

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Εύρωστες Αποφάσεις σε Ενεργειακά Συστήματα Έντονης Αβεβαιότητας

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Γ. ΛΑΖΑΡΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2008

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ
ΣΠΟΥΔΩΝ ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

Εύρωστες Αποφάσεις σε Ενεργειακά Συστήματα Έντονης Αβεβαιότητας

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Γ. ΛΑΖΑΡΟΠΟΥΛΟΣ

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 15η Ιουλίου 2008

.....	.....	.....
Ι. Ψαρράς	Δ. Ασκούνης	Γ. Μέντζας
Καθηγητής ΕΜΠ	Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ	Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2008

.....

Αθανάσιος Γ. Λαζαρόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αθανάσιος Γ. Λαζαρόπουλος, Αθήνα Ιούλιος 2008

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Εξετάζοντας τα κρίσιμα θέματα της ενεργειακής πολιτικής όπως είναι η διασφάλιση του ενεργειακού ανεφοδιασμού, η αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και η ανταγωνιστικότητα του ενεργειακού τομέα αναδεικνύονται ζητήματα έντονης αβεβαιότητας. Η ενεργειακή υποδομή απαιτεί χρόνο για να υλοποιηθεί και το προσδόκιμο ζωής της είναι μερικές δεκαετίες. Οι νέες ενεργειακές τεχνολογίες απαιτούν χρόνο για να αναπτυχθούν και ακόμα περισσότερο χρόνο για να λάβουν μεγάλο μερίδιο αγοράς. Η αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση για πετρέλαιο, αέριο και ηλεκτρική ενέργεια και η ανάγκη για συνεχές και όσο το δυνατόν οικονομικότερο ενεργειακό ανεφοδιασμό αναγκάζουν τις χώρες να σκεφτούν σοβαρά τη μελλοντική τους θέση στην παγκόσμια ενεργειακή και πολιτική «σκακιέρα». Ομοίως, οι αλλαγές στο κλίμα προκαλούμενες από τις αυξανόμενες συγκεντρώσεις αερίων θερμοκηπίου από τις ανθρώπινες δραστηριότητες επιβάλλουν τη λήψη μέτρων από τις χώρες σε συλλογικό επίπεδο. Η ανάλυση που επιδιώκει να αντιμετωπίσει αυτά τα ζητήματα πρέπει να υποστηρίξει μια ομοίως μακροπρόθεσμη λύση με χρονικό ορίζοντα που κυμαίνεται από τριάντα έως πενήντα έτη.

Δυστυχώς, η ανάλυση σε τέτοιους χρονικούς ορίζοντες είναι μια αβέβαιη διαδικασία. Το μέλλον είναι εξ'ορισμού άγνωστο και δεν μπορεί να προβλεφθεί. Ενώ σε χρονικούς ορίζοντες δέκα ετών, η αδράνεια του συστήματος ενέργειας/οικονομίας είναι τόσο ισχυρή ώστε λίγα περιθώρια για αλλαγή υπάρχουν, κατά τη διάρκεια ευρύτερων χρονικών οριζόντων, το μέλλον είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα είναι έντονα διαφοροποιημένο από το παρόν. Οι αποφάσεις για ζητήματα σχετικά με αυτό το μακρινό μέλλον θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν ως προβλήματα αποφάσεων υπό έντονη αβεβαιότητα (decisions problems under severe uncertainty). Οι προβλέψεις και η ανάλυση σεναρίων μπορούν να βοηθήσουν στον εντοπισμό των παραγόντων που μπορούν να έχουν επιπτώσεις στο μέλλον της ενεργειακής οικονομίας. Οι παράγοντες αυτοί μπορεί να είναι οι αβέβαιες μελλοντικές τεχνολογικές εξελίξεις, η οικονομική ανάπτυξη, οι κυβερνητικές πολιτικές και ένας κυκεώνας προσφοράς και ζήτησης (ενεργειακών και άλλων) προϊόντων. Οι παράγοντες αυτοί μπορούν, μακροπρόθεσμα, να αλλάξουν πλήρως τον τρόπο με τον οποίο χρησιμοποιούμε την ενέργεια.

Στόχος αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι λαμβάνοντας τα αποτελέσματα από ένα σύνολο ενεργειακών σεναρίων (μέσω του μοντέλου TIMES που παρουσιάζεται στο Κεφ.2) να προσδιοριστούν εύρωστες στρατηγικές (μέσω της Εύρωστης Λήψης Αποφάσεων που παρουσιάζεται στο Κεφ.3) με τη χρήση της θεωρίας χάσματος πληροφορίας (όπως παρουσιάζεται στο Κεφ.1) λαμβάνοντας υπόψη τις δαπάνες από την κατασκευή ανταγωνιστικών ενεργειακών υποδομών, την ανάπτυξη ενεργειακών διαδρομών, τη σύναψη ενεργειακών/οικονομικών συμφωνιών (και εξαρτήσεων) μεταξύ χωρών και τον περιορισμό της περιβαλλοντικής ζημίας στη χάραξη των μελλοντικών ενεργειακών στρατηγικών βοηθώντας στην προώθηση των καλύτερων μακροπρόθεσμων (και βραχυπρόθεσμων στη συνέχεια) επιλογών στον τομέα της ενέργειας (μια ανασκόπηση, γενικά, των Ευρωπαϊκών υποδομών δίνεται στο Κεφ.4 ενώ μια ανασκόπηση, ειδικά, των Σκανδιναβικών υποδομών δίνεται στο Κεφ.5). Το μοντέλο εφαρμόζεται στο ενεργειακό σύστημα των Σκανδιναβικών χωρών (όπως αυτό παρουσιάζεται στο Κεφ.6) δίνοντας αριθμητικά αποτελέσματα και χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την ακολουθούμενη πολιτική τα οποία παρουσιάζονται στο Κεφ.7. Αναλυτικά τα Κεφάλαια της Μεταπτυχιακής Εργασίας είναι τα παρακάτω.

Στο Κεφ.1 παρουσιάζονται δύο κύριες ιδέες. Κατά πρώτο λόγο, το Κεφάλαιο 1 εστιάζει στην αβεβαιότητα χάσματος πληροφορίας (info-gap uncertainty) διακρίνοντάς την από την έννοια της πιθανότητας (probability). Η θεωρία χάσματος πληροφορίας (info-gap modeling) θεωρείται ως μια από τις καλύτερες λύσεις για τη διαμόρφωση και τη διαχείριση της αβεβαιότητας σε μοντέλα συστημάτων. Κατά δεύτερο λόγο, εξετάζεται η αλληλεξάρτηση μεταξύ της μοντελοποίησης της αβεβαιότητας (uncertainty model) και της λήψης αποφάσεων (decision-making). Η ορθή μοντελοποίηση της αβεβαιότητας απαιτεί την επαφή με τον τελικό χρήστη, δηλαδή με την εφαρμογή λήψης αποφάσεων του μοντέλου αβεβαιότητας. Η σημαντικότερη οδός διάδοσης της αβεβαιότητας είναι από τα δεδομένα εισόδου (initial data) και μέσω της δομής του μοντέλου στην περιοχή απόφασης (decision-domain).

Στο Κεφ.2 παρουσιάζονται τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου TIMES και η παγκόσμια υλοποίησή του ως ETSAP-TIAM. Στο μοντέλο έχουν προστεθεί νέα χαρακτηριστικά και δυνατότητες οι οποίες επεκτείνουν τις λειτουργίες-συναρτήσεις του και τη δυνατότητα εφαρμογής τους στη μελέτη των ενεργειακών συστημάτων και

την ανάλυση της ενέργειας και των πολιτικών για το περιβάλλον. Σε πρώτη φάση, το Κεφ.2 μένει στο εννοιολογικό και πρακτικό επίπεδο. Σε δεύτερη φάση, εμπλέκεται στην πιο λεπτομερή διατύπωση των εξισώσεων του μοντέλου TIMES. Ειδική μνεία επίσης γίνεται στην περιγραφή τεσσάρων προαιρετικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων του μοντέλου TIMES που είναι οι άμορφες επενδύσεις (lumpy investments), η ενδογενής τεχνολογία μάθησης (endogenous technology learning), ο στοχαστικός προγραμματισμός (stochastic programming) και η ενότητα του κλίματος (climate module). Επιπλέον, το Κεφ.2 περιέχει τρία τμήματα, που παρουσιάζουν την απλουστευμένη διατύπωση του γραμμικού προγράμματος (simplified formulation of Linear Program), τις λεπτομέρειες υπολογισμού της ισορροπίας προσφοράς-ζήτησης (supply demand equilibrium) και τη δόμησης της τεχνολογίας ενδογενούς εκμάθησης (Endogenous Technology Learning Formulation).

Στο Κεφ.3 παρουσιάζεται η τυποποιημένη θεωρία απόφασης (standard decision theory) και περιγράφεται η εφαρμογή της σε προβλήματα απόφασης υπό ιδανικούς όρους (decision problems under ideal conditions). Έπειτα, το Κεφ.3 περιγράφει τους τέσσερις κύριους όρους που πρέπει να ισχύουν προκειμένου η τυποποιημένη θεωρία απόφασης να παρέχει αδιαμφισβήτητα αποτελέσματα όσον αφορά την επιλογή πολιτικής. Τέλος, παρουσιάζεται μια νέα αναλυτική μέθοδος για τη λήψη απόφασης υπό έντονη αβεβαιότητα (decision making under deep uncertainty) η οποία καλείται Εύρωστη Λήψη Αποφάσεων (Robust Decision Making) και που μπορεί να βοηθήσει τις μελλοντικές προσπάθειες ενεργειακού προγραμματισμού.

Στο Κεφ.4 παρουσιάζεται το ζήτημα των Ευρωπαϊκών ενεργειακών διαδρόμων (European energy corridors). Η Ευρωπαϊκή Ένωση (EU) εισάγει σήμερα τις μισές από τις ενεργειακές ανάγκες της και προβλέπεται ότι αυτή η ενεργειακή εξάρτηση μπορεί να αυξηθεί σε 70% μέχρι το 2030. Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, απαιτείται τόσο εσωτερική όσο και εξωτερική δράση στα πλαίσια της ΕΕ. Σαν εσωτερική πολιτική της ΕΕ, καλείται η έμφαση στις νέες ενεργειακές τεχνολογίες. Όσον αφορά την εξωτερική πλευρά δράσεων που απασχολεί το Κεφ.4, δίνεται έμφαση στη δημιουργία των ενεργειακών διαδρόμων (ενεργειακών διόδων ή ενεργειακών διαδρομών) μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών. Στο Κεφ.4 γίνεται μια επισκόπηση του Ευρωπαϊκού ενεργειακού προβλήματος και

παρουσιάζεται η υπάρχουσα και μελλοντική κατάσταση σε υποδομές για τους ευρωπαϊκούς ενεργειακούς διαδρόμους.

Στο Κεφ.5 εξετάζεται ένα μοντέλο ενεργειακών συστημάτων (energy system model) το οποίο περιγράφει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας στις Σκανδιναβικές χώρες (Nordic countries). Το μοντέλο εξελίχθηκε χρησιμοποιώντας ως πλατφόρμα και γεννήτρια σεναρίων το μοντέλο TIMES στοχεύοντας να δημιουργήσει ένα απλουστευμένο μοντέλο με μια διαφανή δομή. Το μοντέλο καταδεικνύει τη χρήση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της πρότυπης γεννήτριας σχετικά με το Σκανδιναβικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Αρχικά, παρουσιάζεται η γενική δομή της παραγωγής θερμότητας και ισχύος μεμονωμένα σε κάθε Σκανδιναβική χώρα, η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ τους και η διαμόρφωση της υδροηλεκτρική ενέργεια και της συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ισχύος (σημαντικοί παράγοντες για την παραγωγή ενέργειας στις Σκανδιναβικές χώρες). Τέλος, παρουσιάζονται τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου και οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι.

Στο Κεφ.6 παρουσιάζονται συνολικά εννέα σενάρια τα οποία αναλύθηκαν με το μοντέλο που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της Μεταπτυχιακής εργασίας. Μόνο τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται στο σενάριο με τις υποθέσεις βασικών γραμμών (scenario with base-line assumptions), το αποκαλούμενο και ως σενάριο αναφοράς (reference scenario), περιγράφονται με λεπτομέρεια ενώ τα αποτελέσματα άλλων σεναρίων αντιμετωπίζονται σε ένα γενικότερο επίπεδο. Εκτός από το σενάριο αναφοράς, δύο σύνολα σεναρίων έχουν υπολογιστεί και εξετάζεται σε αυτά η συμπεριφορά του μοντέλου. Το πρώτο σύνολο σεναρίων αποτελείται από τέσσερα σενάρια επικύρωσης (validation scenarios) ενώ το δεύτερο σύνολο το οποίο θα απασχολήσει και περαιτέρω την ανάλυση εξαιτίας των σημαντικών αποτελεσμάτων του χρησιμοποιείται για μια πρακτική ανάλυση του Σκανδιναβικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.

Τέλος, στο Κεφ.7 δίνονται αριθμητικά αποτελέσματα και συμπεράσματα από την εφαρμογή του μοντέλου για διάφορες πολιτικές (policies), συνδυασμούς σεναρίων (portfolio of scenarios), λύπη (regret) και σχετική λύπη (relative regret), ανταγωνιστικές και μη ανταγωνιστικές πολιτικές (competitive and non competitive policies), ευρωστία (robustness), συσωρευτική αύξηση κόστους (cumulative cost increase) και ακρίβεια (accuracy).

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Διπλωματία,. Πολιτική, Ενέργεια, Αβεβαιότητα Χάσματος Πληροφορίας, Μοντελοποίηση Χάσματος Πληροφορίας, Λήψη Αποφάσεων, μοντέλο TIMES, Προβλήματα Απόφασης υπό Ιδανικές Συνθήκες, Προβλήματα Απόφασης υπό Έντονη Αβεβαιότητα, Εύρωστη Λήψη Αποφάσεων, Ενεργειακοί Διάδρομοι, Μοντέλο Ενεργειακών Συστημάτων, Σκανδιναβικές χώρες, Χαρτοφυλάκιο Σεναρίων, Λύπη, Σχετική Λύπη, Ανταγωνιστικές και μη Ανταγωνιστικές Πολιτικές, Συσωρευτική Αύξηση Κόστους, Ευρωστία, Ακρίβεια.

ABSTRACT

Analysing the intersection between energy, diplomacy and political decisions, economic trade and alliances between countries and climate change mitigation issues requires the adoption of a very long-term perspective. Energy infrastructure takes a very long time to build and has a useful life often measured in decades. New energy technologies take time to develop and even longer to reach their maximum market share. Increasing world demand for oil, gas and electricity and the need of an uninterrupted and more economic energy supply force countries to think about their future position in the global energy and political chessboard. Similarly, the impact of increasing concentrations of greenhouse gases from human activities develops over a very long period (from decades to centuries), while policy responses to climate change threats may only yield effects after considerable delay. Analysis that seeks to tackle these issues must take a similarly long term view; say at least thirty to fifty years.

Unfortunately, analysis of such time frames is an uncertain science. The future is by definition unknown and cannot be predicted. While over time horizons of ten years the inertia of the energy/economy system is so strong as to leave little room for change, over longer periods, the future will almost certainly look different than the present. Decisions for issues concerning this far future could be characterized as decisions problems under deep uncertainty. Projections and scenario analysis can help us to understand the factors that might affect the future of the energy economy. These include uncertain future technological developments, economic growth, government policies and a maze of product introductions and consumer responses that can, over the long run, fundamentally change how and why we use energy.

The results from a plethora of energy scenarios can help identify robust strategies to minimize costs of both economic dislocations and environmental damage in the development of future energy paths, in turn, assisting in promoting better policy choices in the energy sector.

Chapter 1 discusses two main ideas. First, Chapter 1 focuses on info-gap uncertainty, as distinct from probability. Info-gap theory is especially suited for modelling and managing uncertainty in system models. Second, we examine the

interdependence between uncertainty modelling and decision-making. Good uncertainty modelling requires contact with the end-use, namely, with the decision-making application of the uncertainty model. The most important avenue of uncertainty propagation is from initial data- and model-uncertainties into uncertainty in the decision-domain.

In Chapter 2, the principal characteristics of the TIMES model and of its global incarnation as ETSAP-TIAM are presented to which several new features were added to extend its functionalities and its applicability to the exploration of energy systems and the analysis of energy and environmental policies. Chapter 2 stresses the technological nature of the model and its economic foundation and properties. First, It stays at the conceptual and practical level. Second, Chapter 2 is devoted to the more detailed formulation of TIMES equations. Special sections are devoted to the description of four optional features of TIMES: lumpy investments, endogenous technology learning, stochastic programming, and the climate module. Furthermore, it contains three sections, presenting the simplified formulation of Linear Program, the details of the computation of the supply demand equilibrium and the Endogenous Technology Learning Formulation.

Chapter 3 first reviews standard decision theory and describes its application to decision problems under ideal conditions. Next, it describes the four main conditions that must hold for standard decision theory to provide unambiguous guidance over the choice of policies. Finally, a new analytic method for decision making under deep uncertainty is presented (called Robust Decision Making) that may help future energy planning efforts.

In Chapter 4 special weight was given to the presentation of European energy corridors. The European Union (EU) imports today half of its energy needs and it is generally recognised that this figure could increase to 70% by 2030. To face these challenges, both EU internal and external action is needed. On the external side (aspect of the problem which is presented in Chapter 4), the “energy corridors” (or energy routes) between the EU and our neighbouring countries are of a crucial importance. Strong and smart energy corridors between EU and neighbouring countries are a key element of our EU energy policy. They contribute to our security of supply, to our competitiveness and to our sustainability. Chapter 4 presents an

abstract of the European energy problem and of the external side energy corridors implementation.

Chapter 5 presents an energy system model describing the electricity and heat generation in the Nordic countries which was developed with the model generator TIMES aiming to create a simplified model with a transparent structure. The model demonstrates the usage of the model generator's features in connection with the Nordic electricity system. At first, Chapter 5 presents the general structure of heat and power production in individual regions, their power exchange and the separately modelling of hydropower and combined heat and power production. Finally, model data and used parameters are presented.

In Chapter 6 altogether nine scenarios were analysed with the developed model. Only the results that are obtained in the scenario with base-line assumptions, a so-called reference scenario, are described with some detail, whereas the results of other scenarios are viewed on a more general level. In addition to the reference scenario, two sets of scenarios have been calculated and the behaviour of the model is examined with. The first one is represented by four validation scenarios. The second is used for rough analysis of the Nordic electricity system.

Finally, in chapter 7 numerical results and conclusions for various policies, combination of scenarios portfolios, regret, relative regret, competitive policies, non competitive policies, cumulative cost increase, robustness, and accuracy are presented.

KEY WORDS: Diplomacy, Policy, Energy, Info-gap Uncertainty, Info-gap Modeling, Decision Making, TIMES model, Decision Problems under Ideal Conditions, Decision Problems under Deep Uncertainty, Robust Decision Making, Energy Corridors, Energy System Model, Nordic countries, Portfolio of Scenarios, Regret, Relative Regret, Competitive and non Competitive Policies, Robustness Cumulative Cost Increase, Accuracy.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΗΡΙΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Ολοκληρώνοντας την εκπόνηση της μεταπτυχιακής μου εργασίας και τις μεταπτυχιακές μου σπουδές στο Διαπανεπιστημιακό Πρόγραμμα Τεχνο-Οικονομικά Συστήματα στη Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, νοιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους εκείνους που υπήρξαν αρωγοί αυτής της προσπάθειας.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα της εργασίας μου Καθηγητή Ε.Μ.Π. και διδάσκοντα του Μεταπτυχιακού μαθήματος "Διαχείριση Ενεργειακών Πόρων" κ. Ιωάννη Ψαρρά για την εμπιστοσύνη στην ανάληψη της μεταπτυχιακής εργασίας και τη συνεργασία του.

Ευχαριστώ θερμά το Διδάκτορα Ε.Μ.Π. και συνδιδάσκοντα του μαθήματος "Διαχείριση Ενεργειακών Πόρων" κ. Αλέξανδρο Φλάμο και τον Υποψήφιο Διδάκτορα ΕΜΠ κ. Σωτήρη Παπαδέλη για την άριστη συνεργασία που είχαμε καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, τις σημαντικές υποδείξεις που μου παρείχαν σε καίρια σημεία της και το χρόνο που διέθεσαν σε αυτή.

Ακόμη, θα ήθελα από τα βάθη της καρδιάς μου να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στην οικογένειά μου, τον πατέρα μου Γεώργιο Λαζαρόπουλο, τη μητέρα μου Αικατερίνη Λαζαροπούλου και τον αδερφό μου Παναγιώτη Λαζαρόπουλο, για τα εχέγγυα που μου προσέφερε για την ολοκλήρωση των σπουδών μου και για την αμέριστη στήριξη και συμπαράσταση σε όλες τις ως τώρα προσπάθειές μου.

Αθήνα, Ιούλιος 2008

Αθανάσιος Γ. Λαζαρόπουλος

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κεφάλαιο 1ο Μοντέλα Χάσματος Πληροφορίας

1.1 Γενικά.....39

1.2 Καθορισμός Αβεβαιότητας κατά τη Μοντελοποίηση Χάσματος Πληροφορίας...41

1.2.1 Αβεβαιότητα στα Μοντέλα Χάσματος Πληροφορίας.....41

1.2.2 Ευρωστία και Ευκαιρία.....48

1.2.3 Απόφαση, Αβεβαιότητα και η Αξία της Πληροφορίας.....52

1.3 Απεικόνιση και Διάδοση της Αβεβαιότητας.....54

1.3.1 Διάδοση Αβεβαιότητας από τα Δεδομένα στην Απόφαση.....55

1.3.2 Αναπαράσταση Αβεβαιότητας με τη χρήση Μοντέλων Χάσματος.....

Πληροφορίας...58

1.4 Επισκόπηση Κεφαλαίου.....60

Κεφάλαιο 2ο Το Μοντέλο TIMES

2.1 Εισαγωγή.....61

2.2 Εισαγωγικά Στοιχεία του Μοντέλου TIMES.....62

2.3 Είσοδοι και Έξοδοι του Μοντέλου TIMES.....64

2.3.1 Σενάριο Εισόδου στο Μοντέλο TIMES.....64

2.3.1.1 Το Συστατικό της Ζήτησης στο Μοντέλο TIMES.....65

2.3.1.2 Το Συστατικό της Προσφοράς στο Μοντέλο TIMES.....66

2.3.1.3 Το Συστατικό της Πολιτικής στο Μοντέλο TIMES.....67

2.3.1.4 Το Συστατικό των Τεχνοοικονμικών στο Μοντέλο TIMES.....67

2.3.2 Σενάριο Εξόδου στο Μοντέλο TIMES.....68

2.4 Η Δομή του Μοντέλου TIMES.....69

2.4.1 Δομή και Δεδομένα του Μοντέλου TIMES.....70

2.4.2 Ο Χρόνος στο Μοντέλο TIMES.....71

2.5 Η Θεώρηση RES.....72

2.6 Επισκόπηση των Ιδιοτήτων του Μοντέλου TIMES (Σύνολα και Παράμετροι)....80

2.6.1 Οι Συσχετισμένες Παράμετροι με τις Διαδικασίες.....81

2.6.2 Οι Συσχετισμένες Παράμετροι με τα Προϊόντα.....82

2.6.3 Οι Συσχετισμένες Παράμετροι με τις Ροές Προϊόντων των.....

Διαδικασιών…83
2.6.4 Οι Συσχετισμένες Παράμετροι με το συνολικό RES…….....84
2.7 Διαχείριση και Εκτέλεση του Μοντέλου TIMES…..…….....84
2.8 Οικονομική Λογική του Μοντέλου TIMES …….....85
2.8.1 Το Παράδειγμα του Μοντέλου TIMES…….....86
2.8.1.1 Η Τεχνολογική Σαφήνεια του Μοντέλου…….....86
2.8.1.2 Το Πολυπεριφερειακό Χαρακτηριστικό του Μοντέλου….....86
2.8.1.3 Ιδιότητες Ισορροπίας……....87
2.8.1.3.1 Γραμμικότητα……..…....87
2.8.1.3.2 Η Μεγιστοποίηση του Πλεονάσματος……..……..…....88
2.8.1.3.3 Ανταγωνιστικές Αγορές Ενέργειας με Τέλεια……
Πρόβλεψη...92
2.8.1.3.4 Οριακή Τιμολόγηση Αξίας…….....93
2.8.1.3.5 Μεγιστοποίηση Κέρδους…….....94
2.9 Τρία Προαιρετικά Χαρακτηριστικά Γνωρίσματα του Μοντέλου TIMES…….....95
2.9.1 Η Άμορφη Επιλογή Επένδυσης…….....95
2.9.1.1 Περιγραφή……....95
2.9.1.2 Διατύπωση και Λύση του Μικτού Γραμμικού Προγράμματος…..
Ακέραιων Αριθμών...96
2.9.1.3 Σημαντική Παρατήρηση στη Δυική Λύση MIP (Τιμές Σκιών.....97
2.9.2 Ενδογενής Τεχνολογική Εκμβάθηση……..……....98
2.9.2.1 Εισαγωγή……....98
2.9.2.2 Η Πρόκληση ETL……..……....99
2.9.2.3 Η Ενδογενής και η Εξωγενής Εκμάθηση……..……....100
2.9.3 Στοχαστικός Προγραμματισμός……..……...101
2.9.3.1 Εισαγωγή……....101
2.9.3.2 Μαθηματική Διατύπωση……....102
2.9.3.3 Κριτήρια Εναλλακτικής Βελτιστοποίησης με Αναμενόμενο……..
Κριτήριο Χρησιμότητας με Αποστροφή Κινδύνου…104
2.9.3.4 Συνάρτηση Χρησιμότητας με τη Γραμμική Αποστροφή…….
Κινδύνου...105
2.10 Η Ενότητα Κλίμα του Μοντέλου TIMES ……..……....105
2.10.1 Συγκεντρώσεις (Συγκέντρωση CO_2)……..……...106

2.10.2 Αλλαγές στην Ατμόσφαιρα……...107
2.10.3 Αύξηση της Θερμοκρασίας……...109
2.11 Βελτιωμένη Περιγραφή του Προγράμματος Βελτιστοποίησης στο μοντέλο……..
TIMES...109
2.11.1 Δείκτες……..……..……...110
2.11.2 Μεταβλητές Απόφασης..……..……...111
2.11.3 Αντικειμενική Συνάρτηση του Μοντέλου TIMES: Συνολικό……
Προεξοφλητικό Κόστος Συστημάτων…114
2.11.4 Περιορισμοί……..……..……...117
2.11.4.1 Μεταφορά Ικανότητας (Συντήρηση των Επενδύσεων)…....117
2.11.4.2 Καθορισμός των Μεταβλητών Δραστηριότητας Διαδικασίας.118
2.11.4.3 Χρήση της Ικανότητας……119
2.11.4.4 Καθορισμός των Μεταβλητών Δραστηριότητας Διαδικασίας.120
2.11.4.5 Καθορισμός των Σχέσεων Ροής σε μια Διαδικασία……122
2.11.4.6 Περιορισμός των Μεριδίων Ροής σε Εύκαμπτες Διαδικασίες.123
2.11.4.7 Περιορισμός Επιφύλαξης Όξυνσης (για Χρονοτεμαχισμένα……
Προϊόντα μόνο)…123
2.11.4.8 Περιορισμοί στα Προϊόντα……...125
2.11.4.9 Περιορισμοί Χρήστη……126
2.11.4.10 Αναπαράσταση Διύλισης Πετρελαίου στο Μοντέλο……...
TIMES...126
2.11.4.10.1 Διύλιση με τον Όγκο (Εκτίμηση Οκτανίου)…….128
2.11.4.10.2 Διύλιση με το Βάρος (Περιεκτικότητα σε Θείο)…...128
2.12 Ελαστική Ζήτηση και Υπολογισμός της Ισορροπίας Προσφοράς-Ζήτησης.....128
2.12.1 Θεωρητικές Εκτιμήσεις και το Θεώρημα της Ισοδυναμίας…..……...130
2.12.2 Τα Μαθηματικά της Ισορροπίας στο Μοντέλο TIMES……....130
2.12.2.1 Ορισμός Συναρτήσεων Ζήτησης……...……...130
2.12.2.2 Διατύπωση της Ισορροπίας στο Μοντέλο TIMES …..……...131
2.12.2.3 Γραμμικοποίηση του Μαθηαμτικού Προγράμματος……....132
2.12.2.4 Βαθμονόμηση των Συναρτήσεων Ζήτησης……..……...134
2.12.2.5 Υπολογιστικές Εκτιμήσεις……..……..……...135
2.12.2.6 Ερμηνεία των Δαπανών, του Πλεονάσματος και των Τιμών στο..
Μοντέλο TIMES…135

2.13 Η Διατύπωση του ETL στο Μοντέλο TIMES.....136
2.13.1 Μαθηματική Διατύπωση.....136
2.13.1.1 Προκαταρκτικές Μαθηματικές Διατυπώσεις.....137
2.13.1.1.1 Υπολογισμός των Κρισίμων Σημείων και των Μηκών... Τμημάτων...139
2.13.1.2 Η Διατύπωση του ETL.....140
2.13.1.2.1 Νέες Μεταβλητές.....140
2.13.1.2.2 Νέοι Περιορισμοί.....141
2.13.1.2.3 Όροι Αντικειμενικής Συνάρτησης.....142
2.13.1.2.4 Επιπρόσθετοι (Προαιρετικοί) Περιορισμοί.....142
2.13.2 Συγκεντρωμένη Εκμάθηση.....143
2.13.3 Εκμάθηση σε ένα Πολυπεριφερειακό Μοντέλο TIMES.....143
2.14 Επισκόπηση Κεφαλαίου.....144

Κεφάλαιο 3^{ο} Μέθοδοι Αναγνώρισης Μακροπρόθεσμης Εύρωστης Στρατηγικής Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων

3.1 Εισαγωγή.....147
3.2 Τυποποιημένη Θεωρία Απόφασης και Περιορισμοί της για Μακροπρόθεσμο..... Προγραμματισμό Ενεργειακών Πόρων...148
3.2.1 Επισκόπηση της Τυποποιημένης Θεωρίας Απόφασης.....149
3.2.2 Προκλήσεις που Εμφανίζονται κατά την Χρήση της Τυποποιημένης..... Θεωρίας Απόφασης στα Μακροπρόθεσμα Πολιτικά Προβλήματα...156
3.2.2.1 Ελλιπής Γνώση των Εφικτών Πολιτικών.....156
3.2.2.2 Κακώς Χαρακτηρισμένη Αβεβαιότητα.....157
3.2.2.3 Αξιόπιστα Μοντέλα Πολιτικής.....162
3.2.2.4 Πολλαπλές Προτιμήσεις Εκβάσεων.....163
3.2.3 Μακροπρόθεσμος Προγραμματισμός Ενεργειακών Πόρων με τις Νέες..... Προσεγγίσεις...163
3.3 Η Νέα Αναλυτική Μέθοδος για τον Προσδιορισμό των Εύρωστων Πολιτικών.165
3.3.1 Η Εύρωστη Λήψη Απόφασης.....166
3.3.1.1 Διερευνητική Ανάλυση.....169
3.3.1.1.1 Γεννήτριες Σεναρίων.....170
3.3.1.1.2 Σύνολα Μελλοντικών Γεγονότων.....173

3.3.1.2 Εύρωστες Πολιτικές…….....…...175
3.3.1.2.1 Κριτήριο Ευρωστίας……..…175
3.3.1.2.2 Λύπη και Απόλυτη Απόδοση…….....….177
3.3.1.2.3 Στρατηγική Κατάταξης……..……..….178
3.3.1.3 Προσδιορισμός των Σεναρίων που Τονίζουν τις Πολιτικές…...180
3.3.1.3.1 Χαρακτηρισμός Ευπάθειας..……..……..….180
3.3.1.3.2 Υπομονετική Μέθοδος Επαγωγικού Κανόνα....…..….183
3.3.1.4 Αναπτύσσοντας το Σύνολο Πολιτικής με Φραγές.....…...187
3.3.1.5 Παραμένουσες Αβεβαιότητες στους Υπεύθυνους για τη Λήψη.....
Αποφάσεων…189
3.3.2 Βασικά Βήματα για την Εύρωστη Λύψη Απόφασης.....190
3.3.2.1 Δημιουργία Συνόλου Μελλοντικών Γεγονότων.....190
3.3.2.2 Επιλογή Υποψήφιας Εύρωστης Πολιτικής.....190
3.3.2.3 Προσδιορισμός των Βασικών Σεναρίων Εστιάζοντας στην.....
Υποψήφια Πολιτική...191
3.3.2.4 Επέκταση της Πολιτικής μέσω των Φραγών και της.……
Επανάληψης…191
3.4 Επισκόπηση Κεφαλαίου.....……....……..191

Κεφάλαιο 4^{ο} Ενεργειακοί Διάδρομοι

4.1 Γενικά.....193
4.1.1 Ανάγκη για Διαδρόμους Φυσικού Αερίου.....195
4.1.2 Ανάγκη για Διαδρόμους Ηλεκτρικής Ενέργειας.....199
4.1.2.1 Ανάγκη Νέας Διασυνοριακής Ικανότητας μεταξύ της Τουρκίας....
και της Νοτιοανατολικής Ευρώπης...201
4.1.2.2 Α Ανάγκη Νέας Ικανότητας Διασύνδεσης μεταξύ της Βόρειας.....
Αφρικής και της Νότιας Ευρώπης...201
4.1.2.3 Προσδοκία Αμφίδρομου Εμπορίου Ηλεκτρικής Ενέργειας στα.....
Σύνορα με την Ανατολική Ευρώπη...202
4.1.3 Ανάγκη για Διαδρόμους Υδρογόνου.....203
4.1.4 Υπόβαθρο της Μελέτης.....206
4.1.5 Στόχοι, Προσέγγιση και Δομή του Προγράμματος ENCOURAGED....208
4.2 Αξιολόγηση των Διαδρόμων Φυσικού Αερίου.....210

4.2.1 Μακροπρόθεσμη Ζήτηση, Εισαγωγή Φυσικού Αερίου και Ανάπτυξη..... Ανεφοδιασμού...211
4.2.2 Αναμενόμενη Ανάπτυξη των Διαδρόμων Αερίου στην ΕΕ.....215
4.2.3 Εμπόδια στις Επενδύσεις.....219
4.2.4 Συστάσεις για τη Βελτίωση των Όρων Επένδυσης.....221
4.2.4.1 Μετριασμός Κινδύνου Αγοράς.....221
4.2.4.2 Μετριασμός Ρυθμιστικού Κινδύνου.....223
4.2.4.3 Μετριασμός του Διεθνούς Πολιτικού Κινδύνου.....223
4.3 Αξιολόγηση των Διαδρόμων Ηλεκτρικής Ενέργειας.....224
4.3.1 Εισαγωγή και Μεθοδολογία.....224
4.3.2 Ζήτηση Ηλεκτρικής Ενέργειας και Άλλες Κύριες Υποθέσεις.....226
4.3.3 Βέλτιστη Ανάπτυξη των Διαδρομών Ηλεκτρικής Ενέργειας μεταξύ της..... ΕΕ και των Γειτονικών Χωρών...229
4.3.3.1 Ανταλλαγές.....229
4.3.3.2 Ικανότητες Μεταφοράς.....231
4.3.3.3 Επενδύσεις.....232
4.3.4 Εμπόδια και Συστάσεις για την Εφαρμογή των Διαδρόμων.....233
4.4 Αξιολόγηση των Διαδρόμων Υδρογόνου.....235
4.4.1 Εισαγωγή και Μεθοδολογία.....235
4.4.2 Πιθανή Ζήτηση για Υδρογόνο στην ΕΕ.....236
4.4.3 Πιθανές Πηγές Υδρογόνου έξω από την ΕΕ.....238
4.4.4 Προσδιορισμός της Δυνατότητας Πραγματοποίησης του Ανεφοδιασμού... Υδρογόνου σε Μεγάλες Αποστάσεις...240
4.5 Συμπεράσματα.....243
4.5.1 Διάδρομοι Αερίου.....245
4.5.2 Διάδρομοι Ηλεκτρικής Ενέργειας.....246
4.5.3 Διάδρομοι Υδρογόνου.....247
4.5.4 Τελικές Παρατηρήσεις.....247
4.6 Επισκόπηση Κεφαλαίου.....248

Κεφάλαιο 5ο Μοντελοποίηση του Ενεργειακού Συστήματος των Σκανδιναβικών Χωρών

5.1 Εισαγωγή.....251

5.2 Επισκόπηση του Μοντέλου.....252
5.3 Μοντελοποίηση Υδρενέργειας.....258
5.4 Μοντελοποίηση της Συνδυασμένης Θέρμανσης και Παραγωγή Ισχύος.....262
5.5 Δεδομένα Μοντέλου.....268
5.6 Επισκόπηση Κεφαλαίου.....278

Κεφάλαιο 6^{o} Σενάρια

6.1 Εισαγωγή.....279
6.2 Σενάριο Αναφοράς.....280
6.2.1 Κατανάλωση Πρωτογενούς Ενέργειας.....281
6.2.2 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας.....283
6.2.3 Εμπόριο Ηλεκτρισμού.....289
6.2.4 Παραγωγή Υδρενέργειας.....291
6.2.5 Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου.....296
6.3 Σενάρια Επικύρωσης.....298
6.4 Σενάρια Ανάλυσης.....303
6.5 Επισκόπηση Κεφαλαίου.....310

Κεφάλαιο 7^{o} Αριθμητικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

7.1 Εισαγωγή.....313
7.2 Περιληπτικά το Θεωρητικό Υπόβαθρο του Λογισμικού Εφαρμογής.....314
7.2.1 Το Σενάριο του Λογισμικού Εφαρμογής.....314
7.2.2 Γενικά περί Μοντέλων Χάσματος Πληροφορίας.....315
7.2.3 Υποθέσεις Εργασίας.....317
7.2.3.1 Υποθέσεις Χάραξης Ενεργειακής Πολιτικής.....317
7.2.3.2 Υποθέσεις Μοντέλου Χάσματος Πληροφορίας.....318
7.2.4 Η Μαθηματική Μοντελοποίηση των Μοντέλων Χάσματος Πληροφορίας..
στο Λογισμικό Εφαρμογής...319
7.3 Αλγόριθμος Λογισμικού Εφαρμογής.....322
7.3.1 Υπολογισμός της Συνάρτησης Ευρωστίας με Δεδομένο Κατώφλι.....
Κόστους...324
7.3.2 Υπολογισμός της Συνάρτησης Κατωφλίου Κόστους με Δεδομένη.....
Ευρωστία...100

7.4 Αριθμητικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα.....325
7.4.1 Συνάρτησης Κατωφλίου Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους με Δεδομένη...
Ευρωστία...325
7.4.1.1 Πολιτική-Σενάριο και Αβεβαιότητα.....325
7.4.1.2 Πολιτική Δύο Σεναρίων και Αβεβαιότητα.....327
7.4.1.3 Πολιτική Τριών Σεναρίων και Αβεβαιότητα.....334
7.4.1.4 Πολιτική Τεσσάρων Σεναρίων και Αβεβαιότητα.....336
7.4.1.5 Πολιτική Περισσοτέρων Σεναρίων και Αβεβαιότητα.....340
7.4.1.6 Πολιτική Σεναρίων, Αβεβαιότητα και Επιτόκιο.....
Προεξόφλησης...340
7.4.2 Συνάρτηση Λύπης, Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους και.....
Ευρωστία...344
7.4.2.1 Πολιτική-Σεναρίου και Λύπη Συσωρευτικής Αύξησης.....
Κόστους...345
7.4.2.2 Πολιτική Δύο Σεναρίων και Λύπη Συσωρευτικής Αύξησης.....
Κόστους...348
7.4.2.3 Πολιτική Τριών Σεναρίων και Λύπη Συσωρευτικής Αύξησης.....
Κόστους...351
7.4.2.4 Πολιτική Τεσσάρων Σεναρίων και Λύπη Συσωρευτικής Αύξησης.
Κόστους...353
7.4.3 Μελέτη Ανταγωνιστικών Πολιτικών με τη Χρήση της Συνάρτησης Λύπης
Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους...355
7.4.4 Μελέτη Μη Ανταγωνιστικών Πολιτικών με τη Χρήση της Συνάρτησης.....
Λύπης Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους...366
7.4.5 Συνάρτησης Ευρωστίας με Δεδομένο Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης...
Κόστους...372
7.4.5.1 Γενικά.....372
7.4.5.2 Πολιτική-Σενάριο και Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης.....
Κόστους...373
7.4.5.3 Πολιτική Δύο Σεναρίων και Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης.....
Κόστους...375
7.4.5.4 Πολιτική Τριών Σεναρίων και Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης..
Κόστους...377

7.4.5.5 Πολιτική Τεσσάρων Σεναρίων και Κατώφλι Συσωρευτικής.....
Αύξησης Κόστους...379
7.5 Συμπεράσματα, Επισκόπηση Κεφαλαίου και Μελλοντική Επέκταση.....381

Παράρτημα Α Εφαρμόζοντας την Στρατηγική Εύρωστης Λήψης Απόφασης

Α.1 Στρατηγική Εύρωστης Λήψης Απόφασης.....383
Α.1.1 Λήψη Απόφασης υπό Καθεστώς Έντονης Αβεβαιότητας.....384
Α.1.2 Συμπληρωματικές Ικανότητες Ανθρώπων και Υπολογιστών.....384
Α.1.3 Κατασκευάζοντας μια Νέα Προσέγγιση.....386
Α.1.4 Τέσσερα Βασικά Στοιχεία για μια Εύρωστη Προσέγγιση Απόφασης...388
Α.1.4.1 Θεώρηση Συνόλων Σεναρίων.....390
Α.1.4.2 Λογισμικό Συνόλων Σεναρίων.....392
Α.1.4.2.1 Λογισμικό Διερευνητικής Διαμόρφωσης και το.....
Πρόβλημα των Πολλαπλών Μελλοντικών Εκβάσεων ...393
Α.1.4.2.2 Λογισμικό Γέννησης Σεναρίων και Δημιουργία Συνόλου.
Πληθυσμού...394
Α.1.4.2.3 Σύνολα Σεναρίων και Πληροφορία για Μακροπρόθεσμες
Μελλοντικές Εκβάσεις...395
Α.1.4.3 Αναζήτηση Εύρωστων Στρατηγικών.....396
Α.1.4.3.1 Πλεονεκτήματα Εύρωστων Κριτηρίων.....397
Α.1.4.3.2 Υλοποιώντας το Κριτήριο Ευρωστίας.....398
Α.1.4.4 Υιοθέτηση Προσαρμοστικών Στρατηγικών.....401
Α.1.4.5 Αμφίδρομος Συνδυασμός των Ικανοτήτων των Μηχανών και των
Ανθρώπων...405
Α.1.4.5.1 Συλλογή Πληροφοριών.....406
Α.1.4.5.2 Δημιουργία Υποθέσεων για τις Εύρωστες.....
Στρατηγικές...408
Α.1.4.5.3 Αξιολόγηση Υποθέσεων.....409

Παράρτημα Β Ηλεκτρική Προσφορά στις Σκανδιναβικές Χώρες

Β.1 Εισαγωγή.....411
Β.1.1 Σουηδία.....412
Β.1.2 Νορβηγία.....419

Β.1.3 Φινλανδία.....424
Β.1.4 Δανία.....428
Β.2 Υποχρεώσεις Μείωσης Αερίων Θερμοκηπίου.....431

Παράρτημα Γ Πακέτο Προγραμμάτων

Γ.1 Εισαγωγή.....435
Γ.2 Πακέτο Προγραμμάτων.....436
Γ.2.1 Πρόγραμμα της Συνάρτησης Ευρωστίας με Δεδομένο Κατώφλι.....
Κόστους...436
Γ.2.2 Πρόγραμμα της Συνάρτησης κατωφλίου Κόστους με Δεδομένη.....
Ευρωστία...442
Γ.2.3 Πρόγραμμα Υπολογισμού Λύπης (Κόστους) με Δεδομένη.....
Ευρωστία...447
Γ.2.4 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης για τον Αλγόριθμο Εισόδου.....449

Βιβλιογραφία.....451

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Κεφάλαιο 1ο Μοντέλα Χάσματος Πληροφορίας

Σχήμα 1.1. Σχηματική αναπαράσταση δύο καμπυλών ευρωστίας και μιας καμπύλης.... ευκαιρίας...47

Κεφάλαιο 2ο Το Μοντέλο TIMES

Σχήμα 2.1. Μερική άποψη ενός απλού ενεργειακού συστήματος αναφοράς (όλα τα..... τόξα είναι προσανατολισμένα από αριστερά στα δεξιά)...74
Σχήμα 2.2. Σκίτσο του RES του μοντέλου TIAM…….....…….…….....76
Σχήμα 2.3. Ισορροπία στην περίπτωση ενεργειακής μορφής όταν το μοντέλο..... ενδογενώς κατασκευάζει τόσο την καμπύλη προσφοράς όσο και την καμπύλη ζήτησης...89
Σχήμα 2.4. Ισορροπία στην περίπτωση ενεργειακής υπηρεσίας όπου ο χρήστης ρητά... παρέχει την καμπύλη ζήτησης...91
Σχήμα 2.5. Παράδειγμα δέντρου γεγονότος.....102
Σχήμα 2.6. Βηματική προσέγγιση των μη γραμμικών όρων της αντικειμενικής..... συνάρτησης...133
Σχήμα 2.7. Παράδειγμα συσωρευτική καμπύλης μάθησης.....137
Σχήμα 2.8. Παράδειγμα προσέγγισης 4 τμημάτων της συσωρευτικής καμπύλης..... δαπανών...138
Σχήμα 2.9. Το *i* τμήμα της βαθμωτής προσέγγισης.....141

Κεφάλαιο 3ο Μέθοδοι Αναγνώρισης Μακροπρόθεσμης Εύρωστης Στρατηγικής Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων

Σχήμα 3.1. Μήτρα έκβασης για κάθε πολιτική και κατάσταση. Οι γραμμές..... περιγράφουν την υπό εξέταση πολιτική. Οι στήλες περιγράφουν κάθε πιθανή κατάσταση στηνοποία εφαρμόζεται η πολιτική. Τα εσωτερικά στοιχεία αντιστοιχούν στις εκβάσεις για κάθε ζευγάρι πολιτικής και κατάστασης.....154
Σχήμα 3.2. Η μήτρα των χρησιμοτήτων που αντιστοιχούν στις εκβάσεις που..... παρουσιάζονται στο Σχήμα 1. Η άνω γραμμή καθορίζει κάθε κατάσταση, που

καθορίζεται από εξωγενείς παράγοντες (εκείνοι που δεν υπόκεινται στον έλεγχο των φορέων χάραξης πολιτικής). Η δεύτερη σειρά δείχνει την αντικειμενική ή υποκειμενική αξιολόγηση της πιθανότητας κάθε κατάστασης. Η αριστερή στήλη δείχνει την υπό εξέταση πολιτική για κάθε σειρά. Το εσωτερικό της μήτρας απεικονίζει τη χρησιμότητα των εκβάσεων που αντιστοιχούν σε κάθε πολιτική ενεργώντας σε κάθε κατάσταση. Η δεξιά στήλη αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη χρησιμότητα για κάθε πολιτική...155

Σχήμα 3.3. Σχηματική αναπαράσταση τριών διαστάσεων που καθορίζουν ένα..... πολιτικό πρόβλημα. Τα προβλήματα κοντά στην αρχή των αξόνων ταιριάζουν καλά στα συμβατικά εργαλεία απόφασης, και τα προβλήματα μακριά από την αρχή των αξόνων απαιτούν εναλλακτικές μεθόδους...164

Σχήμα 3.4. Εννοιολογική αντιπροσώπευση των σχέσεων της πολυπλοκότητας ενός..... μοντέλου και της ακρίβειας πρόβλεψής του (αριστερά) και της ερμηνευσιμότητας (δεξιά)...172

Σχήμα 3.5. Μελλοντικό σύνολο που αντιστοιχεί σε κάθε ζευγάρι πολιτικών και..... καταστάσεων...174

Σχήμα 3.6. Μήτρα σεναρίου με τα κριτήρια πολιτικής αξιολόγησης.....176

Σχήμα 3.7. Γραφική παράσταση του z (αριθμοί στο εσωτερικό της γραφικής..... παράστασης) σε σχέση με τα a και b και τους διαφορετικούς χαρακτηρισμούς των υψηλών περιοχών αξίας. Η τριγωνική περιοχή χαρακτηρίζει βέλτιστα τις περιοχές όπου z>5. Οι τετραγωνικές περιοχές είναι υποβέλτιστοι χαρακτηρισμοί που θα είχε προσδιορίσει ο PRIM....187

Σχήμα 3.8. Βασικά βήματα για την Εύρωστη Λήψη Απόφασης.....190

Κεφάλαιο 4^{ο} Ενεργειακοί Διάδρομοι

Σχήμα 4.1. Σύγκριση του υδρογόνου με τις συμβατικές δαπάνες ανεφοδιασμού..... καυσίμων στις αγορές της ΕΕ το 2040...204

Σχήμα 4.2. Ανάγκες εισαγωγής φυσικού αερίου για Ευρωπαϊκή Ένωση, Ελβετία και... Βαλκανικές χώρες σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, σενάρια DG TREN...212

Σχήμα 4.3. Δυνατότητα εξαγωγής αερίου των κύριων παραγωγών προς την..... Ευρωπαϊκή Ένωση, την Ελβετία και τις Βαλκανικές χώρες...213

Σχήμα 4.4. Ρωσική εξαγωγή αερίου. Υποδομή και προγράμματα διέλευσης.....215

Σχήμα 4.5. Απαιτήσεις επένδυσης στις υποδομές αερίου (Ευρωπαϊκή Ένωση, Ελβετία

Βαλκανικές χώρες και Τουρκία) για το σενάριο αναφοράς...217
Σχήμα 4.6. Τρέχουσες και μελλοντικές εξελίξεις διαδρόμων αερίου στην Ευρώπη.218
Σχήμα 4.7. Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας το 2030 και ποσοστό αύξησης την περίοδο.
2005-2030 σε κάθε περιοχή του συστήματος...228
Σχήμα 4.8. Σύνθεση των ανταλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας (όγκοι, κατευθύνσεις και.
ποσοστό χρησιμοποίησης το 2030, σενάριο αναφοράς)....230
Σχήμα 4.9. Μακροπρόθεσμος προβλέψεις ζήτησης για υδρογόνο, φυσικό αέριο και.....
ηλεκτρική ενέργεια για ΕΕ25...237
Σχήμα 4.10. Επιλεγμένα κέντρα παραγωγής υδρογόνου.....239
Σχήμα 4.11. Ζήτηση υδρογόνου σύμφωνα με τα σενάρια HyWays και μέγιστη.....
δυνατότητα εισαγωγών το 2040 για 12 επιλεγμένους διαδρόμους υδρογόνου...240
Σχήμα 4.12. Σύγκριση του κόστους παραγωγής υδρογόνου και του κόστους μεγάλης..
απόστασης μεταφοράς από τις επιλεγμένες γειτονικές χώρες με την Ευρώπη με την
ευρωπαϊκή παραγωγή υδρογόνου από τις εσωτερικές πηγές με χρονική προοπτική
μέχρι το 2040...241

Κεφάλαιο 5^{ο} Μοντελοποίηση του Ενεργειακού Συστήματος των Σκανδιναβικών Χωρών

Σχήμα 5.1. Η δομή του Φινλανδικής υπομονάδας.....253
Σχήμα 5.2. Η δομή των μοντελοποιημένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στη.....
Σουηδία, τη Νορβηγία και τη Δανία. Η Δανέζικη υπομονάδα δεν περιλαμβάνει την
υδρενέργεια ενώ στη Νορβηγική υπομονάδα ο ατμός και η θέρμανση έχουν
συνδυαστεί σε ένα προϊόντα...255
Σχήμα 5.3. Το εμπόριο της ηλεκτρικής ενέργειας στο μοντέλο. Τα άσπρα βέλη με την
ικανότητα μεταφοράς παριστάνουν το διαμορφωμένο εσωτερικό εμπόριο, ενώ
τα μαύρα βέλη παριστάνουν το εξωγενώς δεδομένο εμπόριο με τις εξωτερικές
περιοχές...256
Σχήμα 5.4. Κάθε περίοδος αποτελείται στο χαμηλότερο επίπεδο της από οκτώ.....
χρονοσχισμές, οι οποίες απεικονίζονται σε διαδοχική διάταξη...257
Σχήμα 5.5. Ο ορίζοντας του μοντέλου.....258
Σχήμα 5.6. Η υδρενέργεια μπορεί να περιγραφεί με τρεις διαδικασίες που είναι η.....
εποχιακή αποθήκευση, η ημερήσια αποθήκευση και ο στρόβιλος...259
Σχήμα 5.7. Ο σχετικός ρυθμός εισροής σε κάθε εποχή.....262

Σχήμα 5.8. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης με τους στροβίλους..... εξαγωγής συμπύκνωσης. Η σκιασμένη περιοχή απεικονίζει τους συνδυασμούς ταυτόχρονης παραγωγής θέρμανσης και ισχύος...263

Σχήμα 5.9. Υποθέσεις για τις δαπάνες επένδυσης των εγκαταστάσεων παραγωγής..... αιολικής ενέργειας στη Δανία και τις άλλες Σκανδιναβικές χώρες...271

Σχήμα 5.10. Προβλέψεις για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προβλέψεις... δεν περιλαμβάνουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή της θέρμανσης περιοχής, η οποία είναι σημαντική στη Σουηδία...272

Σχήμα 5.11. Υποτιθέμενη ανάπτυξη των τιμών ενέργειας σε κάθε περιοχή του..... μοντέλου...276

Κεφάλαιο 6^{ο} Σενάρια

Σχήμα 6.1. Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε σχηματική αναπαράσταση τριών. διαστάσεων...281

Σχήμα 6.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2005, το 2010, το 2015, το 2020 και... το 2025 για κάθε περιοχή του μοντέλου....284

Σχήμα 6.3. Ανεφοδιασμός ηλεκτρικής ενέργειας στη Φινλανδική υπομονάδα από τις.. τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων στην παραγωγής τόσο των μονάδων παραγωγής θερμότητας περιοχής όσο και αυτών που παράγουν διαδικασίες ατμού όπως επίσης και τις καθαρές εισαγωγές...286

Σχήμα 6.4. Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στη θερμότητα περιοχής και..... παραγωγή διαδικασίας ατμού μεταξύ 2005 και 2025. Στη Σουηδία, τη Νορβηγία και τη Δανία η παραγωγή διαδικασίας ατμού περιλαμβάνει μόνο τις μονάδες CHP....288

Σχήμα 6.5. Εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας (θετικές τιμές) και εισαγωγές (αρνητικές.. τιμές) σε TWh/ έτος από τη Νορβηγία και τη Σουηδία στις άλλες περιοχές του μοντέλου...289

Σχήμα 6.6. Εποχιακή παραγωγή υδρενέργειας στη Νορβηγία, τη Σουηδία και τη..... Φινλανδία με κανονική εισροή...292

Σχήμα 6.7. Εποχιακή παραγωγή υδρενέργειας στη Σουηδική υπομονάδα με την..... υψηλή, κανονική και χαμηλή εισροή...293

Σχήμα 6.8. Περιεχόμενο δεξαμενών στην αρχή κάθε εποχής με κανονική εισροή. Το... μέγιστο αναφέρεται στο ανώτερο όριο ικανότητας δεξαμενών...294

Σχήμα 6.9. Η παραγωγή υδρενέργειας κατά τη διάρκεια του φορτίου ημέρας και.....

νύχτας στην περίπτωση της κανονικής ανώτατης/ελάχιστης παραγωγής εισροής αντιπροσωπεύει το σύνολο ορίων παραγωγής από την ημερήσια αποθήκευση...295

Σχήμα 6.10. Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου το 2005, το 2010, το 2015, το 2020..... και το 2025. Τα αποτελέσματα δίνονται σε ισοδύναμα Mtτ διοξειδίου του άνθρακα όταν οι εκπομπές CH4 και N2O πολλαπλασιάζονται με τους παράγοντες βάρους 21 και 310...297

Σχήμα 6.11. Η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας των περιοχών του..... μοντέλου στα σενάρια αναφοράς και σενάρια επικύρωσης για τις περιόδους 2005, 2010, 2015, 2020 και 2025...298

Σχήμα 6.12. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ 2005 και 2025..... συμπεριλαμβανομένων όλων των περιοχών του μοντέλου…299

Σχήμα 6.13. Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου μεταξύ 2005 και 2025 σε ισχοδύναμα Mt CO2 για τα σενάρια αναφοράς και τα σενάρια επικύρωσης...302

Σχήμα 6.14. Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στα σενάρια αναφοράς και σενάρια ανάλυσης μεταξύ 2005 και 2025...304

Σχήμα 6.15. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα σενάρια αναφοράς και σενάρια..... ανάλυσης μεταξύ 2005 και 2025...304

Σχήμα 6.16. Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου μεταξύ 2005 και 2025 στο ισοδύναμο Mt CO2 για τα σενάρια αναφοράς και τα σενάρια ανάλυσης...307

Σχήμα 6.17. Η πραγματική αύξηση του συνολικού κόστους σε σύγκριση με το..... σενάριο αναφοράς. Οι τιμές αντιπροσωπεύουν τις συνολικές δαπάνες των πενταετών περιόδων 2005, 2010, 2015, 2020 και 2025...309

Κεφάλαιο 7^{ο} Αριθμητικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Σχήμα 7.1. Ο αλγόριθμος του προγράμματος για την εύρεση της ευρωστίας με..... δεδομένο κατώφλι κόστους...323

Σχήμα 7.2. Ο αλγόριθμος του προγράμματος για την εύρεση του κατωφλίου κόστους. με δεδομένη την ευρωστία...324

Σχήμα 7.3. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.... πολιτική ταυτισμένη με ένα από τα σενάρια (πολιτική-σενάριο)...326

Σχήμα 7.4. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.... διάφορες πολιτικές με εστίαση στην πολιτική δύο σεναρίων (κανένα από τα δύο..... σενάρια της πολιτικής δεν είναι το GhgLim)...328

Σχήμα 7.5. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.... διάφορες πολιτικές με εστίαση στην πολιτική δύο σεναρίων (ένα από τα δύο σενάρια είναι το GhgLim)...329

Σχήμα 7.6. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.... όλες τις πιθανές δυνατές πολιτικές δύο σεναρίων με συμμετοχή 50%-50%...331

Σχήμα 7.7. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.... ποσοστά συμμετοχής σεναρίων σε πολιτικές όταν δεν περιλαμβάνεται το σενάριο GhgLim...332

Σχήμα 7.8. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.... ποσοστά συμμετοχής σεναρίων σε πολιτικές όταν περιλαμβάνεται το σενάριο GhgLim...333

Σχήμα 7.9. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.... ποσοστά συμμετοχής σεναρίων σε πολιτικές τριών σεναρίων...335

Σχήμα 7.10. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.. την απλούστερη περίπτωση πολιτικής τεσσάρων σεναρίων...336

Σχήμα 7.11. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.. δυνατές πιθανές περιπτώσεις πολιτικών τεσσάρων σεναρίων...337

Σχήμα 7.12. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.. διάφορες τιμές βήματος για την ευρωστία…339

Σχήμα 7.13. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.. διάφορες τιμές επιτοκίου προεξόφλησης...341

Σχήμα 7.14. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για.. διάφορες τιμές επιτοκίου προεξόφλησης για επιλεγμένες πολιτικές σεναρίων...343

Σχήμα 7.15. Σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία. και το επιτόκιο προεξόφλησης για τις πολιτικές-σεναρίου...346

Σχήμα 7.16. Σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία. και το επιτόκιο προεξόφλησης για επιλεγμένες πολιτικές δύο σεναρίων...349

Σχήμα 7.17. Σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία. και το επιτόκιο προεξόφλησης για επιλεγμένες πολιτικές τριών σεναρίων...352

Σχήμα 7.18. Σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία. και το επιτόκιο προεξόφλησης για επιλεγμένες πολιτικές τεσσάρων σεναρίων...354

Σχήμα 7.19α. Ανάλυση πολιτικής NoExhg (50%) + NorGas (50%) και πολιτικής..... NoExhg (70%) + NorGas (30%) (ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη

συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης...357

Σχήμα 7.19β. Ανάλυση της διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους τις πολιτικής... NoExhg (70%) + NorGas (30%) από την πολιτική NoExhg (50%) + NorGas (50%) (ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης...358

Σχήμα 7.20α. Ανάλυση πολιτικής NoExhg (20%) + NorGas (50%) + SwePO (40%) + GhgLim (10%) και πολιτικής NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%) (ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης...360

Σχήμα 7.20β. Ανάλυση τις διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους της πολιτικής... NoExhg (20%) + NorGas (50%) + SwePO (40%) + GhgLim (10%) από την πολιτική NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%) (ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης…361

Σχήμα 7.21α. Ανάλυση πολιτικής NoExhg (50%) + NorGas (50%) και πολιτικής..... NoExhg (10%) + NorGas (90%) (μη ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης...367

Σχήμα 7.21β. Ανάλυση της διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους τις πολιτικής... NoExhg (50%) + NorGas (50%) από την πολιτική NoExhg (10%) + NorGas (90%) (μη ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης...368

Σχήμα 7.22α. Ανάλυση πολιτικής NoExhg (10%) + NorGas (20%) + SwePO (30%) + GhgLim (40%) και πολιτικής NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%) (μη ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική

αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης…370

Σχήμα 7.22β. Ανάλυση της διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους τις πολιτικής... NoExhg (10%) + NorGas (20%) + SwePO (30%) + GhgLim (40%) και πολιτικής NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%) (μη ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης...371

Σχήμα 7.23. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για.... πολιτική ταυτισμένη με ένα από τα σενάρια (πολιτική-σενάριο)...374

Σχήμα 7.24. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για.... πολιτικές δύο σεναρίων με συμμετοχή 50%-50%...376

Σχήμα 7.25. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για.... πολιτικές δύο σεναρίων όπου μεταβάλλεται το ποσοστό συμμετοχής τους.…377

Σχήμα 7.26. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για.... ποσοστά συμμετοχής σεναρίων σε πολιτικές τριών σεναρίων...378

Σχήμα 7.27. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για.... την απλούστερη περίπτωση πολιτικής τεσσάρων σεναρίων...379

Σχήμα 7.28. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για.... δυνατές πιθανές περιπτώσεις πολιτικών τεσσάρων σεναρίων...380

Παράρτημα Α Εφαρμόζοντας την Στρατηγική Εύρωστης Λήψης Απόφασης

Σχήμα Α.1. Ολοκλήρωση υπολογιστών και ανθρώπων σε LTPA.....407

Παράρτημα Β Ηλεκτρική Προσφορά στις Σκανδιναβικές Χώρες

Σχήμα Β.1. α) Ηλεκτρική παραγωγή της Σουηδίας το 1998 (συνολικά 154TWh)..... β) Τελική χρήση ενέργειας στη Σουηδία το 1998...414

Σχήμα 2. Η αύξηση στην ετήσια παραγωγική ικανότητα υδρενέργειας τις τελευταίες... δεκαετίες (TWh)...420

Σχήμα Β.3. Το περιεχόμενο των δεξαμενών στη Νορβηγία όπου ο y άξονας..... παρουσιάζει το ποσοστό της μέγιστης ικανότητας (81.7TWh), ο x άξονας παρουσιάζει τις εβδομάδες ενός έτους ελάχιστου, min, max και μέσος είναι οι τιμές

για την περίοδο 1991-1999...421

Σχήμα Β.4. Η ηλεκτρική παραγωγή και κατανάλωση στη Νορβηγία από το 1985 έως το.

1999...422

Σχήμα Β.5. α) Το μερίδιο των ενεργειακών μεταφορέων και της εισαγωγής στο.....

Φινλανδικό εφοδιασμό ηλεκτρικής ενέργειας το 1998 (σύνολο 77TWh)

β) Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 1998...424

Σχήμα Β.6. Η συνολική τελική ενεργειακή χρήση στη Φινλανδία (σύνολο.....

295TWh)...426

Σχήμα Β.7. Κατανάλωση καυσίμων στην ηλεκτρική παραγωγή της Δανίας.....

Οι εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνουν την παραγωγή τη δεκαετία του '90...429

Παράρτημα Γ Πακέτο Προγραμμάτων

Σχήμα Γ.1. Η διεπαφή του προγράμματος της συνάρτησης ευρωστίας με δεδομένο.....

κατώφλι...437

Σχήμα Γ.2. Η συνάρτηση $SynoloEisodon(Epitokio, q, alpha, akriveia)$.....438

Σχήμα Γ.3. Η συνάρτηση $Ypo\log ismosKostousSynolou(Epitokio, U)$.....

Κόστους...439

Σχήμα Γ.4. Η συνάρτηση $Blackbox1(Epitokio, Politics)$.....440

Σχήμα Γ.5. Η συνάρτηση $\mathrm{Re}\,ward(CostSynolou)$.....441

Σχήμα Γ.6. Η διεπαφή του προγράμματος της συνάρτησης κατωφλίου με δεδομένη.....

ευρωστία...443

Σχήμα Γ.7. Η συνάρτηση $SynoloEisodon(Epitokio, q, alpha, akriveia)$.....444

Σχήμα Γ.8. Η συνάρτηση $Ypo\log ismosKostousSynolou(Epitokio, U)$.....445

Σχήμα Γ.9. Η συνάρτηση $Blackbox1(Epitokio, Politics)$.....446

Σχήμα Γ.10. Η συνάρτηση $\mathrm{Re}\,ward(CostSynolou)$.....447

Σχήμα Γ.11. Η συνάρτηση για τον υπολογισμό της λύπης.....448

Σχήμα Γ.12. Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης υπολογισμού συνόλου των πιθανών.....

δυνατών πολιτικών από σενάρια...449

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Κεφάλαιο 1ο Μοντέλα Χάσματος Πληροφορίας

Κεφάλαιο 2ο Το Μοντέλο TIMES

Πίνακας 2.1. Ζητήσεις τελικών χρήσεων στο μοντέλο TIAM.....79

Κεφάλαιο 3ο Μέθοδοι Αναγνώρισης Μακροπρόθεσμης Εύρωστης Στρατηγικής Διαχείρισης Ενεργειακών Πόρων

Κεφάλαιο 4ο Ενεργειακοί Διάδρομοι

Πίνακας 4.1. Κύρια προγράμματα αγωγών στην Ευρώπη.....196

Πίνακας 4.2. Κύρια χαρακτηριστικά των προγραμμάτων εισαγωγών ανά.....
κατηγορία...220

Κεφάλαιο 5ο Μοντελοποίηση του Ενεργειακού Συστήματος των Σκανδιναβικών Χωρών

Πίνακας 5.1. Οι τέσσερις εποχές, η διάρκειά τους και η αντιστοιχία των μηνών όπως..
χρησιμοποιούνται στο μοντέλο...258

Πίνακας 5.2. Πραγματική και μοντελοποιημένη εποχιακή ικανότητα αποθήκευσης.....
και μέγιστη διαφορά παραγωγικής ισχύος ημέρας και νύχτας κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η πραγματική ικανότητα δεξαμενών λαμβάνεται από Nordel (1999)...261

Πίνακας 5.3. Περίοδος χρησιμοποίησης μέγιστου φορτίου για διαφορετικές.....
διαδικασίες (ώρες/έτος). Οι τιμές είναι μόνο αντιπροσωπευτικές και μπορούν να διαφέρουν μεταξύ των μεμονωμένων διαδικασιών μέσα σε μια ομάδα διαδικασίας...267

Πίνακας 5.4. Παράμετροι διαδικασιών συνδυασμένου κύκλου θερμοηλεκτρικής.....
εγκατάστασης φυσικού αερίου CHP...269

Πίνακας 5.5. Εκτιμήσεις παραμέτρου για τις επιλεγμένες τεχνολογίες παραγωγής.....
ισχύος και θέρμανσης...270

Πίνακας 5.6. Προβλέψεις βασικών γραμμών για την κατανάλωση προϊόντων και.....

περιορισμοί για τις περιόδους 2005, 2015 και 2025...274

Πίνακας 5.7. Υποθέσεις βασικών γραμμών για τις τιμές καυσίμων.....
συμπεριλαμβανομένων και των φόρων...275

Πίνακας 5.8. Παράγοντες εκπομπής για τα καύσιμα και τις επιλεγμένες τεχνικές.....
καύσης...277

Κεφάλαιο 6^{ο} Σενάρια

Πίνακας 6.1. Εισροές των υγρών, κανονικών και ξηρών περιόδων σε κάθε περιοχή σε TWh...291

Πίνακας 6.2. Η συσσωρευτική και μέση ετήσια ανάπτυξη δαπανών σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Οι δαπάνες υπολογίζονται για τη χρονική έκταση από το 2003 έως το 2027...309

Κεφάλαιο 7^{ο} Αριθμητικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

Παράρτημα Α Εφαρμόζοντας την Στρατηγική Εύρωστης Λήψης Απόφασης

Παράρτημα Β Ηλεκτρική Προσφορά στις Σκανδιναβικές Χώρες

Πίνακας Β.1. Εγκατεστημένη ικανότητα στις Σκανδιναβικές χώρες τις 31 Δεκεμβρίου 1998...416

Πίνακας Β.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις Σκανδιναβικές χώρες το 1998,.....
όπου * συμπεριλαμβάνεται στις υγροποιημένες μορφές...416

Πίνακας Β3. Εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας στις σκανδιναβικές χώρες το 1998.....
Άλλες χώρες είναι η Γερμανία που θεωρείται ότι κάνει εμπόριο με τη Δανία, τη Σουηδία και τη Νορβηγία και η Ρωσία που θεωρείται ότι κάνει εμπόριο με τη Φινλανδία...417

Πίνακας Β.4. Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στις Σκανδιναβικές χώρες το.....
1998...418

Παράρτημα Γ Πακέτο Προγραμμάτων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΜΟΝΤΕΛΑ ΧΑΣΜΑΤΟΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ

1.1 Γενικά

Οι άνθρωποι αναπτύσσουν μαθηματικά μοντέλα για να συλλάβουν τα βασικά χαρακτηριστικά ενός συστήματος προκειμένου να υπάρξει καλύτερη κατανόηση για το πως αυτό λειτουργεί. Αυτό τους επιτρέπει να λαμβάνουν βελτιωμένες αποφάσεις στο τι πρέπει να κάνουν για να λύσουν ένα δεδομένο πρόβλημα. Παραδείγματος χάριν, όσον αφορά την απόφαση για το πως μπορεί να περικοπεί η ροή της ρύπανσης μέσω του χώματος που προκαλείται από μια διαρροή υγρών χημικών ουσιών στο έδαφος από τοπικές χημικές εγκαταστάσεις, πεπερασμένα σε αριθμό στοιχεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από μαθηματικής άποψης για να διαμορφωθεί η κατάστρωση του προβλήματος στο φυσικό επίπεδο και έτσι να προσδιοριστεί η ροή των ρύπων [1], [2], [3]. Κατά το σχεδιασμό μεγάλης κλίμακας προγραμμάτων εφαρμοσμένης μηχανικής όπως είναι ένα περιφερειακό πρόγραμμα άρδευσης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί το μοντέλο γραφικών παραστάσεων για την επίλυση των συγκρούσεων (graph model for conflict resolution) [4], για τον καθορισμό των συμβιβαστικών αποφάσεων, για την επίλυση των διαφωνιών που προκύπτουν μεταξύ των υπερασπιστών του προγράμματος, των περιβαλλοντικών ομάδων, των κυβερνητικών αντιπροσωπειών και άλλων ομάδων ενδιαφέροντος. Εξ ορισμού, κάθε μαθηματικό μοντέλο είναι μια προσέγγιση της πραγματικότητας, δεδομένου ότι δεν μπορεί ποτέ να είναι το ίδιο το πραγματικό φυσικό ή κοινωνικό σύστημα που διαμορφώνεται στον πραγματικό κόσμο. Εν τούτοις, με την ανάπτυξη ενός μοντέλου

ή ενός συνόλου μοντέλων, που είναι όσο το δυνατόν απλούστερα σύμφωνα με την αρχή του Occam's Razor, τα ανθρώπινα όντα έχουν στη διάθεσή τους ένα κοινό μέσο επικοινωνίας για να συζητήσουν και να αντιληφθούν καλύτερα το πρόβλημα όταν πρόκειται να αποφασίσουν κατά ένα τρόπο υπεύθυνο, αποτελεσματικό και δίκαιο.

Τα μαθηματικά μοντέλα μπορούν να ταξινομηθούν ως αιτιοκρατικά (ντετερμινιστικά ή deterministic) ή απροσδιόριστα (μη ντετερμινιστικά ή indeterminate). Ένα αιτιοκρατικό μοντέλο είναι εκείνο στο οποίο οι διευκρινισμένοι όροι (specified conditions) καθορίζουν κατά απόλυτο τρόπο τα μελλοντικά αποτελέσματα. Ένα αιτιοκρατικό μοντέλο δεν περιέχει κανένα τμήμα αβεβαιότητας που να βασίζεται σε θεωρία πιθανοτήτων, ασαφή σύνολα ή μοντελοποίηση χάσματος πληροφορίας (info-gap modeling). Ένα παράδειγμα ενός αμιγώς αιτιοκρατικού μοντέλου είναι ένα σύνολο διαφορικών εξισώσεων που αναπτύσσονται για την περιγραφή ενός φυσικού συστήματος. Αντίθετα, στην περίπτωση των απροσδιόριστων μοντέλων, οι προηγούμενοι όροι δεν καθορίζουν τα μελλοντικά αποτελέσματα. Ένα απροσδιόριστο μοντέλο περιέχει αβεβαιότητα βασισμένη είτε στη θεωρία πιθανοτήτων, είτε στην ασαφή λογική, είτε σε μοντελοποίηση χάσματος πληροφορίας, είτε σε κάποιον άλλο τρόπο περιγραφής αβεβαιότητας ενδεχομένως ακόμη και συνδυασμένο με αιτιοκρατικό μοντέλο.

Θα μπορούσε επίσης να υποστηριχθεί, χωρίς καμία αμφιβολία, ότι ένα προσεκτικά κατασκευασμένο μοντέλο προσφέρει μια έγκυρη περιγραφή ενός φυσικού ή κοινωνικού συστήματος, αφαιρώντας με αυτόν τον τρόπο την ουσιαστική αβεβαιότητα. Εντούτοις, κάποια αβεβαιότητα παραμένει ακόμα κι αν το μοντέλο είναι αρκετά περίπλοκο. Υπάρχουν πολλοί λόγοι για την εμμονή (persistence) και τη διεισδυτικότητα (pervasiveness) της αβεβαιότητας. Όλα τα μοντέλα είναι προσεγγίσεις της πραγματικότητας που, είτε για την περιγραφή φυσικών είτε κοινωνικών φαινομένων, είναι εξαιρετικά σύνθετα και δυναμικά μεταβαλλόμενα κατά τη διάρκεια του χρόνου. Οι ανακρίβειες και οι αβεβαιότητες μπορούν να εισαχθούν στη διαμόρφωση της σύνδεσης μεταξύ των πλήρως διαφορετικών τύπων συστημάτων, όπως στο συνδυασμό φυσικών και κοινωνικοοικονομικών μοντέλων. Άλλοι λόγοι εισαγωγής ανακρίβειας και αβεβαιότητας σε ένα μοντέλο είναι τα δεδομένα, που μπορεί να είναι ανεπαρκή, αλλά και οι μετρήσεις, που μπορεί να είναι ανακριβείς. Επιπλέον, μερικά φαινόμενα μπορούν τα ίδια να είναι εγγενώς αβέβαια.

Εν τούτοις, τα μοντέλα παρέχουν ένα πολύτιμο σημείο εστίασης, μια αφετηρία κατανόησης του προβλήματος και ένα στήριγμα για μια πιο σοφή λήψη απόφασης.

1.2 Καθορισμός Αβεβαιότητας κατά τη Μοντελοποίηση Χάσματος Πληροφορίας

1.2.1 Αβεβαιότητα στα Μοντέλα Χάσματος Πληροφορίας

Παραδοσιακά, η αβεβαιότητα περιγράφεται από τη θεωρία πιθανότητας (probability theory) η οποία ποσοτικοποιεί την έλλειψη πληροφορίας (lack of information) είτε από την πλευρά της συχνότητας της επανάληψης των γεγονότων (frequency of recurrence of events) είτε από την πλευρά των υποκειμενικών βαθμών βεβαιότητας ενός παρατηρητή (subjective degrees of belief) [5]. Τις τελευταίες δεκαετίες, χρησιμοποιείται ευρέως η θεωρία της ασαφούς λογικής (fuzzy logic) η οποία παρέχει μια σειρά εναλλακτικών λύσεων στην παραδοσιακή θεωρία πιθανότητας. Οι διάφοροι τύποι αβεβαιότητας ποσοτικοποιούνται με τις ασαφείς συναρτήσεις μέλους (fuzzy membership functions). Παραδείγματα αποτελούν η γλωσσική ασάφεια μιας πρότασης, η δυνατότητα ή η ανάγκη (και όχι η πιθανότητα) της εμφάνισης ενός γεγονότος [6], [7], [8], [9], [10].

Στην ιστορική εξέλιξη της σκέψης σχετικά με την αβεβαιότητα, η ασαφής λογική είναι μια σημαντική διαφοροποίηση από την παραδοσιακή θεωρία πιθανότητας. Ωστόσο κάθε μια από αυτές τις θεωρίες παρουσιάζει μια διαφορετική πτυχή ατελών πληροφοριών (imperfect information) ή αποσπασματικών πληροφοριών (fragmentary information). Κάθε μια από αυτές τις θεωρίες το κάνει αυτό με διαφορετικό τρόπο. Επιπλέον, κάθε θεωρία έχει αναπτυχθεί για να εξυπηρετήσει διαφορετικές κατηγορίες εφαρμογών. Εντούτοις, παρά τις όποιες διαφορές μεταξύ τους, μοιράζονται μια ομοιότητα ως προς τη μορφή. Και η ασαφής λογική και η παραδοσιακή θεωρία πιθανοτήτων ποσοτικοποιούν την αβεβαιότητα με κανονικοποιημένες μαθηματικές λειτουργίες (normalized mathematical functions) όπως είναι η συνάρτηση μέλους (membership function) και η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (probability density) αντίστοιχα.

Παρόλα αυτά προκύπτει το ερώτημα του αν η αβεβαιότητα μπορεί να ποσοτικοποιηθεί χωρίς να χρησιμοποιηθούν συναρτήσεις κατανομής (distribution functions). Η απάντηση στην ερώτηση αυτή είναι ναι. Για να γίνει αυτό πρέπει οι πληροφορίες σχετικά με το πρόβλημα να είναι λιγοστές. Συγκεκριμένα, η ανάγκη για ένα αραιό μοντέλο αβεβαιότητας (sparse model of uncertainty) εμφανίζεται όταν βρισκόμαστε μακριά από τα σύνορα της σίγουρης γνώσης βαθειά στη σφαίρα του άγνωστου. Σε τέτοιες καταστάσεις, το μοντέλο αβεβαιότητας το οποίο θα αναπτυχθεί πρέπει να λειτουργήσει εξετάζοντας πληροφορίες που είναι πιο ελλιπείς σε σχέση με τις πληροφορίες που υπάρχουν συνήθως. Αν οι πληροφορίες που υπήρχαν είναι αυτές που υπάρχουν συνήθως τότε θα καταφεύγαμε σε μοντέλο ασαφούς λογικής ή σε παραδοσιακό μοντέλο πιθανοτήτων.

Για να γίνει αντιληπτή η ανάγκη του αραιού μοντέλου αβεβαιότητας ας εξεταστεί η ακόλουθη κατάσταση. Τοξικά απόβλητα απελευθερώνονται από βιομηχανικές εγκαταστάσεις σε ποταμό και ρέουν προς τη θάλασσα προκαλώντας ζημίες στη χλωρίδα και την πανίδα της περιοχής, υποβαθμίζοντας την ποιότητα του νερού προς ανθρώπινη χρήση. Για να γίνει η αξιολόγηση της περιβαλλοντικής επίπτωσης, είναι απαραίτητο να υπολογιστεί ο τοπικός γηγενής ρυθμός απορρόφησης (local indigenous rate of absorption) που λαμβάνει υπόψη την προσρόφηση (adsorption) και τη χημική αντίδραση των τοξικών υλικών με την κοίτη του ποταμού και με τα άλλα υλικά που διαλύονται στον ποταμό. Αυτές οι διαδικασίες είναι σύνθετες και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες όπως ο ρυθμός ροής, ο βαθμός στροβιλισμού, η θερμοκρασία, η συγκέντρωση και λοιποί παράγοντες. Αυτοί οι παράγοντες δεν είναι γνωστοί σε ικανοποιητικό βαθμό ενώ ποικίλλουν χρονικά και χωρικά. Εν ολίγοις, ο ρυθμός αφαίρεσης τοξικών αποβλήτων από τον ποταμό εξαρτάται από μια συνάρτηση με μεταβλητές το χρόνο, τον χώρο και άλλους παράγοντες. Υδρολογικά μοντέλα και μοντέλα ποιότητας νερού είναι δυνατόν να αναπτυχθούν παρόλα αυτά απαιτούνται τεράστιοι πόροι αλλά και χρόνος για να ελεγχθεί και να βελτιωθεί η αξιοπιστία του προτεινόμενου μοντέλου.

Αντί ενός ρεαλιστικού, αποδεδειγμένου μοντέλου με τεράστιες απαιτήσεις σε χρόνο και λοιπούς πόρους, μπορεί να υιοθετηθεί ένα προσεγγιστικό μοντέλο με την προϋπόθεση ότι θα παρεκκλίνει κατά ένα άγνωστο αλλά όχι σημαντικό περιθώριο από την πραγματική συμπεριφορά. Στη χρησιμοποίηση ενός προσεγγιστικού μοντέλου, αναγνωρίζεται ένα μεγάλο χάσμα πληροφοριών (information gap) μεταξύ

αυτού που είναι γνωστό (what *is known*) και το τι θα έπρεπε να είναι γνωστό (what *needs to be known*) προκειμένου να ληφθούν λογικές αποφάσεις στη διαχείριση των τοξικών αποβλήτων.

Αυτό το χάσμα πληροφοριών είναι μια αυστηρή μορφή αβεβαιότητας (severe form of uncertainty) και εμφανίζεται συχνά στην πράξη. Σε πολλά καινοτόμα τεχνολογικά προγράμματα είναι πραγματικά γνωστά πολύ λιγότερα από αυτά που θα έπρεπε να είναι γνωστά προκειμένου να ληφθούν οι σοφότερες και οι πιο αξιόπιστες αποφάσεις. Στον περιβαλλοντικό προγραμματισμό, στη βιομηχανική διαχείριση, στην κοινωνική και οικονομική λήψη αποφάσεων, στην ιατρική διάγνωση και σε άλλες περιοχές, αρκετά συχνά το χάσμα μεταξύ αυτού που ξέρουμε και του τι πρέπει να ξέρουμε είναι ουσιαστικό. Πώς μπορεί λοιπόν να οργανωθούν οι πληροφορίες αλλά και η έλλειψη αυτών; Πώς μπορεί να μετρηθεί το μέγεθος αυτού του χάσματος έτσι ώστε να μπορεί να προσδιοριστεί η ποσότητα της αβεβαιότητας που θα αντιμετωπίσουν οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων (decision makers);

Επιστρέφοντας στο παράδειγμα των τοξικών αποβλήτων αποχέτευσης, ας θεωρηθεί ο ρυθμός αφαίρεσης $\bar{r}(x,t,q)$ ως συνάρτηση της θέσης x, του χρόνου t και των άλλων ποσοτήτων q, βασισμένων στο καλύτερο διαθέσιμο (αλλά ενδεχομένως αρκετά απλό) μοντέλο. Η πραγματική συνάρτηση ρυθμού αφαίρεσης $r(x,t,q)$ παρεκκλίνει κατά άγνωστο μέγεθος από το ονομαστικό μοντέλο $\bar{r}(x,t,q)$. Δεν υπάρχει καμία πληροφορία με την οποία να εκφραστεί η πιθανότητα των διαφόρων εναλλακτικών συναρτήσεων ρυθμού, έτσι είναι αδύνατο να διευκρινιστεί ένα πιθανοτικό μοντέλο (probabilistic model) για την αβεβαιότητα της συνάρτησης $r(x,t,q)$. Στην πραγματικότητα, δεδομένου ότι το εν λόγω φαινόμενο είναι αρκετά σύνθετο και δεδομένου ότι η συνάρτηση $r(x,t,q)$ είναι μια συνάρτηση πολλών μεταβλητών είναι πολύ δύσκολο να γίνουν οποιοιδήποτε ισχυρισμοί για την ευλογοφάνεια (plausibility) μεταξύ των απείρων εναλλακτικών συναρτήσεων r. Για αυτόν τον λόγο, ένα ασαφές μοντέλο αβεβαιότητας για τη συνάρτηση του ρυθμού αφαίρεση είναι αδύνατο να αναπτυχθεί χωρίς την εισαγωγή εκτεταμένων και ανεπιβεβαίωτων υποθέσεων. Λαμβάνοντας υπόψη αυτήν τη σημαντική έλλειψη πληροφοριών για τις πιθανές παραλλαγές της συνάρτησης ρυθμού αφαίρεσης, ένα απλό καθορισμένο μοντέλο αβεβαιότητας θα μπορούσε να διατυπωθεί ως σύνολο

όλων των συναρτήσεων των σύμφωνων με την ονομαστική συνάρτηση $\bar{r}(x,t,q)$ μέχρι ένα δεδομένο επίπεδο απόκλισης όπως δίνεται από τη σχέση

$$U(\alpha,\bar{r})=\left\{r(x,t,q):\left|r(x,t,q)-\bar{r}(x,t,q)\right|\le\alpha\right\},\ \alpha\ge 0 \qquad (1)$$

όπου $U(\alpha,\bar{r})$ είναι το σύνολο όλων των συναρτήσεων των οποίων η απόκλιση από τη συνάρτηση $\bar{r}(x,t,q)$ δεν είναι πουθενά μεγαλύτερη από α. Για μια σταθερή τιμή του α, αυτό το σύνολο λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα στη συνάρτηση ρυθμού αφαίρεσης καθορίζοντας ένα ορισμένο εύρος διακύμανσης της συνάρτησης $r(x,t,q)$ γύρω από τον ονομαστικό ρυθμό αφαίρεσης $\bar{r}(x,t,q)$. Όσο μεγαλύτερη η τιμή του α, τόσο μεγαλύτερο το εύρος της άγνωστης διακύμανσης, για αυτό λοιπόν το λόγο η σταθερά α καλείται και παράμετρος αβεβαιότητας (uncertainty parameter). Αρκετά συχνά η τιμή του α δεν είναι γνωστή με αποτέλεσμα η (1) τελικά να μη δίνει ένα ενιαίο σύνολο αλλά μια οικογένεια ενθέτων συνόλων (family of nested sets). Ο βαθμός ενσωμάτωσης (degree of nesting) όπως και το επίπεδο αβεβαιότητας, εκφράζονται από την παράμετρο αβεβαιότητας α. Η οικογένεια των ενθέτων συνόλων $U(\alpha,\bar{r}),\ \alpha\ge 0$ είναι ένα μοντέλο χάσματος πληροφορίας (info-gap model of uncertainty). Δεδομένου ότι τα σύνολα $U(\alpha,\bar{r})$ σε αυτήν την οικογένεια είναι στην πραγματικότητα κυρτά σύνολα (convex sets), το παραπάνω σύνολο είναι ένα κυρτό μοντέλο χάσματος πληροφορίας. Το μοντέλο χάσματος πληροφορίας της (1) είναι μόνο ένα από ένα ευρύ φάσμα μοντέλων χάσματος πληροφορίας που χρησιμοποιούνται συχνά. Η διατύπωση και η επιλογή ενός μοντέλου πληροφορίας χάσματος εξαρτάται από το είδος των αρχικών πληροφοριών. Θεωρητική ανάπτυξη μοντέλων χάσματος πληροφορίας έχει γίνει και για εφαρμογές στην πυρηνική τεχνολογία (nuclear assay) [11], στη μηχανολογική ανάλυση (mechanical analysis) [12] και στη θεωρία αξιοπιστίας (reliability theory) [13].

Όταν γίνεται οργάνωση των πληροφοριών (αλλά και της άγνοιας) σε οικογένειες συνόλων (sets) ή συστάδων (cluster), οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων έχουν να εξετάσουν συναρτήσεις ρυθμών οι οποίες μπορεί να έρχονται σε αντίθεση μεταξύ τους. Οι θεωρίες πιθανότητας (probability theory) και δυνατότητας (possibility theory) έχουν και αυτές να κάνουν με σύνολα γεγονότων. Στη θεωρία πιθανότητας, για παράδειγμα, πρέπει να υπολογιστεί η πιθανότητα ώστε η συχνότητα επανάληψης των συναρτήσεων ρυθμού να λαμβάνει τιμές μικρότερες από ένα κατώφλι. Στη θεωρία δυνατότητας πάλι, καλούμαστε να απαντήσουμε εάν ένα

σύνολο συναρτήσεων με χαμηλούς ρυθμούς είναι εφικτό. Η διαφορά είναι ότι με τα μοντέλα χάσματος πληροφορίας, τα γεγονότα οργανώνονται σε συστάδες, αλλά δεν υιοθετούνται συναρτήσεις κατανομής για να γίνει η αποτίμησή τους. Στην περίπτωση των μοντέλων χάσματος πληροφορίας, δεν υπάρχουν ικανοποιητικές πληροφορίες για να διατυπωθεί μια συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας ή μια συνάρτηση μέλους.

Οι συναρτήσεις κατανομής στην παραδοσιακή θεωρία πιθανοτήτων και στην θεωρία ασαφούς λογικής έχουν ως σκοπό να μετρήσουν την αβεβαιότητα καθώς συσχετίζονται με το μέγεθος των συνόλων. Τα μεγάλα σύνολα τείνουν να έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα συμπερίληψης συχνά ή αρκετά συχνά επαναλαμβανομένων γεγονότων. Εδώ είναι το επίκεντρο της διαφοράς μεταξύ των μοντέλων που βασίζονται σε κατανομές και στα μοντέλα χάσματος πληροφορίας. Στα μοντέλα χάσματος πληροφορίας, μπορεί να ταξινομηθούν οι βαθμοί του χάσματος πληροφορίας από την πλευρά του μεγέθους της παραμέτρου αβεβαιότητας α. Παρόλα αυτά, αυτός ο τρόπος ταξινόμησης θεωρείται σημαντικά χαμηλότερης ποιοτικής στάθμης σε σχέση με τις συναρτήσεις κατανομής οι οποίες δείχνουν τη συχνότητα ή την ευλογοφάνεια επανάληψης (για τη θεωρία πιθανότητας και δυνατότητας αντίστοιχα). Στα μοντέλα χάσματος πληροφορίας, γίνεται η επικέντρωση στη συστάδα παρά στην επανάληψη (recurrence) ή την πιθανότητα (likelihood).

Η μοντελοποίηση χάσματος πληροφορίας είναι μια θεωρία αβεβαιότητας, που παρακινείται από τη σημαντική έλλειψη πληροφοριών. Εντούτοις, έχει τη δικιά της ιδιαίτερη οξύνοια. Είναι αρκετά ευχερές να εκφραστεί η ιδέα ότι η αβεβαιότητα μπορεί να είναι είτε ολέθρια (pernicious) είτε ευνοϊκή (propitious). Δηλαδή οι παραλλαγές της αβεβαιότητας οι οποίες μπορούν να βρεθούν μπορεί να είναι είτε δυσμενείς (adverse) είτε ευνοϊκές (favorable) αντίστοιχα.

Από εδώ λοιπόν και στο εξής, με τον όρο δυσμένεια (adversity) ορίζεται η πιθανότητα της αποτυχίας ενώ με τον όρο ευμένεια (favorability) ορίζεται η πιθανότητα της σαρωτικής επιτυχίας (sweeping success). Με τον όρο συνάρτηση ευρωστίας (robustness function) ορίζεται το μέγιστο επίπεδο αβεβαιότητας με το οποίο δεν παρουσιάζεται αποτυχία ενώ με τον όρο συνάρτηση ευκαιρίας (opportunity function) ορίζεται το ελάχιστο επίπεδο αβεβαιότητας με το οποίο δεν παρουσιάζεται δυνατότητα σαρωτικής επιτυχίας. Εάν με q οριστεί διάνυσμα παραμέτρων όπως ο χρόνος, μεταβλητές σχεδίασης ή άλλες παράμετροι του μοντέλου, μπορούμε

περιληπτικά να εκφράσουμε τις συναρτήσεις ευρωστίας και ευκαιρίας ως το μέγιστο ή το ελάχιστο ενός συνόλου τιμών α τέτοιο ώστε

$$\hat{\alpha}(q) = \max\{\alpha : \text{ικανοποιούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις}\} \text{ (ευρωστία)} \quad (2)$$

$$\hat{\beta}(q) = \min\{\alpha : \text{είναι εξασφαλισμένη σαρωτική επιτυχία}\} \text{ (ευκαιρία)} \quad (3)$$

Με άλλα λόγια, η συνάρτηση ευρωστίας $\hat{\alpha}(q)$ είναι η ανοσία (immunity) απέναντι στην αποτυχία (επιθυμητή είναι μια μεγάλη τιμή της συνάρτησης ευρωστίας) ενώ αντίθετα, η συνάρτηση ευκαιρίας $\hat{\beta}(q)$ είναι η ανοσία απέναντι στη σαρωτική επιτυχία (επιθυμητή είναι μια μικρή τιμή της συνάρτησης ευκαιρίας).

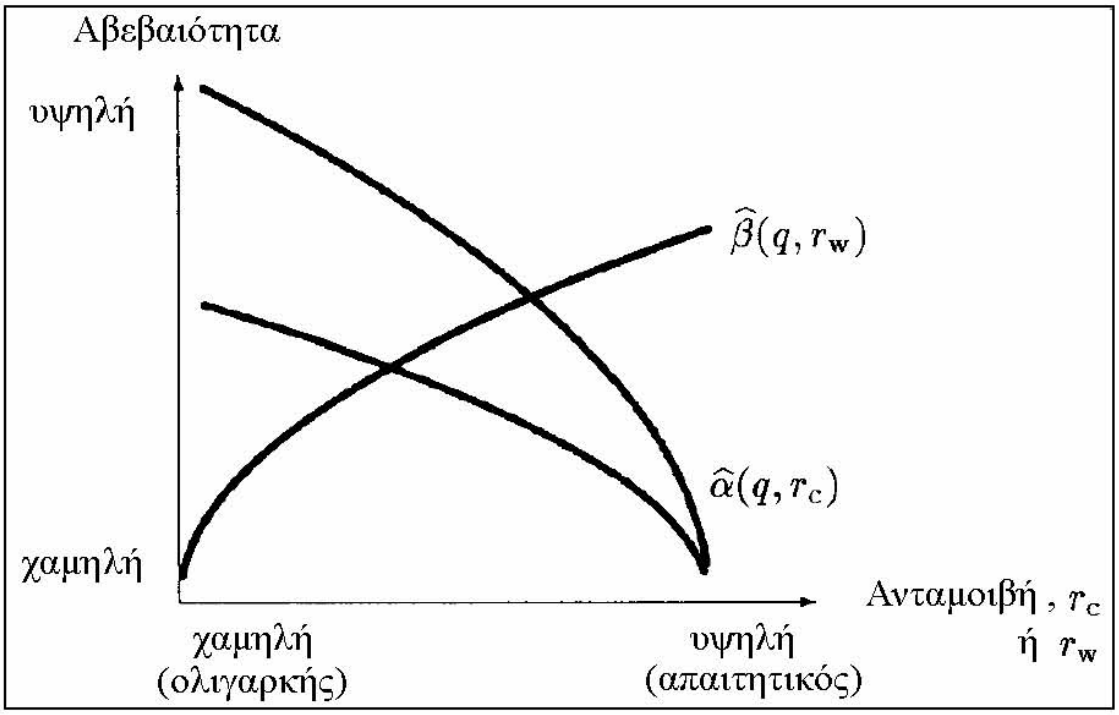
Αρκετά συχνά, ο βαθμός επιτυχίας αξιολογείται από μια βαθμωτή συνάρτηση ανταμοιβής $R(q, f)$ (scalar reward function), η οποία εξαρτάται από το διάνυσμα q των ενεργειών (actions), των αποφάσεων (decision) και των παραμέτρων του μοντέλου (model parameters) καθώς επίσης και από μια άγνωστη μεταβλητή f της οποίας οι διακυμάνσεις περιγράφονται από ένα μοντέλο χάσματος πληροφορίας $F(a, \bar{f})$. Στην (2) με τον όρο ελάχιστες απαιτήσεις χαρακτηρίζεται η απαίτηση η ανταμοιβή να λαμβάνει τουλάχιστον την τιμή κατωφλίου r_c. Ομοίως, η σαρωτική επιτυχία στην (3) εξασφαλίζεται με την απαίτηση η ανταμοιβή να λαμβάνει τουλάχιστον την τιμή κατωφλίου r_w. Οι συναρτήσεις ευρωστίας και ευκαιρίας μπορούν τώρα να εκφραστούν από τις παρακάτω εξισώσεις

$$\hat{\alpha}(q) = \max\left\{\alpha : \min_{u \in U(\alpha, \bar{u})} R(q, f) \geq r_c\right\} \quad (4)$$

$$\hat{\beta}(q) = \min\left\{\alpha : \max_{u \in U(\alpha, \bar{u})} R(q, f) \geq r_w\right\} \quad (5)$$

Όπως έχει ήδη αναλυθεί [14] και όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.1, η συνάρτηση ευρωστίας $\hat{\alpha}(q, r_c)$ είναι μια μονότονα φθίνουσα συνάρτηση (κινούμενη στο διάστημα ανταμοιβής r από μηδέν έως την ελάχιστη απαραίτητη ανταμοιβή r_c). Αυτό εκφράζει το συμβιβασμό (tradeoff) μεταξύ της απαιτούμενης ανταμοιβής και του βαθμού αβεβαιότητας. Εάν απαιτείται υψηλή ανταμοιβή, είναι επιτρεπτός μόνο χαμηλός βαθμός αβεβαιότητας. Αντίθετα, η συνάρτηση ευκαιρίας $\hat{\beta}(q, r_w)$ είναι μια μονότονα αύξουσα συνάρτηση (κινούμενη στο διάστημα ανταμοιβής r από μηδέν έως την ανταμοιβή r_w). Η τελευταία παρατήρηση εκφράζει το γεγονός ότι η

σαρωτική επιτυχία μπορεί να επιτευχθεί όταν υπάρχουν υψηλά επίπεδα αβεβαιότητας.



Σχήμα 1.1. Σχηματική αναπαράσταση δύο καμπυλών ευρωστίας και μιας καμπύλης ευκαιρίας.

Οι θέσεις των καμπυλών ευρωστίας και ευκαιρίας στη σχηματική απεικόνιση της αβεβαιότητας σε σχέση με την ανταμοιβή στο Σχήμα 1.1, αποκαλύπτουν το περιεχόμενο του σχετικού συμβιβασμού: εξετάζοντας την άνω καμπύλη ευρωστίας $\hat{\alpha}(q, r_c)$, διαπιστώνεται ότι λαμβάνει χαμηλότερα επίπεδα αβεβαιότητας μόνο όταν απαιτείται υψηλότερη ανταμοιβή. Η άνω καμπύλη ευρωστίας αντιπροσωπεύει μια πιο απότομη συμπεριφορά σε θέματα ανταμοιβής και αβεβαιότητας από την κάτω καμπύλη. Για δεδομένο επίπεδο ανταμοιβής, μεγαλύτερο επίπεδο αβεβαιότητας είναι ανεκτό σύμφωνα με την άνω καμπύλη. Αντίθετα, για δεδομένη αβεβαιότητα, η άνω καμπύλη ευρωστίας επιτρέπει μεγαλύτερη ανταμοιβή από την κάτω καμπύλη. Θέλοντας να χαρακτηρίσουμε τις δύο αυτές καμπύλες ως πολιτικές ή στρατηγικές λήψεις αποφάσεων, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η κάτω συνάρτηση ευρωστίας είναι πιο ευαίσθητη ή αντίθετη στην αβεβαιότητα σε σχέση με την άνω καμπύλη. Ισοδύναμα, η άνω καμπύλη μπορεί να χαρακτηριστεί ως πιο ριψοκίνδυνη ή παρορμητική όταν αντιμετωπίζεται μέσω στρατηγικής χαμηλότερης ευρωστίας.

1.2.2 Ευρωστία και Ευκαιρία

Οι στρατηγικές ευρωστίας και ευκαιρίας όπως αυτές έχουν οριστεί έως τώρα μέσω των συναρτήσεων ευρωστίας και ευκαιρίας αποτελούν τον πυρήνα της θεωρίας απόφασης μέσω μοντέλου χάσματος πληροφορίας.

Ο υπεύθυνος για τη λήψη της απόφασης θα κάνει την επιλογή του αφού αρχικά καθορίσει την αξία του διανύσματος απόφασης q το οποίο πέραν από διάνυσμα μπορεί να είναι διανυσματική συνάρτηση πραγματικών ή/και γλωσσικών μεταβλητών. Το διάνυσμα απόφασης q ανήκει σε ένα σύνολο διαθέσιμων αποφάσεων Q. Η έκβαση αυτής της επιλογής, όπως είδαμε έως τώρα, επηρεάζεται από ένα άγνωστο διάνυσμα (ή διανυσματική συνάρτηση) $f \in \Omega$ της οποίας το εύρος διακύμανσης περιγράφεται από ένα μοντέλο χάσματος πληροφορίας $F\left(a, \bar{f}\right),\ a \geq 0$ σε ένα Banach χώρο Ω (Banach space). Ειδικότερα, το ενδιαφέρον εστιάζεται στις καταστάσεις κατά τις οποίες η απόφαση είναι βασισμένη σε ένα ελλιπές ή ανακριβές μοντέλο, το οποίο συνήθως θα χαρακτηρίζεται από ένα κεντρικό σημείο $\bar{f}$ (centerpoint) του μοντέλου χάσματος πληροφορίας. Το μοντέλο χάσματος πληροφορίας $F\left(a, \bar{f}\right)$ αναπαριστά το μοντέλο πληροφορίας χάσματος του υπεύθυνου απόφασης σχετικά με αυτό το μοντέλο σχεδίασης (design-base model). Δεδομένου ότι η πραγματικότητα προτιμά μοντέλα f παρά $\bar{f}$, η έκβαση της απόφασης q θα επηρεαστεί από το χάσμα μεταξύ $\bar{f}$ και f.

Στη συνέχεια καθορίζονται δυο συναρτήσεις ανταμοιβής που λαμβάνουν πραγματικές τιμές (real-valued) και δέχονται ως είσοδο (q, A) με $q \in Q$ και $A \subset \Omega$. Η κάτω συνάρτηση ανταμοιβής $R_*(q, A)$ (lower reward function) είναι μονότονα φθίνουσα στο σύνολο ισχύος (power set) Ω. Για δεδομένη επιλογή q ισχύει

$A \subset B$ συνεπάγεται $R_*(q, A) \geq R_*(q, B)$ (6)

Η άνω συνάρτηση ανταμοιβής $R^*(q, A)$ είναι μονότονα αύξουσα στο σύνολο ισχύος Ω και για δεδομένη επιλογή q ισχύει

$A \subset B$ συνεπάγεται $R^*(q, A) \leq R^*(q, B)$ (7)

Η μονοτονία (monotonicity) αυτών των συναρτήσεων ανταμοιβής δεν αφορά την απόφαση σχετικά με το διάνυσμα q ή με τις προτιμήσεις του υπεύθυνου απόφασης σχετικά με αυτές τις επιλογές. Οι συναρτήσεις ανταμοιβής είναι μονότονες

στο χώρο Ω των άγνωστων βοηθητικών γεγονότων f και εκφράζει τον αντίκτυπο της μεταβλητότητας στις διαθέσιμες εκβάσεις μιας επιλογής q. Οι εξισώσεις (6) και (7) δεν περιγράφουν σχέσεις προτίμησης σχετικά με το q.

Οι πιο κοινές υλοποιήσεις των κάτω και άνω συναρτήσεων ανταμοιβής λαμβάνονται με δεδομένο τις μικρότερες και τις μεγαλύτερες διαθέσιμες ανταμοιβές όταν το f να ποικίλλει σε ένα σύνολο $A \subset \Omega$. Ας θεωρηθεί ότι $r(q,f)$ είναι η ανταμοιβή που περιγράφει την πραγματικότητα όταν η επιλογή είναι το $q \in Q$. Σε αυτήν την περίπτωση η άγνωστη ποσότητα λαμβάνει την τιμή $f \in \Omega$. Ο όρος ανταμοιβή που χρησιμοποιείται είναι γενικός και μπορεί να απεικονίσει οικονομικό κέρδος ή τεχνολογική απόδοση (όπως η δομική σταθερότητα). Υιοθετώντας μια συνάρτηση ανταμοιβής $r(q,f)$, μπορούν να γίνει κοινή επιλογή των κάτω και άνω συναρτήσεων ανταμοιβής που δίνονται από τις σχέσεις

$$R_*(q,A) = \min_{f \in A} r(q,f) \tag{8}$$

$$R^*(q,A) = \max_{f \in A} r(q,f) \tag{9}$$

Κατά συνέπεια, $R_*(q,A)$ είναι η ελάχιστη διαθέσιμη ανταμοιβή, ενώ $R^*(q,A)$ η μέγιστη διαθέσιμη ανταμοιβή, στο αβέβαιο περιβάλλον A. Σε αυτήν την υλοποίηση, $R_*(q,A)$ και $R^*(q,A)$ δεν έχουν καθορίσει ακόμη μια σχέση προτίμησης στην απόφαση q και αυτό επειδή το σύνολο A είναι ακαθόριστο και οι μικρότερες και υψηλότερες ανταμοιβές μπορούν να συμπεριφερθούν διαφορετικά.

Πιο συγκεκριμένα, θα επιλέξουμε στη συνέχεια το σύνολο A, ως το σύνολο $F(\alpha, \bar{f})$ μιας οικογένειας ενθέτων συνόλων χάσματος πληροφορίας. Κατόπιν, στις (8) και (9), $R_*[q,F(\alpha,\bar{f})]$ είναι η μικρότερη προσιτή ανταμοιβή στο χάσμα πληροφορίας α και $R^*[q,F(\alpha,\bar{f})]$ είναι η μεγαλύτερη προσιτή ανταμοιβή στο χάσμα πληροφορίας α. Γίνεται η υπενθύμιση ότι το μοντέλο χάσματος πληροφορίας απεικονίζει την ανεπάρκεια γνώσης (knowledge-deficiency) των μοντέλων στα οποία οι αποφάσεις είναι βασισμένες. Κατά συνέπεια, $R_*[q,F(\alpha,\bar{f})]$ και $R^*[q,F(\alpha,\bar{f})]$ είναι οι ελάχιστες και μέγιστες προσιτές ανταμοιβές στο μοντέλο χάσματος πληροφορίας α το οποίο χρησιμοποιείται.

Οι συναρτήσεις ανταμοιβής $R_*(x,A)$ και $R^*(x,A)$ λαμβάνουν πραγματικές τιμές και περιγράφουν την επιθυμητή ανταμοιβή. Ο υπεύθυνος απόφασης προτιμά τις

μεγαλύτερες από τις μικρότερες ανταμοιβές. Εντούτοις, καμία από τις $R_*(q,A)$ και $R^*(q,A)$ δε χρειάζεται να είναι συνεχής (continuous) ή κυρτή (convex) (αν και στη συνέχεια θα γίνει αρκετές φορές η υπόθεση της συνέχειας) ούτε να προέρχεται από σχέσεις προτίμησης (preference relations). Επιπλέον, ο υπεύθυνος απόφασης δεν μπορεί να ξέρει τις τιμές $R_*(q,A)$ και $R^*(q,A)$ που θα προκύψουν στην πράξη επειδή το σύνολο A είναι άγνωστο. Τέλος, ενώ R_* και R^* συνεπάγονται ανεπάρκεια γνώσης, εντούτοις δεν είναι πιθανοτικές συναρτήσεις αλλά συναρτήσεις οι οποίες εξαρτώνται από το μοντέλο χάσματος πληροφορίας.

Στη συνέχεια, αυτές οι δυο συναρτήσεις $R_*(q,A)$ και $R^*(q,A)$ θα χρησιμοποιηθούν για να καθοριστούν δύο συναρτήσεις απόφασης (όπως τις είδαμε και παραπάνω) [15] που παράγουν προτιμήσεις στις τιμές του q. Αυτές οι προτιμήσεις δεν είναι μοναδικές, ούτε οι ίδιες προτιμήσεις προέρχονται απαραιτήτως από κάθε μια από τις δύο συναρτήσεις απόφασης. Αυτές οι προτιμήσεις θα ποικίλουν ανάλογα με το επίπεδο φιλοδοξίας (aspiration level), τις λεπτομέρειες του προβλήματος απόφασης και ενδεχομένως από άλλους εξωγενείς παράγοντες.

Ας θεωρηθεί r_c η αξία της ανταμοιβής που ο υπεύθυνος απόφασης προσπαθεί να επιτύχει. Μεγαλύτερη ανταμοιβή θα ήταν καλύτερη, αλλά λιγότερη ανταμοιβή από r_c δε θα ήταν αποδεκτή. Η ευρωστία της επιλογής q, λοιπόν, είναι το μέγιστο επίπεδο ανεπάρκειας γνώσης στο οποίο η ανταμοιβή r_c τουλάχιστον είναι εγγυημένη. Δηλαδή

$$\hat{\alpha}(q,r_c) = \max\left\{\alpha : R_*\left[q, F\left(\alpha, \tilde{f}\right)\right] \geq r_c\right\} \tag{10}$$

όπου $\hat{\alpha}(q,r_c)$ είναι μια εύρωστη συνάρτηση απόφασης που ικανοποιεί τους περιορισμούς (robust satisficing decision function). Μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι καθόσον το επίπεδο φιλοδοξίας του υπεύθυνου απόφασης αυξάνει, αυτή η αύξηση των φιλοδοξιών εκφράζεται από αύξηση της κρίσιμης ανταμοιβής r_c και μείωση της ευρωστίας $\hat{\alpha}(q,r_c)$. Αυτή, όπως είδαμε και παραπάνω, είναι μια θεμελιώδης ανταλλαγή μεταξύ της φιλοδοξίας και του εφικτού. Οι υψηλές φιλοδοξίες (μεγάλα r_c) μπορούν να μην είναι εφικτές (λόγω της χαμηλής ευρωστίας $\hat{\alpha}(q,r_c)$), οδηγώντας τον υπεύθυνο απόφασης να χαμηλώσει τις φιλοδοξίες του. Αντιθέτως, αν από την ανάλυση προκύψει ότι οι φιλοδοξίες ενός υπεύθυνου απόφασης είναι υπερβολικά

μέτριες (προκύπτοντας μεγάλη ευρωστία), αυτό επιτρέπει στον υπεύθυνο απόφασης να στοχεύσει σε έναν υψηλότερο στόχο (μεγαλύτερο r_c).

Τώρα (όπως και παραπάνω), ας θεωρηθεί r_w ως μεγάλη τιμή ανταμοιβής (πολύ μεγαλύτερη της r_c) που ο υπεύθυνος απόφασης θα ήταν ευχαριστημένος να επιτύχει. Χαμηλότερη ανταμοιβή θα ήταν αποδεκτή, αλλά ανταμοιβή τόσο μεγάλη όσο η ανταμοιβή r_w θα αποτελούσε μια αναπάντεχη χαρά. Η ευκαιρία, έμφυτη στην επιλογή q, είναι το ελάχιστο επίπεδο ανεπάρκειας γνώσης στο οποίο το αναπάντεχο κέρδος μπορεί να εμφανιστεί και δίνεται από τη σχέση

$$\hat{\beta}(q, r_w) = \min\left\{\alpha : R^*\left[x, F\left(\alpha, \bar{f}\right)\right] \geq r_w\right\} \tag{11}$$

όπου $\hat{\beta}(q, r_w)$ είναι συνάρτηση απόφασης ευκαιρίας σαρωτικής νίκης (συνάρτηση απόφασης ευκαιρίας αναπάντεχου κέρδους ή opportune-windfalling decision function). Μπορεί να αποδειχθεί ότι $\hat{\beta}(q, r_w)$ αυξάνει καθώς αυξάνεται με το r_w κάτι το οποίο σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερη αβεβαιότητα προκειμένου να επιτραπεί η δυνατότητα μεγαλύτερου αναπάντεχου κέρδους. Αυτό είναι μια ανταλλαγή μεταξύ της βεβαιότητας και της ευκαιρίας που σημαίνει ότι μεγάλη βεβαιότητα (μικρό $\hat{\beta}(q, r_w)$) συνεπάγεται μικρή ευκαιρία για σαρωτική ανταμοιβή (μεγάλο r_w).

Οι συναρτήσεις $\hat{\alpha}(q, r_c)$ και $\hat{\beta}(q, r_w)$ καλούνται επίσης συναρτήσεις ανοσίας. Η συνάρτηση $\hat{\alpha}(q, r_c)$ είναι η ανοσία απέναντι στην αποτυχία (ανταμοιβή μικρότερη από r_c). Όταν η συνάρτηση $\hat{\alpha}(q, r_c)$ λαμβάνει μεγάλη τιμή, η αποτυχία μπορεί να εμφανιστεί μόνο σε επίπεδα μεγάλης αβεβαιότητας και ο υπεύθυνος απόφασης δεν είναι τρωτός στην ολέθρια αβεβαιότητα. Ομοίως, η συνάρτηση $\hat{\beta}(q, r_w)$ είναι η ανοσία απέναντι στο αναπάντεχο κέρδος (ανταμοιβή τουλάχιστον r_w). Όταν το $\hat{\beta}(q, r_w)$ λαμβάνει μικρές τιμές, η σαρωτική επιτυχία μπορεί να εμφανιστεί ακόμη και υπό τις υπάρχουσες περιστάσεις. Ο υπεύθυνος απόφασης είναι τρωτός στην ευνοϊκή αβεβαιότητα.

Αυτές οι εκτιμήσεις οδηγούν σε ταξινομήσεις προτίμησης (preference rankings) κατά την επιλογή του διανύσματος q. Ενώ "το μεγαλύτερο είναι το καλύτερο" όσον αφορά την ευρωστία $\hat{\alpha}(q, r_c)$, "το μεγαλύτερο είναι το χειρότερο"

για την ευκαιρία $\hat{\beta}(q, r_w)$. Οι προτιμήσεις που προκύπτουν από τη στρατηγική ευρωστίας (robust-satisficing strategy) είναι

$$q \geq_r q' \text{ αν } \hat{\alpha}(q, r_c) \geq \hat{\alpha}(q', r_c) \quad (12)$$

Παρομοίως, οι προτιμήσεις που προκύπτουν από τη στρατηγική ευκαιρίας (opportune-windfalling strategy) είναι

$$q \geq_o q' \text{ αν } \hat{\beta}(q, r_w) \leq \hat{\beta}(q', r_w) \quad (13)$$

Ας σημειωθεί ότι είτε $\geq_r$ είτε $\geq_o$ είναι υποχρεωτικά μονότιμα για οποιοδήποτε ζευγάρι των επιλογών q και q' αν και οι προτιμήσεις μπορούν να αλλάξουν με αλλαγές είτε του κατωφλίου r_c είτε του κατωφλίου r_w.

1.2.3 Απόφαση, Αβεβαιότητα και η Αξία της Πληροφορίας

Σε αυτήν την υποπαράγραφο, θα αναπτυχθούν δύο θέματα τα οποία απασχολούν αυτήν την περίοδο την παγκόσμια βιβλιογραφία και έρευνα [15]. Το πρώτο θέμα εστιάζεται στο γεγονός ότι οι πληροφορίες είναι το συμπλήρωμα της αβεβαιότητας, το οποίο είναι αυτονόητο όταν η αβεβαιότητα διαχειρίζεται μέσω μοντέλων χάσματος πληροφορίας. Το δεύτερο θέμα έχει να κάνει με την αξία των πληροφοριών (value of information) και το πώς αυτή η αξία μπορεί να αξιολογηθεί από την σκοπιά της ενίσχυσης της ευρωστίας σε σχέση με την αβεβαιότητα (robustness-to-uncertainty) μιας απόφασης.

Σχετικά με το πρώτο θέμα, είναι δεδομένο ότι οι πληροφορίες είναι το συμπλήρωμα της αβεβαιότητας. Πρέπει παρόλα αυτά κάποιος να είναι σε θέση να εκμεταλλευτεί τις νέες πληροφορίες με τη βελτίωση των μοντέλων αβεβαιότητας που αυτός διαθέτει. Δεδομένου ότι η γνώση και η κατανόηση βελτιώνονται πρέπει να κάποιος να είναι σε θέση να διακρίνει και να διαφοροποιείται μεταξύ των εναλλακτικών δυνατοτήτων όπως για παράδειγμα η δυνατότητα επιλογής μεταξύ διαφορετικών μοντέλων συστημάτων. Αυτό παρακινεί τον ακόλουθο καθορισμό της σχετικής έλλειψης πληροφορίας μεταξύ δυο μοντέλων χάσματος πληροφορίας.

Λαμβάνοντας υπόψη δύο μοντέλα χάσματος πληροφορίας, $F_1(\alpha, \bar{f})$ και $F_2(\alpha, \bar{f})$, μπορεί να ειπωθεί ότι το πρώτο μοντέλο είναι πιο πληροφοριακό (informative) σε σχέση με το δεύτερο εάν ισχύει η σχέση

$$F_1(\alpha, \bar{f}) \subseteq F_2(\alpha, \bar{f}) \tag{14}$$

όπου $F_1(\alpha, \bar{f})$ είναι πιο πληροφοριακό υπό την έννοια ότι περιγράφει τη σειρά των δυνατοτήτων πιο περιοριστικά από το $F_2(\alpha, \bar{f})$ για αβεβαιότητα α.

Πρέπει να γίνει η αναφορά δύο επιφυλάξεων όσον αφορά το συνυπολογισμό της εξίσωσης (14) ως δοκιμή (test) για τη σχετική έλλειψη πληροφορίας δύο μοντέλων χάσματος πληροφορίας. Καταρχήν, η σχετική έλλειψη πληροφορίας (relative informativeness) δεν είναι μια απόλυτη ταξινόμηση όλων των μοντέλων χάσματος πληροφορίας. Μπορεί να συμβεί δύο μοντέλα να τέμνονται αλλά να μην συμπεριλαμβάνει το ένα το άλλο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι απλά τα μοντέλα δεν είναι ισόμετρα και οι πληροφορίες τους επομένως είναι διαφορετικές.

Δεύτερον, το F_1 είναι πιο πληροφοριακό από το F_2 υπό την έννοια ότι, εάν το F_1 ελέγχεται ως μοντέλο αβέβαιης απόκλισης, τότε το F_1 παρέχει μια ακριβέστερη εικόνα της πραγματικότητας από αυτό που θα παρέχονταν αν ελέγχονταν το F_2.

Στη συνέχεια εξετάζεται το δεύτερο θέμα που είναι η αξία της πληροφορίας. Γίνεται η υπόθεση δυο μοντέλων χάσματος πληροφορίας, τα οποία ταξινομούνται σχετικά με την έλλειψη πληροφορίας όπως προκύπτει από τη σχέση (14). Το F_1 είναι πιο πληροφοριακό από το F_2 αλλά το ερώτημα είναι αν η διαφορά μεταξύ τους είναι ουσιαστική ή είναι ασήμαντη. Στη συνέχεια, γίνεται η θεώρηση δύο μοντέλων ως αντικειμένων μελέτης των οποίων η επαλήθευση ή απόρριψη εξετάζεται από το ερώτημα του εάν αξίζει το F_1 την προσπάθεια να ελεγχθεί ακόμα κι αν απαιτείται μεγαλύτερη προσπάθεια από ότι για την επαλήθευση του F_2.

Σε αυτά τα ζητήματα δεν μπορεί να υπάρξει απόλυτη απάντηση. Η απάντηση προκύπτει από αυτό που κάποιος επιθυμεί να κάνει χρησιμοποιώντας τα μοντέλα. Στη συνέχεια διατυπώνεται το ζήτημα όσον αφορά τη σχέση της ευρωστίας με την αβεβαιότητα. Κάθε μοντέλο χάσματος πληροφορίας παράγει μια συνάρτηση ευρωστίας, η οποία καλείται ως $\hat{\alpha}_1(q, r_c)$ και $\hat{\alpha}_2(q, r_c)$ αντίστοιχα. Εύκολα αποδεικνύεται ότι αυτές οι συναρτήσεις ευρωστίας ταξινομούνται αριθμητικά εάν και μόνο εάν τα αντίστοιχα μοντέλα χάσματος πληροφορίας ταξινομούνται από την εξίσωση (14). Δηλαδή ο συνυπολογισμός της εξίσωσης (14) είναι ισοδύναμος με

$$\hat{\alpha}_1(q, r_c) \geq \hat{\alpha}_2(q, r_c) \tag{15}$$

Όσο πιο πληροφοριακό το μοντέλο χάσματος πληροφορίας, τόσο πιο εύρωστες αποφάσεις αυτό έχει ως έξοδο για οποιοδήποτε επίπεδο φιλοδοξίας r_c. Αυτό παρέχει μια σχετική αξιολόγηση των μοντέλων χάσματος πληροφορίας. Η αύξηση των πληροφοριών που απαιτείται για να ελεγχθεί το F_1 από το F_2 είναι πολύτιμη μέχρι το σημείο που η απόφαση q είναι πιο εύρωστη δεδομένης της αβεβαιότητας του F_1 από το F_2. Εάν μπορούν να προσδιοριστούν σημαντικά πιο εφικτές επιλογές με την επιλογή του μοντέλου F_1 σε σχέση με τις επιλογές που προκύπτουν με τη χρήση του μοντέλου F_2 προκύπτει το συμπέρασμα ότι το πρώτο μοντέλο είναι σημαντικά πολυτιμότερο από το δεύτερο. Είναι σαφές ότι η υποκειμενική αξιολόγηση των αυξήσεων της ευρωστίας με την χρήση γλωσσικών όρων όπως "μεγάλο" (large), "σημαντικό" (signficant), κ.λπ. δεν είναι ένας εύκολος στόχος [15], [16]. Εντούτοις, η επιλογή της ανάπτυξης ενός μοντέλου χάσματος πληροφορίας παρά κάποιου άλλου ντετερμινιστικού μοντέλου, πρέπει να εξαρτηθεί από τις αποφάσεις πάνω στις οποίες το μοντέλο θα στηριχθεί. Με τη σύγκριση των συναρτήσεων ευρωστίας για τα μοντέλα χάσματος πληροφορίας, αξιολογείται η σχετική χρησιμότητα των μοντέλων.

1.3 Απεικόνιση και Διάδοση της Αβεβαιότητας

Μέχρι τώρα έχει γίνει η παρουσίαση και εξήγηση της ερμηνείας των πληροφοριών οι οποίες συνοδεύουν κάθε πρόβλημα πρόκλησης (challenge problem) ως ενδεχόμενη, εμπειρική παραβολή ή περίληψη παρατηρήσεων. Στη συνέχεια, θα γίνει ο καθορισμός των προσεγγίσεων χάσματος πληροφορίας στην απεικόνιση και τη διάδοση της αβεβαιότητας.

Θα προταθούν δύο διαφορετικές πτυχές διάδοσης αβεβαιότητας ενώ αναλυτικότερα στην §1.3.1 θα γίνει αναλυτική παρουσίαση μιας από αυτές. Αυτό που διακρίνει τις δύο προσεγγίσεις είναι το διάστημα στο οποίο η ενημερωτική αβεβαιότητα (informational uncertainty) διαδίδεται. Στην πρώτη μέθοδο, η αβεβαιότητα διαδίδεται άμεσα στο διάστημα των αποκρίσεων του συστήματος που καθορίζεται από το πρόβλημα πρόκλησης. Στη δεύτερη μέθοδο, επάνω στην οποία θα γίνει η εστίαση, η αβεβαιότητα διαδίδεται στο διάστημα απόφασης. Είναι ο χώρος

όπου το μοντέλο χρησιμοποιείται για να επιλεγεί η κατάλληλη δράση. Με αυτήν τη μέθοδο, γίνεται επικέντρωση στο βαθμό στον οποίο η απόφαση τελικής χρήσης παρουσιάζει αστάθεια σε σχέση με την αβεβαιότητα στα αρχικά δεδομένα.

Στην §1.3.2, ερευνάτε η απεικόνιση της ανεπάρκειας δεδομένων σε ένα μοντέλο πληροφορίας χάσματος. Συγκεκριμένα, γίνεται επεξήγηση της εκτίμησης των παραμέτρων ενός μοντέλου χάσματος πληροφορίας βασισμένου στα δεδομένα.

Γίνεται η θεώρηση ότι $X(\alpha, \bar{x})$, για $\alpha \geq 0$ περιγράφει ένα μοντέλο χάσματος πληροφορίας δεδομένων που συνοψίζονται ως πληροφορίες του προβλήματος πρόκλησης. Το $X(\alpha, \bar{x})$ μπορεί να αντιπροσωπεύσει χάσματα πληροφορίας στις τιμές των παραμέτρων ή των συναρτήσεων, ή χάσματα πληροφορίας στις κατανομές πιθανότητας των οντοτήτων.

Η πρώτη μέθοδος, στην οποία δε θα γίνει εμβάθυνση, είναι η άμεση διάδοση (direct propagation). Το πρόβλημα πρόκλησης καθορίζει ένα σύστημα εισόδου/εξόδου (input/output system). Η αβεβαιότητα στην είσοδο οδηγεί το σύστημα στην παραγωγή αβεβαιότητας και στην έξοδο. Η είσοδος είναι το μοντέλο χάσματος πληροφορίας $X(\alpha, \bar{x})$ το οποίο αποτελεί οικογένεια ενθέτων συνόλων. Η έξοδος είναι η οικογένεια των συνόλων απόκρισης του συστήματος. Η ανεπάρκεια γνώσης διαδίδεται από το χάσμα πληροφορίας της βασικής πληροφορίας, σε ένα χάσμα πληροφορίας στο διάστημα απόκρισης. Δε θα ακολουθηθεί αυτή η κατεύθυνση περαιτέρω, αν και μπορεί να είναι χρήσιμη και συνεπάγεται πολλά ενδιαφέροντα ζητήματα.

1.3.1 Διάδοση Αβεβαιότητας από τα Δεδομένα στην Απόφαση

Στη δεύτερη μέθοδο, η εστίαση γίνεται στην σταθερότητα της απόφασης (decision stability). Πως η αβεβαιότητά για τα αρχικά δεδομένα διαδίδεται στην τελική απόφαση; Είναι η τελική απόφαση όσον αφορά την αρχική ανεπάρκεια πληροφορίας εύρωστη ή παρουσιάζεται με ανοσία, είναι σταθερή ή παρουσιάζεται με διακυμάνσεις; Το ζήτημα αυτό θα εξεταστεί χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις ευρωστίας όπως αυτές έχουν αναπτυχθεί έως τώρα. Δεδομένου ότι η αβεβαιότητα μπορεί να είναι ευνοϊκή καθώς επίσης και ολέθρια, θα ερευνηθεί επίσης εάν η τελική απόφαση είναι επιρρεπής σε σαρωτική επιτυχία λόγω των απρόβλεπτων ευνοϊκών

αποκλίσεων από τα ονομαστικά δεδομένα. Αυτό εξετάζεται με τη συνάρτηση ευκαιρίας.

Μια συνάρτηση ευρωστίας για την αξιολόγηση της σταθερότητας της απόφασης μπορεί να διατυπωθεί αν αρχικά γίνει η θεώρηση ότι το x είναι τα δεδομένα στα οποία υπάρχει αβεβαιότητα. Η ανεπάρκεια γνώσης σχετικά με το x απεικονίζεται από το μοντέλο χάσματος πληροφορίας $X(\alpha, \tilde{x})$, $\alpha \geq 0$. Τα δεδομένα, x, προκαλούν μια απόφαση $D(x)$. Ο αλγόριθμος απόφασης $D(x)$ μπορεί να είναι συνεχής και να λαμβάνει πραγματικές τιμές για να δείξει την επιλογή χρόνου, θέσης, ή κάποιας άλλης διάστασης. Ακόμη, το $D(x)$ μπορεί να λαμβάνει ακέραιες τιμές για να εκφράσει επιλογή μεταξύ ευδιάκριτων επιλογών.

Το ενδιαφέρον εστιάζεται στη διαμόρφωση των αρχικών δεδομένων, x, και της διάδοσης αυτής της αβεβαιότητας στο διάστημα απόφασης. Απαιτείται η αξιολόγηση του βαθμού δριμύτητας (degree of severity) αυτής της αβεβαιότητας των δεδομένων για την τελική χρήση αυτών των πληροφοριών. Η λειτουργία ευρωστίας αξιολογεί το βαθμό μεταβλητότητας των δεδομένων, ο οποίος είναι ανεκτός από τον τελικό χρήστη. Εάν αυτή η ευρωστία είναι μεγάλη, η αβεβαιότητα για το x είναι θετική. Η χαμηλή ευρωστία επηρεάζεται αρνητικά από τις ανεπαρκείς πληροφορίες. Δηλαδή η λειτουργία ευρωστίας εξετάζει τον αντίκτυπο που έχει η μεταβλητή x στον τελικό χρήστη.

Η απόφασή θα βασιστεί στην καλύτερη εκτίμηση (best-estimate) x_e του x η οποία μπορεί να ληφθεί στην κεντρική τιμή του μοντέλου χάσματος πληροφορίας. Μια συνηθισμένη συνάρτηση ευρωστίας [17] αξιολογεί τη σταθερότητα των πιθανών αποφάσεων $D(x)$ έναντι της απόφασης που θα ληφθεί πραγματικά, $D(x_e)$. Στη συνέχεια γίνεται η θεώρηση $|D(x) - D(x_e)|$, το οποίο αποτελεί και το μέτρο για το πόσο διαφορετικές είναι μεταξύ τους οι αποφάσεις. Η ευρωστία του αλγορίθμου απόφασης D είναι το μέγιστο χάσμα πληροφορίας στο x το οποίο δεν επιτρέπει την απόφαση $D(x)$ να αποκλίνει πέραν συγκεκριμένου κατωφλίου από το $D(x_e)$

$$\hat{\alpha}(D, r_c) = \max\left\{\alpha : \max_{x \in X(a,\tilde{x})} |\mathrm{D(x)} - \mathrm{D(x_e)}| \leq r_c\right\} \tag{16}$$

Η παράμετρος φιλοδοξίας r_c είναι η μέγιστη αποδεκτή διακύμανση της απόφασης που θα είχαμε λάβει εάν είχαμε χρησιμοποιήσει τα δεδομένα x (που δεν υπάρχουν στη διάθεση του υπεύθυνου απόφασης), σε σύγκριση με την απόφαση που

πραγματικά θα υπάρχει με την επιλογή των δεδομένων x_e (που είναι πραγματικά διαθέσιμα). Μια μεγάλη τιμή του $\hat{\alpha}(D, r_c)$ υπονοεί ότι τα δεδομένα μπορούν να αποκλίνουν πολύ χωρίς απαράδεκτα να προσκρούσουν στην απόφαση. Δηλαδή μεγάλη ευρωστία σημαίνει ότι τα στοιχεία δεν ποικίλλουν ολέθρια. Αφ' ετέρου, μικρή αξία του $\hat{\alpha}(D, r_c)$ υπονοεί ότι τα δεδομένα είναι επικίνδυνα ασταθή. Με άλλα λόγια, η συνάρτηση $\hat{\alpha}(D, r_c)$ αξιολογεί το βαθμό ολέθριας μεταβλητότητας (degree of pernicious variability) των αρχικών στοιχείων x σε σχέση με τη φιλοδοξία επιβίωσης του υπεύθυνου απόφασης ιθύνοντος r_c για την τελική χρήση $D(x)$.

Το r_c εκφράζει την ελάχιστη απαίτηση του υπεύθυνου απόφασης για τη σταθερότητα του αλγορίθμου. Ο υπεύθυνος απόφασης μπορεί να επιδιώξει την απόφαση η οποία θα εξασφαλίζει τη μεγαλύτερη σταθερότητα. Ας γίνει η θεώρηση ότι το r_w λαμβάνει πολύ μικρότερη τιμή διακύμανσης σε σχέση με την απόφαση με το r_c. Λαμβάνοντας μια σταθερότητα απόφασης τόσο καλή όσο το r_w θα μπορούσε να ειπωθεί ότι όχι μόνο έχει εξασφαλιστεί η επιβίωση αλλά πρόκειται για ένα ιδιαίτερα επιθυμητό αναπάντεχο κέρδος. Η συνάρτηση ευκαιρίας αξιολογεί την ανοσία στο αναπάντεχο κέρδος και είναι το χαμηλότερο επίπεδο χάσματος πληροφορίας στα δεδομένα που επιτρέπονται, αλλά δεν εγγυάται αυτό το αναπάντεχο κέρδος. Η συνάρτηση ευκαιρίας δίνεται από τη σχέση

$$\hat{\beta}(D, r_w) = \min\left\{\alpha : \min_{x \in X(a,\bar{x})} \left|\mathrm{D(x)} - \mathrm{D(x_e)}\right| \le r_w\right\} \tag{17}$$

Μια μικρή τιμή της συνάρτησης ευκαιρίας $\hat{\beta}(D, r_w)$ σημαίνει ότι ο αλγόριθμος απόφασης είναι κατάλληλος και το αναπάντεχο κέρδος είναι πολύ πιθανό. Όσον αφορά την αβεβαιότητα των δεδομένων, μια μικρή τιμή του $\hat{\beta}(D, r_w)$ υπονοεί επικείμενες ευνοϊκές διακυμάνσεις του x. Η συνάρτηση $\hat{\beta}(D, r_w)$ αξιολογεί το βαθμό ευνοϊκής μεταβλητότητας των αρχικών δεδομένων x όσον αφορά τη φιλοδοξία αναπάντεχου κέρδους r_w του υπεύθυνου απόφασης για την τελική χρήση $D(x)$.

1.3.2 Αναπαράσταση Αβεβαιότητας με τη χρήση Μοντέλων Χάσματος Πληροφορίας

Στην παράγραφο §1.3.1, αναλύθηκε η σταθερότητα απόφασης με τη χρησιμοποίηση ενός δεδομένου μοντέλου $X(\alpha, \bar{x})$ για την αναπαράσταση της αβεβαιότητας στα αρχικά δεδομένα. Στη συνέχεια χρησιμοποιείται το μοντέλο χάσματος πληροφορίας για να κατασκευαστούν οι συναρτήσεις απόφασης ανοσίας (decision-immunity functions ή συναρτήσεις ευρωστίας και ευκαιρίας). Αυτές οι συναρτήσεις ανοσίας αξιολογούν τη διάδοση της αβεβαιότητας των δεδομένων στην περιοχή απόφασης. Σε αυτήν την παράγραφο, θα διατυπωθεί πως το $X(\alpha, \bar{x})$ διατυπώνεται και ενημερώνεται βάσει των μετρήσεων. Δηλαδή το ενδιαφέρον εστιάζεται στη διαμόρφωση του χάσματος πληροφορίας. Γίνεται η υπόθεση μιας συλλογής δεδομένων X_i, $i \in I$, όπου I είναι ένα σύνολο δεικτών που προσδιορίζουν τα δεδομένα. Επίσης, γίνεται η θεώρηση ότι κάθε X_i αποτελεί ένα σύνολο μετρήσεων. Αυτό το σύνολο μπορεί να περιέχει έναν απλό αριθμό ή ένα διάνυσμα μετρήσεων ή μπορεί να είναι ένα άπειρο σύνολο τιμών δεδομένων βασισμένων σε μετρήσεις. Αυτά τα σύνολα δεδομένων θα χρησιμοποιηθούν για να γίνει η επιλογή των ιδιοτήτων και παραμέτρων ενός μοντέλου χάσματος πληροφορίας $X(\alpha, \bar{x})$. Οι ιδιότητες που θα επιλεγούν θα καθορίσουν τον τύπο μοντέλου χάσματος πληροφορίας. Μερικοί τύποι μοντέλων χάσματος για παράδειγμα είναι το διάστημα (interval), το ελλιψοειδές (ellipsoid), το ολοκλήρωμα ενέργειας (integral-energy). Οι παράμετροι που καθορίζονται μπορούν να είναι οποιεσδήποτε από τις ποσότητες που διευκρινίζουν τη συγκεκριμένη δομή του μοντέλου χάσματος πληροφορίας, όπως το κεντρικό σημείο. Γίνεται η θεώρηση ότι το q είναι ένα διάνυσμα που διευκρινίζει αυτές τις ιδιότητες και παραμέτρους.

Η προσέγγιση που λαμβάνεται για να διατυπωθεί και να ενημερωθεί ένα μοντέλο χάσματος πληροφορίας περιλαμβάνει δύο στάδια. Καταρχήν, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα για να αξιολογηθεί μια εμπειρική συνάρτηση ευρωστίας, $\hat{\alpha}_e(q, r_c)$. Αυτό μπορεί να γίνει ακολουθώντας διαφορετικούς τρόπους ή διαφορετικές ερμηνείες αλλά πάντα με κατάλληλη επιλογή έτσι ώστε το μοντέλο να είναι κατάλληλο στα διαφορετικά προβλήματα. Αυτό γίνεται με την εξέταση της προσέγγισης με την οποία το $\hat{\alpha}_e(q, r_c)$ αξιολογεί την αξιοπιστία μεταξύ των

δεδομένων και του μοντέλου χάσματος πληροφορίας. Σε δεύτερο στάδιο, επιλέγεται το q για να βελτιστοποιηθεί η αξιοπιστία του μοντέλου χάσματος πληροφορίας στα δεδομένα. Αυτό γίνεται με κατάλληλη επιλογή του q έτσι ώστε να ελαχιστοποιηθεί το $\hat{\alpha}_e(q, r_c)$.

Ας γίνει η θεώρηση ότι το $X_q(\alpha, \bar{x})$ περιγράφει το μοντέλο χάσματος πληροφορίας που διευκρινίζεται από την αναπροσαρμογή του διανύσματος q. Η συνάρτηση χάσματος (gap function) για το σύνολο δεδομένων X, όσον αφορά το $X_q(\alpha, \bar{x})$, είναι το μικρότερο χάσμα πληροφορίας στο οποίο το $X_q(\alpha, \bar{x})$ είναι σύμφωνο (consistent) με το X και δίνεται από τη σχέση

$$\Gamma(X, q) = \min\{\alpha : X \subseteq X_q(\alpha, \bar{x})\} \tag{18}$$

Εάν η τιμή της συνάρτησης $\Gamma(X, q)$ είναι μικρή, τότε το $X_q(\alpha, \bar{x})$ είναι ιδιαίτερα σύμφωνο με τα στοιχεία X. Ένα μεγάλο χάσμα υπονοεί χαμηλή αξιοπιστία μεταξύ του μοντέλου και των δεδομένων.

Ας υποτεθεί ότι έχουμε την καλύτερη εκτίμηση των δεδομένων που συμβολίζεται ως X_e. Δηλαδή το X_e είναι η αναμένουσα τιμή μιας χαρακτηριστικής αξίας, ή σύνολο τιμών των δεδομένων. Στη συνέχεια, θεωρείται το X_e ως το σύνολο για να κρατηθεί η σημείωσή μας συνεπής. Ας θεωρηθεί ότι το $p(X, X_e)$ είναι ένα μέτρο της διαφοράς μεταξύ των δεδομένων X και της καλύτερης εκτίμησης X_e. (Σε άλλες προσεγγίσεις όπου στόχος είναι η αναπροσαρμογή, δε χρειαζόμαστε την εκτίμηση X_e).

Η εμπειρική ευρωστία είναι το μέγιστο χάσμα πληροφορίας α στο οποίο δεδομένα που δε διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους αλλά και σύμφωνα με το $X_q(\alpha, \bar{x})$. Η εμπειρική ευρωστία δίνεται από τη σχέση

$$\hat{\alpha}_e(q, r_c) = \max\{\Gamma(X_i, q), i \in I : \Gamma(X_j, q) \le \Gamma(X_i, q) \text{εαν } p(X_j, X_e) \le r_c, j \in I\} \tag{19}$$

Η κατανόηση της εμπειρικής ευρωστίας μπορεί να γίνει εάν αρχικά θεωρήσουμε ότι το σύνολο των δεδομένων X_j είναι χωρίς αποκλίσεις (outlier) και δε διαφέρει από την αναμενόμενη τιμή X_e πολύ. Αυτό δίνεται από τον όρο $p(X_j, X_e) \le r_c$. Ανάλογα με το βαθμό επιείκειας/απόκλισης που χρειάζεται μπορεί να

γίνει και η κατάλληλη επιλογή του r_c. Η εμπειρική ευρωστία είναι το μέγιστο χάσμα πληροφορίας $X_q(\alpha, \bar{x})$ το οποίο περιλαμβάνει όλα τα μη απομακρυσμένα δεδομένα.

Θα μπορούσε επίσης να επισημανθεί η ομοιότητα μεταξύ της βελτιστοποίησης της σχέσης (19) και της κανονικοποίησης Tikhonov [18]. Η ομοιότητα είναι ότι τα δεδομένα είναι κανονικοποιημένα (σταθεροποιημένα) γύρω από το X_e, με το r_c ως παράμετρο κανονικοποίησης. Η βελτιστοποίηση εμπλέκεται με τη σύγκριση μεταξύ των διακριτών συνόλων δεδομένων X_i και X_j. Το μοντέλο χάσματος πληροφορίας είναι συμβατό με τα δεδομένα αν το $X_q(\alpha, \bar{x})$ συλλαμβάνει τα δεδομένα σε έναν χαμηλό ορίζοντα της αβεβαιότητας. Δηλαδή μια μικρή τιμή του $\hat{\alpha}_e(q, r_c)$ δείχνει υψηλή αξιοπιστία των δεδομένων του μοντέλου χάσματος πληροφορίας. Ως εκ τούτου, γίνεται η ενημέρωση του μοντέλου χάσματος πληροφορίας, βασισμένο στα δεδομένα X_i, $i \in I$ επιλέγοντας q τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιεί την εμπειρική ευρωστία. Το βέλτιστο μοντέλο, $\hat{q}$, καθορίζεται από τη σχέση

$$\hat{\alpha}_e(\hat{q}, r_c) = \min_q \hat{\alpha}_e(q, r_c) \tag{20}$$

1.4 Επισκόπηση Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 1ο παρουσιάστηκε η θεωρία χάσματος πληροφορίας η οποία χρησιμοποιείται στο πακέτο προγραμμάτων (ή μοντέλο) που αναπτύχθηκε για να μοντελοποιηθεί η έντονη αβεβαιότητα η οποία εμφανίζεται στα προβλήματα μακροχρόνιας ενεργειακής διαχείρισης πόρων. Αποτελεί την καρδιά της εύρωστης λήψης αποφάσεων.

Παρόλα αυτά πριν την εφαρμογή της εύρωστης λήψης απόφασης είναι σημαντικό να παρουσιαστεί το μοντέλο το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για να περιγραφεί το ενεργειακό σύστημα που είναι πολύ σημαντικό. Αυτό το μοντέλο είναι το TIMES και παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 2ο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ TIMES

2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το Κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν και θα συζητηθούν τα κύρια χαρακτηριστικά του μοντέλου TIMES (TIMES model) και της παγκόσμιας εκδοχής του ως ETSAP-TIAM. Το μοντέλο TIMES θεωρείται ως απόγονος των ευρέως διαδεδομένων μοντέλων MARKAL και EFOM, στα οποία προστέθηκαν νέα χαρακτηριστικά για να επεκταθούν οι λειτουργίες και οι δυνατότητες εφαρμογής με σκοπό τη βαθύτερη κατανόηση και ανάλυση των ενεργειακών συστημάτων και την ανάπτυξη πολιτικών για το περιβάλλον. Επίσης, στο Κεφάλαιο αυτό τονίζεται η τεχνολογική φύση του μοντέλου, η οικονομική του θεώρηση και οι ιδιότητές του. Στο Κεφάλαιο αυτό θα γίνει η ανάλυση τόσο του εννοιολογικού και πρακτικού κομματιού του μοντέλου όσο και της δομής του μοντέλου αφού θα γίνει λεπτομερής διατύπωση των μαθηματικών εξισώσεων με τις οποίες περιγράφεται το μοντέλο TIMES. Ειδική μνεία γίνεται στην περιγραφή τεσσάρων προαιρετικών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων του μοντέλου TIMES που είναι οι άμορφες επενδύσεις (lumpy investments), η ενδογενής τεχνολογία μάθησης (endogenous technology learning), ο στοχαστικός προγραμματισμός (stochastic programming) και η υπομονάδα του κλίματος (climate module). Επιπλέον, θα γίνει συνοπτική παρουσίαση των πρόσφατων εφαρμογών του μοντέλου. Ειδικά, στα πλαίσια της ανάλυσης του μαθηματικού κορμού του μοντέλου TIMES, η περιγραφή θα γίνει σε μια μορφή τριών τμημάτων όπου στο πρώτο τμήμα θα παρουσιαστεί η απλουστευμένη διατύπωση του

γραμμικού προγράμματος του μοντέλου TIMES, στο δεύτερο τμήμα θα παρουσιαστούν οι λεπτομέρειες του υπολογισμού της ισορροπίας μεταξύ προσφοράς και ζήτησης (supply demand equilibrium) ενώ στο τρίτο μέρος θα γίνει η παρουσίαση της Ενδογενούς Διατύπωσης Εκμάθησης Τεχνολογίας (Endogenous Technology Learning Formulation) [19].

2.2 Εισαγωγικά Στοιχεία του Μοντέλου TIMES

Το μοντέλο ETSAP TIMES (αρκτικόλεξο του Ενσωματωμένου Συστήματος MARKAL-EFOM ή The Integrated MARKAL-EFOM System), αναπτύχθηκε και εξελίσσεται από το ETSAP (Πρόγραμμα Ανάλυσης Συστημάτων Ενεργειακής Τεχνολογίας ή Energy Technology Systems Analysis Programme ETSAP) που λειτουργεί υπό την αιγίδα της IEA (Αντιπροσωπείας Διεθνούς Ενέργειας ή International Energy Agency). Το ολοκληρωμένο μοντέλο αποτίμησης TIMES (TIMES integrated assessment model ή ETSAP-TIAM) είναι η παγκόσμια πολυπεριφερειακή υλοποίηση της γεννήτριας TIMES.

Το μοντέλο TIMES είναι μια πρότυπη γεννήτρια για τοπικά, εθνικά ή πολυπεριφερειακά ενεργειακά συστήματα, η οποία παρέχει μια πλούσια βάση τεχνολογίας για την ενεργειακή δυναμική πέρα από έναν μακροπρόθεσμο, πολλών περιόδων χρονικό ορίζοντα. Εφαρμόζεται συνήθως στην ανάλυση ολόκληρου του τομέα της ενέργειας, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί στη λεπτομερή μελέτη ενιαίων τομέων όπως για παράδειγμα ηλεκτρική ενέργεια και τον τομέα της θερμότητας περιοχής.

Στο μοντέλο TIMES, από το χρήστη για κάθε περιοχή παρέχονται οι περιπτώσεις αναφοράς της ζήτησης ενεργειακών υπηρεσιών τελικής χρήσης (reference case projections of end-use energy service demands) όπως για παράδειγμα η ζήτηση ενέγειας για μεταφορές, για φωτισμό κατοικημένων περιοχών, για παραγωγή χάλυβα κτλ. Επιπλέον, ο χρήστης παρέχει τις εκτιμήσεις του υπάρχοντος αποθέματος του σχετικού με την ενέργεια εξοπλισμού σε όλους τους τομείς στο έτος αναφοράς και τα χαρακτηριστικά των διαθέσιμων μελλοντικών τεχνολογιών, όπως παρούσες και μελλοντικές πηγές προσφοράς ενέργειας (primary energy supply) και δυναμικό αυτών. Χρησιμοποιώντας αυτές τις μεταβλητές ως εισόδους, το μοντέλο

δίνει ως έξοδο την παροχή ενεργειακών υπηρεσιών με το ελάχιστο συνολικό κόστος (minimum global cost) ή ακριβέστερα με την ελάχιστη απώλεια συνολικού πλεονάσματος (minimum loss of total surplus) λαμβάνοντας ταυτόχρονα αποφάσεις σχετικές με την επένδυση σε εξοπλισμό (equipment investment), τη λειτουργία εξοπλισμού (equipment operation), την προσφορά ενέργειας και το ενεργειακό εμπόριο (energy trade). Το μοντέλο TIMES είναι έτσι ένα κάθετα ολοκληρωμένο μοντέλο ολόκληρου του ενεργειακού συστήματος.

Το πεδίο του μοντέλου επεκτείνεται ώστε να περιλάβει ζητήματα πέραν από τα απολύτως σχετικά με τα ζητήματα της ενέργειας όπως τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών εκπομπών. Το μοντέλο προσεγγίζει την ανάλυση των ενεργειακών πολιτικών για το περιβάλλον, οι οποίες μπορούν να περιγραφούν με ακρίβεια χάρη στην ακρίβεια της περιγραφής των τεχνολογιών και των καυσίμων σε όλους τους τομείς. Στο μοντέλο TIMES, οι ποσότητες και οι τιμές των διαφόρων προϊόντων προκύπτουν από την κατάσταση ισορροπίας του συστήματος (in equilibrium), δηλαδή οι τιμές και οι ποσότητές των διαφόρων προϊόντων είναι κάθε φορά τέτοιες που οι προμηθευτές παράγουν ακριβώς αυτές τις ποσότητες που απαιτούνται από τους καταναλωτές. Αυτή η ισορροπία έχει την ιδιότητα να μεγιστοποιεί το συνολικό πλεόνασμα (πλεόνασμα των καταναλωτών συν το πλεόνασμα των παραγωγών).

Επιπλέον, το μοντέλο TIMES περιλαμβάνει ενότητα σχετική με το κλίμα. Σε αυτήν την ενότητα υπολογίζεται ο αντίκτυπος των αποφάσεων των σχετικών με τα ενεργειακά ζητήματα στο περιβάλλον (εκπομπές αερίων, συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου, προκύπτουσες αλλαγές στην ατμοσφαιρική συγκέντρωση, πρόβλεψη παγκόσμιας θερμοκρασίας κτλ). Η ενότητα κλίμα του μοντέλου TIMES είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στο TIAM.

Το μοντέλο TIMES αναπτύχθηκε ως διάδοχος των από κάτω-προς-τα-άνω ενεργειακών μοντέλων (bottom-up energy models) δηλαδή του μοντέλου MARKAL [20], [21], [22] και του μοντέλου EFOM [23], [24]. Το μοντέλο TIMES ενσωματώνει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των προγόνων του όπως επίσης και κάποια νέα χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Από το μοντέλο MARKAL, το μοντέλο TIMES κληρονομεί τη λεπτομερή περιγραφή των τεχνολογιών, την έννοια των RES και τις ιδιότητες της ισορροπίας (equilibrium properties). Από το μοντέλο EFOM, το μοντέλο TIMES κληρονομεί τη λεπτομερή απεικόνιση των ενεργειακών ροών στο επίπεδο τεχνολογίας. Επιπλέον, το μοντέλο TIMES παρουσιάζει τα κάτωθι

χαρακτηριστικά γνωρίσματα που δεν ήταν παρόντα στα μοντέλα των προκατόχων του (τουλάχιστον στις προηγούμενες υλοποιήσεις τους):

- Περίοδοι μεταβλητού μήκους (variable length periods).
- Τεχνολογίες χρονοεξαρτώμενης παραγωγής (vintaged technologies).
- Λεπτομερής αναπαράσταση των ταμειακών ροών (cash flows) στην αντικειμενική συνάρτηση (objective function).
- Τεχνολογίες που παρουσιάζουν ευέλικτες εισόδους (flexible inputs) και ευέλικτες εξόδους (flexible outputs).
- Στοχαστικό προγραμματισμό με αποστροφή στον κίνδυνο (stochastic programming with risk aversion).
- Μονάδα κλίματος.
- Ενδογενές ενεργειακό εμπόριο μεταξύ των περιοχών (endogenous energy trade between regions).

2.3 Είσοδοι και Έξοδοι του Μοντέλου TIMES

2.3.1 Σενάριο Εισόδου στο Μοντέλο TIMES

Το μοντέλο TIMES διερευνά πιθανά μακροπρόθεσμα ενεργειακά σενάρια. Λειτουργώντας σε μακροπρόθεσμους χρονικούς ορίζοντες, οι οποίοι μπορούν να προσομοιωθούν στο μοντέλο TIMES μέχρι το 2100 στις τρέχουσες εκδόσεις του μοντέλου, η προσέγγιση σεναρίου (scenario approach) είναι πραγματικά η μόνη επιλογή που μπορεί να δώσει αξιόπιστα αποτελέσματα. Τα σενάρια, αντίθετα από τις προβλέψεις, δεν προϋποθέτουν τη γνώση προόδου (advance knowledge) των κύριων οδηγών (main drivers) του ενεργειακού συστήματος.

Αντ' αυτού, ένα σενάριο αποτελείται από ένα σύνολο συνεπών υποθέσεων (coherent assumptions) για τις μελλοντικές τροχιές (trajectories) αυτών των οδηγών, που οδηγούν συνολικά σε μια συνεπή οργάνωση του υπό μελέτη συστήματος. Ένας δημιουργός σεναρίου (scenario builder) πρέπει επομένως να εξετάσει προσεκτικά τις υποθέσεις που γίνονται για την εσωτερική συνοχή (internal coherence), μέσω ενός

αξιόπιστου πλάνου εργασίας (storyline). Στο μοντέλο TIMES, ένα πλήρες σενάριο αποτελείται από τέσσερις τύπους εισαγωγών:

- Ζητήσεις ενεργειακών υπηρεσιών (energy service demands).
- Αρχικές δυνατότητες πόρων (primary resource potentials).
- Πολιτική που έχει τεθεί (policy setting).
- Περιγραφές ενός συνόλου τεχνολογιών (descriptions of a set of technologies).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται σχόλια σε κάθε ένα από τα άνω τέσσερα συστατικά στοιχεία.

2.3.1.1 Το Συστατικό της Ζήτησης στο Μοντέλο TIMES

Στο μοντέλο TIMES, το σύνολο τροχιών ζήτησης (set of demand trajectories) γίνεται αρχικοποιώντας τις τιμές που λαμβάνουν οι διάφοροι οδηγοί ζήτησης (demand drivers) όπως είναι ο πληθυσμός, το Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ ή GDP), οι έξοδοι συγκεκριμένων τομέων της οικονομικής ζωής, κ.λ.π. Αυτοί οι δείκτες λαμβάνονται εξωτερικά, μέσω άλλων μοντέλων (όπως το GEMINI-E3) ή από αποδεκτές εξωτερικές πηγές. Ας σημειωθεί ότι το μοντέλο GEMINI-E3 χρησιμοποιεί άλλους οδηγούς ως εισόδους προκειμένου να παραχθούν τα αποτελέσματά του όπως για παράδειγμα υποθέσεις σχετικά με την τεχνολογική πρόοδο, τον πληθυσμό και το εμπορικό καθεστώς. Για τις προβλέψεις πληθυσμών (population projections) και τις προβλέψεις νοικοκυριών (household projections) χρησιμοποιούνται ευρέως διαδεδομένα και αποδεδειγμένα στη χρήση μοντέλα [25], [26], [108]. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλες προσεγγίσεις για παραχθούν οι οδηγοί για το μοντέλο TIMES, που μπορεί να είναι είτε μέσω άλλων μοντέλων είτε μέσω άλλων μέσων. Οι εκδόσεις του TIAM οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν από το 2004 έως το 2006 χρησιμοποιούσαν το μοντέλο GEM-E3 αντί του GEMINI-E3 για να παραχθούν οι οδηγοί ζήτησης.

Μόλις καθοριστούν και ποσοτικοποιηθούν οι οδηγοί για το μοντέλο TIMES, η δημιουργία του σεναρίου ζήτησης αναφοράς (reference demand scenario) απαιτεί ένα σύνολο ζητήσεων ενεργειακών υπηρεσιών κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα στον οποίο το σενάριο θα λειτουργήσει. Αυτό γίνεται με την επιλογή των ελαστικοτήτων των ζητήσεων σε σχέση με τον αντίστοιχο οδηγό (elasticities of

demands to their respective drivers) σε κάθε περιοχή, χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο γενικό τύπο:

$$Demand = Driver^{Elasticity} \quad (1)$$

Οι ελαστικότητες των ζητήσεων σε σχέση με τους αντίστοιχους οδηγούς παριστάνουν το βαθμό αποσύζευξης μεταξύ των οδηγών και των ζητήσεων (degree of decoupling between the drivers and the demands).

Οι ζητήσεις παρέχονται από το χρήστη μόνο για το σενάριο αναφοράς. Όταν το μοντέλο οργανώνεται για εναλλασσόμενα σενάρια όπως για παράδειγμα για μια περίπτωση περιορισμένης εκπομπής ή για ένα σύνολο εναλλασσόμενων τεχνολογικών υποθέσεων, είναι πιθανό ότι οι ζητήσεις θα επηρεαστούν. Το μοντέλο TIMES έχει την ικανότητα του υπολογισμού του επηρεασμού των ζητήσεων στους μεταβαλλόμενους όρους ενός εναλλασσόμενου σεναρίου. Για να γίνει αυτό, το μοντέλο απαιτεί ακόμη ένα σύνολο μεταβλητών εισόδου που είναι οι υποτιθέμενες ελαστικότητες των ζητήσεων στις τιμές τους (elasticities of the demands to their own prices). Το μοντέλο TIMES έπειτα μπορεί να ρυθμίσει ενδογενώς τις ζητήσεις στις εναλλασσόμενες περιπτώσεις. Στην πραγματικότητα, το μοντέλο TIMES οδηγείται όχι από τις ζητήσεις αλλά από τις καμπύλες ζήτησης (demand curves).

2.3.1.2 Το Συστατικό της Προσφοράς στο Μοντέλο TIMES

Το δεύτερο συστατικό ενός σεναρίου είναι ένα σύνολο καμπυλών προσφοράς (supply curves) για την πρωτογενή ενέργεια και τους υλικούς πόρους. Οι πολλών βαθμίδων καμπύλες προσφοράς (multi-stepped supply curves) μπορούν να διαμορφωθούν εύκολα στο μοντέλο TIMES, με κάθε βαθμίδα να αναπαριστά ένα ορισμένο δυναμικό (potential) του διαθέσιμου πόρου με το κόστος του. Σε μερικές περιπτώσεις, το δυναμικό μπορεί να εκφραστεί είτε ως συσωρευτική δυνατότητα πέραν του ορίζοντα του μοντέλου (cumulative potential over the model horizon) όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των αποθεμάτων φυσικού αερίου και ακατέργαστου πετρελαίου είτε ως δυναμικό πέραν της βάσης των πόρων (potential over the resource base) όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των διαθεσίμων περιοχών για ανεμογεννήτριες που διαφοροποιούνται από τις ταχύτητες του ανέμου, του διαθεσίμου καλλιεργήσιμου εδάφους για βιοκαλλιέργεια, τις περιοχές στεγών για

φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις είτε ως ετήσιο δυναμικό όπως για παράδειγμα στην περίπτωση των μέγιστων ρυθμών εξαγωγών (maximum extraction rates), της ετήσιας διαθεσιμότητας αιολικής ενέργειας (annual available wind), της βιομάζα και του δυναμικού από υδροηλεκτρική ενέγεια (υδρενέργεια ή hydro potentials). Ας σημειωθεί ότι το τμήμα της προσφοράς περιλαμβάνει επίσης τον προσδιορισμό των δυναμικών εμπορικών συναλλαγών.

2.3.1.3 Το Συστατικό της Πολιτικής στο Μοντέλο TIMES

Στο μέτρο που μερικές πολιτικές προσκρούουν και συμπεριλαμβάνονται στο ενεργειακό σύστημα, μπορούν να γίνουν επιπλέον ένα αναπόσπαστο τμήμα του καθορισμού ενός σεναρίου. Παραδείγματος χάριν, ένα σενάριο που δε λαμβάνει υπόψη πολιτικές (no-policy scenario) μπορεί να αγνοήσει εντελώς τις εκπομπές των διάφορων ρύπων, ενώ ένα σενάριο που λαμβάνει υπόψη εναλλακτικά σενάρια πολιτικών (alternate policy scenarios) μπορεί να επιβάλουν περιορισμούς εκπομπών, ή φόρους εκπομπής. Η λεπτομερής τεχνολογική φύση του μοντέλου TIMES επιτρέπει την προσομοίωση μιας ευρείας ποικιλίας τόσο μοντέλων μέτρων αξιολόγησης (micromeasures) όπως είναι τα τεχνολογικά χαρτοφυλάκια (technology portfolios) και οι στοχοθετημένες επιχορηγήσεις σε ομάδες τεχνολογίας (targeted subsidies to groups of technologies) όσο και ευρύτερων πολιτικών στόχων όπως είναι ο γενικός φόρος άνθρακα (general carbon tax) ή το σύστημα εμπορικών συναλλαγών παραγόντων εκπομπών αερίου (trading system on air contaminants) Ένα απλούστερο παράδειγμα πολιτικής είναι η πυρηνική πολιτική που περιορίζει τη μελλοντική επέκταση των πυρηνικών εγκαταστάσεων. Ένα άλλο παράδειγμα είναι η επιβολή φόρων στα καύσιμα ή η χορήγηση βιομηχανικών επιχορηγήσεων.

2.3.1.4 Το Συστατικό των Τεχνοοικονομικών στο Μοντέλο TIMES

Το τέταρτο και τελευταίο συστατικό ενός σεναρίου είναι το σύνολο τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη για το μετασχηματισμό των αρχικών πόρων σε ενεργειακές υπηρεσίες. Στο μοντέλο TIMES, αυτές οι

τεχνοοικονομικές παράμετροι περιγράφονται με τη μορφή τεχνολογιών (ή διαδικασιών) που μετασχηματίζουν μερικά προϊόντα σε άλλα (καύσιμα, υλικά, ενεργειακές υπηρεσίες, εκπομπές). Μερικές τεχνολογίες μπορούν να επιβληθούν ενώ άλλες μπορούν απλά να είναι διαθέσιμες στο μοντέλο που έχει επιλεχθεί. Το μοντέλο TIMES στηρίζεται σε ένα πλούσιο, καλά αναπτυγμένο σύνολο τεχνολογιών, τόσο σημερινών όσο και μελλοντικών. Η έμφαση που δίνεται στην τεχνολογική βάση δεδομένων είναι ένας από τους κύριους και σημαντικότερους παράγοντες της κατηγορίας των μοντέλων των από κάτω-προς-τα-άνω (bottom-up models), στα οποία ανήκει και το μοντέλο TIMES (Αν και το μοντέλο TIMES δεν καλύπτει τις μακροοικονομικές μεταβλητές πέρα από τον τομέα της ενέργειας, με το να λαμβάνει υπόψη την ελαστικότητα των τιμών σε σχέση με τις ζητήσεις συλλαμβάνει ένα σημαντικό στοιχείο των αποτελεσμάτων ανατροφοδότησης μεταξύ του ενεργειακού συστήματος και της οικονομίας. Άλλες κατηγορίες μοντέλων τείνουν να υπογραμμίσουν άλλες πτυχές του συστήματος όπως για παράδειγμα τις αλληλεπιδράσεις με το υπόλοιπο της οικονομίας. Αυτές οι κατηγορίες μοντέλων μεταχειρίζονται το τεχνικό σύστημα κατά τρόπο συντομότερο μέσω των συνολικών λειτουργιών παραγωγής (aggregate production functions). Πρέπει τέλος να τονιστεί ότι δύο σενάρια μπορεί να διαφέρουν σε όλα ή μόνο σε μερικά από τα συστατικά τους. Παραδείγματος χάριν, το ίδιο σενάριο ζήτησης μπορεί πολύ καλά να οδηγήσει διάφορα σενάρια διαφοροποιώντας τις αρχικές δυνατότητες των πόρων ή/και των τεχνολογιών ή/και των πολιτικών, στο μέτρο που οι εναλλακτικές υποθέσεις σεναρίου δεν αλλάζουν τις βασικές εισόδους ζήτησης που είναι οι οδηγοί και οι ελαστικότητες. Ο δημιουργός του σεναρίου πρέπει πάντα να είναι προσεκτικός για τη γενική συνοχή των διαφόρων υποθέσεων που γίνονται στα τέσσερα συστατικά ενός σεναρίου.

2.3.2 Σενάριο Εξόδου στο Μοντέλο TIMES

Σε κάθε σενάριο, το μοντέλο TIMES δίνει ως έξοδο δύο τύπους αποτελεσμάτων. Αρχικά, παρέχεται η πρωταρχικής σπουδαιότητας λύση του γραμμικού προγράμματος για κάθε χρονική περίοδο και σε κάθε περιοχή μέσα από:

- Ένα σύνολο επενδύσεων σε όλες τις τεχνολογίες.

- Τα επίπεδα λειτουργίας όλων των τεχνολογιών (operating levels of all technologies).
- Εισαγωγές και εξαγωγές κάθε τύπου εμπορεύσιμων ενεργειακών μορφών και υλικών.
- Τα επίπεδα εξαγωγής κάθε μορφής και υλικού πρωτογενούς ενέργειας.
- Τις ροές κάθε εταιρίας (ηλεκτρισμού και μη) από κάθε τεχνολογία.
- Τις εκπομπές κάθε ουσίας από κάθε τεχνολογία, κάθε τομέα και σύνολο.
- Τις αλλαγές στη συγκέντρωση των αερίων θερμοκηπίου.
- Την επάγουσα ακτινοβολία που προκαλείται από την ατμοσφαιρική συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα.
- Την αλλαγή στην παγκόσμια θερμοκρασία που προκαλείται από την αλλαγή της επάγουσας ακτινοβολίας.

Επιπλέον, η διπλή λύση (dual solution) του γραμμικού προγράμματος παρέχει:

- Τις τιμές σκιών (shadow price) κάθε εταιρίας η οποία συμμετέχει στο RES (ενεργειακή μορφή, ζήτηση, εκπομπή, πρώτες ύλες).
- Το μειωμένο κόστος κάθε τεχνολογίας (reduced cost of each technology) στο RES, δηλαδή η απαραίτητη μείωση δαπανών για να κατασταθεί η τεχνολογία ανταγωνιστική.

2.4 Η Δομή του Μοντέλου TIMES

Λειτουργικά, η εκτέλεση του μοντέλου TIMES διαμορφώνει το ενεργειακό σύστημα (energy system) ενός συνόλου περιοχών σε ένα καθορισμένο χρονικό ορίζοντα με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το καθαρό συνολικό κόστος (minimize the net total cost) ή να μεγιστοποιηθεί ισοδύναμα το καθαρό συνολικό πλεόνασμα (maximize the net total surplus) του συστήματος ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται οι διάφοροι περιορισμοί οι οποίοι έχουν τεθεί.

2.4.1 Δομή και Δεδομένα του Μοντέλου TIMES

Είναι χρήσιμο να γίνει η διάκριση μεταξύ της δομής ενός μοντέλου (model's structure) και μιας ιδιαίτερης περίπτωσης εφαρμογής του. Η δομή ενός μοντέλου εξηγεί τη θεμελιώδη προσέγγιση για την υλοποίηση και την ανάλυση ενός προβλήματος που δεν αλλάζει από μια εφαρμογή στην επόμενη. Όλα τα μοντέλα TIMES εκμεταλλεύονται την ίδια μαθηματική δομή. Εντούτοις, κάθε περίπτωση διαφέρει σύμφωνα με τις εισαγωγές των δεδομένων. Παραδείγματος χάριν, στο μοντέλο πολλών περιοχών (multi-region model), η κάθε περιοχή μπορεί να έχει τα δικά της άγνωστα εσωτερικά αποθέματα πετρελαίου (undiscovered domestic oil reserves) και αναλόγως, το μοντέλο TIMES προωθεί τις τεχνολογίες και τις διαδικασίες τις σχετικές με την ανάπτυξη της έρευνας στον τομέα. Εάν, εναλλακτικά μια περιοχή δεν έχει άγνωστα αποθέματα πετρελαίου καμία συναφής τεχνολογία και διαδικασία δεν παράγεται από το μοντέλο. Λόγω αυτής της ιδιότητας, το μοντέλο TIMES μπορεί επίσης να κληθεί και ως γεννήτρια μοντέλο (model generator), βασισμένο στις πληροφορίες εισαγωγής που παρέχονται από το δημιουργό του μοντέλου έτσι ώστε να παραχθεί ένα στιγμιότυπο του μοντέλου.

Η δομή του μοντέλου TIMES καθορίζεται τελικά από τις μεταβλητές και τις εξισώσεις που αυτές με τη σειρά τους καθορίζονται από την εισαγωγή των δεδομένων που παρέχονται από το χρήστη. Η ίδια η βάση δεδομένων περιέχει τόσο ποιοτικά στοιχεία (qualitative data) όσο και ποσοτικά στοιχεία (quantitative data). Τα ποιοτικά δεδομένα περιλαμβάνουν για παράδειγμα τους καταλόγους μεταφορέων ενέργειας (lists of energy carriers), των τεχνολογιών που ο δημιουργός του μοντέλου πιστεύει ότι ισχύουν σε κάθε περιοχή κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα, καθώς επίσης και τις περιβαλλοντικές εκπομπές που πρόκειται να ακολουθήσουν. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε υποομάδες, παραδείγματος χάριν οι ενεργειακοί μεταφορείς μπορούν να χωριστούν σύμφωνα με τον τύπο τους όπως για παράδειγμα σε φυσικά καύσιμα, πυρηνική ενέργεια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα ποσοτικά δεδομένα, αντίθετα, περιγράφουν τις τεχνολογικές και οικονομικές τιμές των παραμέτρων για κάθε τεχνολογία, κάθε περιοχή και κάθε χρονικό διάστημα. Κατά τη διαμορφωση μοντέλων πολλών περιοχών είναι συχνή η περίπτωση μιας τεχνολογίας που μπορεί να είναι διαθέσιμη για χρήση σε δύο

διακριτές περιοχές εντούτοις, οι υποθέσεις δαπανών και απόδοσης μπορούν να είναι διαφορετικές για αυτή.

2.4.2 Ο Χρόνος στο Μοντέλο TIMES

Ο χρονικός ορίζοντας διαιρείται σε ένα αριθμό χρονικών περιόδων, αριθμός ο οποίος καθορίζεται από το χρήστη. Κάθε περίοδος του μοντέλου μπορεί να περιέχει έναν αυθαίρετο και ενδεχομένως διαφορετικό από περίοδο σε περίοδο αριθμό ετών. Για το μοντέλο TIMES, όλα τα έτη σε μια δεδομένη περίοδο θεωρούνται ίδια (εκτός από την αντικειμενική συνάρτηση δαπανών που διαφοροποιείται μεταξύ των πληρωμών σε κάθε έτος μιας περιόδου και τις μεταβλητές επένδυσης). Για όλες τις ποσότητες όπως τα δυναμικά ενέργειας, οι χρηματικές ροές των εταιριών, τα επίπεδα λειτουργίας αλλά και οποιαδήποτε άλλη είσοδος ή έξοδος του μοντέλου σχετική με την περίοδο t λαμβάνουν διαφορετικές τιμές για κάθε ένα από τα έτη σε εκείνη την περίοδο. Εξαίρεση αποτελούν οι μεταβλητές επένδυσης, που γίνονται συνήθως μόνο μια φορά σε μια περίοδο (υπάρχουν εξαιρετικές περιπτώσεις όπου το μοντέλο TIMES πρέπει να υποθέσει ότι μια επένδυση επαναλαμβάνεται περισσότερες από μία φορά σε μια περίοδο. Αυτό εμφανίζεται όταν η περίοδος είναι τόσο μεγάλη που υπερβαίνει την τεχνική ζωή της επένδυσης). Στην περίπτωση του μοντέλο TIAM, ένας ορίζοντας 100 ετών επιλέγεται προκειμένου να απεικονιστεί κατάλληλα η μακροπρόθεσμη φύση των κλιματικών φαινομένων.

Η αρχική περίοδος που εξετάζεται συνήθως επιλέγεται να είναι μια προηγούμενη περίοδος, κατά τη διάρκεια της οποίας το μοντέλο δεν έχει καμία ελευθερία και για την οποία όλες οι ποσότητες ενδιαφέροντος καθορίζονται από το χρήστη μέσω των ιστορικών τιμών. Η αρχική περίοδος συνίσταται στις περισσότερες εφαρμογές από ένα έτος, προκειμένου να διευκολυνθεί η βαθμολόγηση με βάση τις τυποποιημένες ενεργειακές στατιστικές. Η βαθμολόγηση στην αρχική περίοδο είναι ένας από τους σημαντικούς στόχους που απαιτούνται κατά την οργάνωση ενός νέου μοντέλου TIMES. Οι κύριες μεταβλητές που βαθμολογούνται είναι τα δυναμικά, τα επίπεδα λειτουργίας των τεχνολογιών, οι εξαγμένες, εξαγόμενες, εισαγόμενες, παραχθείσες και καταναλωθείσες ποσότητες για όλους τους ενεργειακούς μεταφορείς και οι εκπομπές. Ας σημειωθεί ότι η προδιαγραφή των δυναμικών στην αρχική

περίοδο επηρεάζει τη συμπεριφορά του μοντέλου κατά τη διάρκεια αρκετών μελλοντικών περιόδων, δεδομένου ότι τα δυναμικά έχουν μια ζωή που επεκτείνεται σε επόμενες περιόδους.

Εκτός από τις χρονικές περιόδους, υπάρχουν χρονικά τμήματα μέσα σε ένα έτος, που καλούνται και χρονοσχισμές (time-slices), οι οποίες μπορούν να καθοριστούν από το χρήστη. Παραδείγματος χάριν, ο χρήστης μπορεί να θελήσει να καθορίσει χρονοσχισμές εποχών, ημέρας/νύκτας, ή/και εργάσιμων ημερών που μπορεί να είναι ιδιαίτερα σημαντικές όποτε ο τρόπος και το κόστος παραγωγής ενός ενεργειακού μεταφορέα στους διαφορετικούς χρόνους του έτους είναι σημαντικά διαφορετικός. Αυτό συμβαίνει παραδείγματος χάριν όταν κυμαίνεται η ζήτηση για μια ενεργειακή μορφή πέρα από το έτος και μπορούν να επιλεγούν διάφορες τεχνολογίες για την παραγωγή της. Σε αυτές περιπτώσεις, το ταίριασμα της προσφοράς και της ζήτησης απαιτεί το συντονισμό των τεχνολογιών παράγωγής και κατανάλωσης από τις εταιρίες σε κάθε χρονοσχισμή. Η ηλεκτρική ενέργεια και άλλες μη αποθηκεύσιμες ενεργειακές μορφές είναι πρωταρχικοί υποψήφιοι για το χρονικό τεμαχισμό (time slicing).

2.5 Η Θεώρηση RES

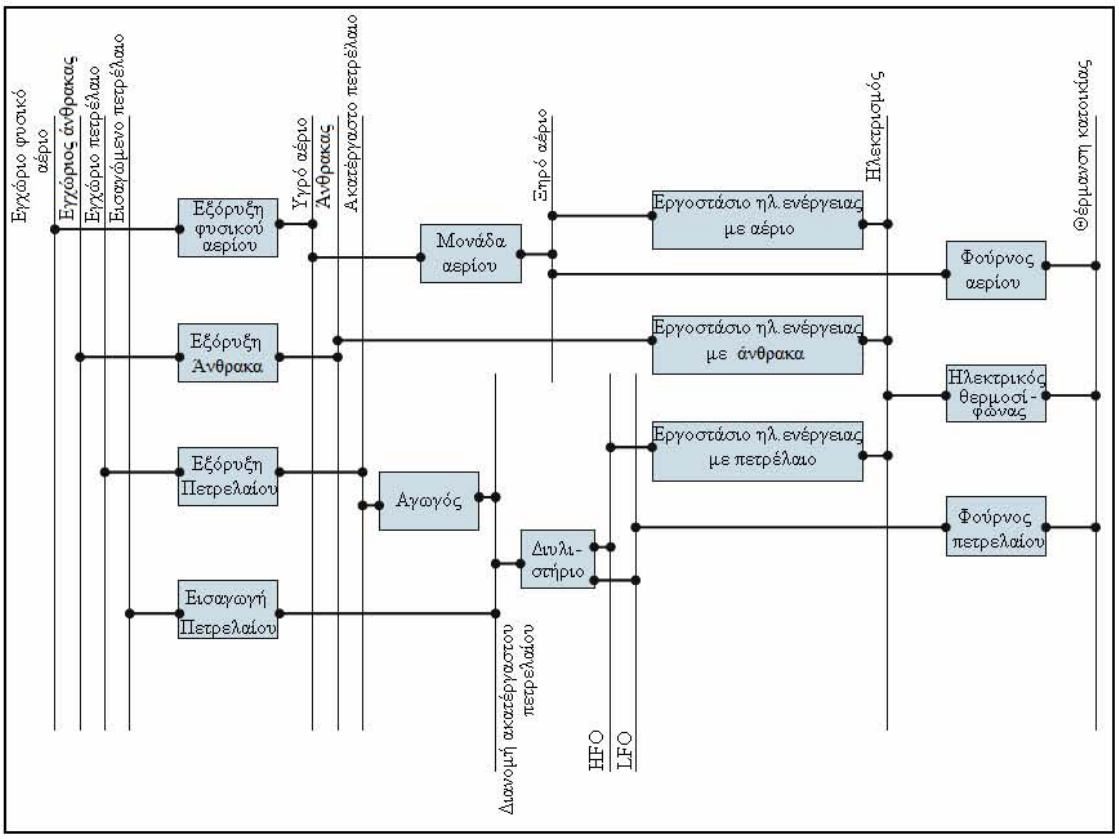
Η οικονομία ενέργειας στο μοντέλο TIMES αποτελείται από τρεις τύπους οντοτήτων:

- Οι τεχνολογίες, επίσης αποκαλούμενες και ως συναρτήσεις ή διαδικασίες, είναι αναπαραστάσεις φυσικών συσκευών που μετασχηματίζουν αγαθά σε άλλα αγαθά. Οι διαδικασίες μπορούν να είναι αρχικές πηγές αγαθών, όπως είναι διαδικασίες εξόρυξης (mining processes), διαδικασίες εισαγωγών (import processes), ή δραστηριότητες μετασχηματισμού (transformation activities) όπως είναι οι εγκαταστάσεις μετατροπής που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, εγκαταστάσεις επεξεργασίας ενέργειας (energy-processing plants) όπως είναι διυλιστήρια και συσκευές ζήτησης τελικής χρήσης (end-use demand devices) όπως είναι τα αυτοκίνητα ή συστήματα θέρμανσης.
- Τα προϊόντα ή αγαθά αποτελούνται από τους ενεργειακούς μεταφορείς, τις ενεργειακές υπηρεσίες, τα υλικά, τις νομισματικές ροές και τις εκπομπές.

Προϊόντα παράγονται γενικά με κάποια διαδικασία ή διαδικασίες ή/και καταναλώνονται με κάποια άλλη διαδικασία ή διαδικασίες.

- Οι ροές προϊόντων είναι οι συνδέσεις μεταξύ των διαδικασιών και των προϊόντων. Μια ροή προϊόντων είναι της ίδιας φύσης με τα προϊόντα αλλά είναι συνδεμένη με μια συγκεκριμένη διαδικασία και περιγράφει μια είσοδο ή μια έξοδο διαδικασίας. Παραδείγματος χάριν, το πετρέλαιο θέρμανσης είναι προϊόν, ενώ το πετρέλαιο θέρμανσης για οικιακή κατανάλωση είναι μια ροή προϊόντος.

Είναι χρήσιμο να απεικονιστούν οι σχέσεις μεταξύ αυτών των οντοτήτων σε ένα διάγραμμα δικτύου (network diagram) το οποίο καλείται και Ενεργειακό Σύστημα Αναφοράς (Reference Energy System ή RES). Στο μοντέλο TIMES, οι διαδικασίες RES αναπαρίστανται ως πλαίσια (boxes) και τα προϊόντα ως κάθετες γραμμές. Οι ροές προϊόντων αναπαρίστανται ως οριζόντιες συνδέσεις μεταξύ των πλαισίων διαδικασιών και των γραμμών προϊόντων. Κάθε ροή είναι προσανατολισμένη και συνδέει ακριβώς έναν κόμβο διαδικασίας με έναν κόμβο προϊόντος. Στο Σχήμα 2.1 απεικονίζεται ένα μικρό κομμάτι ενός υποθετικού RES που περιέχει μια ενιαία ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών, όπως είναι στην περίπτωση αυτή θέρμανση για κατοικίες.



Σχήμα 2.1. Μερική άποψη ενός απλού ενεργειακού συστήματος αναφοράς (όλα τα τόξα είναι προσανατολισμένα από αριστερά στα δεξιά).

Υπάρχουν τρεις τεχνολογίες θέρμανσης χώρου τελικής χρήσης. Αυτές που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο, ηλεκτρική ενέργεια και τους ενεργειακούς μεταφορείς θερμαντικού πετρελαίου (προϊόντα) αντίστοιχα. Αυτοί οι ενεργειακοί μεταφορείς παράγονται από άλλες τεχνολογίες. Απεικονίζονται στο διάγραμμα ως μονάδες αερίου, ως τρία είδη εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (με φυσικό αέριο, με άνθρακα και με πετρέλαιο) και ως διυλιστήρια. Για να ολοκληρωθεί η αλυσίδα παραγωγής πρωτογενούς ενέργειας, στο διάγραμμα απεικονίζονται μια πηγή εξόρυξης φυσικού αερίου, μια πηγή εξόρυξης άνθρακα και δύο πηγές ακατέργαστου πετρελαίου (η μια περιγράφει την εγχώρια εξαγωγή και στη συνέχεια τη μεταφορά με τη χρήση αγωγού ενώ η άλλη περιγράφει την εισαγωγή). Αυτό το απλό RES έχει συνολικά 13 προϊόντα και 13 διαδικασίες. Ας σημειωθεί ότι σε αυτό το RES κάθε φορά που προϊόντα εισάγονται/εξάγονται από μια διαδικασία (μέσω συγκεκριμένης ροής) το όνομα των προϊόντων αλλάζει όπως για παράδειγμα το υγρό αέριο γίνεται ξηρό αέριο ενώ το ακατέργαστο πετρέλαιο γίνεται ακατέργαστο πετρέλαιο αγωγών.

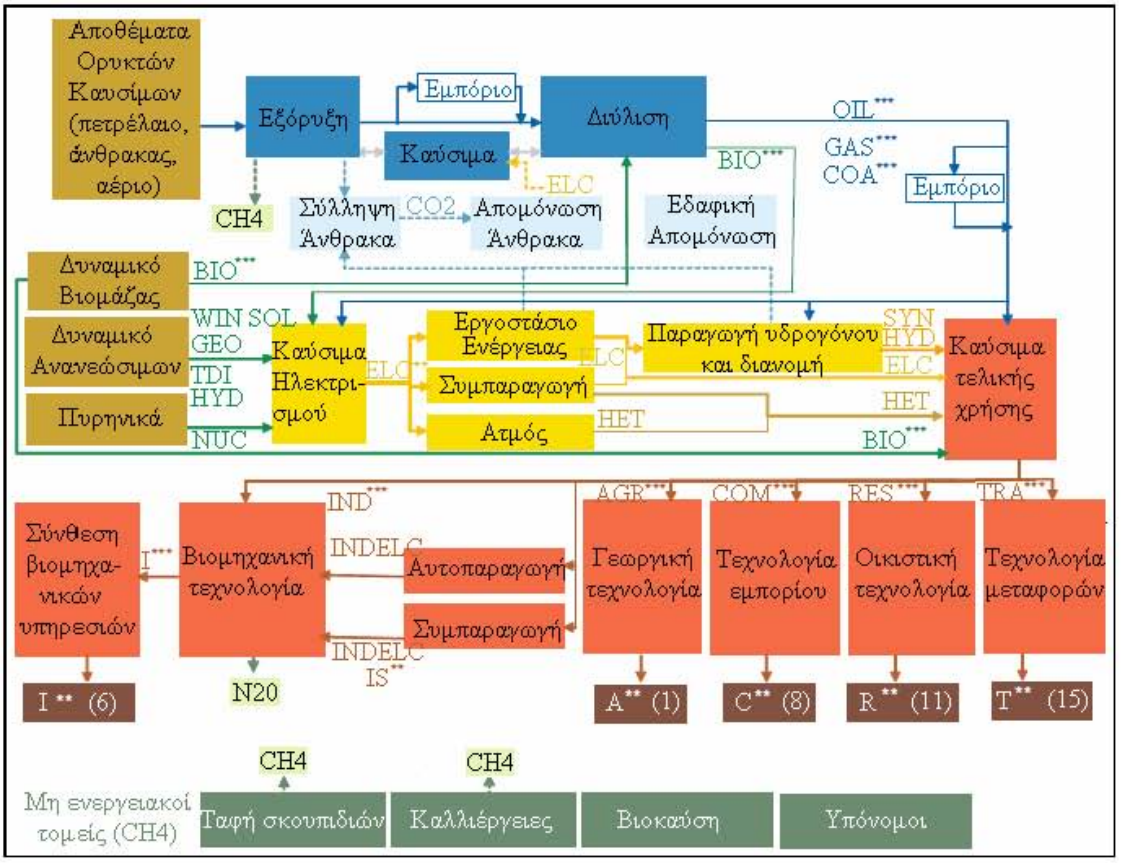
Αυτός ο απλός κανόνας επιτρέπει στις διασυνδέσεις μεταξύ των διαδικασιών να διατηρηθούν σε όλο το δίκτυο.

Για να οργανωθεί το RES και να ενημερωθεί το σύστημα διαμόρφωσης για τη φύση των συστατικών του, οι διάφορες τεχνολογίες, τα προϊόντα, και οι ροές μπορούν να ταξινομηθούν σε σύνολα. Κάθε σύνολο του μοντέλου TIMES συγκεντρώνει συστατικά παρόμοιας φύσης. Το ίδιο στοιχείο μπορεί να εμφανιστεί σε πολυάριθμα σύνολα τεχνολογίας ή προϊόντων. Η καθορισμένη ιδιότητα μέλους μεταβιβάζει τη φύση των επιμέρους συστατικών και είναι συχνά πιό σχετική με την μετεπεξεργασία (υποβολή έκθεσης) από ότι για τον επηρεασμό της δομής του μοντέλου. Αυτό ισχύει επειδή στο μοντέλο TIMES οι περισσότερες διαδικασίες προικίζονται με ουσιαστικά τις ίδιες ιδιότητες (με εξαίρεση την αποθήκευση και τις διαπεριφερειακές διαδικασίες ανταλλαγής) συνδέοντας τις ίδιες μεταβλητές μεταξύ τους (υπακούοντας σε παρόμοιους περιορισμούς εκτός αν ο χρήστης αποφασίσει διαφορετικά).

Αντίθετα, τα προιόντα του μοντέλου TIMES είναι ταξινομημένα σε διάφορες κύριες ομάδες (major groups). Υπάρχουν πέντε τέτοιες ομάδες:

1. οι ενεργειακοί μεταφορείς,
2. τα υλικά,
3. οι ενεργειακές υπηρεσίες,
4. οι εκπομπές και
5. οι νομισματικές ροές.

Η χρήση αυτών των ομάδων είναι ουσιαστική στον καθορισμό των περιορισμών του μοντέλου TIMES, όπως θα παρουσιαστεί άλλωστε στις επόμενες παραγράφους. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται ένα πληρέστερο RES του μοντέλου TIAM, εφαρμόσιμο σε κάθε μια από τις 15 περιοχές TIAM (Αφρική, Αυστραλία, Νέα Ζηλανδία, Καναδάς, Κεντρική και Νότια Αμερική, Κίνα, Ανατολική Ευρώπη, πρώην Σοβιετική Ένωση, Ινδία, Ιαπωνία, Μεξικό, Μέση Ανατολή, υπόλοιπες αναπτυσσόμενες χώρες Ασίας, Κορέα, ΗΠΑ, Δυτική Ευρώπη).



Σχήμα 2.2. Σκίτσο του RES του μοντέλου TIAM.

Τα κύρια στοιχεία του TIAM RES περιγράφονται στη συνέχεια εν συντομία:

- Τομέας της ενεργειακής προσφοράς. Κάθε πρωτογενής ενέργειας μπορεί είτε να εξορύσσεται (ορυκτά καύσιμα, βιομάζα) είτε να προκύπτει ως δυναμικό (όπως είναι η ενέργεια που δεν προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, η υδροηλεκτρική ενέργεια ή υδρενέργεια (HYD), η αιολική ενέργεια (WIN), η γεωθερμική ενέργεια (GEO)). Κάθε μια από αυτές τις μορφές ενέργειας εμφανίζεται με μια πιθανότητα και ένα συγκεκριμένο κόστος μονάδας. Αυτό αποτελεί μια καμπύλη προσφοράς για κάθε ενεργειακή μορφή. Οι πόροι πρωτογενούς ενέργειας και οι μορφές όπως μοντελοποιούνται στο TIAM είναι ο άνθρακας (4 πόροι, 2 μορφές), το ακατέργαστο πετρέλαιο (21 πόροι, 4 μορφές), το φυσικό αέριο (11 πόροι, 1 μορφή) και η στερεά βιομάζα (8 πόροι, 6 μορφές).
- Ενεργειακό εμπόριο. Οι ακόλουθοι τύποι ενέργειας κυκλοφορούν στο εμπόριο ενδογενώς μεταξύ των 15 περιοχών TIAM. Αυτοί οι τύποι είναι ο άνθρακας (brown και hardcoal), το ακατέργαστο πετρέλαιο, τα διυλισμένα πετρελαιοειδή (βενζίνη, diesel, πετρέλαιο και νάφθα), το φυσικό αέριο, το

υγροποιημένο φυσικό αέριο και οι ατμοσφαιρικές εκπομπές. Οι τιμές αυτών των ενεργειακών μορφών υπολογίζονται ενδογενώς από το μοντέλο. Επίσης λαμβάνεται υπόψη ο αντίκτυπος των πολιτικών για το περιβάλλον στον τύπο ενέργειας και το εμπόριο αδειών (permit trade).

- Ενεργειακός μετασχηματισμός. Το ακατέργαστο πετρέλαιο μετασχηματίζεται σε 15 RPP μέσω των διυλιστηρίων, η στερεά βιομάζα μπορεί να μετασχηματιστεί σε αλκοόλες, ο άνθρακας και το φυσικό αέριο μπορούν να μετασχηματιστούν σε υδρογόνο μέσω αεριοποίησης (gasification), ανασχηματισμού (reforming) ή μέσω ηλεκτρόλυσης, το φυσικό αέριο μπορεί να υγροποιηθεί και το LNG μπορεί να αεριοποιηθεί με τη χρήση κατάλληλων διεργασιών.
- Ενεργειακή μετατροπή. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από έναν μεγάλο αριθμό τεχνολογιών. Αυτές οι τεχνολογίες για να έχουν ως έξοδο ηλεκτρική ενέργεια έχουν ως είσοδο έναν ή περισσότερους αρχικούς πόρους, όπως είναι ο άνθρακας, το (φυσικό) αέριο, το πετρέλαιο, ο αέρας.
- Τομείς της κατανάλωσης ενέργειας. Οι τομείς της τελικής χρήσης περιλαμβάνουν τον οικιστικό (residential ή RES), τον εμπορικό (commercial ή COM), τον βιομηχανικό (industrial ή IND) και τον τομέα των μεταφορών (transportation ή TRA). Κάθε ένας έχει διάφορες, ανεξάρτητες απαιτήσεις για τις ενεργειακές υπηρεσίες που παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Κάθε ενεργειακή υπηρεσία μπορεί να καλυφθεί από μια σειρά τεχνολογιών τελικής χρήσης.

	Κωδικός	**Μονάδα**
Τελικές χρήσεις μεταφορών (15)		
Αυτοκίνητα	TRT	Billion vehicle-km/year
Λεωφορεία	TRB	Billion vehicle-km/year
Ελαφριά φορτηγά	TRL	Billion vehicle-km/year
Εμπορικά φορτηγά	TRC	Billion vehicle-km/year
Μέσα φορτηγά	TRM	Billion vehicle-km/year
Βαριά φορτηγά	TRH	Billion vehicle-km/year
Δίτροχα	TRW	Billion vehicle-km/year
Τρίτροχα	TRE	Billion vehicle-km/year

Διεθνής αεροπορία	TAI	PJ/year
Εσωτερική αεροπορία	TAD	PJ/year
Σιδηρόδρομος φορτίου	TTF	PJ/year
Επιβατικός σιδηρόδρομος	TTP	PJ/year
Εσωτερική ναυσιπλοΐα	TWD	PJ/year
Διεθνής ναυσιπλοΐα (αποθήκες)	TWI	PJ/year
Μη ενεργειακές χρήσεις στις μεταφορές	NEU	PJ/year
Τελικές οικιστικές χρήσεις[α] (11)		
Θέρμανση χώρου	RH1, RH2, RH3, RH4	PJ/year
Ψύξη χώρου	RC1, RC2, RC3, RC4	PJ/year
Θέρμανση ύδατος	RWH	PJ/year
Φωτισμός	RL1, RL2, RL3, RL4	PJ/year
Μαγείρεμα	RK1, RK2, RK3, RK4	PJ/year
Ψυγεία και ψυκτήρες	RRF	PJ/year
Πλυντήρια ρούχων	RCW	PJ/year
Στεγνωτήρες ρούχων	RCD	PJ/year
Πλυντήρια πιάτων	RDW	PJ/year
Διάφορα είδη κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας	REA	PJ/year
Άλλες ενεργειακές χρήσεις	ROT	PJ/year
Τελικές εμπορικές χρήσεις[α] (8)		
Θέρμανση χώρου	CH1, CH2, CH3, CH4	PJ/year
Ψύξη χώρου	CC1, CC2, CC3. CC4	PJ/year
Θέρμανση ύδατος	CHW	PJ/year
Φωτισμός	CLA	PJ/year
Μαγείρεμα	CCK	PJ/year
Ψυγεία και ψυκτήρες	CRF	PJ/year
Ηλεκτρικοί εξοπλισμοί	COE	PJ/year

Άλλες ενεργειακές χρήσεις	COT	PJ/year
Τελικές αγροτικές χρήσεις (1)		
Γεωργία	AGR	
Τελικές βιομηχανικές χρήσεις[β] (6)		
Σίδηρος και χάλυβας	IIS	Millions tonnes
Μη σιδηρούχα μέταλλα	INF	Millions tonnes
Χημικές ουσίες	ICH	PJ
Πολτός και χαρτί	ILP	Millions tonnes
Ορυκτά μη μετάλλων	INM	PJ
Άλλες βιομηχανίες	IOI	PJ
Άλλες χρήσεις (1)		
Μη διευκρινισμένη κατανάλωση ενέργειας	ONO	PJ/year
α. Οι κωδικοί RLi, RCi, RLi, RKi, CHi, CCi αναπαριστούν τη ζήτηση για κάποιες υποπεριοχές (sub-regions) που είναι διαθέσιμες για κάποιες περιοχές (regions) όπως είναι οι ΗΠΑ και ο Καναδάς.		
β Οι βιομηχανικές υπηρεσίες ενέργειας δομούνται από ένα μίγμα από άλλες πιο λεπτομερείς υπηρεσίες όπως είναι ο ατμός, η διαδικασία θερμότητας, η κίνηση των μηχανών, η ηλεκτρολυτική υπηρεσία κτλ		

Πίνακας 2.1. Ζητήσεις τελικών χρήσεων στο μοντέλο TIAM.

- Εκπομπές και επιλογές μείωσης εκπομπής. Το μοντέλο TIAM υπολογίζει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG) όπως είναι το CO_2 (από την κατανάλωση ενέργειας), το CH_4 (από την κατανάλωση ενέργειας συμπεριλαμβανομένων των διαρροών καθώς επίσης και από μερικούς μη ενεργειακούς τομείς όπως είναι τα υλικά οδοποιίας, τα λιπάσματα, τα υγρά απόβλητα, το μη ενεργειακό κάψιμο βιομαζών, η εντερική ζύμωση και η καλλιέργεια ρυζιού) και το N_2O (από την κατανάλωση ενέργειας καθώς επίσης και από τις βιομηχανίες λιπαρού και νιτρικού οξέος). Όλες οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου συγχωνεύονται επίσης σε μια ενιαία ισοδύναμη CO_2 εκπομπή, κάτι το οποίο βασίζεται το μοντέλο της παγκόσμιας δυνατότητας θέρμανσης που χρησιμοποιείται ως είσοδος στην ενότητα κλίματος. Η μείωση (ή μετριασμός) των εκπομπών μπορεί να ολοκληρωθεί με διάφορους τρόπους:

- Μέσω ενεργειακών αντικαταστάσεων.
- Μέσω βελτιωμένης αποδοτικότητας των εγκατεστημένων συσκευών.
- Μέσω συγκεκριμένων συσκευών μείωσης εκπομπών CO_2 όπως για παράδειγμα η καύση ή χρησιμοποίηση CH_4 για την ηλεκτρική παραγωγή, η καταστολή των διαρροών σε επίπεδο μετάδοσης φυσικού αερίου, η θερμική καταστροφή N_2O, η αναερόβια χώνευση των αποβλήτων με την αποκατάσταση αερίου.
- Μέσω της απομάκρυνσης (το CO_2 συλλαμβάνεται και αποθηκεύεται υπόγεια, βιολογική απομάκρυνση άνθρακα).
- Μέσω των μειώσεων ζήτησης.

Ας σημειωθεί ότι λαμβάνονται υπόψη και οι γεωργικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Επίσης είναι διαθέσιμο το ενδογενές εμπόριο όλων των εκπομπών, έτσι ώστε το εμπόριο αδειών να μπορεί να μοντελοποιηθεί εύκολα στο μοντέλο.

- Λόγω της λεπτομερούς τεχνολογικής φύσης του, το μοντέλο TIAM είναι σε θέση να μιμηθεί σχεδόν οποιοδήποτε τύπο μέτρου μείωσης εκπομπής, είτε πρόκειται για κανονισμό, είτε για φόρο, είτε για μοντέλο χαρτοφυλακίου.
- Τέλος, το αρχικό έτος της βάσης δεδομένων λαμβάνει τις τιμές που προκύπτουν από τις ενεργειακές ισορροπίες οι οποίες παρέχονται από τη Διεθνή Αντιπροσωπεία Ενέργειας (International Energy Agency), και τα χαρακτηριστικά των τεχνολογιών και των αποθεμάτων τα οποία είναι βασισμένα στην παγκόσμια βιβλιογραφία ή σε ειδική γνώση όπως είναι οι εκθέσεις IPCC, η Αμερικανική Αντιπροσωπεία Προστασίας Περιβάλλοντος (US-Environmental Protection Agency), η IEA (IEA-Energy Technology Perspectives), το Αμερικανικό Υπουργείο Ενέργειας (US-Department of Energy), η Αμερικανική Γεωλογική Επιθεώρηση (US Geological Survey) και το Παγκόσμιο Συμβούλιο Ενέργειας (World Energy Council).

2.6 Επισκόπηση των Ιδιοτήτων του Μοντέλου TIMES (Σύνολα και Παράμετροι)

Στη συνέχεια γίνεται μια σύντομη παρουσίαση των τύπων των ιδιοτήτων που συνδέονται με κάθε οντότητα του RES ή με το RES συνολικά.

Οι ιδιότητες μπορούν να είναι αριθμοί ή σύνολα. Τα περισσότερα σύνολα καθορίζονται για τις διαδικασίες για να περιγράψουν τα υποσύνολα των ροών που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να κατασκευάσουν συγκεκριμένους περιορισμούς ροής. Οι βασικές ιδιότητες καλούνται συνήθως παράμετροι (parameters). Δίνεται μια συνοπτική περιγραφή των διαθέσιμων τύπων παραμέτρων στο μοντέλο TIMES.

2.6.1 Οι Συσχετισμένες Παράμετροι με τις Διαδικασίες

Οι συσχετισμένες παράμετροι με τις διαδικασίες (process-oriented parameters) διακρίνονται σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- Στις τεχνικές παραμέτρους. Οι τεχνικές παράμετροι (technical parameters) περιλαμβάνουν την αποδοτικότητα (efficiency), τον παράγοντα διαθεσιμότητας (availability factor), τις καταναλώσεις προϊόντων ανά μονάδα δραστηριότητας, τις μετοχές των καυσίμων ανά δραστηριότητα μονάδας, την τεχνική ζωή διαδικασίας, τη χρονική ανοχή κατασκευής, τη χρονική ανοχή αποσυναρμολόγησης (dismantling lead-time), χρονική ανοχή διάρκειας, τις τιμές των προϊόντων που καταναλώνονται (και παράγονται) από την κατασκευή (και την αποσυναρμολόγηση) μιας μονάδας της διαδικασίας και τη συμβολή στη μέγιστη εξίσωση. Η αποδοτικότητα (efficiency), οι παράγοντες διαθεσιμότητας (availability factors), οι είσοδοι προϊόντων και οι έξοδοι των διαδικασιών μπορούν να καθοριστούν με διάφορους τρόπους ανάλογα με την επιθυμητή ευελιξία διαδικασίας (desired process flexibility), το μέγεθος χρονοσχισμής που επιλέγεται για τη διαδικασία και το μέγεθος χρονοσχισμής που επιλέγεται για τα προϊόντα. Ορισμένες παράμετροι είναι μόνο σχετικές με ειδικές διαδικασίες, όπως με τις διαδικασίες αποθήκευσης (storage processes) ή με τις διαδικασίες που εφαρμόζονται για το εμπόριο μεταξύ των περιοχών.
- Οι οικονομικές και πολιτικές παράμετροι. Οι οικονομικές και πολιτικές παράμετροι (economic and policy parameters) περιλαμβάνουν ποικίλες δαπάνες που συνδέονται με την επένδυση, την αποσυναρμολόγηση, τη συντήρηση και τη λειτουργία μιας διαδικασίας. Επιπλέον, οι φόροι και οι επιχορηγήσεις μπορούν να καθοριστούν κατά τρόπο εύκαμπτο. Άλλες οικονομικές παράμετροι είναι η οικονομική ζωή μιας διαδικασίας (economic

life of a process) που είναι ο χρόνος κατά τη διάρκεια του οποίου το κόστος επένδυσης μιας διαδικασίας αποσβένεται. Αυτός ο χρόνος μπορεί να διαφέρει από τη λειτουργική διάρκεια ζωής και το ειδικό προεξοφλητικό επιτόκιο διαδικασίας (process specific discount rate) αποκαλούμενο επίσης και ως ρυθμός εμποδίων (hurdle rate) και χρησιμεύει στον υπολογισμό των ετήσιων πληρωμών στο κόστος επένδυσης διαδικασίας (annualized payments on the process investment cost).

- Άνω και κάτω όρια. Τα άνω και κάτω όρια μπορούν να επιβληθούν στην επένδυση, στην ικανότητα και στη δραστηριότητα μιας διαδικασίας.

Ας σημειωθεί ότι πολλές παράμετροι διαδικασίας μπορούν να είναι χρονοεξαρτώμενης παραγωγής (vintaged) δηλαδή εξαρτώμενες από την ημερομηνία της εγκατάστασης της νέας ικανότητας. Παραδείγματος χάριν, το ετήσιο κόστος συντήρησης ενός αυτοκινήτου θα μπορούσε να καθοριστεί σταθερό για 3 έτη και έπειτα να αυξάνει με τρόπο γραμμικό κάθε έτος.

2.6.2 Οι Συσχετισμένες Παράμετροι με τα Προϊόντα

Οι συσχετισμένες παράμετροι με τα προϊόντα (commodity-oriented parameters) διακρίνονται σε τρεις γενικές κατηγορίες:

- Τεχνικές παράμετροι που συνδέονται με τα προϊόντα. Αυτές είναι η γενική αποδοτικότητα (παραδείγματος χάριν αποδοτικότητα πλέγματος) και οι χρονοσχισμές. Για τα προϊόντα ζήτησης (demand commodities), μπορούν να διευκρινιστούν επιπλέον ετήσιες προβαλλόμενες καμπύλες ζήτησης και φορτίων (εάν τα προϊόντα έχουν μια υποετήσια ανάλυση χρονοσχισμών).
- Οι οικονομικές παράμετροι περιλαμβάνουν τις συμπληρωματικές δαπάνες, τους φόρους και τις επιχορηγήσεις στην παραγωγή προϊόντων. Στην περίπτωση μιας υπηρεσίας ζήτησης, οι πρόσθετες παράμετροι είναι η ελαστικότητα τιμών-ζήτησης (demand's own-price elasticity), το συνολικό επιτρεπόμενο εύρος της διακύμανσης της τιμής από τη ζήτησης και ο αριθμός των σκαλοπατιών (steps) για τη διακριτή προσέγγιση (discrete approximation) της καμπύλης.

- Βασισμένες στην ακολουθούμενη πολιτική. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν τα όρια ζήτησης των προϊόντων, την παραγωγή προϊόντων, τις εισαγωγές και τις εξαγωγές προϊόντων από μια περιοχή.

2.6.3 Οι Συσχετισμένες Παράμετροι με τις Ροές Προϊόντων των Διαδικασιών

Μια ροή προϊόντων (commodity flow) ή απλούστερα μια ροή (flow) είναι μια ποσότητα προϊόντων που παράγεται ή που καταναλώνεται σε μια δεδομένη διαδικασία. Κάθε διαδικασία έχει ροές που εισάγονται και εξάγονται που είναι διαφορετικών τύπων (καύσιμα, υλικά, ζήτηση ή εκπομπές). Κάθε ροή έχει μια μεταβλητή που συνδέεται με το ποσό αυτό, καθώς επίσης και διάφορες ιδιότητες.

- Οι τεχνικές παράμετροι επιτρέπουν τον πλήρη έλεγχο του μέγιστου ή/και ελάχιστου μεριδίου μιας δεδομένη εισαγωγής ή της ροής παραγωγής που μπορεί να ληφθεί στην ίδια ομάδα προϊόντων. Παραδείγματος χάριν, μια εύκαμπτη τουρμπίνα μπορεί να δεχτεί πετρέλαιο ή αέριο ως εισαγωγή και ο υπεύθυνος μοντελοποίησης μπορεί να χρησιμοποιήσει μια παράμετρο για να περιορίσει το μερίδιο του πετρελαίου το πολύ στο 40% της συνολικής εισαγωγής καυσίμων. Άλλες παράμετροι και σύνολα που καθορίζουν το ποσό ορισμένων εκροών σε σχέση με ορισμένες εισροές όπως είναι για παράδειγμα η αποδοτικότητα και το ποσοστό εκπομπής από καύσιμα. Παραδείγματος χάριν, σε εγκαταστάσεις καθαρισμού πετρελαίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί παράμετρος που να καθορίζει το συνολικό ποσό καθαρισμένου προϊόντος ίσο με το 92% του συνολικού ποσού εισαγωγών στις εγκαταστάσεις καθαρισμού, ή για να υπολογίσει ορισμένες εκπομπές ως σταθερό ποσοστό του ποσού πετρελαίου που καταναλώνεται.
- Οι οικονομικές παράμετροι περιλαμβάνουν μεταβλητές δαπάνες, φόρους, επιχορηγήσεις και άλλες δαπάνες που συνδέονται με μια μεμονωμένη ροή διαδικασίας.

2.6.4 Οι Συσχετισμένες Παράμετροι με το συνολικό RES

Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν τους παράγοντες μετατροπής νομίσματος σε ένα πολυπεριφερειακό πρότυπο (currency conversion factors), τις διευκρινίσεις σε συγκεκριμενοποιήσεις που έχουν να κάνουν με περιοχές και χρονοσχισμές (region-specific time-slice definitions), τις συγκεκριμένες τιμές του κεφαλαίου και της εργασίας ανά περιοχή που επηρεάζουν τις δαπάνες των τεχνολογιών (region-specific values of capital and labor), το γενικό επιτόκιο προεξόφλησης ανά περιοχή (region-specific general discount rate) και το έτος αναφοράς για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους (αντικειμενική λειτουργία). Επιπλέον, ορισμένοι διακόπτες ελέγχουν την ενεργοποίηση της διαδικασίας παρεμβολής δεδομένων καθώς επίσης και των ειδικών μοντέλων χαρακτηριστικών γνωρισμάτων που χρησιμοποιούνται.

2.7 Διαχείριση και Εκτέλεση του Μοντέλου TIMES

Η κατασκευή και η συντήρηση μιας βάσης δεδομένων στο μοντέλο TIMES διευκολύνεται από τη διεπαφή VEDA_FE (front end interface) που επιτρέπει στο χρήστη να κατασκευάσει, να έχει πρόσβαση, να προσπελάσει, να διατηρεί τη βάση δεδομένων του μοντέλου και να εκτελεί μια σειρά μοντέλων. Μια διεπαφή διευκόλυνσης VEDA_BE (companion back end interface) διευκολύνει την εξερεύνηση της λύσης, της κατασκευής των πινάκων και της γραφικής παράστασης αποτελέσματος.

Η βάση δεδομέων του μοντέλου TIMES μετασχηματίζεται σε μια γραμμική μήτρα προγραμματισμού μέσω ενός προγράμματος υπολογιστών (γεννήτρια μητρών) που γράφεται σε γλώσσα GAMS. Το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού (LP) λύνεται έπειτα από εμπορικό βελτιστοποιητή (optimizer) όπως είναι ο CPLEX ή ο EXPRESS. Όταν απαιτείται μικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (MIP), το πρόγραμμα GAMS ενεργοποιεί αυτόματα τον είδικό βελτιστοποιητή (MIP optimizer).

2.8 Οικονομική Λογική του Μοντέλου TIMES

Σε αυτήν την παράγραφο θα δοθεί η οικονομική ερμηνεία του μοντέλου TIMES και άλλων μοντέλων ισορροπίας βασισμένων στη μεγιστοποίηση του συνολικού πλεονάσματος (maximizing total surplus). Τα μοντέλα μερικής ισορροπίας (partial equilibrium models) έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό γνώρισμα: το γνώρισμα αυτό είναι η ταυτόχρονη διαμόρφωση της παραγωγή, της κατανάλωσης προϊόντων και τιμών τους. Τέτοια προϊόντα είναι τα καύσιμα, προϊόντα και υπηρεσίες ενέργειας. Η τιμή της παραγωγής προϊόντων έχει επιπτώσεις στη ζήτηση των προϊόντων, ενώ συγχρόνως η ζήτηση έχει επιπτώσεις στην τιμή των προϊόντων. Μια αγορά λέγεται ότι βρίσκεται σε ισορροπία (equilibrium) όταν οι τιμές p^* και οι ποσότητες q^* είναι αυτές που κανένας δεν επιθυμεί να αγοράσει ποσότητα μικρότερη από q^* σε τιμή p^* και κανένας παραγωγός δεν παράγει ποσότητα μεγαλύτερη από q^* σε τιμή p^*. Και το p^* και το q^* είναι διανύσματα των οποίων η διάσταση είναι ίση με τον αριθμό των διαφορετικών προϊόντων που πρόκειται να μοντελοποιηθούν. Όπως εξηγείται παρακάτω, όταν όλες οι αγορές είναι σε ισορροπία τότε το συνολικό οικονομικό πλεόνασμα μεγιστοποιείται.

Παλαιότερα, τα απλά από-κάτω-προς-τα-άνω μοντέλα καθόριζαν τη ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών ελαχιστοποιώντας το κόστος για δεδομένη ζήτηση (π.χ. οι πρώτες υλοποιήσεις του MARKAL, [20], [22] αν και το μοντέλο MARKAL έχει επεκταθεί και διαφοροποιηθεί από αυτές τις πρόωρες εκδόσεις). Αντίθετα, οι ζητήσεις του μοντέλου TIMES για τις ενεργειακές υπηρεσίες είναι οι ίδιες ελαστικές στις τιμές τους, επιτρέποντας κατά συνέπεια στο μοντέλο να υπολογίσει μια αξιόπιστη ισορροπία προσφοράς-ζήτησης (supply-demand equilibrium). Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι ένα θεμελιώδες βήμα προς τη σύλληψη της κύριας ανατροφοδότησης από την οικονομία στο ενεργειακό σύστημα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η κεντρική οικονομική λογική του μοντέλου TIMES, η περιγραφή λεπτομερειών για το πως οι με ελαστική τιμή ζητήσεις (price elastic demands) διαμορφώνονται στο μοντέλο TIMES και τέλος γίνεται η παρουσίαση των οικονομικών ιδιοτήτων του μοντέλου.

2.8.1 Το Παράδειγμα του Μοντέλου TIMES

Εν συντομία, το μοντέλο TIMES είναι ένα ρητό, πολυπεριφερειακό, μοντέλο μερικής ισορροπίας, το οποίο υποθέτει δίνοντας ως αποτέλεσμα ζητήσεις με ελαστική τιμή, ανταγωνιστικές αγορές και τέλεια πρόβλεψη με συνέπεια την οριακή αξία διατίμησης (marginal value pricing). Στη συνέχεια, γίνεται εμβάθυνση σε κάθε μια από τις παραπάνω ιδιότητες.

2.8.1.1 Η Τεχνολογική Σαφήνεια του Μοντέλου

Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί, κάθε τεχνολογία περιγράφεται στο μοντέλο TIMES από διάφορες τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους. Ένα ώριμο μοντέλο TIMES μπορεί να περιλάβει αρκετές χιλιάδες τεχνολογίες σε όλους τους τομείς του ενεργειακού συστήματος όπως είναι οι ενεργειακές προμήθειες (procurement), η μετατροπή (conversion), η επεξεργασία (processing), η μετάδοση (transmission) και άλλες τελικές χρήσεις (end-uses) σε κάθε περιοχή. Κατά συνέπεια, το μοντέλο TIMES ενθυλακώνει πολλές τεχνολογίες. Επιπλέον, ο αριθμός τεχνολογιών και η σχετική τοπολογία τους μπορούν να αλλάξουν μέσω της εισαγωγής δεδομένων χωρίς να χρειάζεται ο χρήστης να τροποποιήσει τις εξισώσεις του μοντέλου. Το μοντέλο είναι έτσι σε μεγάλο βαθμό οδηγούμενο από τα δεδομένα (data driven).

2.8.1.2 Το Πολυπεριφερειακό Χαρακτηριστικό του Μοντέλου

Μερικά από τα υπάρχοντα μοντέλα TIMES που καλύπτουν ολόκληρο το ενεργειακό σύστημα περιλαμβάνουν μέχρι και 15 περιφερειακές ενότητες ενώ μερικά από τα υπάρχοντα τομεακά μοντέλα TIMES (sectoral TIMES models) περιλαμβάνουν μέχρι 30 περιοχές. Ο αριθμός περιοχών σε ένα μοντέλο περιορίζεται μόνο από τη δυσκολία της επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού πολύ μεγάλου μεγέθους. Οι μεμονωμένες περιφερειακές ενότητες συνδέονται με την ενέργεια και τις υλικές μεταβλητές εμπορικών συναλλαγών και όταν απαιτηθεί με τις μεταβλητές των εμπορικών συναλλαγών των αδειών εκπομπής. Οι εμπορικές

μεταβλητές μετασχηματίζουν το σύνολο των περιφερειακών ενοτήτων σε ένα ενιαίο πολυπεριφερειακό (ενδεχομένως πρότυπο παγκόσμιας) ενέργειας, όπου οι ενέργειες που λαμβάνονται σε μια περιοχή μπορούν να έχουν επιπτώσεις σε όλες τις άλλες περιοχές. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα είναι φυσικά ουσιαστικό όταν λαμβάνονται υπόψη παγκόσμιες ή περιφερειακές πολιτικές ενέργειας και εκπομπής.

2.8.1.3 Ιδιότητες Ισορροπίας

Όπως παρουσιάστηκε και ανωτέρω, το μοντέλο TIMES υπολογίζει μια μερική ισορροπία (partial equilibrium) στις αγορές ενέργειας. Αυτό το χαρακτηριστικό γνώρισμα ισορροπίας είναι παρόν σε κάθε στάδιο του ενεργειακού συστήματος όπως είναι οι μορφές πρωτογενούς ενέργειας, οι μορφές δευτερογενούς ενέργειας και οι ενεργειακές υπηρεσίες. Ισορροπία προσφοράς και ζήτησης μεγιστοποίηση του συνολικού πλεονάσματος (άθροισμα των πλεονασμάτων προμηθευτών και καταναλωτών). Η ισορροπία στο μοντέλο TIMES χαρακτηρίζεται στην πραγματικότητα από τρεις θεμελιώδεις ιδιότητες που είναι η γραμμικότητα (linearity), η μεγιστοποίηση του πλεονάσματος (maximization of surplus) και η ανταγωνιστικότητα των αγορών ενέργειας (competitiveness of energy markets). Αυτές οι ιδιότητες οδηγούν στη συνέχεια σε δύο πρόσθετα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που είναι η πρόσθετη τιμολόγηση δαπάνης (marginal cost pricing) και η ιδιοκτησία μεγιστοποίησης κέρδους (profit maximization property). Στη συνέχεια περιγράφονται οι τρεις θεμελιώδεις ιδιότητες.

2.8.1.3.1 Γραμμικότητα

Μια γραμμική σχέση εισαγωγής- εξαγωγή (linear input-to-output relationship) σημαίνει ότι κάθε τεχνολογία μπορεί να εφαρμοστεί σε οποιαδήποτε δυναμικό ή ικανότητα (capacity), συνεχώς από ένα χαμηλότερο όριο σε ένα ανώτερο όριο, χωρίς οικονομίες κλίμακας (economies of scale). Σε μια πραγματική οικονομία, μια δεδομένη τεχνολογία είναι συνήθως διαθέσιμη σε διακριτά μεγέθη, παρά σε συνεχή μεγέθη (παραδείγματος χάριν εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας ή ένα

υδροηλεκτρικό πρόγραμμα). Γενικά, το πεδίο της εφαρμογής είναι στο επίπεδο χωρών ή περιοχών. Το γεγονός ότι οι εξισώσεις του μοντέλου TIMES είναι γραμμικές, δεν σημαίνει ότι οι λειτουργίες παραγωγής συμπεριφέρονται σε μια γραμμικά. Πράγματι, οι λειτουργίες παραγωγής του μοντέλου TIMES είναι συνήθως ιδιαίτερα μη γραμμικές (αλλά κυρτές), αντιπροσωπεύοντας τις μη γραμμικές λειτουργίες ως βαθμωτή ακολουθία γραμμικών λειτουργιών (stepped sequence of linear functions). Ένα απλό παράδειγμα είναι ο ανεφοδιασμός κάποιου πόρου που μπορεί να απεικονισθεί ως ακολουθία γραμμικών τμημάτων, κάθε μια με αυξανόμενο κόστος μονάδας (rising unit cost). Κατά συνέπεια, οι οικονομίες μη κλίμακας (diseconomies of scale) είναι συχνά παρούσες στο μοντέλο TIMES και προσαρμόζονται εύκολα.

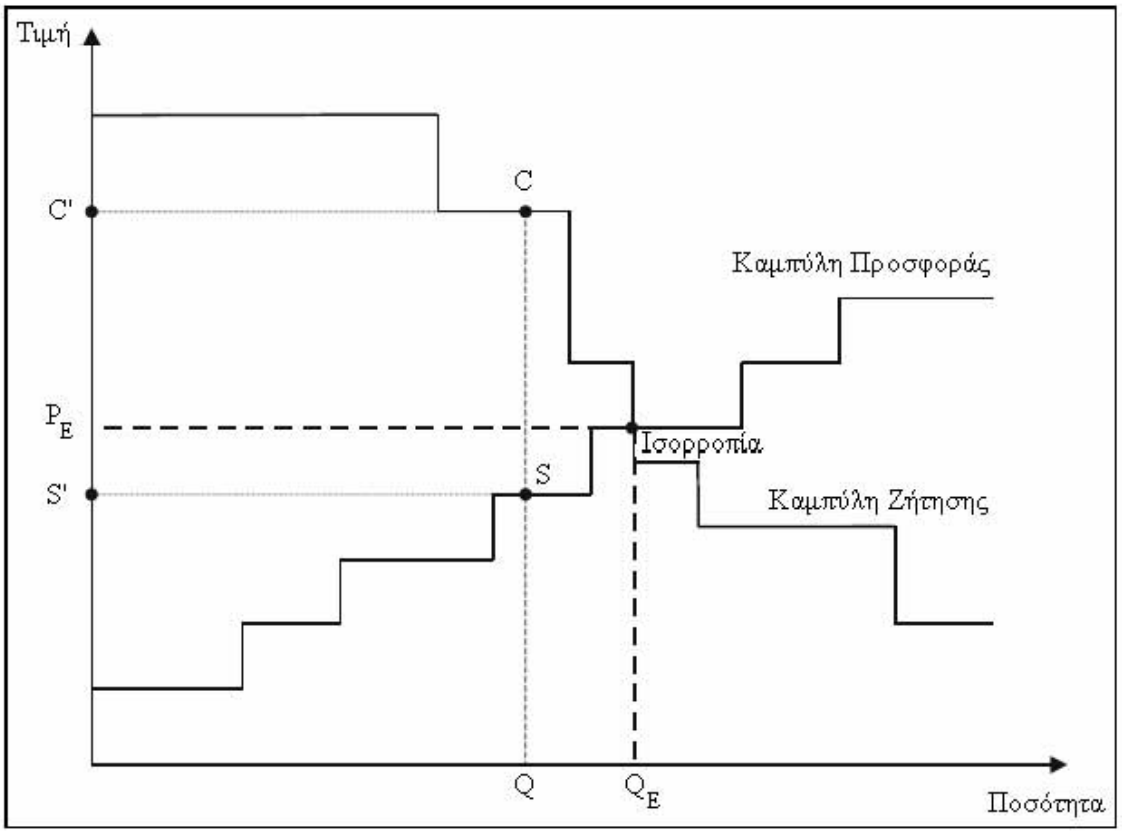
Η ιδιότητα της γραμμικότητας επιτρέπει τον υπολογισμό της ισορροπίας του μοντέλου TIMES με τη χρήση γραμμικού προγραμματισμού. Παρακάτω, παρέχεται μια βελτιωμένη έκδοση των μεταβλητών, των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης του γραμμικού προγραμματισμού που επιλύεται στο μοντέλο TIMES. Στην περίπτωση όπου εμφανίζονται οικονομίες κλίμακας ή κάποια άλλη μη κυρτή (non-convex) σχέση τότε το πρόγραμμα βελτιστοποίησης δεν θα ήταν πλέον γραμμικό ή ακόμα και κυρτό. Θα εξεταστεί μια τέτοια περίπτωση στη συνέχεια κατά την ανάλυση της ενδογενούς εκμάθησης τεχνολογίας (Endogenous Technology Learning).

2.8.1.3.2 Η Μεγιστοποίηση του Πλεονάσματος

Το συνολικό πλεόνασμα μιας οικονομίας είναι το άθροισμα των πλεονασμάτων των προμηθευτών και των καταναλωτών. Στο μοντέλο TIMES, οι προμηθευτές προϊόντων είναι τεχνολογίες που προμηθεύουν προϊόντα και οι καταναλωτές προϊόντων είναι τεχνολογίες ή ζητήσεις που καταναλώνουν προϊόντα. Πολλές τεχνολογίες είναι ταυτόχρονα και προμηθευτές και καταναλωτές, αλλά όχι των ίδιων προϊόντων (μια τεχνολογία δεν έχει ποτέ τα ίδια προϊόντα με την είσοδο και την έξοδό της, με εξαίρεση τις τεχνολογίες αποθήκευσης).

Επομένως, για κάθε προϊόν το RES καθορίζει ένα σύνολο προμηθευτών και ένα σύνολο καταναλωτών. Το σύνολο προμηθευτών προϊόντων χαρακτηρίζεται από

την αντίστροφη λειτουργία παραγωγής του (inverse production function) ή την καμπύλη προσφοράς (supply curve) σχεδιάζοντας το οριακό κόστος παραγωγής των προϊόντων (marginal production cost) ως συνάρτηση της παρεχόμενης ποσότητας. Στο μοντέλο TIMES, όπως και σε άλλα τεχνολογικά μοντέλα, η καμπύλη προσφοράς προϊόντων δεν διευκρινίζεται ρητά, αλλά παράγεται ενδογενώς από το ίδιο το μοντέλο. Ένα τυποποιημένο αποτέλεσμα της γραμμικής θεωρίας προγραμματισμού είναι ότι η αντίστροφη λειτουργία προσφοράς είναι σταδιακά σταθερή και αυξάνεται κατά ένα παράγοντα (βλέπε Σχήμα 2.3) για την περίπτωση ενιαίων προϊόντων. Κάθε οριζόντιο βήμα της αντίστροφης λειτουργίας προσφοράς δείχνει ότι τα προϊόντα παράγονται από ένα ορισμένο σύνολο τεχνολογιών σε μια αυστηρά γραμμική τάση. Δεδομένου ότι οι παραχθείσες ποσότητα αυξάνονται, ένας ή περισσότεροι πόροι του συνόλου των πόρων εξαντλούνται, και επομένως το σύστημα πρέπει να αρχίσει ένα διαφορετικό σύνολο τεχνολογιών. Κατά συνέπεια, κάθε αλλαγή στο σύνολο της παραγωγής παράγει ένα βήμα λειτουργίας παραγωγής βημάτων αξίας υψηλότερης από το προηγούμενο βήμα.

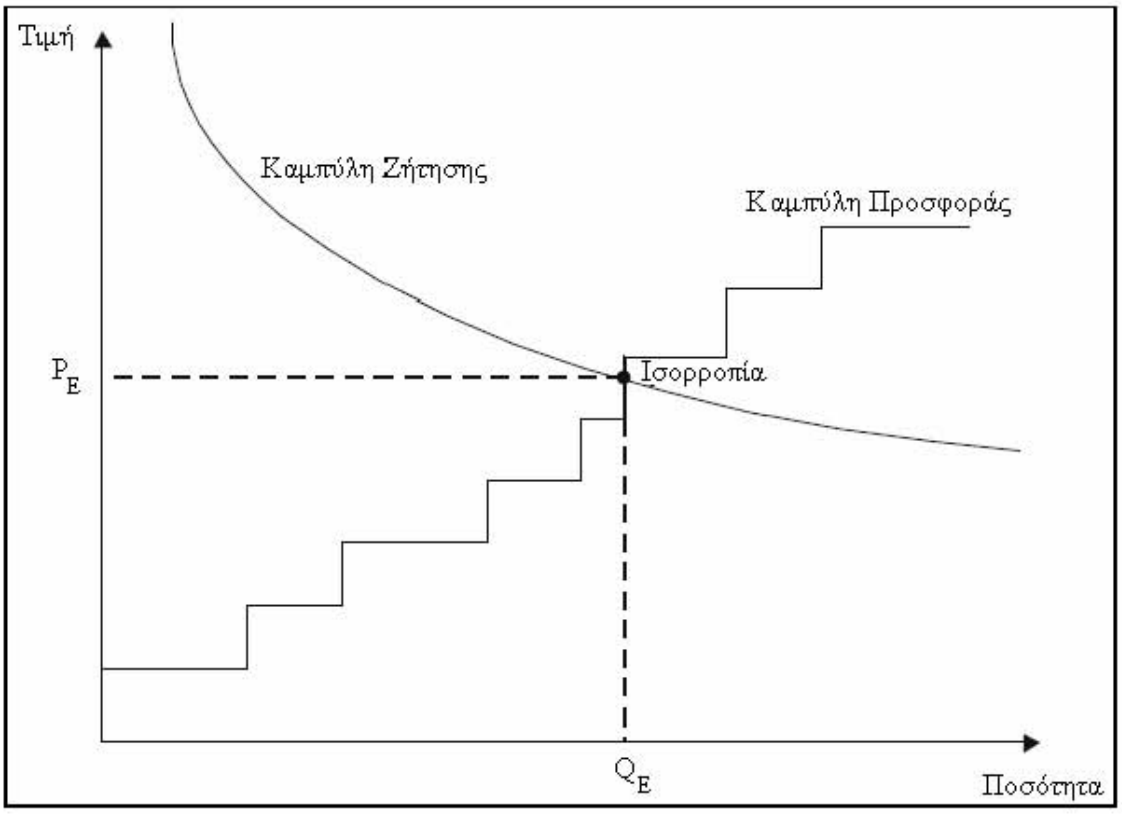


Σχήμα 2.3. Ισορροπία στην περίπτωση ενεργειακής μορφής όταν το μοντέλο ενδογενώς κατασκευάζει τόσο την καμπύλη προσφοράς όσο και την καμπύλη ζήτησης.

Κατά τρόπο συμμετρικό, κάθε περίπτωση στο μοντέλο TIMES καθορίζει μια σειρά αντίστροφων λειτουργιών ζήτησης (inverse demand functions) ή καμπύλες ζήτησης (demand curves). Για τη ζήτηση, μπορεί να γίνει η διάκριση μεταξύ δύο περιπτώσεων. Καταρχήν, εάν ένα προϊόν είναι ενεργειακός μεταφορέας (energy carrier) του οποίου η παραγωγή και η κατανάλωση είναι ενδογενής του μοντέλου, τότε η καμπύλη ζήτησής της κατασκευάζεται ενδογενώς στο μοντέλο TIMES και είναι μια ελαττούμενη βηματικά συνάρτηση της ποσότητας που απαιτείται, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3. Εάν, αφ' ετέρου, το προϊόν είναι ζήτηση για μια ενεργειακή υπηρεσία, τότε η καμπύλη ζήτησης του καθορίζεται εξογενώς από το χρήστη μέσω της ελαστικότητας τιμής-ζήτησης και η καμπύλη είναι σε αυτήν την περίπτωση μια ομαλά μειούμενη καμπύλη όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.4. Στο μοντέλο TIMES, κάθε ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών υποτίθεται ότι έχει μια σταθερή συνάρτηση ελαστικότητας τιμών της μορφής

$$\frac{D}{D_o} = \left(\frac{P}{P_o} \right)^E \tag{1}$$

όπου D_o, P_o είναι ζευγάρι αναφοράς των τιμών ζήτησης και των τιμών για εκείνη την ενεργειακή υπηρεσία και για τον ορίζοντα πρόβλεψης (που λαμβάνεται από την επίλυση ενός σεναρίου αναφοράς) και το E είναι η ελαστικότητα τιμών εκείνης της ζήτησης ενεργειακών υπηρεσιών που επιλέγεται από το χρήστη (σημειώστε ότι αν και όχι παρουσιασμένη από τη σημείωση, αυτή η ελαστικότητα τιμών μπορεί να ποικίλει μέσα στο χρόνο).



Σχήμα 2.4. Ισορροπία στην περίπτωση ενεργειακής υπηρεσίας όπου ο χρήστης ρητά παρέχει την καμπύλη ζήτησης.

Η ισορροπία προσφοράς-ζήτησης είναι στο σημείο τομής της συνάρτησης προσφοράς και της συνάρτησης ζήτησης και αντιστοιχεί σε μια ποσότητα ισορροπίας Q_E και σε μια τιμή ισορροπίας P_E. Στην τιμή P_E, οι προμηθευτές είναι πρόθυμοι να παρέχουν την ποσότητα Q_E και οι καταναλωτές είναι πρόθυμοι να αγοράσουν αυτήν την ποσότητα Q_E. Φυσικά, η ισορροπία στο μοντέλο TIMES αφορά πολλά προϊόντα και η ισορροπία είναι ένα πολυδιάστατο ανάλογο των ανωτέρω, όπου Q_E και το P_E είναι τώρα διανύσματα και όχι βαθμωτά μεγέθη.

Χρησιμοποιώντας το Σχήμα 2.3, για παράδειγμα ο καθορισμός του πλεονάσματος των προμηθευτών που αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο σημείο S στην αντίστροφη καμπύλη προσφοράς είναι το καθαρό εισόδημα (net revenue) που συνδέεται με τα προϊόντα, δηλαδή η περιοχή μεταξύ του οριζόντιου τμήματος SS' και της αντίστροφης καμπύλης προσφοράς. Ομοίως, το πλεόνασμα καταναλωτή για ένα σημείο C στην αντίστροφη καμπύλη ζήτησης, ορίζεται ως η περιοχή μεταξύ του τμήματος CC' και της αντίστροφης καμπύλης ζήτησης. Αυτή η περιοχή είναι η ευκαιρία κέρδους (opportunity gain) του καταναλωτή που αγοράζει το προϊόν σε μια

τιμή χαμηλότερη από την τιμή που είναι πρόθυμος να πληρώσει. Για μια δεδομένη ποσότητα Q, το συνολικό πλεόνασμα (προμηθευτών συν των καταναλωτών) είναι η περιοχή που αποτελείται μεταξύ των δύο αντίστροφων καμπυλών και που βρίσκεται στα αριστερά του Q. Όπως φαίνεται από το Σχήμα 2.3, το συνολικό πλεόνασμα μεγιστοποιείται ακριβώς όταν το Q είναι ίσο με την ποσότητα ισορροπίας Q_E. Επομένως, μπορούμε να δηλώσουμε (στην ενιαία περίπτωση προϊόντων) την ακόλουθη αρχή ισοδυναμίας δηλαδή η ισορροπία προσφοράς-ζήτησης επιτυγχάνεται όταν το συνολικό πλεόνασμα μεγιστοποιείται.

Στην πολυδιάστατη περίπτωση, η απόδειξη της ανωτέρω δήλωσης είναι λιγότερο προφανής και απαιτεί μια ορισμένη ιδιότητα ολοκλήρωσης (integrability property) [27], [28]. Ένας ικανοποιητικός όρος για να ικανοποιείται η ιδιότητα ολοκλήρωσης είναι όταν οι διαγώνιες ελαστικότητες τιμών (cross-price elasticities) οποιωνδήποτε δύο ενεργειακών μορφών είναι ίσες, δηλαδή

$$\frac{\partial P_j}{\partial Q_i} = \frac{\partial P_i}{\partial Q_j} \text{ για όλα τα } i, j \qquad (2)$$

Στην περίπτωση των προϊόντων που είναι ενεργειακές υπηρεσίες, αυτοί οι όροι ικανοποιούνται στο μοντέλο TIMES επειδή έχουν υποτεθεί διαγώνιες μήτρες τιμών ελαστικότητας. Στην περίπτωση ενός ενεργειακού μεταφορέα, όπου η καμπύλη ζήτησης παράγεται ενδογενώς, είναι επίσης εύκολο να δειχτεί ότι η ιδιότητα ολοκλήρωσης ικανοποιείται πάντα. Κατά συνέπεια, η αρχή της ισοδυναμίας ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Αυτό είναι ένα χρήσιμο αποτέλεσμα που παρέχει μια απλή μέθοδο για την ισορροπία, όπως εξηγείται λεπτομερώς παρακάτω.

Εν περιλήψει, οι εγγυήσεις της αρχής της ισοδυναμίας παρέχουν το συμπέρασμα ότι το μοντέλο TIMES μεγιστοποιεί το συνολικό πλεόνασμα Η συνολική έννοια πλεονάσματος είναι ένα στήριγμα των οικονομικών κοινωνικής ευημερίας επειδή λαμβάνουν υπόψη τόσο τα πλεονάσματα των καταναλωτών όσο και των παραγωγών.

2.8.1.3.3 Ανταγωνιστικές Αγορές Ενέργειας με Τέλεια Πρόβλεψη

Οι ανταγωνιστικές αγορές ενέργειας χαρακτηρίζονται από τις τέλειες πληροφορίες (perfect information) και από τους πολλαπλάσιους πράκτορες που δεν

ασκούν την αγοραστική δύναμη. Η υπόθεση των ανταγωνιστικών αγορών συνεπάγεται ότι η τιμή αγοράς προϊόντων είναι ίση με την οριακή αξία της στην οικονομία κάτι το οποίο αποτελεί τυποποιημένο αποτέλεσμα της μικροοικονομικής θεωρίας. Αυτή η ιδιότητα υιοθετείται στο μοντέλο TIMES. Στο μοντέλο TIMES, η τέλεια υπόθεση πληροφοριών επεκτείνεται σε ολόκληρο τον ορίζοντα προγραμματισμού, έτσι ώστε κάθε πράκτορας να έχει την τέλεια πρόβλεψη δηλαδή την πλήρη γνώση των παραμέτρων, του παρόντος και του μέλλοντος της αγοράς. Ως εκ τούτου, η ισορροπία υπολογίζεται με τη μεγιστοποίηση του συνολικού πλεονάσματος σε ολόκληρο το σύνολο των περιόδων. Μια τέτοια ισορροπία καλείται επίσης και ως διαχρονική, δυναμική ισορροπία (inter-temporal, dynamic equilibrium).

Εντούτοις, η τέλεια υπόθεση πρόβλεψης μπορεί να χαλαρώσει ώστε να γίνει η υπόθεση μερικών αβέβαιων παραμέτρων. Αυτή η υπόθεση είναι στη βάση της πιθανολογικής επιλογής προγραμματισμού του μοντέλου TIMES. Μια άλλη παραλλαγή του μοντέλου TIMES υποθέτει ότι οι πράκτορες έχουν μια περιορισμένη πρόβλεψη για παράδειγμα μια ή μερικές περίοδοι και όχι πλήρη ορίζοντα.

2.8.1.3.4 Οριακή Τιμολόγηση Αξίας

Το γεγονός ότι η ισορροπία στο μοντέλο TIMES εμφανίζεται στο σημείο τομής της αντίστροφης καμπύλης προσφοράς και της αντίστροφης καμπής ζήτησης υπονοεί άμεσα ότι η τιμή ισορροπίας είναι ίση με την οριακή αξία των προϊόντων (marginal system value of the commodity). Από μια διαφορετική σκοπιά, η θεωρία δυαδικότητας του γραμμικού προγραμματισμού δείχνει ότι για κάθε περιορισμό του γραμμικού προγράμματος του μοντέλου TIMES υπάρχει μια διπλή μεταβλητή. Αυτή η διπλή μεταβλητή (όταν επιτυγχάνεται μια βέλτιστη λύση) καλείται επίσης και τιμή σκιάς του περιορισμού (constraint's shadow price) και είναι ίση με την οριακή αλλαγή της αντικειμενικής λειτουργίας ανά μονάδας αύξησης του περιορισμού στο δεξί μέρος (marginal change of the objective function per unit increase of the constraint's right-hand-side). Παραδείγματος χάριν, η τιμή σκιών ενός περιορισμού ζήτησης είναι η τιμή της αντίστοιχης ενεργειακής υπηρεσίας.

Η θεωρία δυαδικότητας απαραιτήτως δεν δείχνει ότι η οριακή αξία ενός προϊόντος είναι ίση με την πρόσθετη δαπάνη για την παραγωγή του προϊόντος.

Παραδείγματος χάριν, στο Σχήμα 2.3 η τιμή δεν αντιστοιχεί σε οποιοδήποτε ασήμαντο κόστος προσφοράς, δεδομένου ότι βρίσκεται σε μια ασυνέχεια της αντίστροφης καμπύλης ανεφοδιασμού. Σε αυτήν την περίπτωση, η τιμή καθορίζεται από τη ζήτηση παρά από την προσφορά και το οριακό κόστος διατίμησης (marginal cost pricing) αυτό δηλαδή που χρησιμοποιείται στα πλαίσια της βελτιστοποίησης των μοντέλων είναι ανακριβής. Η οριακή αξία διατίμησης (marginal value pricing).

2.8.1.3.5 Μεγιστοποίηση Κέρδους

Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα μπορεί να προκύψει από τις υποθέσεις της ανταγωνιστικότητας. Ενώ ο δεδηλωμένος στόχος του μοντέλου TIMES είναι να μεγιστοποιηθεί το συνολικό πλεόνασμα, αυτό έχει αποτέλεσμα κάθε οικονομικός φορέας στο μοντέλο TIMES να προσπαθεί να μεγιστοποιεί το κέρδος του. Αυτή η ιδιότητα είναι συγγενής με την γνωστή ιδιότητα των αοράτων χεριών (invisible hand) των ανταγωνιστικών αγορών. Αυτή η ιδιότητα είναι σημαντική γιατί παρέχει μια εναλλακτική αιτιολόγηση για την κατηγορία των ισορροπιών των βασισμένων στη μεγιστοποίηση του συνολικού πλεονάσματος. Είναι τώρα δυνατό να μετατοπιστεί η λογική του μοντέλου από ένα παγκόσμιο, κοινωνικό μοντέλο (μεγιστοποίηση πλεονάσματος) σε ένα τοπικό, αποκεντρωμένο μοντέλο (μεμονωμένη μεγιστοποίηση χρησιμότητας). Φυσικά, αυτή η ισοδυναμία ισχύει μόνο στο μέτρο που δεν είναι αυστηρά επιβεβλημένος ο οριακός μηχανισμός τιμολόγησης αξίας, δηλαδή ούτε μεμονωμένοι παραγωγοί ούτε μεμονωμένοι καταναλωτές έχουν αγοραστική δύναμη.

2.9 Τρία Προαιρετικά Χαρακτηριστικά Γνωρίσματα του Μοντέλου TIMES

2.9.1 Η Άμορφη Επιλογή Επένδυσης

2.9.1.1 Περιγραφή

Σε μερικές περιπτώσεις, η ιδιότητα της γραμμικότητας του μοντέλου TIMES μπορεί να γίνει ένα μειονέκτημα όσον αφορά την ακριβή διαμόρφωση ορισμένων αποφάσεων επένδυσης. Στη συνέχεια γίνεται η εξέταση του μοντέλου TIMES για μια σχετικά μικρή κοινότητα όπως για μια πόλη. Για ένα τέτοιο πεδίο, μπορεί να ληφθεί υπόψη η κοκκοποίηση (granularity) μερικών επενδύσεων. Παραδείγματος χάριν, το μέγεθος εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που προτείνεται από το μοντέλο θα έπρεπε να προσαρμοστεί σε ένα εκτελέσιμο ελάχιστου μεγέθους (δε θα είχε κανένα νόημα να αποφασίσουν να κατασκευάσουν πυρηνικές εγκαταστάσεις 50MW). Ένα άλλο παράδειγμα για τη διαμόρφωση πολυπεριφερειακού μοντέλου είναι η κατασκευή ή όχι ενός διαγωνίων περιοχών ηλεκτρικού πλέγματος (cross-region electric grid) ή ενός διαγωνίων περιοχών σωλήνωσης αερίου (cross-region gas pipeline) όταν πρόκειται για διακριτές αυξήσεις μεγέθους. Οι διαδικασίες οι υποκείμενες στις επενδύσεις μόνο συγκεκριμένων αυξήσεων περιγράφονται ως άμορφες επενδύσεις (lumpy investments).

Για άλλους τύπους επενδύσεων, το μέγεθος δεν επηρεάζει, όπως για παράδειγμα το μοντέλο μπορεί να αποφασίσει να αγοράσει 10950.52 ηλεκτρικά αυτοκίνητα, το οποίο στρογγυλεύεται εύκολα σε 10950 χωρίς οποιαδήποτε σοβαρή δυσχέρεια. Παρόμοια κατάσταση ισχύει για διάφορες κατοικημένες ή εμπορικές συσκευές θέρμανσης, ή για την ικανότητα των ανεμοστροβίλων ή των βιομηχανικών λεβήτων, ή για οποιεσδήποτε τεχνολογίες με σχετικά μικρά εφικτά μεγέθη. Τέτοιες τεχνολογίες δεν θα ήταν υποψήφιες για επεξεργασία ως άμορφες επενδύσεις. Είναι η ευθύνη του χρήστη να αποφασίσει αν ορισμένες τεχνολογίες πρέπει (ή δεν πρέπει) να σεβαστούν τον ελάχιστο περιορισμό μεγέθους, εκτιμώντας τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα. Αυτό το τμήμα εξηγεί πώς το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού στο μοντέλο TIMES μετασχηματίζεται στο πρόβλημα ακέραιου

γραμμικού προγραμματισμού (MIP) για να προσαρμοστούν οι ελάχιστοι ή πολλαπλάσιοι περιορισμοί μεγέθους και στη συνέχεια παρουσιάζει τις συνέπειες αυτών περιορισμών μεγέθους στον υπολογιστικό χρόνο και στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων δυαδικότητας.

Η άμορφη επιλογή επένδυσης που είναι διαθέσιμη στο μοντέλο TIMES είναι ελαφρώς γενικότερη από αυτή που περιγράφεται παραπάνω. Ασφαλίζει ότι η επένδυση σε μια τεχνολογία k είναι ίση με έναν από τους πεπερασμένους αριθμούς N προκαθορισμένων μεγεθών $0, S_1(t), S_2(t), ..., S_N(t)$. Όπως υπονοείται από τη σημείωση, αυτά τα διακριτά μεγέθη μπορούν να είναι διαφορετικά σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Το πρόβλημα βελτιστοποίησης ως αποτέλεσμα της εισαγωγής των μεταβλητών ακέραιων αριθμών σε ένα γραμμικό πρόγραμμα καλείται μικτού γραμμικού προγράμματος ακεραίων αριθμών (Mixed Integer Program ή MIP).

2.9.1.2 Διατύπωση και Λύση του Μικτού Γραμμικού Προγράμματος Ακέραιων Αριθμών

Η διαμόρφωση μιας άμορφης επένδυσης περιλαμβάνει τις μεταβλητές ακέραιων αριθμών, δηλ. μεταβλητές των οποίων οι τιμές μπορούν μόνο να είναι μη αρνητικοί ακέραιοι αριθμοί (0, 1, 2, …). Η μαθηματική διατύπωση είναι η ακόλουθη

$$NCAP(p,t) = \sum_{i=1}^{N} S_i(p,t) \times Z_i(p,t) \text{ για κάθε } t = 1,...,T \quad (3)$$

$$Z_i(p,t) = 0,1 \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N} Z_i(p,t) \le 1 \quad (5)$$

Ο δεύτερος και τρίτος περιορισμός υπονοούν ότι το πολύ μια από τις μεταβλητές Z είναι ίση με 1. Επομένως, ο πρώτος περιορισμός σημαίνει ότι το $NCAP$ είναι ίσο με ένα από τα μεγέθη ή είναι ίσο με 0, το οποίο είναι το επιθυμητό αποτέλεσμα. Αν και η διατύπωση των άμορφων επενδύσεων φαίνεται απλή, έχει μια βαθιά επίδραση στο προκύπτον πρόγραμμα βελτιστοποίησης. Πράγματι, τα προβλήματα MIP είναι εμφανώς δυσκολότερα να λυθούν από τα προβλήματα LP, και στην πραγματικότητα πολλές από τις ιδιότητες των γραμμικών προγραμμάτων που συζητούνται στα προηγούμενα τμήματα δεν ισχύουν αυτούσιες για προβλήματα MIP,

συμπεριλαμβανομένης της θεωρίας δυαδικότητας (duality theory), της συμπληρωματικής χαλαρώτητας (complementary slackness). Ας σημειωθεί ότι η δυνατότητα του περιορισμού $Z(p,t)$ να είναι 0 ή 1 προέρχεται από τη διαιρετότητα (divisibility) των γραμμικών προγραμμάτων. Αυτό σημαίνει ότι η περιοχή των εφικτών λύσεων των ακέραιων μεταβλητών αριθμών (feasibility domain of integer variables) (και επομένως μερικών μεταβλητών επένδυσης) δεν είναι πλέον παρακείμενη, καθιστώντας το πρόβλημα δυσκολότερο. Η αύξηση της δυσκολίας έγκειται στο γεγονός ότι δεν μπορούν να εφαρμοστούν καθαρά αλγεβρικές μεθόδοι για να λυθεί το MIP. Στην πραγματικότητα, σχεδόν όλοι οι αλγόριθμοι λύσης MIP κάνουν χρήση, τουλάχιστον μέχρι ενός ορισμένου βαθμού, των μερικών απαριθμητικών σχεδίων (partial enumerative schemes), τα οποία τείνουν να εμφανίζονται χρονοβόρα και να παρέχουν μικρότερη αξιοπιστία από τις αλγεβρικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται στα LP.

2.9.1.3 Σημαντική Παρατήρηση στη Δυική Λύση MIP (Τιμές Σκιών)

Η χρησιμοποίηση MIP παρά LP ασκεί επίδραση στην ερμηνεία των τιμών σκιών στο μοντέλο TIMES. Μόλις βρεθεί η βέλτιστη λύση MIP, είναι σύνηθες για του επιλυτές MIP να καθορίσουν όλες τις μεταβλητές ακέραιων αριθμών στις βέλτιστες τιμές ακέραιων αριθμών τους και να εκτελέσουν μια πρόσθετη επανάληψη του αλγορίθμου LP, ώστε να ληφθεί η δυική λύση (dual solution) δηλαδή οι τιμές σκιών όλων των περιορισμών. Ας θεωρηθεί για παράδειγμα η τιμή σκιάς της τιμής του περιορισμού ισορροπίας για το φυσικό αέριο. Σε ένα MIP, αυτή η τιμή αντιπροσωπεύει την τιμή του αερίου υπό όρους στον καθορισμό των άμορφων επενδύσεων στις βέλτιστες τιμές ακέραιων αριθμών τους.

Τελικά, κατά τη χρησιμοποίηση MIP, μόνο η πρωταρχική λύση είναι πλήρως αξιόπιστη. Παρά την προειδοποίηση, οι άμορφες επενδύσεις διαμόρφωσης μπορούν να είναι κυρίαρχης σημασίας σε μερικές περιπτώσεις, και μπορούν έτσι να δικαιολογήσουν τον πρόσθετο χρόνο υπολογισμού τους και τη μερική απώλεια δυικών πληροφοριών.

2.9.2 Ενδογενής Τεχνολογική Εκμάθηση

2.9.2.1 Εισαγωγή

Σε ένα μακροπρόθεσμο, δυναμικό μοντέλο όπως είναι το μοντέλο TIMES, τα χαρακτηριστικά πολλών από τις μελλοντικές τεχνολογίες είναι σχεδόν αναπόφευκτα να αλλάξουν κατά το πέρας των μελλοντικών περιόδων λόγω της τεχνολογικής εκμάθησης (technological learning).

Σε μερικές περιπτώσεις είναι δυνατό να προβλεφθούν τέτοιες αλλαγές ως χρονική συνάρτηση και έτσι να καθοριστεί μια χρονοσειρά τιμών για κάθε παράμετρο όπως είναι το κόστος επένδυσης ανά μονάδα (unit investment cost), αποδοτικότητα (efficiency) κτλ. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η τεχνολογική εκμάθηση είναι εξωγενής (exogenous) δεδομένου ότι εξαρτάται μόνο από το χρόνο και μπορεί έτσι να καθοριστεί εκτός μοντέλου.

Σε άλλες περιπτώσεις υπάρχουν τεχνολογικές παράμετροι των οποίων ο ρυθμός που αλλάζουν εξαρτάται από την εμπειρία που αποκτιέται από αυτήν την τεχνολογία. Αυτήν η εμπειρία δεν είναι απλώς μια χρονική συνάρτηση που έχει παρέλθει, αλλά εξαρτάται από τη συσωρευτική επένδυση στην τεχνολογία. Σε μια τέτοια κατάσταση, η τεχνολογική εκμάθηση είναι ενδογενής (endogenous), δεδομένου ότι οι μελλοντικές τιμές των παραμέτρων δεν είναι πλέον μια χρονική συνάρτηση που έχει παρέλθει μόνο αλλά εξαρτάται από τις συσωρευτικές αποφάσεις επένδυσης που λαμβάνονται από το μοντέλο (που είναι άγνωστες πριν την εκτέλεση του μοντέλου). Κατά συνέπεια, η εξέλιξη των τεχνοοικονομικών παραμέτρων δεν μπορεί να καθοριστεί εκτός μοντέλου, δεδομένου ότι εξαρτάται από τα αποτελέσματα του μοντέλου. Η ενδογενής τεχνολογική εκμάθηση (Endogenous Technological Learning ή ETL) ονομάζεται επίσης και μάθηση από την εκτέλεση (Learning-By-Doing ή LBD).

Εκτιμώντας ότι η εξωγενής τεχνολογική εκμάθηση δεν απαιτεί οποιαδήποτε πρόσθετη διαμόρφωση, η ενδογενής τεχνολογική εκμάθηση (ETL) απαιτεί συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Στο μοντέλο TIMES, υπάρχει η πρόνοια της απεικόνισης των αποτελεσμάτων της ενδογενούς εκμάθησης στο κόστος επένδυσης μονάδας των τεχνολογιών.

2.9.2.2 Η Πρόκληση ETL

Σε πολλές τεχνολογίες έχουν αναληφθεί σε διάφορες χώρες εμπειρικές μελέτες κόστους επένδυσης ανά μονάδα. Πολλές από αυτές τις μελέτες βρίσκουν μια εμπειρική σχέση μεταξύ του κόστους επένδυσης ανά μονάδα μιας τεχνολογίας στο χρόνο t από τη σχέση

$$C_t = \sum_{j=-1}^{t} VAR_INV_j \quad (6)$$

Μια κλασική σχέση μεταξύ του κόστους επένδυσης ανά μονάδα και της συσωρευτικής επένδυσης σε αυτήν την τεχνολογία δίνεται από τη σχέση

$$INVCOST_t = a \cdot C_t^{-b} \quad (7)$$

όπου a είναι το αρχικό κόστος επένδυσης ανά μονάδα (όταν το C_t είναι ίσο με 1) και b είναι ο δείκτης εκμάθησης, που αντιπροσωπεύει την ταχύτητα της μάθησης. Με την αύξηση της εμπειρίας που απεικονίζεται από τη συσωρευτική ικανότητα, μειώνονται οι δαπάνες επένδυσης ανά μονάδα και αυτό μπορεί να καταστήσει τις επενδύσεις στην τεχνολογία ελκυστικότερες. Πρέπει να είναι σαφές ότι οι 'μυωπικοί' επενδυτές (near-sighted investors) δε θα είναι σε θέση να ανιχνεύσουν το πλεονέκτημα νωρίς στις τεχνολογίες εκμάθησης, δεδομένου ότι θα παρατηρήσουν μόνον το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης και (όντας μυωπικός), δεν θα προσδοκήσουν τη μελλοντική πτώση του κόστος επένδυσης ως αποτέλεσμα των πρόωρων επενδύσεων. Με άλλα λόγια, η διαίσθηση της πλήρους τεχνολογικής δυνατότητας μάθησης μέχρι την εκτέλεση απαιτεί διορατικούς πράκτορες που να μπορούν να δεχτούν την παραγωγή των αρχικά μη-κερδοφόρων επενδύσεων προκειμένου να ωφεληθούν αργότερα από τη μείωση των δαπανών επένδυσης.

Όσον αφορά την πραγματική εφαρμογή, απλά χρησιμοποιώντας την (7) ως παράγοντα της αντικειμενικής συνάρτησης λειτουργίας $VARINT_t$ θα παραγάγει μια μη γραμμική, μη κυρτή έκφραση. Επομένως, η προκύπτουσα μαθηματική βελτιστοποίηση δεν είναι πλέον γραμμική, και απαιτεί ειδικές τεχνικές για τη λύση της. Στο μοντέλο TIMES, χρησιμοποιείται μια μικτή διατύπωση προγραμματισμού ακέραιων αριθμών (MIP), όπως θα περιγραφεί στη συνέχεια.

2.9.2.3 Η Ενδογενής και η Εξωγενής Εκμάθηση

Σε αυτήν την υποπαράγραφο, θα παρουσιαστούν σχόλια και επισημάνσεις που μπορούν να είναι χρήσιμα στους δυνητικούς χρήστες του χαρακτηριστικού γνωρίσματος ETL.

Εάν ένα μοντέλο οργανώνεται με μια τέτοια διατύπωση, είναι πολύ πιθανό ότι το μοντέλο θα επιλέξει μερικές τεχνολογίες και θα επενδύσει μαζικά σε κάποια πρόωρη περίοδο σε αυτές τις τεχνολογίες εκτός αν αποτρέπεται από το να το κάνει από πρόσθετους περιορισμούς. Η εξήγηση αυτού του συμβάντος μπορεί να δοθεί ποιοτικά από το γεγονός ότι μόλις επιλεχτεί μια τεχνολογία εκμάθησης για την επένδυση, δύο αντιτιθέμενες δυνάμεις παρουσιάζονται στο παιχνίδι στην απόφαση του βέλτιστου συγχρονισμού των επενδύσεων. Αφ' ενός, η απόρριψη παρέχει ένα κίνητρο για την αναβολή των επενδύσεων. Αφ' ετέρου, η επένδυση επιτρέπει στο κόστος επένδυσης ανά μονάδα να μειωθεί αμέσως και επιτρέπει έτσι τις πολύ φτηνότερες επενδύσεις στις τεχνολογίες εκμάθησης σε όλες τις μελλοντικές περιόδους. Λαμβάνοντας υπόψη τη σημαντική μείωση δαπανών που προκαλείται συνήθως με την εκμάθηση, ο πρώτος παράγοντας (απόρριψη) είναι απίθανο να υπερισχύσει, και ως εκ τούτου το μοντέλο θα τείνει να επενδύσει μαζικά και νωρίς σε τέτοιες τεχνολογίες (ή καθόλου). Η μαζική επένδυση εξαρτάται από τους άλλους περιορισμούς του προβλήματος (όπως ο βαθμός στον οποίο τα προϊόντα που παράγονται από την τεχνολογία εκμάθησης είναι σε ζήτηση, η παρουσία υπαρχουσών τεχνολογιών που ανταγωνίζονται με την τεχνολογία εκμάθησης, κ.λπ.). Εντούτοις, υπάρχει ο σαφής κίνδυνος ότι μπορούμε να παρατηρηθούν μη ρεαλιστικές μεγάλες πρόωρες επενδύσεις σε μερικές τεχνολογίες εκμάθησης.

Οι υπεύθυνοι μοντελοποίησης ETL γνωρίζουν αυτό το φαινόμενο και επιβάλλουν πρόσθετους περιορισμούς για να ελέγξουν τη διείσδυση των τεχνολογιών εκμάθησης. Αυτοί οι περιορισμοί μπορούν να λάβουν τη μορφή άνω ορίων στο δυναμικό ή την επένδυση στις τεχνολογίες εκμάθησης κάθε φορά που η περίοδος, που απεικονίζεται το κρίνει ρεαλιστικό. Αυτά τα άνω όρια διαδραματίζουν έναν καθοριστικό ρόλο στη λύση του προβλήματος και συχνότερα παρατηρείται ότι η ικανότητα μιας τεχνολογίας εκμάθησης είναι είτε ίση με 0 είτε με ένα άνω όριο. Αυτή η τελευταία παρατήρηση δείχνει ότι η επιλογή των άνω ορίων από τον υπεύθυνο

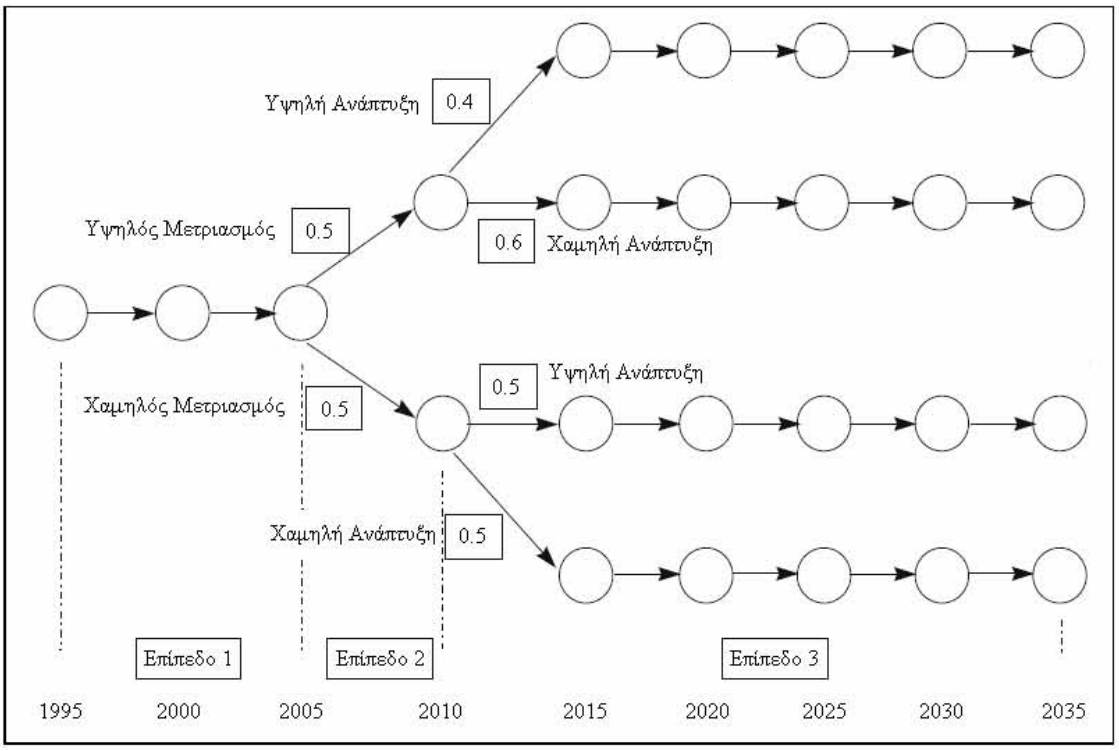
μοντελοποίησης (modeler) είναι ο κυρίαρχος παράγοντας στον έλεγχο της διείσδυσης των επιτυχών τεχνολογιών εκμάθησης.

2.9.3 Στοχαστικός Προγραμματισμός

2.9.3.1 Εισαγωγή

Ο πιθανολογικός ή στοχαστικός προγραμματισμός (stochastic programming) είναι μια προσέγγιση για τη βέλτιστη λήψη απόφασης σε περιβάλλον κινδύνου (risk). Ο κίνδυνος αποτελείται από την αβεβαιότητα τη σχετική με μερικές τιμές μερικές (ή όλες) των παραμέτρων LP που είναι οι συντελεστές δαπανών (cost coefficients), οι συντελεστές μητρών (matrix coefficients) και οι RHS. Κάθε άγνωστη (ή αβέβαιη) παράμετρος θεωρείται ως τυχαία μεταβλητή, συνήθως με μια διακριτή, γνωστή κατανομή πιθανότητας. Η αντικειμενική συνάρτηση γίνεται έτσι επίσης μια τυχαία μεταβλητή και πρέπει να επιλεγεί ένα κριτήριο προκειμένου να κατασταθεί η βελτιστοποίηση δυνατή. Ένα τέτοιο κριτήριο μπορεί να είναι το αναμενόμενο κόστος, η αναμενόμενη χρησιμότητα ή και άλλα [29].

Η αβεβαιότητα σε μια δεδομένη παράμετρο λέγεται ότι είναι είτε πλήρως είτε μερικώς επιλυμένη (resolved), στο χρόνο ανάλυσης (resolution time) που είναι ο χρόνος στον οποίο η πραγματική αξία της παραμέτρου εμφανίζεται. Οι διαφορετικές παράμετροι μπορούν να έχουν διαφορετικούς χρόνους ανάλυσης. Και οι χρόνοι ανάλυσης και οι κατανομές πιθανότητας των παραμέτρων μπορούν να αντιπροσωπευθούν σε ένα δέντρο γεγονότος (event tree) όπως αυτό παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.5, που απεικονίζει μια χαρακτηριστική ενεργειακή/περιβαλλοντική κατάσταση.



Σχήμα 2.5. Παράδειγμα δέντρου γεγονότος.

Στο Σχήμα 2.5, δύο παράμετροι είναι αβέβαιες: το επίπεδο μετριασμού (mitigation level) και ρυθμός αύξησης ζήτησης (demand growth rate). Η πρώτη παράμετρος μπορεί να λάβει μόνο δύο τιμές (υψηλός και χαμηλός μετριασμός) και η τιμή της μεταβλητής γίνεται γνωστή το 2005. η δεύτερη μεταβλητή μπορεί και αυτή να λάβει δύο τιμές (υψηλή ανάπτυξη και χαμηλή ανάπτυξη) και η τιμή που λαμβάνει γίνεται γνωστή το 2010. Οι πιθανότητες των εκβάσεων παρουσιάζονται κατά μήκος των κλάδων. Σε αυτό το παράδειγμα γίνεται η υπόθεση ότι το παρόν είναι το έτος 1995. Αυτό το παράδειγμα παρουσιάζει τρία στάδια δηλαδή ανάλυση που λαμβάνει την τιμή δύο. Το απλούστερο δέντρο γεγονότος έχει μόνο δύο στάδια δηλαδή ανάλυση που λαμβάνει την τιμή ένα.

2.9.3.2 Μαθηματική Διατύπωση

Η βασική παρατήρηση είναι ότι πριν από το χρόνο ανάλυσης, ο υπεύθυνος της μοντελοποίησης (και ως εκ τούτου και το μοντέλο) δε γνωρίζει τις πραγματικές τιμές των τυχαίων παραμέτρων αλλά παρόλα αυτά πρέπει να λάβει αποφάσεις. Αντίθετα, μετά από το χρόνο ανάλυσης, ο υπεύθυνος της μοντελοποίησης ξέρει με βεβαιότητα

την έκβαση του γεγονότος και οι αποφάσεις του θα είναι διαφορετικές και εξαρτώμενες από την έκβαση που έχει εμφανιστεί. Για το παράδειγμα στο Σχήμα 2.5, το 2000 και το 2005 μπορεί να υπάρξει μόνο ένα σύνολο αποφάσεων, ενώ το 2010 θα υπάρξουν δύο σύνολα αποφάσεων, ενδεχόμενα σε όποια των εκβάσεων μετριασμού (υψηλών ή χαμηλών) έχει εμφανιστεί, και το 2015, 2020, ..., 2035 θα υπάρξουν τέσσερα σύνολα πιθανών αποφάσεων. Αυτή η παρατήρηση οδηγεί άμεσα στο κατωτέρω, γενικό, πολυπεριοδικό, πολυβαθμικό, πιθανολογικό πρόγραμμα (8)–(10)

$$\min Z = \sum_{t\in T}\sum_{w\in W(t)} C(t,w)\times X(t,w)\times p(t,w) \tag{8}$$

υπό τους περιορισμούς

$$A(t,w)\times X(t,w)\geq b(t,w) \quad \forall t\in T, \forall w\in W(t) \tag{9}$$

$$\sum_{t\in T} D(t,g(t,w))\times X(t,g(t,w))\geq e(w) \quad \forall t\in T, \forall w\in W(T) \tag{10}$$

όπου t είναι χρονική περίοδος, T είναι το σύνολο των χρονικών περιόδων, w είναι ο δείκτης παγκόσμιας κατάστασης, $W(t)$ είναι σύνολο παγκοσμίων δεικτών για το χρονικό διάστημα t και όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 $W(1995)=1$, $W(2000)=1$, $W(2005)=1$, $W(2010)=(1,2)$, $W(2015)=(1,2,3,4)$, $W(2020)=(1,2,3,4)$, $W(2025)=(1,2,3,4)$, $W(2030)=(1,2,3,4)$, $W(2035)=(1,2,3,4)$, $W(T)$ είναι το σύνολο παγκοσμίων δεικτών στο τελευταίο στάδιο δηλαδή το σύνολο σεναρίων. Το καθορισμένο $W(T)$ είναι ομοιομορφικό (homeomorphic) στο σύνολο των μονοπατιών από την περίοδο 1 έως την τελική περίοδο T στο δέντρο γεγονότος, $g(t,w)$ είναι μια μοναδική χαρτογράφηση από το $\{(t,w)|\ w\in W(T)\}$ στο $W(t)$ σύμφωνα με το δέντρο γεγονότος, το διάνυσμα στηλών των μεταβλητών απόφασης στην περίοδο t, $X(t,w)$είναι το διάνυσμα στήλης των μεταβλητών απόφασης την περίοδο t υπό w, $C(t,w)$ το διάνυσμα σειράς δαπανών υπό w, $p(t,w)$ οι πιθανότητες γεγονότος υπό w, $A(t,w)$ η υπομήτρα LP των ενιαίων περιορισμών περιόδου για την περίοδο t υπό w, $\beta(t,w)$ είναι το δεξί δευτερεύον διάνυσμα στήλης (ενιαίοι περιορισμοί περιόδου) για την περίοδο t υπό w, $D(t,w)$ είναι η υπομήτρα LP των περιορισμών πολυπεριόδου υπό w, $e(w)$ είναι το δεξιό δευτερεύον διάνυσμα στήλης (περιορισμοί πολυπεριόδου) υπό w.

Η διατύπωση που χρησιμοποιείται είναι το αναμενόμενο κριτήριο δαπανών [30], [31], [32]. Πρέπει να γίνει η επισήμανση ότι πρόκειται για ένα πρόβλημα LP, αλλά το μέγεθός του είναι μεγαλύτερο από αυτό του αιτιοκρατικού μοντέλου TIMES.

2.9.3.3 Κριτήρια Εναλλακτικής Βελτιστοποίησης με Αναμενόμενο Κριτήριο Χρησιμότητας με Αποστροφή Κινδύνου

Η προηγούμενη περιγραφή του πιθανολογικού προγραμματισμού υποθέτει ότι ο φορέας χάραξης πολιτικής δέχεται το αναμενόμενο κόστος βελτιστοποιώντας το κριτήριό του. Αυτό είναι ισοδύναμο με το ότι είναι ουδέτερος στον κίνδυνο. Σε πολλές περιπτώσεις, η υπόθεση της ουδετερότητας κινδύνου είναι μόνο μια προσέγγιση του αληθινού ρόλου της χρησιμότητας ενός ιθύνοντος. Στο μοντέλο TIMES, υπάρχει μια εναλλακτική αντικειμενική συνάρτηση που μοντελοποιεί την αποστροφή στον κίνδυνο. Λαμβάνει τη μορφή ενός αναμενόμενου κριτηρίου χρησιμότητας με γραμμικοποιημένη αποστροφή στον κίνδυνο (expected utility criterion with linearized risk aversion). Η προσέγγιση είναι βασισμένη στο κλασσικό μοντέλο E-V που αποτελεί σύντμηση της αναμενόμενης αξίας-διακύμανσης (Expected Value-Variance). Στην προσέγγιση E-V, υποτίθεται ότι η διαφορά του κόστους είναι ένα αποδεκτό μέτρο του κινδύνου που συνδέεται με την παρουσία της αβεβαιότητας. Η διακύμανση του κόστους μιας δεδομένης στρατηγικής k καθορίζεται ως

$$Var(C_k) = \sum_w p_w \cdot (Cost_{w|k} - EC_k)^2 \qquad (11)$$

όπου $Cost_{w|k}$ είναι το κόστος όταν ακολουθείται η στρατηγική k και επικρατεί η κατάσταση του κόσμου w. Επίσης, EC_k είναι το αναμενόμενο κόστος της στρατηγικής k που προκύπτει από τη γνωστή σχέση

$$EC_k = \sum_w p_w \cdot Cost_{w|k} \qquad (12)$$

Στην προσέγγιση E-V, το αναμενόμενο κριτήριο δαπανών αντικαθίσταται έτσι από την ακόλουθη συνάρτηση χρησιμότητας (utility functions) που ελαχιστοποιείται για

$$U = EC + \lambda \cdot \sqrt{Var(C)} \quad ; \qquad (13)$$

όπου $\lambda > 0$ είναι ένα μέτρο αποστροφής στον κίνδυνο του ιθύνοντος. Για $\lambda = 0$, λαμβάνεται το συνηθισμένο αναμενόμενο κριτήριο δαπανών. Οι μεγαλύτερες τιμές λ δείχνουν την αυξανόμενη αποστροφή κινδύνου. Ας σημειωθεί ότι η ανωτέρω διατύπωση οδηγεί σε ένα μη γραμμικό, μη-κυρτό μοντέλο με τους επόμενους υπολογιστικούς περιορισμούς που θα επέβαλλαν σοβαρούς περιορισμούς στο μέγεθος του μοντέλου. Η επόμενη υποενότητα παρουσιάζει μια γραμμική έκδοση αυτού του κριτηρίου.

2.9.3.4 Συνάρτηση Χρησιμότητας με τη Γραμμική Αποστροφή Κινδύνου

Για να αποφευχθούν οι μη γραμμικότητες, είναι δυνατό να αντικατασταθεί η ημιδιακύμανση (semi-variance) από την άνω απόλυτη απόκλιση (Upper absolute-deviation), όπως αυτή καθορίζεται από

$$UpAbsDev(Cost_k) = \sum_w p_w \cdot \{Cost_{w|k} - EC_k\}^+ \quad (14)$$

όπου η συνάρτηση $y = \{x\}^+$ καθορίζεται από τους ακόλουθους δύο γραμμικούς περιορισμούς που είναι $y \geq x$, $y \geq 0$ και η χρησιμότητα γράφεται τώρα μέσω της ακόλουθης γραμμικής έκφρασης

$$U = EC + \lambda \cdot UpsAbsDev(C) \quad (15)$$

Η παραπάνω σχέση είναι η αναμενόμενη χρησιμότητα που εφαρμόζεται στη γεννήτρια του μοντέλου TIMES.

2.10 Η Ενότητα Κλίμα του Μοντέλου TIMES

Η ενότητα κλίμα αρχίζει από τις παγκόσμιες εκπομπές όπως προκύπτουν από το παγκόσμιο μοντέλο TIMES και προχωρά στο διαδοχικό υπολογισμό:

- των αλλαγών στις συγκεντρώσεις CO_2 σε τρεις δεξαμενές (reservoir),
- τη συνολική αλλαγή των συγκεντρώσεων CO_2 σε σχέση με τη προβιομηχανική περίοδο (pre-industrial times) στην ατμόσφαιρα από ανθρωπογενείς αιτίες

- και τις αλλαγές στη θερμοκρασία (κατά τη διάρκεια των προβιομηχανικών χρόνων) σε δύο δεξαμενές (reservoir).

Οι εξισώσεις κλίματος που χρησιμοποιούνται για να εκτελεστούν αυτοί οι υπολογισμοί βασίζονται στο μοντέλο των Nordhaus και Boyer (1999). Η επιλογή του Nordhaus και οι εξισώσεις κλίματος του Boyer παρακινούνται από την απλότητα της προσέγγισης του θέματος και από το γεγονός ότι η περιγραφή της ενότητας του κλίματος από το μοντέλο τους είναι καλά τεκμηριωμένη και κατά αποδεκτό τρόπο ακριβής [33]. Στην εφαρμογή μας, η μη γραμμική εξίσωση έχει αντικατασταθεί από μια γραμμική προσέγγιση της οποίας οι τιμές πλησιάζουν πολύ τις ακριβείς εφ' όσον επιλέγεται προσεκτικά η χρήσιμη χρονοσειρά. Αυτή η προσέγγιση παρακινήθηκε από την ανάγκη διαμόρφωσης των ορίων θερμοκρασίας αφού είναι μη πιθανή προσέγγιση με μια μη γραμμική εξίσωση.

Αυστηρά, η συγκέντρωση και οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην ενότητα του κλίματος ισχύουν μόνο στον κύκλο άνθρακα ενώ μια διαφορετική επεξεργασία άλλων αερίων του θερμοκηπίου όπως είναι το μεθάνιο, N_2O, όζον, αεροζόλ και αερολύματα θα μπορούσε να γίνει χρησιμοποιώντας τα συγκεκριμένα μοντέλα των κύκλων ζωής τους (life cycles). Εντούτοις, μετά από μια συνήθως αποδεκτή προσέγγιση, είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν οι εξισώσεις του CO_2 για να υπολογιστεί ο αντίκτυπος άλλων αερίων στο κλίμα (GlobalWarming Potentials ή GWP) όπως συστήνονται από την έκθεση αξιολόγησης IPCCThird Assessment Report (2001) [26]. Επομένως, στην παράγραφο που ακολουθεί, ο όρος CO_2 που χρησιμοποιείται στις εξισώσεις κλίματος πρέπει να θεωρηθεί ως ισοδύναμος-CO_2. Περιγράφουμε τώρα τις μαθηματικές εξισώσεις που χρησιμοποιούνται σε κάθε ένα από τα τρία βήματα της ενότητας κλίματος.

2.10.1 Συγκεντρώσεις (Συγκέντρωση CO_2)

Η συγκέντρωση ισοδύναμου-CO_2 περιγράφεται ως γραμμικό μοντέλο τριών δεξαμενών (linear three-reservoir model). Οι τρεις δεξαμενές είναι η ατμόσφαιρα (atmosphere), ο γρήγορης μίξης ανώτερος ωκεανός μαζί με τη βιόσφαιρα (quickly mixing upper ocean and biosphere) και ο βαθύς ωκεανός (deep ocean). Ροές CO_2 μπορούν να υπάρξουν και προς τις δυο κατευθύνσεις γειτονικών δεξαμενών. Το

γραμμικό μοντέλο τριών δεξαμενών περιγράφεται από τις ακόλουθες τρεις εξισώσεις όταν το βήμα (step of the recursion) είναι ίσο με ένα έτος

$$M_{atm}(y) = E(y-1) + (1-\varphi_{atm-up}) \cdot M_{atm}(y-1) + \varphi_{up-atm} \cdot M_{up}(y-1) \quad (16)$$

$$M_{up}(y) = (1-\varphi_{up-atm}-\varphi_{up-lo}) \cdot M_{up}(y-1) + \varphi_{atm-up} \cdot M_{atm}(y-1) + \varphi_{lo-up} \cdot M_{lo}(y-1) \quad (17)$$

$$M_{lo}(y) = (1-\varphi_{lo-up}) \cdot M_{lo}(y-1) + \varphi_{up-lo} \cdot M_{up}(y-1) \quad (18)$$

όπου $M_{atm}(y)$, $M_{up}(y)$, $M_{lo}(y)$ είναι μάζες CO_2 στην ατμόσφαιρα, σε μια δεξαμενή γρήγορα μίξης (quickly mixing reservoir) που αντιπροσωπεύει το ανώτερο επίπεδο του ωκεανού και της βιόσφαιρας και στους βαθιούς ωκεανούς (GtC), αντίστοιχα, στην περίοδο t (GtC), $E(y-1)$ είναι οι ισοδύναμες εκπομπές σε CO_2 τον προηγούμενο χρόνο (GtC) και φ_{ij} είναι ο ρυθμός μεταφοράς από τη δεξαμενή i στη δεξαμενή j ($i, j = atm, up, lo$) από το έτος $y-1$ στο έτος y.

2.10.2 Αλλαγές στην Ατμόσφαιρα

Η σχέση μεταξύ των συγκεντρώσεων των αερίων του θερμοκηπίου (GHG accumulations) και της αύξησης της ακτινοβολίας καταναγκασμού (radiative forcing) $\Delta F(t)$, προέρχεται από εμπειρικές μετρήσεις και μοντέλα κλίματος και δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\Delta F(t) = \gamma \cdot \frac{\ln(M_{atm}(t)/M_o)}{\ln 2} + O(t) \quad (19)$$

όπου M_o είναι η προβιομηχανική (περίπου 1750) ατμοσφαιρική συγκέντρωση αναφοράς του CO_2 ή 596.4 GtC, γ είναι η ευαισθησία της ακτινοβολίας καταναγκασμού στην ατμοσφαιρική συγκέντρωση του CO_2 και λαμβάνει τιμή 3.71 W/m^2, $O(t)$ είναι η αύξηση στη συνολική ακτινοβολία καταναγκασμό την περίοδο t σε σχέση με το προβιομηχανικό επίπεδο λόγω ανθρωπογενούς GHG που δεν λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των εκπομπών του CO_2 με μονάδες W/m^2. Στο μοντέλο Nordhaus και Boyer (1999), μόνο οι εκπομπές του CO_2 διαμορφώθηκαν ρητά, και επομένως το $O(t)$ συμπεριλαμβάνει όλα τα άλλα GHG. Στο μοντέλο TIMES, το N_2O και το CH_4 συμπεριλαμβάνονται πλήρως στο $O(t)$ αλλά άλλα αέρια δε συμπεριλαμβάνονται (π.χ., CFC, αερολύματα, όζον). Επομένως, οι τιμές για $O(t)$

θα διαφέρουν από εκείνες του Nordhaus και Boyer. Είναι η ευθύνη του κατασκευαστή του μοντέλου να περιλάβει στον υπολογισμό του $O(t)$ μόνο εκείνα τα αέρια που δεν περιλαμβάνονται στις εκπομπές ισοδύναμου-CO_2.

Η παραμετροποίηση της εξίσωσης μπορεί να αλλάξει. Η τιμή του γ αλλάζει, βασισμένη στη βελτιωμένη επιστημονική γνώση. Επομένως, οι χρήστες είναι ελεύθεροι να πειραματιστούν με άλλες τιμές της παραμέτρου γ. Στο μοντέλο TIMES, η λογαριθμική συνάρτηση (19) αντικαθίσταται από τη γραμμική προσέγγιση που παρουσιάζεται στην (20), προκειμένου να συντηρηθεί η γραμμικότητα των εξισώσεων του μοντέλου TIMES. Με τη γραμμικοποίηση, οι εξισώσεις καταναγκασμού και θερμοκρασίας είναι κανονικές εξισώσεις (regular equations), που επιτρέπουν σε έναν χρήστη να βάλει όρια σε αυτές τις ποσότητες. Η γραμμική προσέγγιση λαμβάνεται ως εξής

- Κατά πρώτο λόγο, λαμβάνεται ένα διάστημα ενδιαφέροντος από το χρήστη για το M. Το διάστημα πρέπει να είναι αρκετά μεγάλο έτσι ώστε να μπορούν να προσαρμοστούν οι προσδοκώμενες τιμές των συγκεντρώσεων, αλλά όχι τόσο μεγάλο ώστε να κατασταθεί η προσέγγιση ανακριβής. Αυτό το διάστημα μπορεί να αναπαρασταθεί ως (M_1, M_2).
- Έπειτα, η γραμμική εξίσωση λαμβάνεται ως το μισό ενός αθροίσματος δύο γραμμικών εκφράσεων, οι οποίες υποτιμούν αντίστοιχα και υπερεκτιμούν την ακριβή τιμή. Η γραμμική έκφραση που υποτιμά την τιμή προέρχεται από τη χορδή της λογαριθμικής καμπύλης, ενώ η γραμμική έκφραση που υπερεκτιμά την τιμή προέρχεται από την εφαπτομένη στη λογαριθμική καμπύλη που είναι παράλληλη στη χορδή. Οι γενικοί τύποι για τις δύο εκτιμήσεις είναι οι ακόλουθοι

Υποτίμηση: $F_1(M) = \gamma \cdot \ln(slope/\ln 2) + slope \cdot (M/M_o - slope/\ln 2)$ (20α)

Υπερτίμηση: $F_2(M) = \gamma \cdot \ln(M_1/M_o)/\ln 2 + slope \cdot (M - M_1)/M_o$ (20β)

Τελική εκτίμηση: $F_3(M) = \dfrac{F_1(M) + F_2(M)}{2}$ (20γ)

όπου $slope = \gamma \cdot \dfrac{\ln(M_2 - M_1)/\ln 2}{(M_2 - M_1)/M_o}$

2.10.3 Αύξηση της Θερμοκρασίας

Στην ενότητα κλίματος στο μοντέλο TIMES (TIMES Climate Module) όπως και σε πολλά άλλα ενσωματωμένα πρότυπα, η αλλαγή κλίματος περιγράφεται από την παγκόσμια μέση θερμοκρασία επιφάνειας (global mean surface temperature). Η ιδέα πίσω από το μοντέλο δύο δεξαμενών είναι ότι ένας υψηλότερος καταναγκασμός ακτινοβολίας θερμαίνει το ατμοσφαιρικό στρώμα (atmospheric layer), το οποίο έπειτα γρήγορα θερμαίνει τον ανώτερο ωκεανό. Σε αυτό το μοντέλο, η ατμόσφαιρα και η ανώτερη ωκεάνια μορφή αποτελούν ένα ενιαίο στρώμα, το οποίο θερμαίνει αργά το δεύτερο στρώμα που αποτελείται από το βαθύ ωκεανό

$$\Delta T_{up}(y) = \Delta T_{up}(y-1) + \sigma_1 \cdot \left\{ F(y) - \lambda \cdot \Delta T_{up}(y-1) - \sigma_2 \cdot \left[\Delta T_{up}(y-1) - \Delta T_{low}(y-1) \right] \right\} \quad (21)$$

$$\Delta T_{low}(y) = \Delta T_{low}(y-1) + \sigma_3 \cdot \left[\Delta T_{up}(y-1) - \Delta T_{low}(y-1) \right] \quad (22)$$

όπου ΔT_{up} είναι η συνολικά υπολογισμένη κατά μέσο όρο αύξηση θερμοκρασίας επιφάνειας σε σχέση με το προβιομηχανικό επίπεδο, ΔT_{low} είναι η αύξηση θερμοκρασίας στο βαθύ ωκεανό σε σχέση με το προβιομηχανικό επίπεδο, σ_1 είναι η ενός έτους ταχύτητα της παραμέτρου ρύθμισης για την ατμοσφαιρική θερμοκρασία επίσης γνωστή και ως παράμετρος καθυστέρησης (lag parameter), σ_2 είναι ο συντελεστής απώλειας θερμότητας από την ατμόσφαιρα στους βαθιούς ωκεανούς, σ_3 είναι ο ενός χρόνου συντελεστής κέρδους θερμότητας από τους βαθιούς ωκεανούς, λ είναι η παράμετρος ανάδρασης (feedback parameter) ή κλιματολογική αντίδραση (climatic retroaction). Είναι σύνηθες να γράφεται $\lambda = \frac{\gamma}{C_s}$, όπου C_s είναι η παράμετρος ευαισθησίας κλίματος, που ορίζεται ως η αλλαγή στην ατμοσφαιρική θερμοκρασία ισορροπίας που προκαλείται με το διπλασιασμό της συγκέντρωσης του CO_2.

2.11 Βελτιωμένη Περιγραφή του Προγράμματος Βελτιστοποίησης στο μοντέλο TIMES

Ένα γραμμικό πρόβλημα προγραμματισμού συνίσταται στην ελαχιστοποίηση (ή τη μεγιστοποίηση) μιας αντικειμενικής συνάρτησης (objective function) που

ορίζεται ως η μαθηματική έκφραση των μεταβλητών απόφασης (decision variables), ικανοποιώντας συγκεκριμένους περιορισμούς (constraints) που επίσης αποκαλούνται και απλά ως εξισώσεις (equations) που επίσης εκφράζονται μαθηματικά. Οι πολύ μεγάλες περιπτώσεις γραμμικών προγραμμάτων που περιλαμβάνουν εκατοντάδες χιλιάδες περιορισμών και μεταβλητών μπορούν να διατυπωθούν στη γλώσσα GAMS, και να λυθούν μέσω του ισχυρού βελτιστοποιητή γραμμικού προγραμματισμού (Linear Programming optimizers) [34]. Το γραμμικό πρόγραμμα που περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους απλοποιείται πολύ, δεδομένου ότι αγνοεί πολλές εξαιρέσεις και περιπλοκές που δεν είναι ουσιαστικές για μια βασική κατανόηση του μοντέλου. Μια διατύπωση προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελείται από τρεις τύπους οντοτήτων:

- τις μεταβλητές απόφασης. Οι μεταβλητές απόφασεις είναι οι άγνωστοι (unknowns) ή ενδογενείς ποσότητες (endogenous quantities) που καθορίζονται από τη βελτιστοποίηση,
- την αντικειμενική συνάρτηση. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι η έκφραση του κριτηρίου που ελαχιστοποιείται ή που μεγιστοποιείται,
- τους περιορισμούς. Οι περιορισμοί είναι οι εξισώσεις ή οι ανισότητες που περιλαμβάνουν τις μεταβλητές απόφασης που πρέπει να ικανοποιηθούν από τη βέλτιστη λύση.

2.11.1 Δείκτες

Οι δομές δεδομένων (data structures) που είναι σύνολα, παράμετροι, μεταβλητές (variables) και εξισώσεις (equations) του μοντέλου χρησιμοποιούν τους ακόλουθους δείκτες:

- το r δείχνει την περιοχή,
- το t δείχνει το χρονικό διάστημα,
- το v χρησιμοποιείται για να δείξει το χρονοεξαρτώμενο έτος μιας επένδυσης. Όταν μια διαδικασία δεν είναι χρονοεξαρτώμενη τότε $v = t$,
- το p δείχνει τη διαδικασία (process) ή τεχνολογία (technology),
- το s δείχνει τη χρονοσχισμή (time-slice). Αυτός ο δείκτης είναι σχετικός μόνο για τα οριζόμενα προϊόντα από το χρήστη (user-designated commodities) και

τις διαδικασίες που ακολουθούνται σε χρονικό διάστημα μικρότερο από το ετήσιο επίπεδο. Η χρονοσχισμή προκαθορίζεται στο "ANNUAL ", δείχνοντας ότι ένα προϊόν μπορεί να παρακολουθηθεί μόνο ετησίως,

- το c δείχνει το προϊόν (commodity) το οποίο μπορεί να είναι ενέργεια (energy), πρώτες ύλες (material), εκπομπή (emission), ζήτηση (demand).

2.11.2 Μεταβλητές Απόφασης

Οι μεταβλητές απόφασης αντιπροσωπεύουν τις επιλογές (choices) που γίνονται από το μοντέλο δηλαδή τους αγνώστους (unknowns). Τα διάφορα είδη μεταβλητών απόφασης σε ένα μοντέλο TIMES είναι

- $NCAP(r, v, p)$. Προσθήκη νέου δυναμικού (επένδυσης) για την τεχνολογία p, στην περίοδο v και την περιοχή r. Για όλες τις τεχνολογίες, η αξία v αντιστοιχεί στο έτος στο οποίο επενδύεται χρονοεξαρτώμενη τεχνολογία. Οι χρονοεξαρτώμενες τεχνολογίες (που δηλώνονται υπό αυτήν τη μορφή από το χρήστη) οι χρονοεξαρτώμενες πληροφορίες (v) απεικονίζονται με άλλες μεταβλητές διαδικασίας, που συζητούνται κατωτέρω. Οι μονάδες αυτής της μεταβλητής απόφασης είναι $PJ / year$ για τις περισσότερες ενεργειακές τεχνολογίες, εκατομμύρια τόνοι ετησίως (million tonnes per year) για το χάλυβα, το αλουμίνιο και τις βιομηχανίες χαρτιού, δισεκατομμύρια οχημοχιλιόμετρα ετησίως (billion vehicle-kilometers per year ή B-vkms/year) ή εκατομμύρια αυτοκίνητα για οδικά οχήματα (million cars for road vehicles) και GW για τον εξοπλισμό ηλεκτρικής ενέργειας ($1GW = 31.536PJ / year$.
- $CAP(r, v, t, p)$. Εγκατεστημένο δυναμικό διαδικασίας p, στην περιοχή r και την περίοδο t (προαιρετικά περίοδο v). Αντιπροσωπεύει τη συνολική ικανότητα σε ισχύ στην περίοδο t, εξετάζοντας την υπόλοιπη ικανότητα στην αρχή του ορίζοντα διαμόρφωσης και τις νέες επενδύσεις που έγιναν πριν από τη συμπεριλαμβανομένη περίοδο t που δεν έχουν φθάσει στην τεχνική διάρκεια ζωής τους. Οι μονάδες που χρησιμοποιούνται είναι οι ίδιες με τις επενδύσεις. Οι μεταβλητές CAP δεν καθορίζονται ρητά στο μοντέλο, αλλά

προέρχονται από τις μεταβλητές $NCAP$ και τα δεδομένα που αφορούν προηγούμενες επενδύσεις και τη διάρκεια ζωής εγκαταστάσεων.

- $CAPT(r,t,p)$. Η συνολική εγκατεστημένη ικανότητα της τεχνολογίας p, στην περιοχή r και την περίοδο t. Οι μεταβλητές $CAPT$ καθορίζονται μόνο όταν διευκρινίζονται όρια η περιορισμοί από το χρήστη. Δεν εισάγουν οποιαδήποτε άλλη εξίσωση.
- $ACT(r,v,t,p,s)$. Επίπεδο δραστηριότητας τεχνολογίας p, στην περιοχή r και την περίοδο t (προαιρετικά επιλογή v και χρονοσχισμή s). Οι μονάδες είναι PJ για όλες τις ενεργειακές τεχνολογίες. Ο δείκτης s είναι σχετικός μόνο για διαδικασίες που παράγουν ή καταναλώνουν προϊόντα που δηλώνονται ως χρονοτεμαχισμένα (time-sliced). Επιπλέον, είναι η διαδικασία που καθορίζει ποιες χρονικές φέτες επικρατούν, μέσω ειδικής ιδιότητας. Εξ ορισμού, παρακολουθούνται μόνο ετήσιες δραστηριότητες.
- $FLOW(r,v,t,p,c,s)$. Η ποσότητα προϊόντων c που καταναλώνεται ή που παράγεται με τη διαδικασία στην περιοχή r και την περίοδο t (προαιρετικά επιλογή v και χρονοσχισμή s). Οι μονάδες είναι PJ για όλες τις ενεργειακές τεχνολογίες. Οι μεταβλητές $FLOW$ παρέχουν ιδιαίτερη ευελιξία στις διαδικασίες που διαμορφώνονται στο μοντέλο TIMES, δεδομένου ότι επιτρέπουν στο χρήστη να καθορίσει εύκαμπτες διαδικασίες για τις οποίες οι ροές εισαγωγής ή/και παραγωγής δεν συνδέονται άκαμπτα με τη δραστηριότητα των διαδικασιών.
- $SIN(r,v,t,p,c,s)/SOUT(r,v,t,p,c,s)$. Η ποσότητα προϊόντων c που αποθηκεύεται ή απαλλάσεται από τη αποθηκευτική διαδικασία p στη χρονοσχισμή s, την περίοδο t (προαιρετικά επιλογή v) και περιοχή r.
- $TRADE(r,t,p,c,s,imp)$ ή $TRADE(r,t,p,c,s,\exp)$. Η ποσότητα προϊόντων c ($PJ/year$) που πωλείται (exp) ή που αγοράζεται (imp) από την περιοχή r μέσω της διαδικασίας εισαγωγής (αντίστοιχα εξαγωγής) p την περίοδο t (προαιρετικά στη χρονοσχισμή s). Ας σημειωθεί ότι η τοπολογία που καθορίζεται για τη διαδικασία ανταλλαγής p διευκρινίζει τα εμπορικά προϊόντα c, την περιοχή r, και τις περιοχές r' με τις οποίες η περιοχή r ανταλλάσσει τα προϊόντα c. Στην περίπτωση των διμερών εμπορικών συναλλαγών, εάν επιδιώκεται το εμπόριο της περιοχής r με διάφορες άλλες

περιοχές, τότε κάθε τέτοιο εμπόριο απαιτεί τον καθορισμό μιας χωριστής διμερούς διαδικασίας ανταλλαγής. Ας σημειωθεί ότι είναι επίσης δυνατό να καθοριστούν πολύπλευρες σχέσεις εμπορικών συναλλαγών μεταξύ της περιοχής r και διάφορων άλλων περιοχών r' με τον καθορισμό μιας από τις περιοχές ως κοινή αγορά για το εμπόριο στα προϊόντα c. Σε αυτήν την περίπτωση, τα προϊόντα εισάγονται στην αγορά και μπορούν να αγοραστούν από οποιαδήποτε άλλη περιοχή που συμμετέχει στην αγορά. Αυτή η περίπτωση είναι κατάλληλη για τα παγκόσμια προϊόντα όπως οι άδειες εκπομπής ή το ακατέργαστο πετρέλαιο. Τέλος, οι εξωγενείς εμπορικές συναλλαγές (exogenous trading) μπορούν επίσης να διαμορφωθούν διευκρινίζοντας περιοχή r' ως εξωτερική περιοχή (external region). Οι εξωγενείς εμπορικές συναλλαγές απαιτούνται για τα μοντέλα που δεν είναι παγκόσμια, δεδομένου ότι οι ανταλλαγές με τις μη διαμορφωμένες περιοχές δεν μπορούν να θεωρηθούν ενδογενείς.

- $D(r,t,d)$. Ζήτηση για την ενεργειακή υπηρεσία d τελικής χρήσης στην περιοχή r και την περίοδο t. Στο σενάριο αναφοράς (reference scenario), αυτή η μεταβλητή καθορίζεται από το χρήστη. Στα σενάρια μη-αναφοράς (non-reference scenarios), το $D(r,t,d)$ μπορεί να διαφέρει από τη ζήτηση της περίπτωσης αναφοράς λόγω της απόκρισης των ζητήσεων στις τιμές (βασισμένες στην ελαστικότητα τιμής κάθε ζήτησης υπηρεσιών). Ας σημειωθεί ότι σε αυτήν την απλουστευμένη διατύπωση, δεν παρουσιάζονται οι μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να αποσυνθέσουν το $D(r,t,d)$ σε ένα σύνολο βηματικών ποσοτήτων.
- Άλλες μεταβλητές. Το μοντέλο TIMES έχει διάφορα προϊόντα σχετικά με μεταβλητές που δεν απαιτούνται αυστηρά αλλά είναι κατάλληλες για την υποβολή εκθέσεων σκοπού ή/και για την εφαρμογή ορισμένων ορίων σε αυτές. Παραδείγματα τέτοιων μεταβλητών είναι το συνολικό ποσό των παραγομένων προϊόντων (total amount produced of a commodity ή *COMPRD*) ή το συνολικό ποσό των καταναλωθέντων προϊόντων (total amount consumed of a commodity ή *COMCON*).

2.11.3 Αντικειμενική Συνάρτηση του Μοντέλου TIMES: Συνολικό Προεξοφλητικό Κόστος Συστημάτων

Ο στόχος μεγιστοποίησης πλεονάσματος (surplus maximization objective) μετασχηματίζεται αρχικά σε έναν ισοδύναμο στόχο ελαχιστοποίησης δαπανών (cost minimization) με τη λήψη τον αρνητικού του πλεονάσματος και την κλήση αυτού ως συνολικού κόστους συστημάτων (total system cost). Στόχος του μοντλεου TIMES είναι επομένως να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος του συστήματος, κατάλληλα αυξημένο με το κόστος της χαμένης ζήτησης ('cost' of lost demand). Όλα τα στοιχεία δαπανών είναι κατάλληλα προεξοφλημένα (discounted) σε ένα επιλεγμένο έτος.

Ενώ οι περιορισμοί του μοντέλου TIMES και οι μεταβλητές συνδέονται σε μια περίοδο (period), τα συστατικά του κόστους συστημάτων εκφράζονται για κάθε έτος του ορίζοντα (ακόμη και για έτη εκτός ορίζοντα). Αυτή η επιλογή προορίζεται στο να παρέχει μια ομαλότερη, ρεαλιστικότερη απόδοση της ροής των πληρωμών στο ενεργειακό σύστημα, όπως θα συζητηθεί παρακάτω. Κάθε έτος, το συνολικό κόστος περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Κύριες δαπάνες (Capital Costs) που αναλαμβάνονται για την επένδυση ή/και την αποσυναρμολόγηση των διαδικασιών.
- Σταθερές και μεταβλητές ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης (Operation and Maintenance Costs ή O&M Costs) και άλλες ετήσιες δαπάνες που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της αποσυναρμολόγησης των τεχνολογιών.
- Δαπάνες που απαιτούνται για τις εξωγενείς εισαγωγές (exogenous imports) και για την εσωτερική παραγωγή των πόρων (domestic resource production).
- Εισοδήματα από τις εξωγενείς εξαγωγές.
- Δαπάνες παράδοσης (delivery costs) για τα απαραίτητα προϊόντα που καταναλώνονται στις διαδικασίες.
- Φόροι και επιχορηγήσεις που συνδέονται με τις ροές προϊόντων και τις δραστηριότητες ή τις επενδύσεις διαδικασίας.
- Εισοδήματα από την ανάκτηση ενσωματωμένων προϊόντων (revenues from recuperation of embedded commodities). Τα εισοδήματα αυτά προέρχονται από την αποσυναρμολόγηση μιας διαδικασίας.

- Υπολλειματική αξία (Salvage value) των διαδικασιών και των ενσωματωμένων προϊόντων στο τέλος του ορίζοντα προγραμματισμού.
- Απώλεια ευημερίας (Welfare loss) ως αποτέλεσμα των μειωμένων απαιτήσεων τελικής χρήσης. Παρακάτω παρουσιάζεται η μαθηματική έκφραση αυτής της ποσότητας.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στο μοντέλο TIMES, ειδική προσοχή λαμβάνεται για την παρακολούθηση των νομισματικών ροών των σχετικών με τις επενδύσεις διαδικασίας και αποσυναρμολόγησης για κάθε έτος του ορίζοντα. Αυτού του τύπου η παρακολούθηση γίνεται σύνθετη λόγω διαφόρων παραγόντων που είναι:

- Το μοντέλο TIMES αναγνωρίζει ότι μπορεί να υπάρξει μια χρονική ανοχή μεταξύ της αρχής και του τέλους της κατασκευής μερικών μεγάλων διαδικασιών, κλιμακώνοντας κατά συνέπεια τις δόσεις επένδυσης κατά τη διάρκεια αρκετών ετών
- Το μοντέλο TIMES επίσης αναγνωρίζει ότι για μερικές άλλες διαδικασίες (π.χ. νέα αυτοκίνητα), οι επενδύσεις στο νέο δυναμικό εμφανίζονται σταδιακά κατά τη διάρκεια αρκετών ετών ενός χρονικού διαστήματος, παρά ως ένα εφάπαξ ποσό όπως γίνεται στο μοντέλο MARKAL.
- Υπάρχει η δυνατότητα μιας ορισμένης απόφασης επένδυσης που λαμβάνεται στην περίοδο t και θα πρέπει να επαναληφθεί περισσότερες από μία φορά κατά τη διάρκεια εκείνης της περιόδου (αυτό θα εμφανιστεί εάν η επιλεχθείσα περίοδος t είναι μεγάλης διάρκειας σε σχέση με τη ζωή διαδικασίας).
- Το μοντέλο TIMES αναγνωρίζει ότι μπορεί να υπάρξουν κύριες δαπάνες αποσυναρμολόγησης (dismantling capital costs) στο τέλος της ζωής ορισμένων διαδικασιών (π.χ. πυρηνικές εγκαταστάσεις) και αυτές οι δαπάνες, ενώ συνδέονται με τη μεταβλητή επένδυσης που συντάσσεται μέχρι την περίοδο t, ολοκληρώνονται πολύ αργότερα.
- Τέλος, το μοντέλο TIMES υποθέτει ότι η πληρωμή οποιουδήποτε κύριου κόστους κατανέμεται σε μια οικονομική ζωή που μπορεί να είναι διαφορετική από την τεχνική ζωή της διαδικασίας και μεταφέρεται ανά έτος με διαφορετικό επιτόκιο από το γενικό επιτόκιο προεξόφλησης (overall discount rate).

Αυτά τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του μοντέλου TIMES, προσθέτουν στην ακρίβεια και στο ρεαλισμό του σχεδιαγράμματος δαπανών ενώ ταυτόχρονα εισάγουν

σύνθετες μαθηματικές εκφράσεις στην αντικειμενική συνάρτηση. Σε αυτό το κεφάλαιο δε θα δοθούν όλες οι λεπτομέρειες όσον αφορά τις σύνθετες εκφράσεις, οι οποίες περιγράφονται πλήρως στην τεκμηρίωση TIMES. Η περιγραφή περιορίζεται στην παρουσίαση των γενικών ενδείξεων στα στοιχεία δαπανών που συνθέτουν την αντικειμενική συνάρτηση. Δηλαδή:

- Οι δαπάνες επένδυσης και αποσυναρμολόγησης (investment and dismantling costs) εκφράζονται με τη χρήση των μεταβλητών επένδυσης $NCAP$ και μετασχηματίζουν τις ροές των ετήσιων πληρωμών που υπολογίζονται για κάθε έτος του ορίζοντα (αλλά και πέραν του ορίζοντα στην περίπτωση της αποσυναρμολόγησης των δαπανών και της ανακύκλωσης των εισοδημάτων).
- Η υπολλειματική αξία όλων των επενδύσεων ακόμα και αυτών που είναι ενεργές στο τέλος του ορίζοντα (end of the horizon ή EOH) υπολογίζεται και η αξία της ορίζεται στο επόμενο έτος μετά από το EOH.
- Οι άλλες δαπάνες που απαριθμούνται ανωτέρω, που είναι όλες οι ετήσιες δαπάνες, οι προστιθέμενες ετήσιες πληρωμές κύριων δαπανών μείον τις ετήσιες υπολλεματικές αξίες για να διαμορφωθεί τελικά η ποσότητα $ANNCOST$.
- Το μοντέλο TIMES υπολογίζει έπειτα για κάθε περιοχή μια συνολική καθαρή παρούσα αξία της ροής των ετήσιων δαπανών, η οποία στη συνέχεια προεξοφλείται στο επιλεγμένο από το χρήστη έτος αναφοράς. Αυτές οι περιφερειακές προεξοφλημένες δαπάνες αθροίζονται έπειτα σε ένα ενιαίο συνολικό κόστος, το οποίο αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση που ελαχιστοποιείται από το μοντέλο κατά υπολογισμό ισορροπίας του (equilibrium computation).

$$NPV = \sum_{r=1}^{R} \sum_{y \in YEARS} \left(1 + d_{r,y}\right)^{REFYR-y} \cdot ANNCOST(r, y) \qquad (23)$$

όπου NPV είναι η καθαρή παρούσα αξία του συνολικού κόστους (net present value of the total cost) για όλες τις περιοχές ή αλλιώς η αντικειμενική συνάρτηση του μοντέλου TIMES (TIMES objective function), $ANNCOST(r, y)$ είναι το συνολικό ετήσιο κόστος στην περιοχή r και το έτος y, $d_{r,y}$ είναι το γενικό επιτόκιο προεξόφλησης (general discount rate), $REFYR$ είναι το έτος αναφοράς για την προεξόφληση, $YEARS$ είναι το σύνολο ετών για το οποίο υπάρχουν δαπάνες, συμπεριλαμβανομένων όλων

των ετών στον ορίζοντα, συν τα προηγούμενα έτη (πριν από την αρχική περίοδο) εάν οι δαπάνες έχουν καθοριστεί για τις προηγούμενες επενδύσεις, συν έτη μετά από ΕΟΗ όπου υφίσταται κάποια επένδυση και/ή αποσυναρμολόγηση των δαπανών, καθώς επίσης και η υπολλειματική αξία και R είναι το σύνολο περιοχών.

2.11.4 Περιορισμοί

Ελαχιστοποιώντας το συνολικό προεξοφλημένο κόστος, το μοντέλο TIMES πρέπει να ικανοποιήσει έναν μεγάλο αριθμό περιορισμών (αποκαλούμενες εξισώσεις του μοντέλου) που εκφράζουν τις φυσικές και λογικές σχέσεις που πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου να απεικονιστεί κατάλληλα το σχετικό ενεργειακό σύστημα. Οι περιορισμοί του μοντέλου TIMES είναι διάφορων ειδών. Στη συνέχεια απαριθμούνται και παρουσιάζονται εν συντομία οι κύριοι τύποι περιορισμών. Εάν δεν ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί του μοντέλου τότε το μοντέλο λέγεται ότι είναι μη εφικτό (infeasible) και το γεγονός αυτό οφείλεται είτε σε λανθασμένα δεδομένα είτε σε υπερλεπτομερή προδιαγραφή (over-specification of some requirement) κάποιας απαίτησης.

2.11.4.1 Μεταφορά Ικανότητας (Συντήρηση των Επενδύσεων)

Η επένδυση σε μια ιδιαίτερη τεχνολογία αυξάνει την εγκατεστημένη ικανότητά της (installed capacity) κατά τη διάρκεια της φυσικής ζωής της τεχνολογίας. Στο τέλος της φυσικής ζωής, η συνολική ικανότητα για αυτήν την τεχνολογία μειώνεται κατά το ίδιο ποσό. Κατά τον υπολογισμό της διαθέσιμης ικανότητας σε κάποιο χρονικό διάστημα, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη την ικανότητα ως αποτέλεσμα όλων των επενδύσεων μέχρι εκείνη την περίοδο, μερικές από τις οποίες μπορεί να είχαν γίνει πριν από την αρχική περίοδο αλλά είναι ακόμα σε κατάσταση λειτουργίας (operating condition) (ενσωματώνεται από την υπόλοιπη ικανότητα της τεχνολογίας) και άλλες που έχουν αποφασιστεί από το μοντέλο στην ή μετά από την αρχική περίοδο μέχρι και την εν λόγω περίοδο.

Η συνολική διαθέσιμη ικανότητα (total available capacity) για κάθε τεχνολογία p, στην περίοδο t, είναι ίση με το ποσό των επενδύσεων που γίνονται από το μοντέλο στις προηγούμενες και τρέχουσες περιόδους και των οποίων η φυσική ζωή δεν έχει τελειώσει ακόμα συν την ικανότητα σε ισχύ πριν από τον ορίζοντα μοντελοποίησης που είναι ακόμα διαθέσιμη. Η ακριβής διατύπωση αυτού του περιορισμού γίνεται αρκετά σύνθετη από το γεγονός ότι το μοντέλο TIMES δέχεται μεταβλητά χρονικά διαστήματα και επομένως το τέλος της ζωής μιας επένδυσης μπορεί να μειωθεί στο μέσο ενός μελλοντικού χρονικού διαστήματος.

$$EQ_CPT(r,t,p) - CapacityTransfer \tag{24}$$

$$CAPT(r,t,p) = Sum\Big\{\text{για όλες τις περιόδους t′ που προηγούνται ή είναι ίσες του t } \textit{τέτοιες ώστε } t - t' < LIFE(r,t',p)\,ofNCAP(r,t',p)\Big\}$$

$$+ RESID(r,t,p) \tag{25}$$

πού $RESID(r,t,p)$ είναι η (εξωγενώς παρεχόμενη) ικανότητα της τεχνολογίας p λόγω των επενδύσεων που έγιναν πριν από την αρχική περίοδο και υπάρχουν ακόμα στην περιοχή r, στο χρόνο t.

2.11.4.2 Καθορισμός των Μεταβλητών Δραστηριότητας Διαδικασίας

Δεδομένου ότι το μοντέλο TIMES αναγνωρίζει τις μεταβλητές δραστηριότητας (activity variables) καθώς επίσης και τις μεταβλητές ροής (flow variables), είναι απαραίτητο να συσχετιστούν αυτοί οι δύο τύποι μεταβλητών. Αυτό γίνεται με την εισαγωγή ενός περιορισμού που εξισώνει μια γενική μεταβλητή δραστηριότητας, $ACT(r,v,t,p,s)$, με το κατάλληλο σύνολο μεταβλητών ροής, $FLOW(r,v,t,p,c,s)$, με κατάλληλη προσαρμογή. Αυτό ολοκληρώνεται με τον προσδιορισμό πρώτα της ομάδας προϊόντων που καθορίζει τη δραστηριότητα (και με αυτόν τον τρόπο της ικανότητας επίσης) της διαδικασίας. Σε μια απλή διαδικασία, μια που καταναλώνει ενιαία προϊόντα και που παράγει ενιαία προϊόντα, ο δημιουργός του μοντέλου επιλέγει απλά μια από αυτές τις δύο ροές για να καθορίσει τη δραστηριότητα, και με αυτόν τον τρόπο τη διαδικασία της κανονικοποίησης (process normalization) που μπορεί να είναι είσοδος ή έξοδος (input or output). Στις πιο

σύνθετες διαδικασίες, με διάφορα προϊόντα (διαφορετικών τύπων) ως εισόδους ή/και εξόδους, ο καθορισμός της μεταβλητής δραστηριότητας απαιτεί πρώτα να επιλεγεί η αρχική ομάδα προϊόντων (primary commodity group ή pcg) που θα χρησιμεύσει ως η δραστηριότητα που θα καθορίζει την ομάδα (activity-defining group). Παραδείγματος χάριν, το pcg μπορεί να είναι ομάδα ενεργειακών μεταφορέων ή ομάδα υλικών ενός δεδομένου τύπου ή ομάδας GHG εκπομπών. Ο δημιουργός του μοντέλου έπειτα προσδιορίζει εάν η δραστηριότητα καθορίζεται μέσω των εισόδων ή μέσω των εξόδων που ανήκουν στην επιλεγμένη *pcg*. Εννοιολογικά, αυτό οδηγεί στην ακόλουθη σχέση:

$$EQ_ACTFLO(r,v,t,p,s) - ActivityDefinition \tag{26}$$

$$ACT(r,v,t,p,s) = SUM\left\{c \quad in \quad pcg \quad of \quad FLOW(r,v,t,p,c,s) / ACTFLO(r,v,t,p,c)\right\} \tag{27}$$

όπου $ACTFLO(r,v,t,p,c)$ είναι ένας παράγοντας μετατροπής (συχνά ίσος με τη μονάδα) από τη δραστηριότητα της διαδικασίας στη ροή συγκεκριμένων προϊόντων.

2.11.4.3 Χρήση της Ικανότητας

Σε κάθε χρονική περίοδο το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιήσει μέρος ή το σύνολο της εγκατεστημένη ικανότητας σύμφωνα με τον παράγοντα διαθεσιμότητας της τεχνολογίας (Availability Factor ή AF). Ας σημειωθεί ότι το μοντέλο μπορεί να αποφασίσει να χρησιμοποιήσει λιγότερο από τη διαθέσιμη ικανότητα κατά τη διάρκεια ορισμένων χρονοσχισμών ή ακόμα και καθ' όλη τη διάρκεια μιας ή περισσότερων περιόδων, εάν μια τέτοια απόφαση συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του γενικού κόστους. Προαιρετικά, υπάρχει μια επιλογή για το δημιουργό του μοντέλου που προβλέπει τον εξαναγκασμό συγκεκριμένων τεχνολογιών στην πλήρη χρησιμοποίηση της ικανότητά τους.

Για κάθε τεχνολογία p, την περίοδο t, επιλογή v, περιοχή r και τη χρονοσχισμή s, η δραστηριότητα της τεχνολογίας δεν μπορεί να υπερβεί τη διαθέσιμη ικανότητά της, όπως διευκρινίζεται από έναν παράγοντα διαθεσιμότητας που καθορίζεται από τον χρήστη.

$$EQ_CAPACT(r,v,t,p,s) - UseOfCapacity \tag{28}$$

$$ACT(r,v,t,p,s) \le or = AF(r,v,t,p,s) \times CAPUNIT(r,p) \times FR(r,s) \times CAP(r,v,t,p) \quad (29)$$

όπου $CAPUNIT(r,p)$ είναι ο παράγοντας μετατροπής μεταξύ των μονάδων της ικανότητας και της δραστηριότητας (συχνά ίσος με μονάδα, εκτός από τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας), παράμετρος $FR(r,s)$ είναι ίση με τη διάρκεια της χρονοσχισμής s, ο παράγοντας διαθεσιμότητας AF χρησιμεύει στην παρουσίαση της φύσης του περιορισμού ως ανισότητα ή ισότητα. Στην τελευταία περίπτωση η ικανότητα αναγκάζεται να χρησιμοποιηθεί πλήρως.

Ο δείκτης s του συντελεστή AF στην (29) δείχνει ότι ο χρήστης μπορεί να διευκρινίσει τη χρονοτεμαχισμένη εξάρτηση (time-sliced dependency) στη διαθεσιμότητα (availability) της εγκατεστημένης ικανότητας μερικών τεχνολογιών. Αυτό απαιτείται όταν εξαρτάται η λειτουργία του εξοπλισμού από τη διαθεσιμότητα ενός πόρου που δεν μπορεί να αποθηκευτεί, όπως είναι ο αέρας και ο ήλιος, ή που μπορούν μόνο μερικώς να αποθηκευτούν, όπως το νερό σε μια δεξαμενή. Σε άλλες περιπτώσεις, ο χρήστης μπορεί να παρέχει έναν παράγοντα AF που δεν εξαρτάται από το s και ο οποίος εφαρμόζεται έπειτα σε ολόκληρο έτος. Το σχεδιάγραμμα λειτουργίας μιας τεχνολογίας μέσα σε ένα έτος, εάν η τεχνολογία έχει μια υποετήσια ανάλυση διαδικασίας, καθορίζεται από τη ρουτίνα βελτιστοποίησης. Ο αριθμός των περιορισμών EQ_CAPACT είναι τουλάχιστον ίσος με τον αριθμό των χρονοσχισμών στον οποίο ο εξοπλισμός λειτουργεί. Για τις τεχνολογίες με μόνο έναν ετήσιο χαρακτηρισμό ο αριθμός περιορισμών μειώνεται σε ένα ανά περίοδο (όπου $s = "ANNUAL"$).

2.11.4.4 Εξίσωση Ισορροπίας Προϊόντος

Σε κάθε χρονική περίοδο, πρέπει η παραγωγή από μια περιοχή συν τις εισαγωγές από άλλες περιοχές κάθε προϊόντος να ισορροπεί με το ποσό που καταναλώνεται στην περιοχή συν αυτό που εξάγεται σε άλλες περιοχές. Στο μοντέλο TIMES, ο κάθε περιορισμός ισορροπίας ($\ge$ ή $=$) ελέγχεται από το χρήστη, μέσω μιας ειδικής παραμέτρου που συνδέεται με κάθε προϊόν. Εντούτοις, ο περιορισμός προκαθορίζεται σε μια ισότητα στην περίπτωση των υλικών δηλαδή η παραχθείσα και η εισαγόμενη ποσότητα είναι ακριβώς ίση με αυτήν που καταναλώνεται και

εξάγεται, και σε μια ανισότητα στην περίπτωση των ενεργειακών μεταφορέων, των εκπομπών και των απαιτήσεων γεγονός δηλαδή το οποίο επιτρέπει κάποια παραγωγή πλεονάσματος. Για εκείνα τα προϊόντα για τα οποία οι χρονοσχισμές έχουν καθοριστεί, ο περιορισμός ισορροπίας πρέπει να ικανοποιηθεί σε κάθε χρονοσχισμή. Ο περιορισμός ισορροπίας είναι πολύ σύνθετος, λόγω των πολλών όρων που περιλαμβάνονται στην παραγωγή και στην κατανάλωση προϊόντων. Εδώ θα παρουσιαστεί μια πολύ απλουστευμένη έκδοση, για να γίνει εμφανής η βασική έννοια αυτής της εξίσωσης. Για κάθε προϊόν c, το χρονικό διάστημα t (επιλογής v), στην περιοχή r και τη χρονοσχισμή s (εάν είναι απαραίτητο ή $s = "ANNUAL"$ εάν όχι), αυτός ο περιορισμός απαιτεί ότι η διάθεση κάθε προϊόντος ισορροπεί με την προμήθειά του. Η διάθεση περιλαμβάνει την κατανάλωση στην περιοχή συν τις εξαγωγές ενώ η προμήθεια περιλαμβάνει την παραγωγή στην περιοχή συν τις εισαγωγές.

$$EQ_COMBAL(r,t,c,s) - Com\,\mathrm{mod}\,ityBalance \tag{30}$$

$$\begin{aligned}
&\Big[Sum\{overallp, c \in TOP(r,p,c,"out")of : \big[FLOW(r,v,t,p,c,s) + \\
&SOUT(r,v,t,p,c,s)\cdot STG_EFF(r,v,p)\big]\} + \\
&Sum\{overallp, c \in RPC_IRE(r,p,c,"imp")of : \\
&TRADE(r,t,p,c,s,"imp")\} + \\
&Sum\{overallpof : \mathrm{Re}\,lease(r,t,p,c)\cdot NCAP(r,t,p,c)\big]\cdot COM_IE(r,t,c,s) \\
&\quad \geq \dot{\eta} = \\
&\qquad Sum\{overallp, c \in TOP(r,p,c,"in")of : FLOW(r,v,t,p,c,s) + \\
&\qquad SIN(r,v,t,p,c,s)\} + \\
&\qquad Sum\{overallp, c \in RPC_IRE(r,p,c,"\exp")\}of : \\
&\qquad TRADE(r,v,t,p,c,s,"\exp") + \\
&\qquad Sum\{overallpof : Sink(r,t,p,c)\cdot NCAP(r,t,p,c)\} + \\
&\qquad FR(c,s)\cdot DM(c,t)
\end{aligned} \tag{31}$$

όπου ο περιορισμός $\geq$ είναι για τις ενεργειακές μορφές και $=$ για υλικά και τις εκπομπές (εκτός αν αυτές οι προεπιλογές αγνοούνται από το χρήστη), $TOP(r,p,c,"in/out")$ προσδιορίζει τη ροή εισόδου/εξόδου προϊόντων c σε/από τη διαδικασία p στην περιοχή r, $RPC_IRE(r,p,c,"imp/\exp")$ προσδιορίζει τη ροή εισαγωγής/εξαγωγής σε/από την περιοχή r των προϊόντων c μέσω της διαδικασίας

p, $STG_EFF(r,v,p)$ είναι η αποδοτικότητα της αποθηκευτικής διαδικασίας p (efficiency of storage process), $COM_IE(r,t,c,s)$ είναι η αποδοτικότητα της υποδομής των προϊόντων c (infrastructure efficiency of commodity), $\mathrm{Re}\,lease(r,t,p,c)$ είναι το ποσό προϊόντων c που ανακτάται ανά μονάδα ικανότητας της διαδικασίας p που αποσυναρμολογείται, $Sink(r,t,p,c)$ είναι η ποσότητα προϊόντων c που απαιτείται ανά μονάδα της νέας ικανότητας της διαδικασίας p, $FR(c,s)$ είναι το μέρος του έτους που καλύπτεται από τη χρονοσχισμή s (ίσο με μονάδα για μη χρονοτεμαχισμένα προϊόντα).

Για να γίνει περισσότερο κατανοητή η εξίσωση ισορροπίας προϊόντος θεωρούμε το παρακάτω παράδειγμα. Η βενζίνη που καταναλώνεται στα οχήματα συν τη βενζίνη που εξάγεται σε άλλες περιοχές δεν πρέπει να υπερβαίνει τη βενζίνη που παράγεται από τις εγκαταστάσεις καθαρισμού συν τη βενζίνη που εισάγεται από άλλες περιοχές.

2.11.4.5 Καθορισμός των Σχέσεων Ροής σε μια Διαδικασία

Μια διαδικασία με μια ή περισσότερες (ίσως ροές ετερογενών) προϊόντων καθορίζεται ουσιαστικά από μια ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές ροής εισόδου και εξόδου. Ελλείψει των σχέσεων μεταξύ αυτών των ροών, η διαδικασία θα ήταν απολύτως ακαθόριστη, δηλαδή οι έξοδοι θα ήταν ανεξάρτητοι από τις εισόδους. Επομένως χρειάζονται ένας ή περισσότεροι περιορισμοί που να δηλώνουν ότι η αναλογία των ροών εξόδου προς τις ροές εισόδου είναι ίση με μια σταθερά που είναι συγγενής έννοια με την αποδοτικότητα (efficiency). Στην περίπτωση ενός προϊόντος και ενός προϊόντος από μια διαδικασία, αυτή η εξίσωση καθορίζει την παραδοσιακή αποδοτικότητα της διαδικασίας. Με διάφορα προϊόντα, αυτός ο περιορισμός μπορεί να αφήσει κάποια ελευθερία στις μεμονωμένες ροές εξόδου (ή εισόδου), εφόσον είναι το ποσό τους σταθερή αναλογία σε σχέση με το ποσό των ροών εισόδου (ή εξόδου) αντίστοιχα. Ένας σημαντικός κανόνας για αυτόν τον περιορισμό είναι ότι κάθε ποσό πρέπει να ληφθεί στα προϊόντα του ίδιου τύπου δηλαδή στην ίδια ομάδα. Στο μοντέλο TIMES, για κάθε διαδικασία ο δημιουργός του μοντέλου προσδιορίζει την ομάδα προϊόντων εισόδου $cg1$, την ομάδα προϊόντων εξόδου $cg2$ και επιλέγει μια τιμή για

την αναλογία αποδοτικότητας, που ονομάζεται $FLOFUNC(p, cg1, cg2)$. Η ακόλουθη εξίσωση ενσωματώνει τα παραπάνω

$$EQ_PTRANS(r, v, t, p, cg1, cg2, s) - EfficiencyDefinition \quad (32)$$

$$SUM\{cincg2of : FLOW(r, v, t, p, c, s)\} =$$
$$FLOFUNC(r, v, cg1, cg2, s) \cdot SUM\{cwithincg1of :$$
$$COEFF(r, v, p, cg1, c, cg2, s) \cdot FLOW(r, v, t, p, c, s)\} \quad (33)$$

όπου $COEFF(r, v, p, cg1, c, cg2, s)$ λαμβάνει υπόψη την εναρμόνιση της διαφορετικής ανάλυσης των χρονοσχισμών από τις μεταβλητές ροής, οι οποίες έχουν παραλειφθεί εδώ για απλότητα, καθώς επίσης και οι αποδοτικότητες μετασχηματισμών οι εξαρτώμενες από τα προϊόντα.

2.11.4.6 Περιορισμός των Μεριδίων Ροής σε Εύκαμπτες Διαδικασίες

Όταν καθεμία των ομάδων προϊόντων $cg1$ και $cg2$ περιλαμβάνει περισσότερα από ένα στοιχεία, ο προηγούμενος περιορισμός επιτρέπει ελευθερία στις τιμές των ροών. Η διαδικασία είναι επομένως αρκετά εύκαμπτη. Ο περιορισμός μεριδίου ροής προορίζεται στο να περιορίσει την ευελιξία, με τον περιορισμό του μεριδίου κάθε ροής μέσα στην ομάδα του.

Ο γενικός τύπος αυτός του περιορισμού μπορεί να δοθεί από την παρακάτω σχέση

$$EQ_INSHR(c, cg, p, r, t, s) \text{ ή } EQ_OUTSHR(c, cg, p, r, t, s) \quad (34)$$

$$FLOW(c) \leq, \geq, = FLOSHAR(c) \cdot SUM\{overallc'incgof : FLOW(c')\} \quad (35)$$

2.11.4.7 Περιορισμός Επιφύλαξης Όξυνσης (για Χρονοτεμαχισμένα Προϊόντα μόνο)

Αυτός ο περιορισμός επιβάλλει τη συνολική ικανότητα όλων των διαδικασιών που παράγουν ένα προϊόν σε κάθε περίοδο και σε κάθε περιοχή να μην υπερβαίνει τη μέση ζήτηση στη χρονοσχισμή ενώ οξύνσεις εμφανίζονται σε περιορισμένο ποσοστό του χρόνου. Αυτό το ποσοστό καλείται ο μέγιστος παράγοντας επιφύλαξης (Peak

Reserve Factor), συμβολίζεται με $RESERV(r,t,c)$ και επιλέγεται για ασφάλεια ενάντια σε διάφορα απρόβλεπτα συμβάντα, όπως είναι το πιθανό έλλειμμα προϊόντων λόγω αβεβαιότητας σχετικά με τον ανεφοδιασμό του διαθεσιμότητα ύδατος σε μια δεξαμενή), βλάβη εξοπλισμού και τυχαία υψηλή ζήτηση που υπερβαίνει τη μέση ζήτηση κατά τη διάρκεια της χρονοσχισμής όταν εμφανίζεται η αιχμή (peak). Αυτός ο περιορισμός είναι επομένως συγγενής έννοια με ένα περιθώριο ασφάλειας που προστατεύει από τυχαία γεγονότα που δεν μπορούν αντιπροσωπεύονται ρητά στο μοντέλο.

Για κάθε χρονική περίοδο t και για την περιοχή r, πρέπει να υπάρχει αρκετή εγκατεστημένη ικανότητα ώστε να ξεπεραστεί η απαραίτητη ικανότητα στην εποχή με τη μεγαλύτερη ζήτηση για τα προϊόντα r κατά έναν παράγοντα ασφαλείας E ο οποίος καλείται παράγοντας επιφύλαξης αιχμής (peak reserve factor).

$$EQ_PEAK(r,t,c,s) - Com\,\mathrm{mod}\,ityPeak\,\mathrm{Re}\,quirements \tag{36}$$

$$\begin{aligned}
&Sum\{over\ \ all\ \ p\ \ producing\ \ c\ \ with\ \ c = pcg\ \ of\\
&\quad CAPUNIT(r,p)\cdot Peak(r,v,p,c,s)\cdot FR(s)\cdot CAP(r,v,t,p)\cdot ACTFLO(r,v,p,c)\}+\\
&\quad Sum\{over\ \ all\ \ p\ \ producing\ \ c\ \ with\ \ c = pcg\ \ of\\
&\quad Peak(r,v,p,c,s)\cdot FLOW(r,v,t,p,c,s)+TRADE(r,t,p,c,s,i)\\
&\quad \geq\\
&\qquad [1+RESERVE(r,t,c,s)]\cdot\Big[Sum\{over\ \ all\ \ p\ \ consu\,\mathrm{min}\,g\ \ c\ \ of\\
&\qquad FLOW(r,v,t,p,c,s)+TRADE(r,t,p,c,s,e)\}\Big]
\end{aligned} \tag{37}$$

όπου $RESERVE(r,t,c,s)$ είναι ο συντελεστής επιφύλαξης για το προϊόν c για τη συγκεκριμένη περιοχή, για τη χρονοσχισμή s. Αυτός ο συντελεστής επιτρέπει στον εξοπλισμό να βρεθεί απροσδόκητα εκτός λειτουργίας, επιτρέπει την εμφάνιση ζήτησης αιχμής και επιτρέπει αβέβαιη διαθεσιμότητα των πόρων. Επίσης, $Peak(r,v,p,c,s)$ (δε λαμβάνει τιμή μεγαλύτερη της μονάδας) είναι το μέρος ικανότητας της τεχνολογίας p σε μια περιοχή r για μια περίοδο t για προϊόν c (μόνο ηλεκτρική ενέργεια ή θερμότητα) που επιτρέπει τη συσχέτιση με το μέγιστο φορτίο στη χρονοσχισμή s. Πολλοί τύποι διαδικασιών προσφοράς είναι προβλέψιμα διαθέσιμοι κατά τη διάρκεια της αιχμής και έτσι έχουν έναν μέγιστο συντελεστή ίσο

με 1 ενώ άλλοι τύποι (όπως οι ανεμοστρόβιλοι ή οι ηλιακές εγκαταστάσεις στην περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας) χαρακτηρίζονται με μέγιστο συντελεστή μικρότερο της μονάδας, δεδομένου ότι είναι κατά μέσον όρο μόνο πιθανοτικά διαθέσιμες στην αιχμή για παράδειγμα ένας ανεμοστρόβιλος παρουσιάζει μέγιστο συντελεστή 0.25 ή 0.3, ενώ οι υδροηλεκτρικές εγκαταστάσεις, εγκαταστάσεις αερίου ή πυρηνικές εγκαταστάσεις παρουσιάζουν συντελεστή ίσο με τη μονάδα. Για την απλότητα της παρουσίασης έχει υποτεθεί στην (37) ότι η ανάλυση των χρονοσχισμών της όξυνσης των προϊόντων και η ανάλυση των χρονοσχισμών των ροών προϊόντων ($FLOW$, $TRADE$) είναι η ίδια.

2.11.4.8 Περιορισμοί στα Προϊόντα

Οι μεταβλητές του μοντέλου TIMES είναι προαιρετικά συνδεμένες με τις διάφορες ποσότητες τις σχετικές με τα προϊόντα, όπως είναι η συνολική παραχθείσα ποσότητα (total quantity produced). Επομένως, είναι αρκετά εύκολο να τεθούν οι περιορισμοί σε αυτές τις ποσότητες, απλά οριοθετώντας τις μεταβλητές προϊόντων σε κάθε περίοδο. Είναι επίσης δυνατό να επιβληθούν συσωρευτικά όρια (cumulative bounds) στα προϊόντα κατά τη διάρκεια περισσότερων από μιας περιόδου. Ένα ιδιαίτερα χρήσιμο χαρακτηριστικό γνώρισμα για την περίπτωση των συσωρευτικών ορίων είναι η οριοθέτηση των εκπομπών ή της εξόρυξης ορυκτών καυσίμων. Με την εισαγωγή κατάλληλων συμβάσεων για τις εκπομπές, ο χρήστης μπορεί να περιορίσει τις εκπομπές σε συγκεκριμένους τομείς. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να επιβάλει παγκόσμιους περιορισμούς εκπομπής που ισχύουν για διάφορες περιοχές λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη το εμπόριο των αδειών εκπομπής. Εναλλακτικά ή ταυτόχρονα ένας φόρος ή μια ποινική ρήτρα μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε παραχθείσα (ή καταναλωθείσα) μονάδα προϊόντος (ενεργειακή μορφή, εκπομπή), μέσω συγκεκριμένων παραμέτρων. Ένας συγκεκριμένος τύπος περιορισμού που καθορίζεται για να περιορίσει το μερίδιο της διαδικασίας (p) στη συνολική παραγωγή των προϊόντων (c) είναι ο περιορισμός που φράσσει τη ροή των προϊόντων (c) από/προς τη διαδικασία (p) μέχρι μια δεδομένη τιμή της συνολικής παραγωγής των προϊόντων (c). Στην παρούσα εφαρμογή, η ίδια δεδομένη τιμή εφαρμόζεται σε όλες τις χρονοσχισμές.

2.11.4.9 Περιορισμοί Χρήστη

Εκτός από τους τυποποιημένους περιορισμούς στο μοντέλο TIMES που έχουν παρουσιαστεί έως τώρα, ο χρήστης που ενδιαφέρεται στην ανάπτυξη προβλέψεων περίπτωσης αναφοράς (reference case projections) σχετικά με τη συμπεριφορά αγοράς ενέργειας (energy market behavior) μπορεί να εισάγει πρόσθετους περιορισμούς για να εκφράσει αυτούς τους ειδικούς όρους. Παραδείγματος χάριν, μπορεί να υπάρξει καθορισμένος από το χρήστη περιορισμός που να περιορίζει την επένδυση σε νέο δυναμικό πυρηνικής ενέργειας (ανεξάρτητα από τον τύπο αντιδραστήρα) ή που να υπαγορεύει ένα ορισμένο ποσοστό νέου δυναμικού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Προκειμένου να διευκολυνθεί η δημιουργία ενός νέου περιορισμού χρήστη, το μοντέλο TIMES παρέχει ένα πρότυπο (template) για την παρουσίαση

(i) του συνόλου των μεταβλητών που περιλαμβάνονται στον περιορισμό και

(ii) των καθορισμένων από το χρήστη συντελεστών που απαιτούνται στον περιορισμό.

2.11.4.10 Αναπαράσταση Διύλισης Πετρελαίου στο Μοντέλο TIMES

Δύο εναλλακτικές προσεγγίσεις είναι διαθέσιμες στο μοντέλο TIMES για να μπορέσει να περιγραφεί η διύλιση του πετρελαίου. Σύμφωνα με την απλουστευμένη προσέγγιση που έχει υιοθετηθεί στην πλειοψηφία των μοντέλων TIMES, οι εγκαταστάσεις καθαρισμού αντιμετωπίζονται ως σύνολο μιας ή περισσότερων τυποποιημένων τεχνολογιών που υπάρχουν στο μοντέλο TIMES. Επίσης, είναι διαθέσιμη μια περιπλοκότερη προσέγγιση όταν ο δημιουργός του μοντέλου επιθυμεί να διευκρινίσει περιορισμούς ποιοτικής απαίτησης (bona fide quality requirement constraints) για κάθε διυλισμένο προϊόν όπως είναι η εκτίμηση οκτανίου (octane rating), η περιεκτικότητα σε θείο (sulfur content), ο δείκτης λάμψης (flash index), η πυκνότητα (density), ο αριθμός δεκαεξανίου (cetane number), το ιξώδες (viscosity), η πίεση ατμού Reid (Reid vapor pressure), κ.λπ. Αυτή η προσέγγιση ενσωματώνεται στην ειδική ενότητα του μοντέλου TIMES περί της διύλισης πετρελαίου της οποίας τα κύρια χαρακτηριστικά γνωρίσματα περιγράφονται σε αυτό το τμήμα.

Προκειμένου να εφαρμοστούν κατάλληλα οι συγκεκριμένοι περιορισμοί σε αυτόν τον τομέα, το μοντέλο απαιτεί νέα σύνολα και παραμέτρους που είναι μοναδικά σε αυτόν τον τομέα και καθορίζονται, ως εξής:

- Σταθερά *REFUNIT*. Διευκρινίζει σε ποιες μονάδες καθορίζονται οι ροές εγκαταστάσεων διύλισης (refinery streams) και λαμβάνει μονάδες όγκου, βάρους ή ενέργειας.
- Σύνολο *REF*. Περιέχει τον κατάλογο διαδικασιών διύλισης (υποσύνολο του *PRC*).
- Σύνολο *OPR*. Περιέχει τους ενδιάμεσους ενεργειακούς μεταφορείς (ροές εγκαταστάσεων διύλισης) που παράγονται από τα μέλη του *REF*, συν το διαθέσιμο ακατέργαστο πετρέλαιο. Κάθε ροή εισάγει στην παραγωγή ένα ή περισσότερα *RPP*. Τα μέλη του *OPR* εκφράζονται σε μονάδες ίδιες με αυτές της *REFUNIT* (όγκος, βάρος ή ενέργεια).
- Σύνολο *BLE*. Περιέχει τα παράγωγα προϊόντων (product commodity) της δραστηριότητας διύλισης.
- Παράμετρος *CONVERT*. Περιέχει την πυκνότητα και το ενεργειακό περιεχόμενο (σε βάρος ή σε όγκο) κάθε ροής διύλισης (blending stream). Αυτές οι παράμετροι χρησιμοποιούνται ως συντελεστές των εξισώσεων διύλισης για να τις μετατρέψουν στις σωστές μονάδες
- Σύνολο *SPE*. Περιέχει τα ονόματα των προδιαγραφών που πρέπει να επιβληθούν στα διυλισμένα πετρελαιοειδή (Refined Petroleum Products ή RPPs), όπως η εκτίμηση οκτανίου, η περιεκτικότητα σε θείο, κ.λπ.
- Παράμετρος *BL_COM*. Περιέχει τις τιμές των προδιαγραφών διύλισης *SPE* για τις ροές διύλισης *OPR*.
- Παράμετρος *BL_SPEC*. Περιέχει τις τιμές των προδιαγραφών *SPE* για το προϊόν διύλισης *BLE*.

Από τη στιγμή που οι παραπάνω μεταβλητές και παράμετροι εξόδου καθοριστούν από το χρήστη, το μοντέλο δημιουργεί τη μεταβλητή διύλισης $BLND_{t,ble,opr}$ που είναι το ποσό του διυλισμένου αποθέματος *OPR* που εισάγεται στην παραγωγή του διυλισμένου προϊόντος *BLE* στο χρονικό διάστημα t.

Οι παραπάνω μεταβλητές και οι παράμετροι εισόδου είναι αυτοί που χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για να εκφραστούν οι ακόλουθοι δύο τύποι περιορισμών διύλισης

2.11.4.10.1 Διύλιση με τον Όγκο (Εκτίμηση Οκτανίου)

$$\sum_{opr \in OPR} \left(oct_{opr} \cdot BLND_{t,ble,opr} \right) = oct_{ble} \cdot \sum_{opr \in OPR} BLND_{t,ble,opr} \qquad (38)$$

όπου oct_{opr} είναι η περιεκτικότητα σε οκτάνιο στον όγκο μιας μονάδας ροής opr και οι μονάδες που λαμβάνει είναι αυτές της $REFUNIT$. Εάν το $REFUNIT$ δεν είναι ίσο με τον όγκο, πρέπει να εφαρμοστούν συντελεστές μετατροπής. Επίσης, oct_{ble} είναι η απαραίτητη εκτίμηση όγκου οκτανίου του διυλισμένου προϊόντος enc (required volume octane rating of the refined product) και $BLND$ είναι μεταβλητές που εκφράζονται σε μονάδες όγκου.

2.11.4.10.2 Διύλιση με το Βάρος (Περιεκτικότητα σε Θείο)

$$\sum_{opr \in OPR} \left(sulf_{opr} \cdot BLND_{t,ble,opr} \right) = sulf_{ble} \cdot \sum_{opr \in OPR} BLND_{t,ble,opr} \qquad (39)$$

όπου $sulf_{opr}$ είναι η περιεκτικότητα σε θείο στον όγκο μιας μονάδας ροής opr και οι μονάδες που λαμβάνει είναι αυτές της $REFUNIT$. Εάν το $REFUNIT$ δεν είναι ίσο με το βάρος, πρέπει να εφαρμοστούν συντελεστές μετατροπής, $sulf_{ble}$ είναι το βάρος του θείου του διυλισμένου προϊόντος enc (weight sulfur content of the refined product) και $BLND$ είναι μεταβλητές που εκφράζονται σε μονάδες βάρους.

2.12 Ελαστική Ζήτηση και Υπολογισμός της Ισορροπίας Προσφοράς-Ζήτησης

Έως τώρα, έχει παρουσιαστεί ο υπολογισμός της ισορροπίας προσφοράς-ζήτησης στο μοντέλο TIMES όταν οι επιλογές προσφοράς και ζητήσεις ενεργειακών υπηρεσιών υπολογίζονται από το μοντέλο. Η ισορροπία καθοδηγείται από την

καθορισμένη από το χρήστη προδιαγραφή των λειτουργιών ζήτησης, οι οποίες καθορίζουν πως κάθε ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών ποικίλλει ως συνάρτηση της τιμής αγοράς αυτής της ενεργειακής υπηρεσίας. Ο κώδικας του μοντέλου TIMES υποθέτει ότι κάθε ζήτηση έχει σταθερή ελαστικότητα τιμής (own-price elasticity) σε δεδομένο χρονικό διάστημα και ότι οι διαγώνιες ελαστικότητες τιμών (cross price elasticities) είναι μηδέν. Η οικονομική θεωρία καθορίζει ότι η ισορροπία που υπολογίζεται έτσι αντιστοιχεί στη μεγιστοποίηση του καθαρού συνολικού πλεονάσματος, που ορίζεται ως το ποσό των πλεονασμάτων προμηθευτών και καταναλωτών [27], [28]. Το συνολικό καθαρό πλεόνασμα έχει θεωρηθεί ως ένα έγκυρο μέτρο της κοινωνικής ευημερίας στη μικροοικονομική παγκόσμια βιβλιογραφία και αυτό το γεγονός παρέχει την υπόθεση ισορροπίας που υπολογίζεται από το μοντέλο TIMES. Το μοντέλο TIMES οργανώνεται με δύο τρόπους: πρώτα μιμούμενο περίπτωση αναφοράς και έπειτα μιμούμενο εναλλακτικά σενάρια σε κάθε ένα από τα οποία βασίζεται, και συνεχίζει λαμβάνοντας τις υποθέσεις και τις παραμέτρους της περίπτωσης αναφοράς. Παραδείγματος χάριν, ένα εναλλακτικό σενάριο μπορεί να κάνει διαφορετικές υποθέσεις σχετικά με τη διαθεσιμότητα ή το κόστος μερικών νέων τεχνολογιών. Μπορεί να υποθέσει ότι εφαρμόζονται ορισμένες ενέργειες ή πολιτικές για το περιβάλλον όπως είναι φόροι εκπομπής ή μοντέλα χαρτοφυλακίων ή βελτιώσεις αποδοτικότητας. Ή πάλι, ένα σενάριο μπορεί να υποθέσει ότι πρέπει να επιτευχθεί ένας ορισμένος στόχος όπως είναι ένα κατώφλι στις εκπομπές, αφήνοντας το μοντέλο στη συνέχεια ελεύθερο να επιτύχει εκείνο τον στόχο με το λιγότερο κόστος. Σχεδόν σε οποιοδήποτε εναλλακτικό σενάριο, κάποια πίεση (strain) τίθεται σε μερικούς τομείς, με συνέπεια αυξήσεις στις οριακές τιμές μερικών ενεργειακών υπηρεσιών. Για παράδειγμα, οι αυστηρές μειώσεις εκπομπής μπορούν να αυξήσουν την τιμή των μεταφορών (auto transportation). Στο μοντέλο TIMES, οι ζητήσεις αυτορυθμίζονται αντιδρώντας στις εμφανιζόμενες αλλαγές της τιμής τους τις σχετικές με την περίπτωση αναφοράς και επομένως το μοντέλο υπερβαίνει τη βελτιστοποίηση του τομέα της ενέργειας μόνο. Κατά συνέπεια αν και το μοντέλο TIMES υπολείπεται στο να υπολογίζει μια γενική ισορροπία, συλλαμβάνει εντούτοις το σημαντικό στοιχείο των αποτελεσμάτων ανατροφοδότησης, κάτι το οποίο τα προηγούμενα από-κάτω-προς-τα-άνω μοντέλα δε λάμβαναν υπόψη.

Σε αυτήν την παράγραφο θα γίνει η παρουσίαση του πως ο γραμμικός προγραμματισμός υπολογίζει την ισορροπία. Πρόσθετες τεχνικές λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία [35], [36]. Μια από τις πρώτες εφαρμογές μεγάλης κλίμακας αυτών των μεθόδων πραγματοποιήθηκε στο Πρόγραμμα Συστήματος Ενεργειακής Ανεξαρτησίας (Project Independence Energy System ή PIES) [37]. Η εφαρμογή στα πλαίσια της ζήτησης για τελική ενέργεια παρά για ενεργειακές υπηρεσίες όπως στο μοντέλο TIMES αυτών των μεθόδων περιορίστηκε.

2.12.1 Θεωρητικές Εκτιμήσεις και το Θεώρημα της Ισοδυναμίας

Η υπολογιστική μέθοδος είναι βασισμένη στο θεώρημα της ισοδυναμίας που έχει παρουσιαστεί παραπάνω και το οποίο προβλέπει ότι μια οικονομική ισορροπία ζήτησης-προσφοράς επιτυγχάνεται όταν μεγιστοποιείται το άθροισμα των πλεονασμάτων των παραγωγών και των καταναλωτών.

2.12.2 Τα Μαθηματικά της Ισορροπίας στο Μοντέλο TIMES

2.12.2.1 Ορισμός Συναρτήσεων Ζήτησης

Για κάθε κατηγορία ζήτησης, καθορίζεται μια καμπύλη ζήτησης δηλαδή καθορίζεται η ζήτηση ως συνάρτηση της τιμής. Στο μοντέλο TIMES χρησιμοποιείται μια σταθερή σχέση ελαστικότητας η οποία δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$DM_i(p) = K_i \cdot p_i^{E_i} \qquad (40)$$

όπου DM_i είναι η ζήτηση i, p_i είναι η τιμή του που λαμβάνεται να είναι το οριακό κόστος (marginal cost) για την προμήθεια του προϊόντος i και E_i είναι η ελαστικότητα τιμών αυτής της ζήτησης. Ας σημειωθεί ότι αν και οι δείκτες r, t (περιοχής και χρόνου αντίστοιχα) έχουν παραλειφθεί σε αυτήν την σημείωση, όλες οι ποσότητες στην (40), συμπεριλαμβανομένων και των ελαστικοτήτων είναι εξαρτώμενες τόσο από την περιοχή όσο και από το χρόνο. Σταθερό K_i μπορεί να

ληφθεί εάν ένα σημείο $\left(p_i^0, DM_i^0\right)$ της καμπύλης είναι γνωστή (περίπτωση αναφοράς). Κατά συνέπεια, το (40) μπορεί να ξαναγραφεί

$$\frac{DM_i}{DM_i^0} = \left(\frac{p_i}{p_i^0}\right)^{E_i} \tag{41}$$

ή

$$p_i = p_i^0 \cdot \left(\frac{DM_i}{DM_i^0}\right)^{\frac{1}{E_i}} \tag{42}$$

όπου ο δείκτης ^{0} δείχνει την περίπτωση αναφοράς και η ελαστικότητα E_i είναι αρνητική. Ας σημειωθεί επίσης ότι η ελαστικότητα μπορεί να έχει δύο διαφορετικές τιμές, μια για τις ανοδικές αλλαγές της ζήτησης (upward changes in demand) και μια για τις καθοδικές αλλαγές (downward changes).

2.12.2.2 Διατύπωση της Ισορροπίας στο Μοντέλο TIMES

Με ανελαστική ζήτηση, το μοντέλο TIMES μπορεί να γραφτεί ως το ακόλουθο γραμμικό πρόγραμμα

$$Min \quad c \cdot X \tag{43}$$

$$s.t. \quad \sum_k CAP_{k,i}(t) \geq DM_i(t) \quad i = 1,2,...,I; t = 1,2,...,T \tag{44}$$

και $B \cdot X \geq b$ (45)

όπου το X είναι το διάνυσμα όλων των μεταβλητών και I είναι ο αριθμός των κατηγοριών ζήτησης. Θέλοντας να περιγραφούν εννοιολογικά οι παραπάνω εξισώσεις θα μπορούσαν να ειπωθούν τα εξής

- Η (43) εκφράζει το συνολικό προεξοφλημένο κόστος που ελαχιστοποιείται.
- Η (44) εκφράζει το σύνολο των περιορισμών ικανοποίησης ζήτησης (demand satisfaction constraints) όπου οι μεταβλητές CAP είναι οι ικανότητες των τεχνολογιών τελικής χρήσης και DM είναι οι εξωγενείς ζητήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται.
- Η (45) είναι το σύνολο όλων των άλλων περιορισμών.

Με τις ελαστικές ζητήσεις, ο ρόλος του μοντέλου TIMES είναι να υπολογίσει μια ισορροπία ζήτησης-προσφοράς όπου και η πλευρά της προσφοράς και η πλευρά της ζήτησης προσαρμόζονται στις αλλαγές στις τιμές και οι τιμές που χρεώνονται από την πλευρά του προμηθευτή είναι οι οριακές δαπάνες (marginal cost) των κατηγοριών ζήτησης δηλαδή το p_i είναι η οριακή δαπάνη για την παραγωγή της ζήτησης DM_i. Α priori αυτό φαίνεται να είναι ένας δύσκολος στόχος, επειδή οι τιμές που χρησιμοποιούνται από την πλευρά της ζήτησης υπολογίζονται ως τμήμα της λύσης των (43), (44) και (45). Το θεώρημα ισοδυναμίας, εντούτοις, δηλώνει ότι μια τέτοια ισορροπία επιτυγχάνεται ως λύση του ακόλουθου μαθηματικού προγράμματος, όπου ο στόχος είναι να μεγιστοποιηθεί το καθαρό συνολικό πλεόνασμα

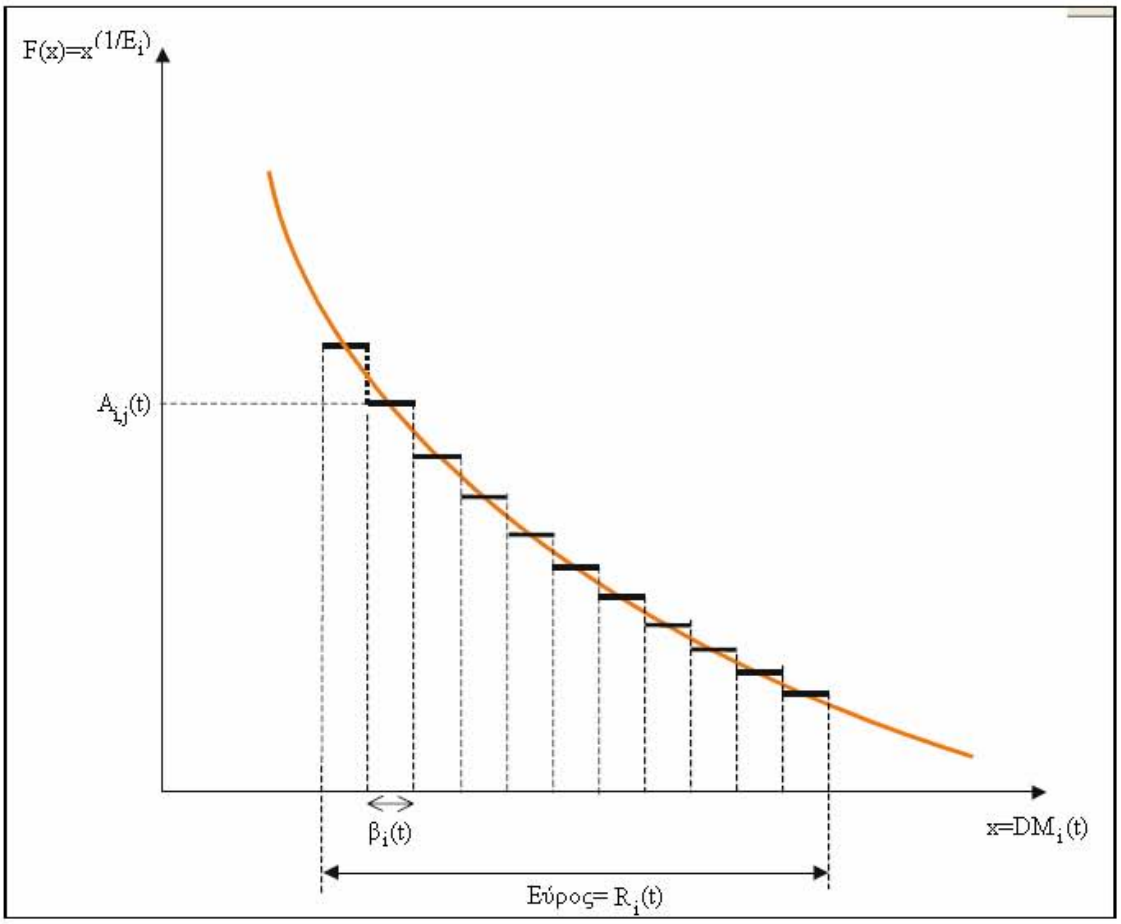
$$Max \sum_i \sum_t \left(p_i^0(t) \cdot \left[DM_i^0(t) \right]^{-\frac{1}{E_i}} \cdot \int_{\alpha}^{DM_i(t)} q^{\frac{1}{E_i}} \cdot dq \right) - c \cdot X \qquad (46)$$

$$s.t. \quad \sum_k CAP_{k,i}(t) - DM_i(t) \geq 0 \quad i = 1,2,...,I; t = 1,2,...,T \qquad (47)$$

και $B \cdot X \geq b$ (48)

2.12.2.3 Γραμμικοποίηση του Μαθηματικού Προγράμματος

Το μαθηματικό πρόγραμμα που περιγράφεται από τις σχέσεις (46), (47), (48) χαρακτηρίζεται από μια μη γραμμική, αντικειμενική συνάρτηση. Επειδή το πρόβλημα της μη γραμμικότητας της αντικειμενικής συνάρτησης είναι διασπάσιμο (separable) δηλαδή δεν περιλαμβάνει διαγώνιους όρους (cross terms) και οι μεταβλητές DM_i είναι κοίλες, κάθε ένας από τους όρους του γίνεται εύκολα γραμμικός από τμηματικά γραμμικών συναρτήσεων που προσεγγίζουν τα ολοκληρώματα της (46). Αυτό είναι το ίδιο λέγοντας ότι οι αντίστροφες καμπύλες ζήτησης προσεγγίζονται από βηματικές συναρτήσεις όπως εμφανίζονται στο Σχήμα 2.6. Ακολουθώντας την παραπάνω μέθοδο, το πρόβλημα βελτιστοποίησης γίνεται γραμμικό.



Σχήμα 2.6. Βηματική προσέγγιση των μη γραμμικών όρων της αντικειμενικής συνάρτησης.

Για να επιτευχθεί η γραμμικοποίηση πρέπει να ακολουθηθούν τα παρακάτω βήματα:

(i) Για κάθε κατηγορία ζήτησης i, ο χρήστης επιλέγει ένα εύρος (range) μέσα στο οποίο υπολογίζεται η τιμή της ζήτησης DM_i η οποία θα διατηρήσει την αμή αυτή και στη συνέχεια για τη ρύθμιση στα αποτελέσματα αμών (adjustment for price effects). Για παράδειγμα το εύρος μπορεί να είναι ίσο με τη ζήτηση της περίπτωσης αναφοράς DM_i^0 συν/πλήν 50%. Η μικρότερη τιμή του εύρους είναι $DM(t)_{\min}$.

(ii) Γίνεται η επιλογή ενός πλέγματος (grid) που διαιρεί το εύρος σε ένα αριθμό n διαστημάτων ίσου πλάτους. Γίνεται η θεώρηση ότι $\beta_i(t)$ είναι το κοινό πλάτος του πλέγματος που δίνεται από τη σχέση $\beta_i(t) = \frac{R_i(t)}{n}$.

Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται σχηματική απεικόνιση της μη γραμμικής

έκφρασης και της προσέγγισης μέσω βηματικών συναρτήσεων. Ο αριθμός των βημάτων, n, πρέπει να επιλεχτεί έτσι ώστε η σταδιακή σταθερή προσέγγιση (step-wise constant approximation) να παραμένει κοντά στην τιμή της συνάρτησης.

(iii) Για κάθε τμήμα ζήτησης $DM_i(t)$ καθορίζονται n βηματικές μεταβλητές (μια ανά διάστημα πλέγματος), οι οποίες αναπαριστώνται ως $s_{1,i}(t)$, $s_{2,i}(t)$,…, $s_{n,i}(t)$. Κάθε μεταβλητή s είναι μικρότερη ή ίση του 0 και μεγαλύτερη από $\beta_i(t)$. Τώρα μπορούν να αντικατασταθούν τα $DM_i(t)$ των (46) και (47) από το άθροισμα των n βηματικών μεταβλητών και κάθε μη γραμμικός όρος στην αντικειμενική συνάρτηση από ένα σταθμισμένο ποσό n βηματικών μεταβλητών, ως εξής:

$$DM_i(t) = DM(t)_{\min} + \sum_{j=1}^{n} s_{j,i}(t) \tag{49}$$

και

$$DM_i(t)^{1+\frac{1}{E_i}} \cong DM(t)_{\min}^{1+\frac{1}{E_i}} + \sum_{j=1}^{n} A_{j,s,i}(t) \cdot \frac{s_{j,i}(t)}{\beta_i(t)} \tag{50}$$

Το προκύπτον μαθηματικό πρόγραμμα είναι τώρα πλήρως γραμμικό. Αντί της μεγιστοποίησης της γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης, το μοντέλο TIMES μπορεί να ελαχιστοποιήσει την αρνητική τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία έχει έπειτα διαστάσεις κόστους. Το μέρος του κόστους που αντιπροσωπεύει το αρνητικό καταναλωτικό πλεόνασμα είναι συγγενές με την απώλεια ευημερίας (welfare loss).

2.12.2.4 Βαθμονόμηση των Συναρτήσεων Ζήτησης

Εκτός από την επιλογή των ελαστικοτήτων για τις διάφορες κατηγορίες ζήτησης, ο χρήστης πρέπει να αξιολογήσει κάθε σταθερά $K_i(t)$. Για να γίνει αυτό, πρέπει να είναι γνωστό ένα σημείο σε κάθε συνάρτηση ζήτησης, (p_i^0, DM_i^0). Για γίνει ο καθορισμός ενός τέτοιου σημείου, απαιτείται μια ενιαία προκαταρκτική εκτέλεση του μοντέλου TIMES (με το εξωγενές $DM_i^0(t)$ και χρησιμοποιώντας τις

προκύπτουσες τιμές σκιών $p_i^0(t)$ όλων των περιορισμών ζήτησης, σε όλα τα χρονικά διαστήματα για κάθε περιοχή.

2.12.2.5 Υπολογιστικές Εκτιμήσεις

Κάθε τμήμα ζήτησης που είναι ελαστικό στην τιμή του απαιτεί τον καθορισμό τόσων μεταβλητών όσων είναι τα βήματα στη διακριτή απεικόνιση της καμπύλης ζήτησης (ανοδικές αλλαγές της ζήτησης και καθοδικές αλλαγές), για κάθε περίοδο και περιοχή. Κάθε τέτοια μεταβλητή έχει μια άνω τιμή χωρίς όμως να χρειάζεται να δημιουργηθεί νέος περιορισμός. Επομένως, η πολυπλοκότητα του γραμμικού προγράμματος αυξάνεται από διάφορες μεταβλητές, αλλά το γραμμικό πρόγραμμα δεν έχει περισσότερους περιορισμούς από το αρχικό ανελαστικό LP (με εξαίρεση τα άνω όρια). Είναι ευρέως γνωστό ότι με τους σύγχρονους κώδικες LP, ο αριθμός μεταβλητών ασκεί ελάχιστη ή καμία επίδραση στον υπολογιστικό χρόνο στο γραμμικό προγραμματισμό. Επίσης, καμία επίδραση στον υπολογιστικό χρόνο δεν ασκεί το γεγονός εάν οι μεταβλητές είναι φραγμένες άνω ή όχι. Επομένως, ο συνυπολογισμός των ελαστικών ζητήσεων ασκεί πολύ μικρή επίδραση στον υπολογιστικό χρόνο. Αυτό είναι μια σημαντική παρατήρηση που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τα μεγάλου μεγέθους προβλήματα LP που προκύπτουν από την απεικόνιση πολυπεριφερειακών και παγκόσμιων προβλημάτων στο μοντέλο TIMES.

2.12.2.6 Ερμηνεία των Δαπανών, του Πλεονάσματος και των Τιμών στο Μοντέλο TIMES

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι, αντί της μεγιστοποίησης του καθαρού συνολικού πλεονάσματος, το μοντέλο TIMES ελαχιστοποιεί το αρνητικό του (συν μια σταθερά), που λαμβάνεται με την αλλαγή των προσήμων στην έκφραση. Για αυτό και άλλους λόγους, είναι ακατάλληλο να δοθεί πάρα πολλή προσοχή στην έννοια των απόλυτων τιμών των αντικειμενικών συναρτήσεων (absolute objective function values).

Στη συνέχεια ας επισημανθεί η δημοφιλής ερμηνεία των τιμών σκιών ως οριακές δαπάνες των περιορισμών του μοντέλου είναι ανακριβής. Η τιμή σκιών ενός περιορισμού είναι, εξ ορισμού, η επαυξητική αξία της αντικειμενικής συνάρτησης ανά μονάδα των περιορισμών της δεξιάς πλευράς (constraint's right hand side ή RHS). Η ερμηνεία είναι αυτή ενός ποσού απώλειας πλεονάσματος ανά μονάδα RHS του περιορισμού. Η διαφορά είναι λεπτή αλλά εντούτοις σημαντική. Παραδείγματος χάριν, η τιμή σκιάς του περιορισμού ισορροπίας ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι απαραιτήτως η πρόσθετη δαπάνη ηλεκτρικής ενέργειας. Πράγματι, όταν αυξάνεται το RHS του ισορροπημένου περιορισμού (balanced constraint) κατά μια μονάδα, μπορεί είτε το σύστημα να παράγει μια μονάδα παραπάνω ηλεκτρικής ενέργειας είτε το σύστημα να καταναλώνει μια μονάδα παρακάτω ηλεκτρικής ενέργειας που μπορεί να γίνει ίσως με την επιλογή αποδοτικότερων συσκευών τελικής χρήσης ή με τη μείωση μιας απαιτητικής σε ενέργεια ενεργειακής υπηρεσίας (electricity-intensive energy service). Είναι επομένως σωστό οι τιμές σκιών να περιγράφονται ως η οριακή αξία συστημάτων ενός πόρου (marginal system value of a resource) και όχι ως η πρόσθετη δαπάνη από εκείνο τον πόρο (marginal cost of procuring that resource).

2.13 Η Διατύπωση του ETL στο Μοντέλο TIMES

2.13.1 Μαθηματική Διατύπωση

Αρχικά, θα γίνει η εξήγηση του πως το πρόβλημα ETL μετασχηματίζεται ώστε να είναι υλοποιήσιμο ως μαθηματικό πρόβλημα προγραμματισμού. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μαθηματική διατύπωση του ETL, που συνίσταται στην περιγραφή της τροποποίησης των τριών στοιχείων του LP (μεταβλητές , περιορισμοί και αντικειμενική συνάρτηση).

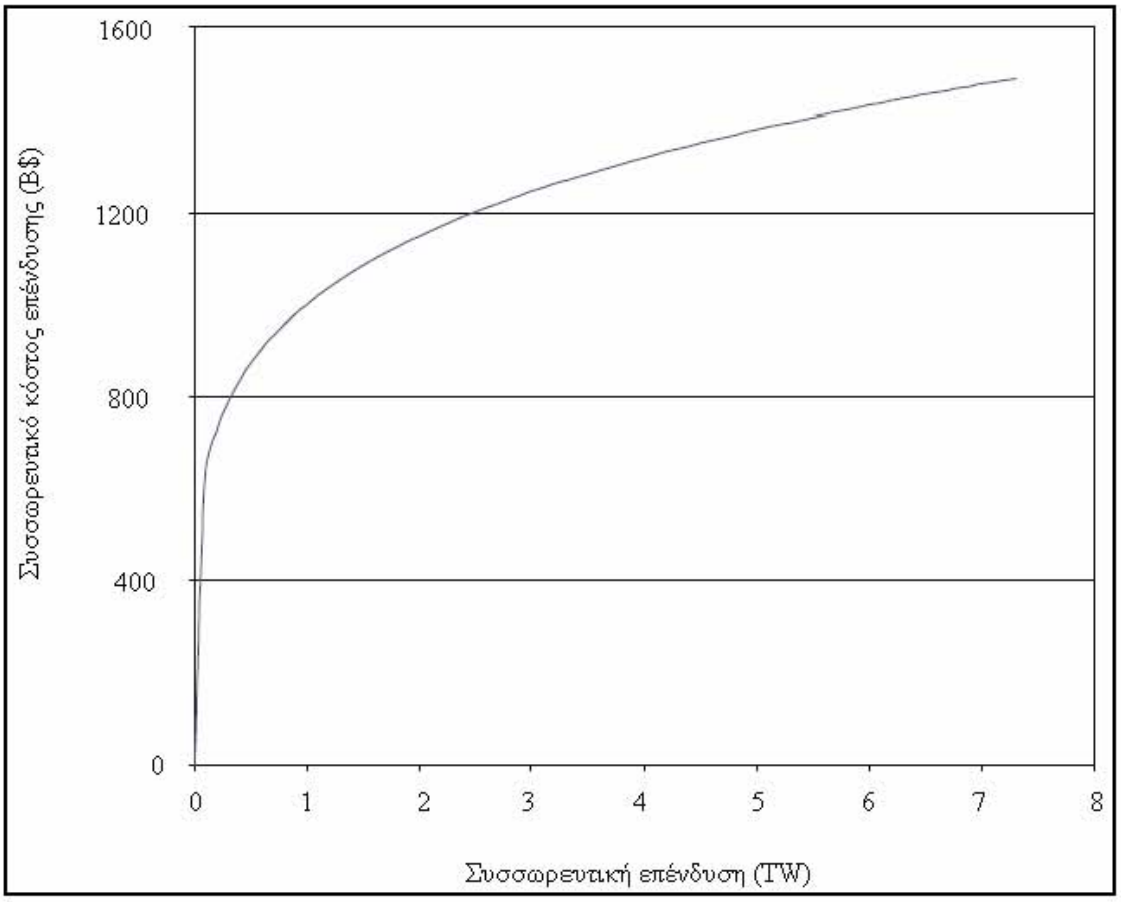
2.13.1.1 Προκαταρκτικές Μαθηματικές Διαπιστώσεις

Σχετικά με το συσωρευτικό κόστος επένδυσης (cumulative investment cost) ακολουθείται η βασική προσέγγιση που περιγράφεται από τον Barreto [38].

Το πρώτο βήμα της διατύπωσης είναι να εκφραστεί το συνολικό κόστος επένδυσης, δηλαδή η ποσότητα που πρέπει να εμφανιστεί στην αντικειμενική συνάρτησης για να περιγράψει το κόστος επένδυσης μιας τεχνολογίας εκμάθησης στην περίοδο t. Το TC_t δίνεται από τη σχέση

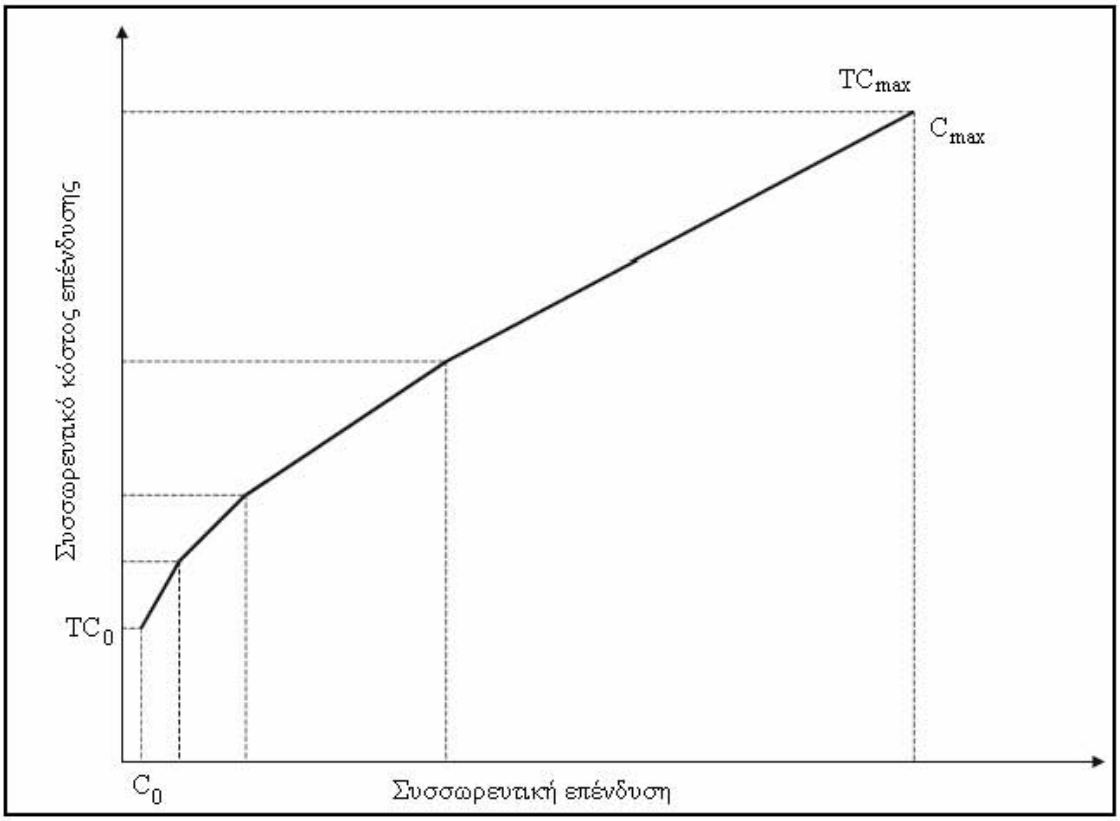
$$TC_t = \int_0^{C_t} a \cdot y^{-b} \cdot dy = \frac{a}{1-b} \cdot C_y^{-b+1} \qquad (51)$$

Το TC_t είναι μια κοίλη συνάρτηση του C_t με μορφή όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 2.7.



Σχήμα 2.7. Παράδειγμα συσωρευτική καμπύλης μάθησης.

Με τη μικτή προσέγγιση προγραμματισμού ακέραιων αριθμών που εφαρμόζεται στο μοντέλο TIMES, η συσωρευτική καμπύλη εκμάθησης προσεγγίζεται από γραμμικά τμήματα και δυαδικές μεταβλητές χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν λογικούς όρους. Στο Σχήμα 2.8 παρουσιάζεται μια πιθανή τμηματική γραμμική προσέγγιση της καμπύλης στο Σχήμα 2.7. Η επιλογή του αριθμού των βημάτων και των αντίστοιχων μηκών τους γίνεται προσεκτικά ώστε να προκύψει μια καλή προσέγγιση της ομαλής συσωρευτικής καμπύλης εκμάθησης.



Σχήμα 2.8. Παράδειγμα προσέγγισης 4 τμημάτων της συσωρευτικής καμπύλης δαπανών.

Ειδικότερα, τα βήματα πρέπει να είναι μικρότερα για τις μικρές τιμές από ότι για τις μεγαλύτερες τιμές, δεδομένου ότι η κυρτότητα της καμπύλης μικραίνει καθώς αυξάνουν οι συνολικές επενδύσεις. Η διατύπωση των μεταβλητών ETL και των περιορισμών μπορεί να συνεχιστεί ως εξής (παραλείπονται στη συνέχεια οι δείκτες οι σχετικοί με την περίοδο, την περιοχή και την τεχνολογία για την απλότητα της παρουσίασης)

1. Ο χρήστης καθορίζει το σύνολο των τεχνολογιών εκμάθησης (TEG).

2. Για κάθε τεχνολογία εκμάθησης, ο χρήστης παρέχει
   a. το ρυθμό προόδου pr από τον οποίο μπορεί να προκύψει ο δείκτης b,
   b. ένα αρχικό σημείο στην καμπύλη εκμάθησης (C_0, TC_0),
   c. τη μέγιστη συσωρευτική επένδυση $C_{\max}$ (από την οποία μπορεί να προκύψει το μέγιστο συνολικό κόστος επένδυσης $TC_{\max}$),
   d. τον αριθμό N των τμημάτων για να προσεγγιστεί η συσωρευτική καμπύλη μάθησης στο διάστημα $(C_0, C_{\max})$.
3. Το μοντέλο επιλέγει αυτόματα τις κατάλληλες τιμές για τα μήκη των βημάτων N και προχωρά έπειτα στη δημιουργία των απαραίτητων νέων μεταβλητών, των περιορισμών και των νέων συντελεστών της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε τεχνολογία εκμάθησης. Οι λεπτομερείς τύποι παρουσιάζονται και σχολιάζονται εν συντομία παρακάτω.

2.13.1.1.1 Υπολογισμός των Κρισίμων Σημείων και των Μηκών Τμημάτων

Ο υπολογισμός των κρίσιμων σημείων (break points) και των μηκών των τμημάτων γίνεται κατά τέτοιο ώστε τα διαδοχικά μήκη διαστήματος στον κάθετο άξονα να επιλέγονται ως μέλη γεωμετρικής πρόοδος, δηλαδή κάθε διάστημα να είναι δύο φορές πιο ευρύ από το προηγούμενό του. Με αυτό τον τρόπο, τα διαστήματα κοντά στις χαμηλές τιμές της καμπύλης είναι μικρότερα ώστε να προσεγγιστεί καλύτερα η καμπύλη στην υψηλή ζώνη κυρτότητας. Ας θεωρηθεί ότι το $\{TC_{i-1}, TC_i\}$ είναι το διάστημα i στον κάθετο άξονα, για $i = 1,2,...,N-1$. Τότε

$$TC_i = TC_{i-1} + 2^{i-N-1} \cdot \left(\frac{TC_{\max} - TC_0}{1 - 0.5^N} \right), \quad i = 1,2,...,N \tag{52}$$

Ας σημειωθεί ότι $TC_{\max}$ είναι ίσο με TC_N.

Τα κρίσιμα σημεία στον οριζόντιο άξονα λαμβάνονται αντικαθιστώντας το TC_i και λαμβάνοντας την παρακάτω σχέση

$$C_i = \left(\frac{(1-b)}{a} \cdot (TC_i) \right)^{\frac{1}{1-b}} \quad i = 1,2,...,N \tag{53}$$

2.13.1.2 Η Διατύπωση του ETL

2.13.1.2.1 Νέες Μεταβλητές

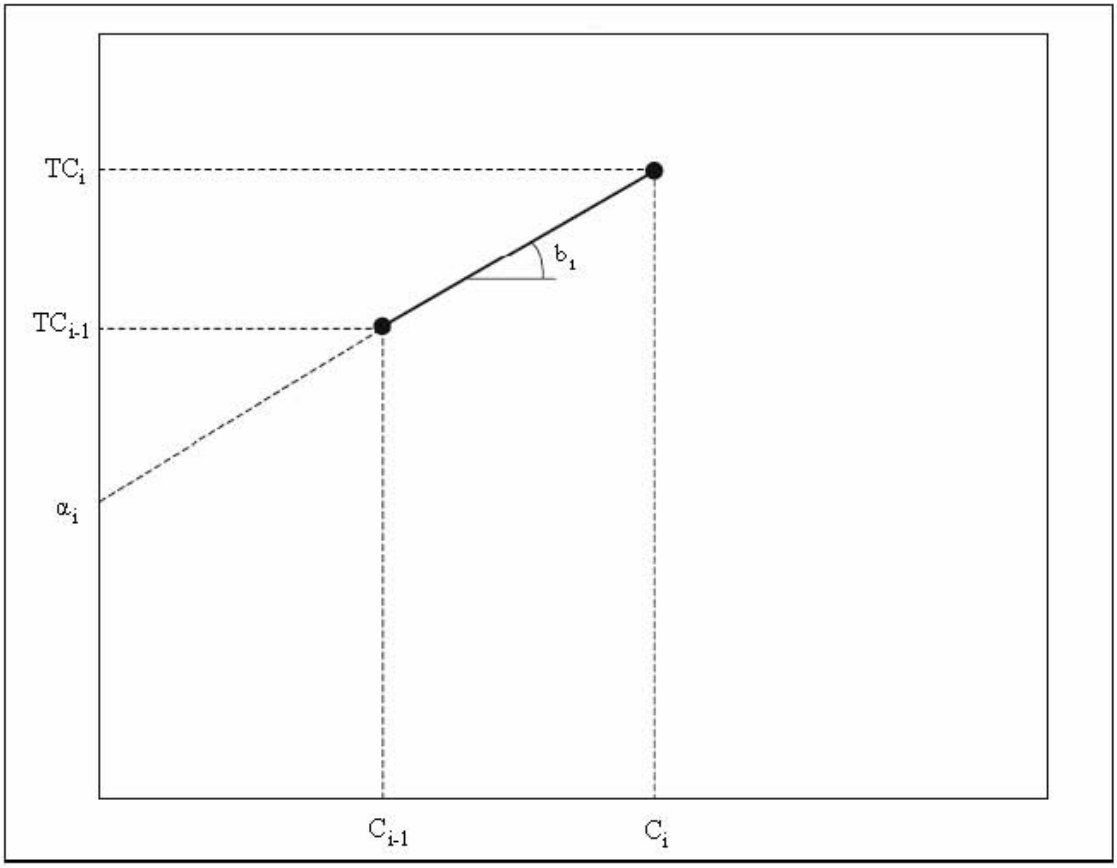
Μόλις επιλεχτούν τα διαστήματα είναι διαθέσιμες τυποποιημένες προσεγγίσεις για να απεικονίσουν μια κοίλη λειτουργία με τη βοήθεια μεταβλητών ακεραίων αριθμών (0–1). Στη συνέχεια, θα περιγραφεί η προσέγγιση η οποία χρησιμοποιείται στο μοντέλο TIMES. Καταρχάς, καθορίζονται N συνεχείς μεταβλητές $x_i, i = 1,2,...,N$. Κάθε x_i απεικονίζει το ποσό των συσωρευτικών επενδύσεων που βρίσκονται στο διάστημα i. Επομένως

$$C = \sum_{i=1}^{N} x_i \tag{54}$$

Στη συνέχεια, γίνεται ο καθορισμός N ακεραίων (0–1) μεταβλητών z_i που χρησιμεύουν ως δείκτες εάν η τιμή του C βρίσκεται ή όχι στο διάστημα i. Μπορεί τώρα η έκφραση για το TC να γραφτεί ως εξής

$$TC = \sum_{i=1}^{N} a_i \cdot z_i + b_i \cdot x_i \tag{55}$$

όπου b_i είναι η κλίση του τμήματος i της γραμμής και a_i είναι το σημείο τομής του τμήματος με τον κάθετο άξονα όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9. Το *i* τμήμα της βαθμωτής προσέγγισης.

Οι ακριβείς εκφράσεις για το a_i και το b_i είναι

$$b_i = \frac{TC_i - TC_{i-1}}{C_i - C_{i-1}} \quad i = 1,2,...,N \tag{56}$$

$$a_i = TC_{i-1} - b_i \cdot C_{i-1} \quad i = 1,2,...,N \tag{57}$$

2.13.1.2.2 Νέοι Περιορισμοί

Για να ισχύει η (55) πρέπει να διασφαλιστεί ότι ακριβώς ένα z_i είναι ίσο με τη μονάδα και τα υπόλοιπα ίσα με 0. Αυτό μπορεί να γίνει υπενθυμίζοντας ότι οι μεταβλητές z_i είναι (0-1) από την

$$\sum_{i=1}^{N} z_i = 1 \tag{58}$$

Πρέπει επίσης να είναι σίγουρο ότι κάθε x_i βρίσκεται μέσα στο i διάστημα όταν το z_i είναι ίσο με μονάδα ή ίσο με 0. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω του περιορισμού

$$C_{i-1} \cdot z_i \le x_i \le C_i \cdot z_i \tag{59}$$

2.13.1.2.3 Όροι Αντικειμενικής Συνάρτησης

Επαναπροσδιορίζοντας το δείκτη περιόδου, είναι εμφανές ότι ο όρος της αντικειμενικής συνάρτησης στην περίοδο t για μια τεχνολογία εκμάθησης είναι ίσος με $TC_t - TC_{t-1}$, ο οποίος πρέπει να προεξοφληθεί όπως όλες οι άλλες δαπάνες επένδυσης.

2.13.1.2.4 Επιπρόσθετοι (Προαιρετικοί) Περιορισμοί

Η επίλυση του προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού ακεραίων αριθμών μπορεί να διευκολυνθεί εάν ο χώρος των εφικτών λύσεων ακέραιων μεταβλητών περιοριστεί. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω των πρόσθετων περιορισμών, οι οποίοι δεν απαιτούνται αυστηρά αλλά μπορούν να προσφέρουν διευκόλυνση στη λύση. Όπως είναι εμφανές έως τώρα, η εμπειρία δηλαδή η συσωρευτική επένδυση αυξάνεται πάντα καθώς ο χρόνος προχωρά. Επομένως, εάν η συσωρευτική επένδυση στην περίοδο t βρεθεί στο τμήμα i, είναι σίγουρο ότι δεν θα βρεθεί στα τμήματα $i-1$, $i-2,\ldots,1$ τη χρονική περίοδο $t+1$. Αυτό οδηγεί σε δύο νέους περιορισμούς (που επαναπροσδιορίζουν το δείκτη περιόδου t για τις μεταβλητές z_i

$$\sum_{j=1}^{i} z_{j,t} \ge \sum_{j=1}^{i} z_{j,t+1} \quad i = 1,2,\ldots,N-1, \quad t = 1,2,\ldots,T-1 \tag{60}$$

$$\sum_{j=1}^{N} z_{j,t} \le \sum_{j=1}^{N} z_{j,t+1} \tag{61}$$

Συνοψίζοντας την ανωτέρω διατύπωση, γίνεται αντιληπτό ότι κάθε τεχνολογία εκμάθησης απαιτεί την εισαγωγή $N \times T$ ακέραιων μεταβλητών (0–1).

2.13.2 Συγκεντρωμένη Εκμάθηση

Είναι επίσης διαθέσιμη στο μοντέλο TIMES μια ενδιαφέρουσα παραλλαγή του ETL, δηλαδή η περίπτωση όπου διάφορες τεχνολογίες χρησιμοποιούν την ίδια βασική τεχνολογία (key technology) ή το ίδιο συστατικό βασικής τεχνολογίας, που υπάγεται στην εκμάθηση. Το φαινόμενο της συγκεντρωμένης εκμάθησης (clustered learning) διαμορφώνεται στο μοντέλο TIMES μέσω της ακόλουθης τροποποίησης της διατύπωσης του προηγούμενου τμήματος.

Ας γίνει η θεώρηση ότι το k είναι η βασική τεχνολογία και $l = 1,2,...,L$ είναι το σύνολο συγκεντρωμένων τεχνολογιών που συνδέονται με το k. Η προσέγγιση αποτελείται από τρία βήματα:

1. Υποδείξτε με k την τεχνολογία εκμάθησης και γράψτε για αυτήν τη διατύπωση του προηγούμενου τμήματος.
2. Αφαιρέστε από κάθε $INVCOST_t$ το αρχικό κόστος επένδυσης της τεχνολογίας k (με αυτόν τον τρόπο αποφεύγεται ο διπλός υπολογισμός του κόστους επένδυσης του k).
3. Προσθέστε τον περιορισμό στο μοντέλο για κάθε περίοδο. Αυτό εξασφαλίζει ότι η εκμάθηση στο k μεταδίδεται σε όλα τα μέλη της συστάδας (cluster) της

$$VAR_INV_k - \sum_{l=1}^{L} VAR_INV_l = 0 \qquad (62)$$

2.13.3 Εκμάθηση σε ένα Πολυπεριφερειακό Μοντέλο TIMES

Η τεχνολογική εκμάθηση μπορεί να αποκτηθεί μέσω της παγκόσμιας ή τοπικής εμπειρίας, ανάλογα με την εξεταζόμενη τεχνολογία. Υπάρχουν παραδείγματα τεχνικών που αναπτύχθηκαν και τελειοποιήθηκαν σε ορισμένες περιοχές του κόσμου, αλλά τείνουν να παραμείνουν περιφερειακές αφού δε διαδόθηκαν συνολικά. Άλλες τεχνολογίες είναι παγκόσμιες υπό την έννοια ότι η ίδια τεχνολογία διατίθεται εμπορικά παντού. Στην τελευταία περίπτωση, η παγκόσμια εμπειρία ωφελεί τους χρήστες που χρησιμοποιούν αυτή την τεχνολογία παγκοσμίως.

Η πρώτη και προφανής επίπτωση αυτών των παρατηρήσεων είναι ότι πρέπει να χρησιμοποιηθεί το κατάλληλο μοντέλο περιοχής για να μελετηθεί κάθε τύπος

εκμάθησης τεχνολογίας. Η διατύπωση που περιγράφεται στα προηγούμενα τμήματα είναι επαρκής σε δύο περιπτώσεις

1. εκμάθηση σε ένα μοντέλο μιας περιοχής και
2. την περιφερειακή εκμάθηση σε ένα μοντέλο πολλών περιφερειών.

Δεν ισχύει άμεσα για την παγκόσμια εκμάθηση σε ένα μοντέλο πολλών περιφερειών όπου η συσωρευτική μεταβλητή επένδυσης πρέπει να αντιπροσωπεύσει το σύνολο όλων των συσωρευτικών επενδύσεων σε όλες τις περιοχές από κοινού. Περιγράφουμε τώρα μια προσέγγιση σχετικά με την παγκόσμια εκμάθηση που μπορεί να εφαρμοστεί στο μοντέλο TIMES, χρησιμοποιώντας μόνο τις τυποποιημένες οντότητες του μοντέλου TIMES.

Το πρώτο βήμα στην πολυπεριφερειακή μοντελοποίηση ETL (MRETL) είναι η δημιουργία μιας πρόσθετης περιοχής, της περιοχής 0, η οποία θα διαδραματίσει το ρόλο της περιοχής κατασκευής (Manufacturing Region). Το RES αυτής της περιοχής αποτελείται μόνο από το σύνολο (παγκόσμιων) τεχνολογιών εκμάθησης (Learning Technologies ή LT). Ο κάθε LT έχει τις ακόλουθες προδιαγραφές

- Ο LT δεν έχει καμία εισαγωγή προϊόντων,
- Ο LT έχει μόνο μια έξοδο, ένα νέο προϊόν παραγωγής c που είναι η λειτουργία της μάθησης. Αυτή η παραγωγή είναι ακριβώς ίση με το επίπεδο επένδυσης στο LT σε κάθε περίοδο.
- Τα προϊόν c μπορεί να εξαχθεί σε όλες τις υπόλοιπες περιοχές.

Τελικά, σε κάθε πραγματική περιοχή, το LT απεικονίζει όλες τις ιδιότητές του εκτός από το κόστος επένδυσης $NCAP_COST$. Επιπλέον, η κατασκευή μιας μονάδας LT απαιτεί μια εισαγωγή μιας μονάδας προϊόντος c. Αυτό εξασφαλίζει ότι το ποσό όλων των επενδύσεων στο LT στις πραγματικές περιοχές είναι ακριβώς ίσο με την επένδυση στο LT στην περιοχή 0, όπως επιδιώκεται άλλωστε [39], [40].

2.14 Επισκόπηση Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 2ο παρουσιάστηκε το ενεργειακό μοντέλο TIMES. Το μοντέλο TIMES χρησιμοποιείται για να μοντελοποιήσει το Σκανδιναβικό ενεργειακό μοντέλο. Στο πακέτο προγραμμάτων (ή μοντέλο) που αναπτύχθηκε, το μοντέλο TIMES χρησιμοποιήθηκε ως αρχική υπομονάδα η οποία ως έξοδο έδωσε στοιχεία σχετικά με

το ενεργειακό σύστημα και αυτή η έξοδος χρησιμοποιήθηκε για να γίνει η εύρωστη λήψη απόφασης.

Η τεχνική που χρησιμοποιείται για την εύρωστη λήψη απόφασης παρουσιάζεται αναλυτικά στο Κεφάλαιο 3ο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΗΣ ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΗΣ ΕΥΡΩΣΤΗΣ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Η εξασφάλιση ικανοποιητικών, υψηλής ποιότητας παροχών ενέργειας κατά τη διάρκεια των επομένων δεκαετιών είναι μια μεγάλη πρόκληση για τους διαχειριστές των ενεργειακών πόρων. Οι ανάγκες σε ενέργεια θα αυξηθούν ενώ η αλλαγή κλίματος, η ολοένα και μεγαλύτερη έλλειψη πόρων στο μέλλον, η ρύπανση, φαινόμενο του θερμοκηπίου, οι γερασμένες ενεργειακές υποδομές και οι μεταβαλλόμενες ενεργειακές προτεραιότητες δημιουργούν ανοιχτά ζητήματα όσον αφορά την αξιοπιστία της προσφοράς. Η επιλογή μιας κατάλληλης πολιτικής που χρησιμοποιεί τις τυποποιημένες μεθόδους είναι εξαιρετικά δύσκολη δεδομένου ότι το πεδίο και το μέγεθος αυτών των επιδράσεων είναι ιδιαίτερα αβέβαιο και τα συμβαλλόμενα μέρη έχουν διαφορετικές απόψεις και συμφέροντα όσον αφορά τις πιθανές εκβάσεις.

Οι νέες αναλυτικές μέθοδοι βασισμένες στην ποσοτική ανάλυση σεναρίων (quantitative scenario analysis) υπόσχονται να βελτιώσουν την υποστήριξη της απόφασης (decision support) στους αρμόδιους για το μακροπρόθεσμο σχεδιασμό των ενεργειακών πόρων και των υποδομών. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να εξετάσουν και να ταξινομήσουν την ουσιαστική αβεβαιότητα για το μέλλον (substantial uncertainty about the future) αλλά και να βοηθήσουν να προσδιοριστούν οι διοικητικές

στρατηγικές που κατά κάποιο τρόπο εξισορροπούν τους στόχους των πολυάριθμων εμπλεκομένων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο αναλύσεις για να καταδειχθεί η χρησιμότητα τέτοιων μεθόδων για το μακροπρόθεσμο προγραμματισμό των ενεργειακών πόρων.

Σε αυτό το Κεφάλαιο θεωρείται δεδομένη η ανάπτυξη και η χρήση ενός μοντέλου παραγωγής ποσοτικών ενεργειακών σεναρίων (βλέπε προηγούμενο Κεφάλαιο 2ο όπου γίνεται η ανάλυση του μοντέλου TIMES) ενώ στη συνέχεια οι έξοδοι αυτού του μοντέλου ενσωματώνονται στη νέα αναλυτική μέθοδο για τη λήψη αποφάσεων υπό έντονη αβεβαιότητα (βλέπε προηγούμενο Κεφάλαιο 1ο όπου γίνεται η ανάλυση των μοντέλων χάσματος πληροφορίας), η οποία θα αποκαλείται εφεξής Μέθοδος Εύρωστης Λήψης Απόφασης (Robust Decision Making ή RDM).

3.2 Τυποποιημένη Θεωρία Απόφασης και Περιορισμοί της για Μακροπρόθεσμο Προγραμματισμό Ενεργειακών Πόρων

Οι αναλυτές δημόσιας πολιτικής και οι αρμόδιοι για το σχεδιασμό και τη διαχείριση των ενεργειακών πόρων χρησιμοποιούν τακτικά την ποσοτική ανάλυση (quantitative analysis) για να βοηθηθούν στη λήψη των αποφάσεών τους. Οι διαχειριστές των ενεργειακών πόρων, παραδείγματος χάριν, χρησιμοποιούν την ανάλυση αποφάσεων για να αξιολογήσουν τη βελτίωση της αξιοπιστίας της παροχής ενέργειας (energy supply reliability improvements) ή τα αποτελέσματα ενός νέου προγράμματος συντήρησης (conservation program). Οι περισσότερες αποφάσεις οποιασδήποτε συνέπειας, συμπεριλαμβανομένων των παραπάνω, περιέχουν πτυχές αβεβαιότητας. Μπορεί να υπάρξει αβεβαιότητα για το βαθμό της επιπρόσθετης αξιοπιστίας στην παροχή ενέργειας που απαιτείται ή για το βαθμό βελτίωσης της αξιοπιστίας που μπορεί να παράγει ένας συγκεκριμένος σχεδιασμός προγράμματος.

Οι μέθοδοι ανάλυσης αποφάσεων που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα στην ανάλυση πολιτικών (policy analysis) και τη διαχείριση ενεργειακών πόρων είναι βασισμένες στην Μπεϋζιανή θεωρία απόφασης. Οι Von Neumann και Morgenstern [41] συνέταξαν τη βασική θεωρία αναμενόμενης χρησιμότητας (expected utility theory) για τη λήψη απόφασης όταν οι εκβάσεις είναι αβέβαιες αλλά καλά χαρακτηρισμένες από μια αντικειμενική κατανομή πιθανότητας (objective probability

distribution) η οποία ορίζει σε κάθε πιθανή τιμή έκβασης μια πιθανότητα εμφάνισης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η καλύτερη επιλογή είναι αυτή που οδηγεί στην ευνοϊκότερη πιθανοτικά έκβαση (most favorable probability-weighted outcome) ή αναμενόμενη χρησιμότητα (expected utility). Ο Savage [42] επέκτεινε αυτήν την θεωρία για να εξετάσει τη λήψη απόφασης υπό υποκειμενική αβεβαιότητα όταν δηλαδή οι αξιολογήσεις της πιθανότητας δεν προέρχονται απλώς από εμπειρικές εκτιμήσεις και μπορούν έτσι να ποικίλουν από άτομο σε άτομο και από χρονική στιγμή σε χρονική στιγμή. Ο Savage έδειξε ότι εάν υπάρχει ένας υπεύθυνος απόφασης (decision maker) του οποίου η συμπεριφορά ακολουθεί ένα σύνολο λογικών αξιωμάτων, τα αποκαλούμενα και αξιώματα Savage (the Savage Axioms), οι υποκειμενικοί του χαρακτηρισμοί για την αβεβαιότητα μπορούν να αποτελέσουν τη βάση για μια λογική επιλογή. Αυτή η θεωρία της υποκειμενικής αναμενόμενης χρησιμότητας (Subjective Expected Utility) έχει γίνει από τότε η de facto κανονιστική μέθοδος (normative method) για τις αποφάσεις υπό αβεβαιότητα.

Σε αυτήν την παράγραφο θα παρουσιαστεί μια τυποποιημένη θεωρία λήψης αποφάσεων και θα περιγραφεί η εφαρμογή της σε προβλήματα αποφάσεων υπό ιδανικές συνθήκες. Έπειτα, περιγράφονται οι τέσσερις κύριοι όροι που πρέπει να ισχύουν έτσι ώστε η τυποποιημένη θεωρία απόφασης να παρέχει σαφείς οδηγίες πέρα από την επιλογή των πολιτικών.

3.2.1 Επισκόπηση της Τυποποιημένης Θεωρίας Απόφασης

Υπάρχουν πέντε κύρια στοιχεία σε ένα τυποποιημένο πρόβλημα απόφασης:

1. οι υπό εξέταση ενέργειες,
2. η κατάσταση του κόσμου στον οποίο οι ενέργειες λαμβάνουν χώρα,
3. η πιθανότητα εμφάνισης κάθε κατάστασης,
4. οι εκβάσεις των ενεργειών για κάθε πιθανή κατάσταση και
5. η επιθυμία του υπεύθυνου για τη λήψη της απόφασης ανεξάρτητα από την έκβαση.

Στην παγκόσμια βιβλιογραφία, διαφορετική ορολογία χρησιμοποιείται στη παγκόσμια βιβλιογραφία όσον αφορά τη θεωρία λήψης αποφάσεων και την πολιτική λήψης αποφάσεων. Εδώ σκοπός είναι η δημιουργία μιας νοηματικής γέφυρας μεταξύ

της τυποποιημένης θεωρητικής λήψης απόφασης βασισμένης στην οικονομική επεξεργασία (standard economic-based treatment of theoretical decision making) και την πολιτικοκεντρική επεξεργασία λήψης της απόφασης υπό αβεβαιότητα (policy-centric treatments of decision making under uncertainty).

Οι ενέργειες (actions) καλούνται συχνά πολιτικές (policies) όταν περιλαμβάνουν ιδρύματα ή οργανισμούς οι οποίοι είναι επιφορτισμένοι να λάβουν αποφάσεις εξ ονόματος του κοινού ή άλλων συμμετεχόντων. Οι πολιτικές υπό εξέταση μπορούν να είναι είτε διακριτές, όπως για παράδειγμα η υλοποίηση του προγράμματος Α, Β ή Γ, είτε να αποτελούνται από πολλές μεμονωμένες δράσεις που αποκαλούνται και πολιτικοί μοχλοί (policy levers), οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικό βαθμό σε διαφορετικές θέσεις και χρόνους, χρησιμοποιώντας διαφορετικές μεθόδους. Ας θεωρηθεί ότι L αντιπροσωπεύει ένα σύνολο εναλλακτικών πολιτικών. Στη συνέχεια θεωρείται μια από τις εναλλακτικές πολιτικές l_y που ανήκει στο σύνολο από το οποίο καλείται ο υπεύθυνος απόφασης να επιλέξει. Κάθε πολιτική στρατηγική, l_Y, είναι ένα διάνυσμα τιμών που αντιστοιχεί σε S μεμονωμένους πολιτικούς μοχλούς l_{yi}

$$l_{yi} = \left(l_{y1},...,l_{yi},...,l_{yS}\right) \in L \quad (1)$$

Οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων ενδιαφέρονται για τις πιθανές εκβάσεις των υπό εξέταση ενεργειών ή των υπό εξέταση πολιτικών. Οι πολιτικές εκβάσεις αξιολογούνται συχνά από κριτήρια ή δείκτες όπως είναι για παράδειγμα το κόστος και η ποσότητα ενός πόρου. Στη συνέχεια, ας γίνει η θεώρηση ότι με M αναπαρίσταται το σύνολο των μεμονωμένων εκβάσεων, όπου οι μεμονωμένες εκβάσεις m_k (T μεμονωμένων δεικτών)

$$m = \left(m_1,...,m_k,...,m_T\right) \in M \quad (2)$$

Μια συνάρτηση έκβασης R χαρτογραφεί και συνδέει τις πολιτικές στρατηγικές, l, με τις εκβάσεις m, δηλαδή:

$$R : L \to M \quad and \quad (3)$$

$$R(l) = m \quad (4)$$

Αυτές οι σχέσεις μπορούν να είναι ποιοτικές ή μπορούν να ποσοτικοποιηθούν σε ένα αναλυτικό μοντέλο ή σε ένα πρόγραμμα υπολογιστή. Για τη συνέχεια, μια κατάσταση (state) περιλαμβάνει όλα τα σχετικά χαρακτηριστικά του κόσμου αρχίζοντας από την

επιλογή και έναρξη εφαρμογής της πολιτικής μέχρι την αξιολόγηση της σε κάποιο σημείο στο μέλλον.

Οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων, που επιλέγουν μεταξύ των πολιτικών, θα προτιμήσουν την απόφαση εκείνη που οδηγεί στην καλύτερη έκβαση. Μια συνάρτηση η οποία μεταφράζει τις συγκεκριμένες εκβάσεις σε ένα τακτικό μέτρο προτίμησης (ordinal measure of preference) καλείται συνάρτησης χρησιμότητας (utility function) και μπορεί να παρέχει έναν σαφή τρόπο στην ταξινόμηση των εκβάσεων και των πολιτικών. Όταν η έκβαση κάθε πολιτικής είναι γνωστή (ή είναι σίγουρη), η βέλτιστη στρατηγική l^* είναι απλά αυτή που μεγιστοποιεί τη χρησιμότητα του υπεύθυνου απόφασης $v[R(l)]$. Το l^* είναι εκείνο που ικανοποιεί την παρακάτω σχέση

$$v[R(l^*)] \geq v[R(l\ )]\ \ \forall l \in L \tag{5}$$

Εάν υπάρχουν πολλοί δείκτες που περιλαμβάνουν το m, τότε η συνάρτηση χρησιμότητας απεικονίζει τόσο τις προτιμήσεις σχετικά με το μέτρο των δεικτών μεμονωμένα όσο και τις προτιμήσεις των συνδυασμών των τιμών των δεικτών.

Εάν η κατάσταση στην οποία η πολιτική λαμβάνεται είναι αβέβαιη, τότε οι εκβάσεις που συνδέονται με κάθε πολιτική είναι επίσης αβέβαιες. Η αβεβαιότητα για μια κατάσταση εμφανίζεται όταν η ελλοχεύουσα δομή του συστήματος (underlying structure of the system) ή οι παράγοντες εκτός του ελέγχου του υπεύθυνου απόφασης (factors out of the control of the decision maker) είναι αβέβαιες, πιθανολογικές ή ανεπαρκώς κατανοητές. Ας θεωρηθεί ότι X είναι το σύνολο όλων των πιθανών καταστάσεων, όταν το x_z λαμβάνει δείκτη z με εύρος τιμών από 1 έως Z. Κάθε κατάσταση x_z είναι ένα διάνυσμα των τιμών που αντιστοιχούν σε U μεμονωμένους εξωγενείς παράγοντες x_{zj}, δηλαδή:

$$x_z = (x_{z1},...,x_{zj},...,x_{zU}) \in X \tag{6}$$

Οι εξωγενείς παράγοντες μπορούν να περιγράψουν τόσο παραμετρικές αβεβαιότητες, όπως είναι ο ρυθμός αύξησης του πληθυσμού, όσο και δομικές αβεβαιότητες, όπως είναι μια διαδικασία επιλογής μεταξύ δύο ανταγωνιστικών μοντέλων για την περιγραφή μιας διαδικασίας για την οποία υπάρχουν λιγοστές λεπτομέρειες.

Μια συνάρτηση πιθανότητας $\pi(x_z)$ απεικονίζει την πιθανότητα εμφάνισης κάθε κατάστασης x_z. Εάν οι πιθανότητες για κάθε κατάσταση είναι γνωστές, τότε μπορεί η αβεβαιότητα να καθοριστεί αντικειμενικά. Για την περίπτωση όπου όλοι οι

σχετικοί εξωγενείς παράγοντες είναι ανεξάρτητοι, η κοινή πιθανότητα οποιασδήποτε κατάστασης x_z είναι το γινόμενο των μεμονομένων (οριακών) πιθανοτήτων για κάθε εξωγενή παράγοντα $\pi(x_{zj})$, καθορίζοντας μια ξεχωριστή κατάσταση $\pi(x_z)=\prod_{j=1}^{U}\pi_{zj}(x_{zj})$. Κατά τον ίδιο τρόπο με την περίπτωση βεβαιότητας, μια συνάρτηση έκβασης R, χαρτογραφεί και συσχετίζει πολιτικές στρατηγικές l και καταστάσεις x με εκβάσεις m όπως περιγράφεται από την παρακάτω σχέση

$$R: L\times X \to M \quad \text{και} \tag{7}$$

$$R(l,x)=m \tag{8}$$

Κάθε στρατηγική l καθορίζει στη συνέχεια μια κατανομή εκβάσεων $\mu_l(m)$. Εάν οι προτιμήσεις σε σχέση με την κατανομή των εκβάσεων ικανοποιούν τα αξιώματα von Neumann-Morgenstern τότε υπάρχει στοιχειώδης συνάρτηση χρησιμότητας $v(m)$ τέτοια έτσι ώστε οι προτιμήσεις να απεικονίζονται από μια αναμενόμενη χρησιμότητα (Expected Utility)

$$EU(l)=\sum_m v(m)\cdot\mu_l(m) \tag{9}$$

$$\mu_l=\sum_{x\to R(l,x)=m}\pi(x) \tag{10}$$

Ο κανόνας απόφασης είναι επομένως να επιλεχτεί το l^* που μεγιστοποιεί την $EU(l)$ ή να επιλεγεί το l^* που ικανοποιεί τη σχέση

$$EU(l)=\sum_m v(m)\cdot\mu_{l^*}(m)\geq\sum_m v(m)\cdot\mu_l(m)\ \ \forall l \tag{11}$$

Οι αντικειμενικές αξιολογήσεις της πιθανότητας καθορίζονται μέσω του πειραματισμού ή της θεωρίας και καλούνται πιθανότητες συχνότητας (frequency probabilities). Ένα ειδικός στις πιθανότητες συχνότητας (frequentist) θα υποστήριζε ότι οι αξιολογήσεις της πιθανότητας πρέπει να καθορίζονται μόνο μέσω τέτοιων μεθόδων. Για πολλούς αβέβαιους παράγοντες (και για τα προβλήματα απόφασης που επηρεάζονται από αυτούς), εντούτοις, δεν υπάρχει κανένας εφικτός τρόπος να γίνουν όλες οι αξιολογήσεις της πιθανότητας εμπειρικά. Χωρίς εναλλακτικές μεθόδους για τις υποκειμενικές πιθανότητες, η θεωρία απόφασης θα είχε μικρή πρακτική χρησιμότητα στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων. Οι υποστηρικτές της θεωρίας του Bayes βεβαιώνουν ότι είναι δεκτό να τεθούν οι προσωπικές πεποιθήσεις κάποιου ως πιθανότητες στην περίπτωση που μελετάται η δημιουργία ενός

εμπειρικού υπολογισμού πιθανότητας. Δεδομένου ότι διατίθενται οι πληροφορίες για την αληθινή πιθανότητα, το θεώρημα του Bayes παρέχει μια μέθοδο για υποκειμενικές αξιολογήσεις της πιθανότητας.

Η υποκειμενική αναμενόμενη θεωρία χρησιμότητας, που αναπτύσσεται από τον Savage, επιτρέπει στους αναλυτές να χρησιμοποιήσουν τις υποκειμενικές αξιολογήσεις της πιθανότητας για να προσδιορίσουν τις βέλτιστες πολιτικές. Ο Savage καθορίζει ως πράξεις (acts) ως εκείνες τις ενέργειες μεταξύ των οποίων ο υπεύθυνος απόφασης καλείται να επιλέξει. Η συνέπεια κάθε πράξης εξαρτάται από ποια κατάσταση εμφανίζεται. Η πιθανότητα εμφάνισης μιας κατάστασης είναι μόνο υποκειμενικά γνωστή. Κάθε πράξη μπορεί έπειτα να περιγραφεί από ένα διάνυσμα που αποτελείται από ζευγάρια των συνεπειών και καταστάσεων ή των γεγονότων. Η λήψη της προτίμησης ενός υπεύθυνου απόφασης όσον αφορά τα ζευγάρια των πράξεων μπορεί να ορίσει την υποκειμενική συνάρτηση χρησιμότητάς του. Εάν ορισμένα αξιώματα (τα αξιώματα του Savage) για τις προτιμήσεις του υπεύθυνου απόφασης ισχύουν, τότε η θεωρία SEU προτείνει ότι η βέλτιστη πολιτική επιλογή είναι αυτή που οδηγεί στη μέγιστη σταθμισμένη πιθανότητα χρησιμότητας (probability-weighted utility) ή τη μέγιστη υποκειμενική αναμενόμενη χρησιμότητα (greatest subjective expected utility) [43].

Οι αναλυτές, όταν πρόκειται να ασχοληθούν υποκειμενικά με πιθανότητες αξιολόγησης των φυσικών δυνάμεων που δεν μπορούν να προσομοιωθούν σε ένα εργαστήριο, κοιτούν τα ιστορικά δεδομένα των συστημάτων για τα οποία ενδιαφέρονται. Παραδείγματος χάριν, μια στρατηγική για την εύρεση της πιθανότητας μεγάλων πλημμυρών ή μεγάλων ξηρασιών πρέπει να υπολογίζει την πιθανότητα εμφάνισης τέτοιων γεγονότων από τα ιστορικά δεδομένα. Αυτή η μέθοδος υποθέτει ότι τα στατιστικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα της διαδικασίας είναι σταθερά στο πέρας του χρόνου, ή είναι χρονικά στάσιμα (υπό τη στατιστική έννοια). Αυτή η υπόθεση ισχύει μόνο εάν τα ιστορικά δεδομένα είναι αρκετά για να μπορούν να χαρακτηρίσουν όλη τη σχετική πιθανολογική μεταβλητότητα.

Για την ευκολότερη σύνδεση μεταξύ της τυποποιημένης θεωρίας απόφασης και των μεθόδων βασισμένων σε σενάρια (scenario-based methods) που θα παρουσιαστεί σε επόμενη παράγραφο, παρουσιάζεται το παρακάτω χαρακτηριστικό πλαίσιο απόφασης με μορφή μήτρας για την περίπτωση διακριτών πολιτικών και καταστάσεων (βλέπε Σχήμα 3.1). Οι μεμονωμένες πολιτικές l συντάσσονται με

δείκτη $y=(0,...,Y)$, οι καταστάσεις x συντάσσονται με δείκτη $z=(1,...,Z)$ και οι εκβάσεις m συντάσσονται με y και z. Ο δείκτης $y=0$ αναφέρεται στη μηδενική πολιτική (null policy).

$\rightarrow$ Καταστάσεις	x_1	⋯	x_z	⋯	x_Z
l_0	m_{01}	⋯	m_{0z}	⋯	m_{0Z}
⋮	⋮	⋱	⋮	⋰	⋮
l_y	m_{y1}	⋯	m_{yz}	⋯	m_{yZ}
⋮	⋮	⋰	⋮	⋱	⋮
l_Y	m_{Y1}	⋯	m_{Yz}	⋯	m_{YZ}
$\uparrow$ Πολιτικές					

Σχήμα 3.1. Μήτρα έκβασης για κάθε πολιτική και κατάσταση. Οι γραμμές περιγράφουν την υπό εξέταση πολιτική. Οι στήλες περιγράφουν κάθε πιθανή κατάσταση στην οποία εφαρμόζεται η πολιτική. Τα εσωτερικά στοιχεία αντιστοιχούν στις εκβάσεις για κάθε ζευγάρι πολιτικής και κατάστασης.

Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζεται η αντίστοιχη μήτρα των χρησιμοτήτων για κάθε έκβαση, μαζί με τις πιθανότητες που συνδέονται με κάθε κατάσταση ($2^{η}$ σειρά) και την αναμενόμενη χρησιμότητα κάθε πολιτικής (δεξιά στήλη). Αν υποτεθεί ότι η μήτρα μπορεί πλήρως να πληρωθεί, ο υπεύθυνος της απόφασης θα επιλέξει εκείνο το l που αντιστοιχεί στην υψηλότερη αναμενόμενη χρησιμότητα, $EU(l)$.

→ Καταστάσεις	x_1	⋯	x_z	⋯	x_Z	EU(l) ↓
→ Πιθανότητες	$\pi(x_1)$	⋯	$\pi(x_z)$	⋯	$\pi(x_Z)$	
l_0	$v(m_{01})$	⋯	$v(m_{0z})$	⋯	$v(m_{0Z})$	$\sum_{z=1}^{Z} \pi(x_z)\, v(m_{0z})$
⋮	⋮	⋱	⋮	⋰	⋮	
l_y	$v(m_{y1})$	⋯	$v(m_{yz})$	⋯	$v(m_{yZ})$	$\sum_{z=1}^{Z} \pi(x_z)\, v(m_{yz})$
⋮	⋮	⋰	⋮	⋱	⋮	
l_Y	$v(m_{Y1})$	⋯	$v(m_{Yz})$	⋯	$v(m_{YZ})$	$\sum_{z=1}^{Z} \pi(x_z)\, v(m_{Yz})$
↑ Πολιτικές						

Σχήμα 3.2. Η μήτρα των χρησιμοτήτων που αντιστοιχούν στις εκβάσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1. Η άνω γραμμή καθορίζει κάθε κατάσταση, που καθορίζεται από εξωγενείς παράγοντες (εκείνοι που δεν υπόκεινται στον έλεγχο των φορέων χάραξης πολιτικής). Η δεύτερη σειρά δείχνει την αντικειμενική ή υποκειμενική αξιολόγηση της πιθανότητας κάθε κατάστασης. Η αριστερή στήλη δείχνει την υπό εξέταση πολιτική για κάθε σειρά. Το εσωτερικό της μήτρας απεικονίζει τη χρησιμότητα των εκβάσεων που αντιστοιχούν σε κάθε πολιτική ενεργώντας σε κάθε κατάσταση. Η δεξιά στήλη αντιπροσωπεύει την αναμενόμενη χρησιμότητα για κάθε πολιτική.

Μια συμβατική ανάλυση απόφασης περιλαμβάνει γενικά τα ακόλουθα βήματα. Καταρχάς, παράγεται ένας πεπερασμένος κατάλογος πιθανών πολιτικών υπό εξέταση (list of potential policies under consideration) δηλαδή η αριστερή στήλη στο Σχήμα 3.2. Όπως έχει ήδη περιγραφεί, ένα συνεχές σύνολο πιθανών πολιτικών θα μπορούσε να καθοριστεί από έναν πεπερασμένο αριθμό χαρακτηριστικών που καλούνται πολιτικοί μοχλοί όπως για παράδειγμα ο τύπος ενεργειακής πολιτικής που θα ακολουθηθεί από έναν κατάλογο εναλλακτικών λύσεων και πως η επιλογή αυτού του τύπου καθορίζεται από το επίπεδο συνολικών δαπανών όπως θα δούμε στη συνέχεια. Έπειτα, ένας ή κάποιοι δείκτες αξιολογούν την απόδοση μιας πολιτικής (τέτοιοι δείκτες μπορούν να είναι το κόστος, οι βελτιώσεις αξιοπιστίας ενέργειας ή η περιβαλλοντική επίδραση) που πρόκειται να επιλεγεί (το *ms* στο Σχήμα). Έπειτα αναπτύσσεται ένα πρόγραμμα υπολογιστή για να προβλέψει την απόδοση κάθε

πολιτικής. Οι πιθανοτικές ή αβέβαιες συναρτήσεις χαρακτηρίζονται στατιστικά μέσα στο μοντέλο μέσω της χρήσης των κατανομών πιθανότητας. Το μοντέλο προβλέπει έπειτα τις εκβάσεις για κάθε πολιτική και προσδιορίζει τη βέλτιστη πολιτική για κάθε απόδοση. Εάν υπάρχουν πολλοί δείκτες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, αναπτύσσεται μια πολλαπλών εξόδων συνάρτηση χρησιμότητας (multi-objective utility function). Τέλος, συστήνεται για εφαρμογή η πολιτική με την υψηλότερη αναμενόμενη χρησιμότητα.

3.2.2 Προκλήσεις που Εμφανίζονται κατά την Χρήση της Τυποποιημένης Θεωρίας Απόφασης στα Μακροπρόθεσμα Πολιτικά Προβλήματα

Υπάρχουν τέσσερις βασικές απαιτήσεις στον προσδιορισμό μιας προαιρετικής πολιτικής. Καταρχάς, πρέπει να προσδιοριστεί ένα πλήρες σύνολο πολιτικών ή πολιτικών μοχλών που χρησιμοποιούνται για να καθοριστεί μια πολιτική (αριστερή στήλη στο Σχήμα 3.2). Δεύτερον, πρέπει να χαρακτηριστεί πλήρως οποιαδήποτε αβεβαιότητα για τους εξωγενείς παράγοντες που καθορίζουν τις καταστάσεις με σκοπό να παραχθούν τόσο οι καταστάσεις όσο και οι πιθανότητες εμφάνισης των καταστάσεων (οι δύο άνω σειρές στο Σχήμα 3.2). Τρίτον, πρέπει να υπάρξει ένα αξιόπιστο μοντέλο για να αξιολογήσει τα αποτελέσματα των πολιτικών σε κάθε κατάσταση. Τέταρτο, μια ενιαία συνάρτηση χρησιμότητας είναι απαραίτητη για να βάλει σε τάξη τις προτιμήσεις έναντι των εκβάσεων. Όταν ένας ή περισσότεροι από αυτούς τους όρους δεν ικανοποιούνται, δεν μπορεί να εφαρμοστεί η τυποποιημένη θεωρία απόφασης χωρίς τη θεώρηση προβληματικών υποθέσεων.

3.2.2.1 Ελλιπής Γνώση των Εφικτών Πολιτικών

Για τα μακροπρόθεσμα προβλήματα πολιτικής που περιλαμβάνουν σύνθετα συστήματα, είναι πιθανό να υπάρξει ένα μεγάλο σύνολο ισοδυνάμων πολιτικών ως προς την εκτίμηση. Οι αναλυτές μπορούν μόνο να γνωρίζουν ένα υποσύνολο των εφικτών πολιτικών στην αρχή της ανάλυσης. Αυτό μπορεί να συμβαίνει για τους εξής λόγους

1. Το πρόβλημα και οι πολιτικές που πρέπει να ακολουθηθούν παρουσιάζουν διάρκεια πολλών χρονικών περιόδων κάτι το οποίο οδηγεί σε ένα εκτεταμένο σύνολο πιθανών πολιτικών.
2. Μπορούν να υπάρξουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι με τους οποίους οι πολιτικές θα μπορούσαν να επηρεάσουν το πρόβλημα.
3. Οι αναλυτές έχουν άγνοια για τις σημαντικές συναρτήσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ίδια η ανάλυση απόφασης μπορεί να αποδειχθεί πληροφοριακή για την ανάπτυξη ανώτερων πολιτικών.

Οι σχεδιαστές πολιτικής μπορούν πολλές φορές να αγνοήσουν μερικές πιθανές πολιτικές. Όταν υπάρχουν πολλές πολιτικές επιλογές, η συμβατική στρατηγική προβλέπει την εκτίμηση μερικών από αυτές κάτι το οποίο μπορεί να προκαλέσει την παράβλεψη μερικών πολιτικών που ευνοούνται από μερικούς από τους ενδιαφερομένους. Αυτό μπορεί να διαβρώσει τη νομιμότητα της διαδικασίας λήψης απόφασης.

3.2.2.2 Κακώς Χαρακτηρισμένη Αβεβαιότητα

Η τυποποιημένη θεωρία απόφασης απαιτεί οι αβεβαιότητες για τις καταστάσεις στις οποίες ενεργούν οι πολιτικές ή τα αποτελέσματα των πολιτικών υπό εξέταση να χαρακτηρίζονται από αντικειμενικές ή υποκειμενικές συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας. Ο προσδιορισμός ενός ενιαίου χαρακτηρισμού της αβεβαιότητας μπορεί να είναι προβληματικός σε πολλές περιστάσεις. Εάν η αβεβαιότητα είναι πολύ έντονη, ένας υπεύθυνος απόφασης ή οι αναλυτές μπορούν να έχουν μικρή εμπιστοσύνη στον υποκειμενικό χαρακτηρισμό της αβεβαιότητας. Εάν ο χαρακτηρισμός είναι κατά ένα μεγάλο μέρος αυθαίρετος (παραδείγματος χάριν, λόγω της άγνοιας για τις συναρτήσεις), ο αναλυτής ή ο υπεύθυνος απόφασης μπορεί να τείνει να απορρίψει τα συμπεράσματα από μια τέτοια ποσοτική ανάλυση απόφασης. Επιπλέον, τέτοιοι κακώς αιτιολογημένοι χαρακτηρισμοί σύρουν συχνά την κριτική των συμμετόχων. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα της μείωση της εγκυρότητας των μελετών.

Εναλλακτικά, εάν μια απόφαση λαμβάνεται από μια ομάδα υπεύθυνων για την περίπτωση λήψης αποφάσεων με διαφορετικές υποκειμενικές απόψεις περί της

αβεβαιότητας μεταξύ των υπευθύνων δεν θα υπάρξει κατανομή σύμφωνη με τις πεποιθήσεις κάθε ιθύνοντος. Σε αυτές τις περιπτώσεις, οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων πρέπει να στηριχθούν σε κάποιο είδος συνδυασμένης μέσης αξιολόγησης της πιθανότητας για να χαρακτηρίσουν την αβεβαιότητα. Η μέθοδος Delphi (Delphi method), που αναπτύχθηκε από τη RAND τη δεκαετία του '50, είναι ένας τρόπος να αποσπαστεί ένας χαρακτηρισμός ομάδας για την αβεβαιότητα (group characterization of uncertainty) [44], [45].

Η συζήτηση για το πως μπορεί να εξεταστεί αυτή η αβεβαιότητα στην ανάλυση απόφασης απασχολεί από καιρό την επιστημονική κοινότητα. Η Μπεϋζιανή θεωρία πιθανότητας (που αναπτύχθηκε στα μέσα του 20^{ου} αιώνα) μεταχειρίζεται αυτήν την αβεβαιότητα με τον ίδιο τρόπο όπως και την υποκειμενική αβεβαιότητα. Ο Ellsberg, εντούτοις, παρατήρησε ότι οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων μπορούν να διακρίνουν μεταξύ της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζεται ως γνωστή (known) ή καλώς χαρακτηριζόμενη (well characterized) και αυτής που μόνο αόριστα γίνεται κατανοητή [46]. Το διάσημο πείραμα του Ellsberg (πείραμα σφαίρας και δοχείου) κατέδειξε ότι πολλοί άνθρωποι, όταν βρίσκονται αντιμέτωποι με αβέβαια τυχερά παιχνίδια και καλούνται να προτιμήσουν μεταξύ κακώς χαρακτηρισμένων και διφορούμενων, θα προτιμήσουν αυτά τα οποία είναι λιγότερο διφορούμενα. Αυτή η συμπεριφορά έρχεται σε αντίθεση με τα αξιώματα Savage και ουσιαστικά προτείνει ότι στην πράξη οι άνθρωποι μπορούν να διακρίνουν μεταξύ της καλώς και κακώς χαρακτηρισμένης αβεβαιότητας. Ο Smithson υποστηρίζει ότι ο τύπος της κακώς χαρακτηρισμένης αβεβαιότητας προέρχεται από την άγνοια εκ μέρους των αναλυτών και είναι έτσι ευδιάκριτος από την αβεβαιότητα που είναι ελέγξιμη μέσω του πειραματισμού [47]. Στη βιβλιογραφία, η κακώς χαρακτηρισμένη αβεβαιότητα καλείται ασάφεια (ambiguity ή vagueness) [43] ή απλά ανακρίβεια (simply imprecision) [48].

Ένα απλό παράδειγμα μπορεί να βοηθήσει στο να επεξηγηθούν οι διαφορές μεταξύ της κακώς χαρακτηρισμένης αβεβαιότητας (ή της ασάφειας) και της συμβατικότερης αβεβαιότητας (καλώς χαρακτηρισμένη αβεβαιότητα). Όπως παρουσιάζεται και παρακάτω, αυτές οι διαφορές έχουν μεγάλες επιπτώσεις στην ανάλυση απόφασης. Το παράδειγμα ([49]) ερευνά τις προτιμήσεις όσον αφορά το στοίχημα (wagering preferences) ενός θεατή αντισφαίρισης για τρεις επερχόμενους αγώνες αντισφαίρισης για τους οποίους έχει διαφορετικούς τύπους γνώσης.

Το παιχνίδι Α είναι μεταξύ δύο ανταγωνιστών τους οποίους ο θεατής τους ξέρει πολύ καλά. Με βάση την προϊστορία, θεωρεί ότι η πιθανότητα νίκης είτε του ενός παίκτη είτε του άλλου είναι ίση με 50%. Το παιχνίδι Β είναι μεταξύ δύο άγνωστων ανταγωνιστών. Σε αυτήν την περίπτωση ο θεατής δεν έχει κανέναν λόγο να αναμένει ένα παίκτη να είναι περισσότερο πιθανό να νικήσει από τον άλλο και επιλέγει έτσι με βάση τις πιθανότητες. Αυτή η επιλογή δεν είναι επειδή σκέφτεται ότι και οι δύο έχουν μια ομαλή πιθανότητα στη νίκη, αλλά επειδή έχει μια πιθανότητα 50% να επιλέξει ποιος θα είναι αυτός που τελικά θα κερδίσει. Τέλος, το παιχνίδι Γ είναι μεταξύ δύο άγνωστων ανταγωνιστών αλλά έχει ακούσει ότι το παιχνίδι αυτό θα είναι μια εύκολη νίκη για έναν από τους δυο. Αν και ο θεατής ξέρει ότι κάποιος ευνοείται έντονα, δεν ξέρει παρόλα αυτά ποιος είναι ο παίκτης αυτός, και για αυτό το λόγο και οι δύο παίκτες έχουν ίσες πιθανότητες. Η αβεβαιότητα που αντιμετωπίζει ο θεατής στο τυχερό παιχνίδι Α χαρακτηρίζεται καλά, δεδομένου ότι είναι εμπειρική. Στις προγενέστερες αντιστοιχίες και οι δύο ανταγωνιστές έχουν καταδείξει την ίση δυνατότητά τους, που οδηγεί το θεατή να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι κάθε παίκτης έχει ίση πιθανότητα νίκης. Στο παιχνίδι Β, ο θεατής πρέπει να κάνει μια αξιολόγηση πιθανότητας όντας ανίδεος των αληθινών πιθανοτήτων νίκης των παικτών. Η αβεβαιότητα είναι κακώς χαρακτηρισμένη, δεδομένου ότι η αξιολόγησή της είναι κατά ένα μεγάλο μέρος θεωρητική. Ο θεατής θα άλλαζε πιθανώς επιλογή αν παρέχονταν σε αυτόν πρόσθετες ιδιαίτερες πληροφορίες για τις δυνατότητες των παικτών. Στο παιχνίδι Γ, ο θεατής είναι βέβαιος ότι ο ευνοημένος παίκτης θα κερδίσει, αλλά δεν ξέρει ποιος είναι ο παίκτης που ευνοείται. Αυτό αφήνει το θεατή με μια κακώς χαρακτηρισμένη υποκειμενική αξιολόγηση της πιθανότητας νίκης των παικτών. Για κάθε ένα από τα τρία παιχνίδια, η υποκειμενική πιθανότητα νίκης κάθε παίκτη είναι 50% και βάση της υποκειμενικής αναμενόμενης θεωρίας χρησιμότητας ο θεατής πρέπει να είναι αδιάφορος σε αυτά τα τυχερά παιχνίδια, καθώς όλοι έχουν τις ίδιες πιθανότητες. Οι Gardenfors και Sahalin υποστηρίζουν, εντούτοις, ότι η επιλογή των ανθρώπων σε ποιο από τα τρία παιχνίδια θα στοιχηματίσουν είναι αρκετά διαφορετική [49]. Οι περισσότεροι άνθρωποι, στην πραγματικότητα, είναι προθυμότεροι να στοιχηματίσουν στο παιχνίδι Α σε σχέση με τα άλλα δύο παιχνίδια, δείχνοντας κάποιο τρόπο αποστροφής στη διφορούμενη αβεβαιότητα του παιχνιδιού Β (όπου ο παρατηρητής δεν ξέρει τίποτα για τις "πραγματικές" πιθανότητες νίκης κάθε παίκτη) και του παιχνιδιού Γ (όπου ο παρατηρητής στοιχηματίζει στην ουσία

εάν έκανε σωστή επιλογή του παίκτη και όχι ποιος παίκτης είναι αυτός με τη μεγαλύτερη απόδοση). Αυτή η παρατήρηση υπονοεί ότι οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων όταν πρόκειται να λάβουν απόφαση με παρουσία κακώς χαρακτηρισμένης αβεβαιότητας δεν ακολουθούν τους κανόνες της μεγιστοποίησης χρησιμότητας που αποτελούν τη βάση της τυποποιημένης θεωρίας απόφασης.

Το παραπάνω παράδειγμα αντισφαίρισης μπορεί περαιτέρω να διερευνήσει πως η κακώς χαρακτηρισμένη αβεβαιότητα μπορεί να έχει επιπτώσεις στη λήψη απόφασης ομάδας. Για αυτό, στη συνέχεια γίνεται η εξέταση του αποτελέσματος αν ο θεατής συνοδευόταν από δύο φίλους και μαζί αποφάσισαν για το στοίχημα μεταξύ των παιχνιδιών τα οποία παρουσιάστηκαν προηγουμένως.

Για το παιχνίδι Α, οι τρεις φίλοι πιθανώς θα συμφωνούσαν ότι το να στοιχηματίσεις σε αυτό θα ήταν αποδεκτό. Για τα παιχνίδια Β και Γ, εντούτοις, θα ήταν δύσκολο οι τρεις φίλοι να συμφωνήσουν σε ποιον να ποντάρουν. Η έλλειψη οποιασδήποτε γνώσης των παικτών μπορεί να οδηγήσει τους φίλους στην αναζήτηση συμπληρωματικών πληροφοριών έτσι ώστε να καθοδηγηθεί η επιλογή τους. Παραδείγματος χάριν, ένας φίλος μπορεί να ρωτήσει την άποψη των ανθρώπων που στέκονται δίπλα του ενώ ο άλλος φίλος μπορεί να προσέξει την προθέρμανση των παικτών. Είναι δυνατό μετά από κάποιο χρόνο κάθε φίλος να αναπτύξει μοναδικές υποκειμενικές αξιολογήσεις της πιθανότητας για το ποιος θα κερδίσει τα δύο παιχνίδια. Κατά την διάρκεια του στοιχήματος, ο θεατής θα είναι ανίκανος να τοποθετήσει ένα απλό στοίχημα που να προσαρμόζει τις αποκλίνουσες απόψεις των φίλων του.

Εν περιλήψει, στο παράδειγμα αντισφαίρισης παρουσιάζονται δυο προβλήματα που προκαλούνται από την κακώς χαρακτηρισμένη αβεβαιότητα. Καταρχάς, σύμφωνα με τα εμπειρικά στοιχεία και τη ψυχολογική θεωρία, οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων αισθάνονται λιγότερο άνετοι λαμβάνοντας αποφάσεις όταν βρίσκονται αντιμέτωποι με την κακώς χαρακτηρισμένη αβεβαιότητα. Ακόμα κι αν κάποιος μπορεί δικαίως να υποστηρίξει ότι ο ρόλος των αναλυτών απόφασης είναι να βοηθήσουν τους υπεύθυνους στη λήψη αποφάσεων και να καταφέρουν να υπερνικήσουν τέτοια προβλήματα κρίσης που χαρακτηρίζονται από το παράδοξο Ellsberg και το παράδειγμα αντισφαίρισης των Gardenfors και Sahalin, οι πραγματικές διαδικασίες απόφασης σπάνια απαιτούν από τους συμμετέχοντες να εμμένουν σε τέτοιες αρχές. Δεύτερον, η κακώς χαρακτηρισμένη αβεβαιότητα θα

οδηγήσει στη σύγκρουση τις ομάδες υπευθύνων για τη λήψη αποφάσεων. Εάν οι βασικές αβεβαιότητες είναι ανεπαρκώς κατανοητές τότε η διαδικασία απόφασης μπορεί να ακινητοποιηθεί μπορεί να εμφανιστεί λόγω των συγκρουόμενων χαρακτηρισμών της αβεβαιότητας.

Πολλές στρατηγικές χρησιμοποιούνται για να υπερνικήσουν την κακώς χαρακτηρισμένη αβεβαιότητα σε μια τυποποιημένη ανάλυση απόφασης. Η αβεβαιότητα συχνά αγνοείται συνολικά. Παραδείγματος χάριν, οι αρμόδιοι για το σχεδιασμό των ενεργειακών πόρων, ανίκανοι να χαρακτηρίσουν τα αποτελέσματα της αλλαγής κλίματος στον ενεργειακό κύκλο, στο παρελθόν αγνόησαν τα πιθανά αποτελέσματά και δεν τα έλαβαν υπόψη στα τότε ενεργειακά μοντέλα. Η μη συμπερίληψη της αβεβαιότητας, εντούτοις, μπορεί να οδηγήσει σε ανεπαρκείς επιλογές εάν ο συνυπολογισμός της αβεβαιότητας είχε να προτείνει κάποιες εναλλακτικές πολιτικές.

Οι αναλυτές επίσης ενεργούν ως η διφορούμενη αβεβαιότητα να μπορεί να χαρακτηριστεί μέσα από την επιλογή αυθαίρετων ή κακώς αιτιολογημένων συναρτήσεων κατανομής πιθανότητας για τις αβέβαιες παραμέτρους. Παραδείγματος χάριν, οι αναλυτές μπορούν να υποθέσουν μια κανονική κατανομή για μια υποτιθέμενη μέση τιμή. Η μη συμπερίληψη της αβεβαιότητας, εντούτοις, προκαταλαμβάνει τα αποτελέσματα ως προς τον επιλεγμένο χαρακτηρισμό αβεβαιότητας. Όταν οι αναλυτές ή οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων συμμετέχουν στη διαδικασία απόφασης, αυτή η πρακτική μπορεί επίσης να οδηγήσει σε ανταγωνιστικά μοντέλα υποστήριξης απόφασης, κάθε ένα ξεχωριστό σε σχέση με τις διαφορετικές υποτιθέμενες κατανομές πιθανότητας για τις άγνωστες παραμέτρους. Εάν τα εναλλακτικά μοντέλα προτείνουν διαφορετικές βέλτιστες πολιτικές, θα μπορούσε να εμφανιστεί ένα αδιέξοδο στην πολιτική διαδικασία. Μια άλλη στρατηγική είναι να οριστούν οι δεύτερης τάξης κατανομές πιθανότητας (second-order probability distributions) στις έντονα αβέβαιες παραμέτρους (deeply uncertain parameters) [49]. Οι Gardenfors και Sahlin χρησιμοποιώντας τον όρο επιστημονική αξιοπιστία (epistemic reliability) αναφέρονται στο επίπεδο ασάφειας της αβεβαιότητας. Το επιστημονικό μέτρο της αξιοπιστίας p δείχνει το πόσο βέβαιος είναι ο υπεύθυνος απόφασης για δεδομένη πιθανότητα. Εισάγοντας ένα πρόσθετο μέτρο πιθανότητας για να περιγραφεί το εύρος της αβεβαιότητας του μοντέλου, αυτό μπορεί να περιπλέξει το πρόβλημα με τη δημιουργία ενός πρόσθετου στρώματος

αβεβαιότητας που να μην μπορεί να διευκρινιστεί ή να συμφωνηθεί. Πολλοί θεωρητικοί των αποφάσεων αποδοκιμάζουν αυτήν την μέθοδο, εξαιτίας του γεγονότος ότι το προκύπτον αξιωματικό σύστημα δεν έχει τις κατάλληλες μαθηματικές ιδιότητες της αναμενόμενης θεωρίας χρησιμότητας.

3.2.2.3 Αξιόπιστα Μοντέλα Πολιτικής

Τα μοντέλα υπολογιστών χρησιμοποιούνται συνήθως για να υποστηρίξουν μια ανάλυση απόφασης. Τέτοια μοντέλα επιδιώκουν να προβλέψουν τις εκβάσεις ενός συνόλου υπό εξέταση πολιτικών και σχεδιάζονται για να παραγάγουν πιθανολογικές εκβάσεις όταν το σύστημα στο οποίο η πολιτική ενεργεί ή η αποτελεσματικότητα των πολιτικών είναι αβέβαιη. Μοντέλα που χρησιμοποιούνται για τη διερεύνηση υποστήριξης απόφασης συχνά ενημερώνουν για την πολιτική επιλογή.

Η ανάγκη για ποσοτικά μοντέλα αυξάνεται συνήθως με την πολυπλοκότητα του προβλήματος απόφασης. Για σύνθετα προβλήματα απόφασης, εντούτοις, τα μοντέλα μπορούν να μην είναι σε θέση να απεικονίσουν όλους τους σχετικούς παράγοντες. Ένα σύνθετο πρόβλημα απόφασης μπορεί επίσης να απαιτήσει την αξιολόγηση παραγόντων που μόνο μερικώς γίνονται κατανοητοί από τους τεχνικούς εμπειρογνώμονες. Κατά συνέπεια, οι υπεύθυνοι δημιουργίας μοντέλων κάνουν συχνά επιλογές σχεδιασμού (δομικές επιλογές) και αναθέσεις τιμών σε παραμέτρους (παραμετρικές επιλογές). Συχνά τέτοιες επιλογές είναι ανεπαρκώς κατανοητές από άλλους χρήστες μοντέλων και μπορούν να αποτελέσουν την απαρχή διαφωνιών σχετικά με αποφάσεις πολιτικής που βασίζονται στα αποτελέσματα αυτών των μοντέλων. Τα επιτυχή μοντέλα είναι εκείνα που αντιπροσωπεύουν τους παράγοντες που είναι σημαντικότεροι στην επιλογή της πολιτικής με ένα διαφανή και κοινώς αποδεκτό τρόπο.

3.2.2.4 Πολλαπλές Προτιμήσεις Εκβάσεων

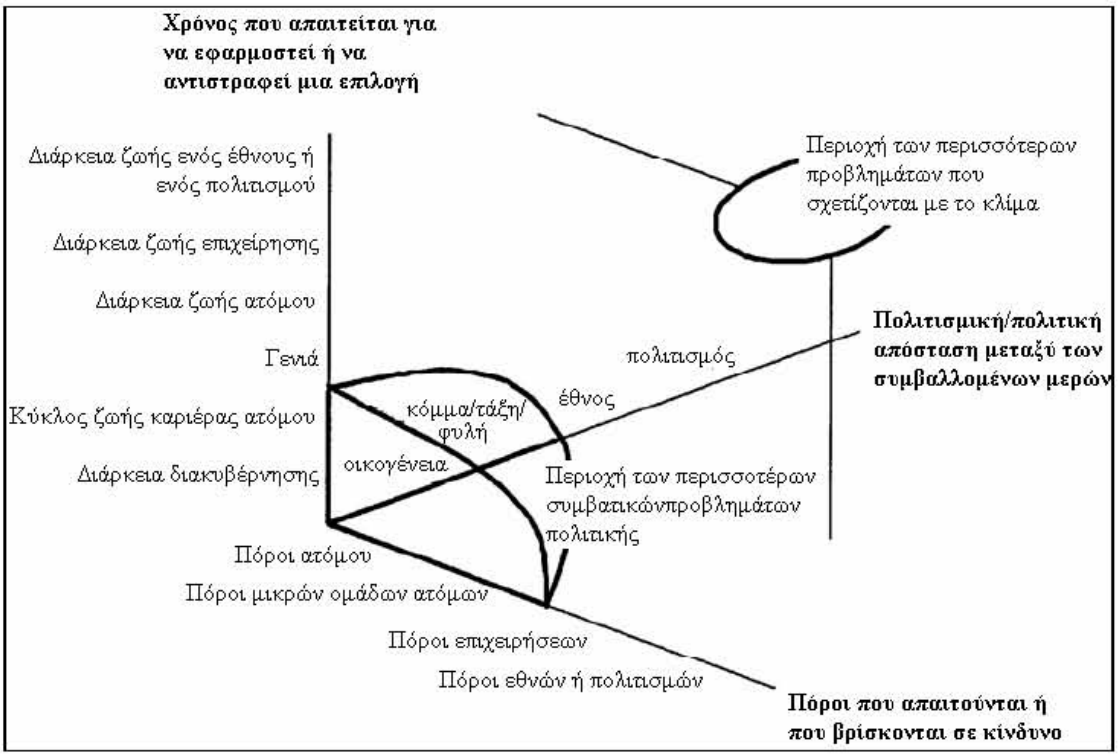
Τέλος, όταν αξιολογούνται οι εκβάσεις πολλαπλών δεικτών, ο αναλυτής πρέπει να ορίσει μια ενιαία συνάρτηση χρησιμότητας για να ταξινομήσει τις προτιμήσεις των συνδυασμών των μεμονωμένων δεικτών έκβασης. Αν και οι τεχνικές που περιγράφονται στην πολυπαραγοντική θεωρία απόφασης (multi-attribute decision theory) υπάρχουν για να αποσπάσουν τις προτιμήσεις των πολλαπλών δεικτών έκβασης, αυτό γίνεται δύσκολο καθώς η διαστατικότητα του μέτρου έκβασης γίνεται μεγάλη [45], [50].

Οι αναλυτές προσπαθούν συχνά να υπερνικήσουν αυτό το πρόβλημα με τον προσδιορισμό μιας βέλτιστης πολιτικής χρησιμοποιώντας το αναμενόμενο κριτήριο χρησιμότητας χωριστά για κάθε δείκτη έκβασης. Ο αναλυτής επιλέγει έπειτα τη βέλτιστη πολιτική που ικανοποιεί το σημαντικότερο κριτήριο του υπεύθυνου απόφασης. Εναλλακτικά, μπορούν να επιδιώξουν να ισορροπήσουν τις εκβάσεις στους διαφόρους δείκτες. Οι προκλήσεις παραμένουν όταν δεν αποδίδει καμία πολιτική αρκετά καλά σε όλες τις προτιμήσεις.

3.2.3 Μακροπρόθεσμος Προγραμματισμός Ενεργειακών Πόρων με τις Νέες Προσεγγίσεις

Ο Morgan παρουσιάζει ένα πλαίσιο για τα προβλήματα της παγκόσμιας αλλαγής όσον αφορά το πρόβλημα ταξινόμησης των πολιτικών και ταξινόμησης των καταλληλότερων συμβατικών τρόπων ανάλυσης [51]. Στη δημοσίευση του αυτή, ο Morgan καθορίζει ένα κύβο τριών διαστάσεων με τις ακόλουθες παραμέτρους ως άξονες:

1. Πόροι που απαιτούνται (resources required) ή που βρίσκονται σε κίνδυνο (at stake).
2. Πολιτιστική/πολιτική απόσταση μεταξύ των συμβαλλομένων μερών.
3. Χρόνος που απαιτείται για να εφαρμοστεί ή να αντιστραφεί η επιλογή (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3. Σχηματική αναπαράσταση τριών διαστάσεων που καθορίζουν ένα πολιτικό πρόβλημα. Τα προβλήματα κοντά στην αρχή των αξόνων ταιριάζουν καλά στα συμβατικά εργαλεία απόφασης, και τα προβλήματα μακριά από την αρχή των αξόνων απαιτούν εναλλακτικές μεθόδους [51].

Υποστηρίζεται ότι τα συμβατικά εργαλεία είναι κατάλληλα για τα προβλήματα κοντά στην αρχή των αξόνων δηλαδή όλων εκείνων των προβλημάτων που απαιτούν μικρό ή μέτριο ποσό πόρων, περιλαμβάνουν σχετικά ομοιογενείς ομάδες ανθρώπων και λειτουργούν σε χρονοδιαγράμματα μικρού ορίζοντα (μικρής διάρκειας). Τα προβλήματα που χαρακτηρίζονται από σημεία μακριά από την αρχή των αξόνων αυτού του κύβου δεν είναι κατάλληλα για να αντιμετωπιστούν με συμβατικά εργαλεία.

Ο κύβος του Morgan μπορεί να συμπεριλάβει τις απαραίτητες απαιτήσεις για την τυποποιημένη θεωρία απόφασης. Καταρχάς, όσο αυξάνει ο χρόνος που απαιτείται για να εφαρμοστεί ή να αντιστραφεί μια πολιτική (κάθετος άξονας), αυξάνει και το μέγεθος της αβεβαιότητας και της πολυπλοκότητα του προβλήματος απόφασης. Όσο πιο μακροχρόνιο το χρονικό πλαίσιο, τόσο πιο διφορούμενη γίνεται η αβεβαιότητα [52]. Δεύτερον, όσο αυξάνουν οι πόροι που απαιτούνται ή που βρίσκονται σε κίνδυνο (προς τα κάτω οριζόντιος άξονας) ο αριθμός των διαθεσίμων πιθανών πολιτικών επιλογών επίσης αυξάνει και αυξάνεται κατεπέκτασιν και η ανάγκη για αναλυτικές

μεθόδους που θα μπορούν να βοηθήσουν στην εκτίμηση των καταλληλότερων πολιτικών. Τέλος, δεδομένης της αύξησης της πολιτιστικής/πολιτικής απόστασης μεταξύ των συμβαλλόμενων μερών (ανοδικός οριζόντιος άξονας) αυξάνεται και ο αριθμός των πιθανών ομάδων ενδιαφέροντος και η ποικιλομορφία της προτίμησης μεταξύ των εκβάσεων.

Πολλά μακροπρόθεσμα προβλήματα πολιτικής, συμπεριλαμβανομένου του προγραμματισμού των ενεργειακών πόρων, περιέχουν ένα ή περισσότερα από τα ανωτέρω χαρακτηριστικά που αποτρέπουν την εφαρμογή των συμβατικών εργαλείων λήψης αποφάσεων.

3.3 Η Νέα Αναλυτική Μέθοδος για τον Προσδιορισμό των Εύρωστων Πολιτικών

Η τυποποιημένη θεωρία απόφασης, αν και χρήσιμη για πολλές αποφάσεις πολιτικής, μπορεί να μην είναι κατάλληλη για την υποστήριξη μακροπρόθεσμων αποφάσεων, ιδιαίτερα όταν δεν μπορεί να χαρακτηριστεί καλά η αβεβαιότητα για το μέλλον, όταν το σύνολο εφικτών πολιτικών είναι επεκτάσιμο (expansive) ή όταν οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων και τα συμβαλλόμενα μέρη έχουν διαφορετικές προτιμήσεις σχετικά με τις εκβάσεις. Για τέτοια μακροπρόθεσμη λήψη απόφασης, οι αναλυτές στρέφονται συχνά στον προγραμματισμό και την ανάλυση σεναρίων για να εξετάσουν πως οι πολιτικές θα αποδώσουν σε μελλοντικές καταστάσεις. Η ανάλυση σεναρίου μπορεί να δώσει έμφαση ιδιαίτερα στις ευνοϊκές εκβάσεις που πρέπει ίσως να προκληθούν ή να υποστηριχθούν από κατάλληλες πολιτικές. Εναλλακτικά, μερικά σενάρια μπορούν να αντιπροσωπεύσουν ανεπιθύμητες ή ιδιαίτερα απίθανες εκβάσεις που οι φορείς χάραξης πολιτικής μπορούν να θελήσουν να αποφύγουν. Το σενάριο επίσης παρουσιάζει τις ευκαιρίες που περιλαμβάνονται στην ανάλυση για τους συμμετέχοντες.

Η τυποποιημένη ανάλυση σεναρίου, εντούτοις, μπορεί κάποιες φορές να αποτυγχάνει να παράσχει όλες τις αναγκαίες οδηγίες στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων. Οι ασκήσεις σεναρίων αναπαριστούν και αξιολογούν μερικά σενάρια, δεδομένου ότι η ανάπτυξη ενός σεναρίου απαιτεί ουσιαστική προσπάθεια και οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων μπορούν συνήθως μόνο να σκεφτούν ένα μικρό σύνολο σεναρίων. Τα μικρά σύνολα σεναρίων μπορούν να παραμελήσουν πολλούς

σημαντικούς παράγοντες που αντιμετωπίζουν οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων, αφήνοντας ενδεχομένως τους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων εκτεθειμένους στην έκπληξη. Η παραδοσιακή ανάλυση σεναρίου δεν παρέχει επίσης κανένα συστηματικό μέσο που να μπορεί να επιτρέψει τη σύγκριση των εναλλακτικών επιλογών πολιτικής (όπως μέσω της τυποποιημένης ποσοτικής ανάλυσης) και αυτό αφήνει συχνά τους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων σε ένα περιβάλλον ασάφειας σχετικά με το πως ένα σύνολο σεναρίων οφείλει να υιοθετηθεί. Τέλος, εάν οι συστάσεις πολιτικής είναι ευαίσθητες στα λίγα σενάρια που επιλέγονται στην αρχή μιας ανάλυσης, πιθανοί συμμέτοχοι με απόψεις που δεν αντιπροσωπεύονται από ένα από τα σενάρια που έχουν προταθεί μπορούν να προκαλέσουν την επανάληψη ολόκληρης της διαδικασίας.

Στις υποπαραγράφους που ακολουθούν, παρουσιάζεται μια αναλυτική μέθοδος για τη λήψη αποφάσεων υπό καθεστώς έντονης αβεβαιότητας. Η μέθοδος αποκαλείται Εύρωστη Λήψη Απόφασης (Robust Decision Making ή RDM) και μπορεί να βοηθήσει στο μελλοντικό συντονισμό προσπαθειών σχετικών με τον προγραμματισμό ενέργειας.

3.3.1 Εύρωστη Λήψη Απόφασης

Η RDM είναι μια αναλυτική μέθοδος για την αναγνώριση εύρωστων πολιτικών υπό καθεστώς έντονης αβεβαιότητας (robust policies for deeply uncertainty) και άλλων δύσκολων προβλημάτων. Οι εύρωστες πολιτικές είναι εκείνες των οποίων η ευνοϊκή απόδοση (favorable performance) είναι σχετικά αναίσθητη στις βασικές αβεβαιότητες (key uncertainties) και τις διαφορετικές προτιμήσεις των υπευθύνων για τη λήψη αποφάσεων. Η RDM είναι μια διαφορετική θεωρία απόφασης σε σχέση με τα μοντέλα απόφασης που βασίζονται στην Μπεϋζιανή θεωρία και η διαφορετικότητα αυτή κυρίως εστιάζεται στον ιδιαίτερο τρόπο με τον οποίο απεικονίζεται η αβεβαιότητα και υπογραμμίζεται η εύρεση της σωστής πολιτικής.

Οι βασικοί άξονες της θεωρίας RDM βρίσκονται στη μακροπρόθεσμη πολιτική ανάλυση (long-term policy analysis), τη διερευνητική διαμόρφωση (exploratory modeling) και την ανάλυση σεναρίων (scenario analysis). Η ανάπτυξη

της RDM οφείλεται στο ενδιαφέρον που έχει επιδειχθεί από τους επιστημονικούς κλάδους των υπολογιστών, της ψυχολογίας και άλλων που είναι επιφορτισμένοι με τη λήψη αποφάσεων. Πιο λεπτομερείς επεξεργασίες του κινήτρου (motivation) και της μεθόδου (method) έχουν παρουσιαστεί από τον Lempert [53], [54], [55], [56], [57], [58], [64].

Η RDM χρησιμοποιεί υπολογιστικά μοντέλα για να υπολογίσει την απόδοση των πολιτικών για τα διακριτά ποσοτικοποιημένα μελλοντικά γεγονότα (individually quantified futures), όπου τα μελλοντικά γεγονότα διακρίνονται από μοναδικά σύνολα πιθανών τιμών παραμέτρων εισόδου (unique sets of plausible input parameter values). Εκμεταλλευόμενη τις πρόσφατες προόδους σε υπολογιστική ισχύ, η RDM αξιολογεί τα μοντέλα πολιτικής για κάθε συνδυασμό υποψηφίων πολιτικών και πιθανών μελλοντικών καταστάσεων για να δημιουργήσει μεγάλα σύνολα μελλοντικών γεγονότων. Αυτά τα σύνολα μπορούν να περιλάβουν μερικές εκατοντάδες έως μερικές χιλιάδες περιπτώσεων.

Για τα προβλήματα πολιτικής που έχουν έναν μεγάλο ή απεριόριστο αριθμό πιθανών πολιτικών προσεγγίσεων, η RDM παρέχει έναν συστηματικό αποτελεσματικό προσδιορισμό των πιθανών πολιτικών ενώ παράλληλα εντοπίζει τις πολιτικές που είναι πιθανό να είναι εύρωστες. Η RDM, αρχικά, χρησιμοποιεί την απεικόνιση (visualization) και τη στατιστική ανάλυση (statistical analysis) για να προσδιορίσει τις πολιτικές (από το αρχικό σύνολο) που αποδίδουν καλά σε ένα σύνολο πιθανών καταστάσεων. Έπειτα, η RDM χρησιμοποιεί τεχνικές αλίευσης δεδομένων (data-mining techniques) που αποκαλύπτουν κάτω από ποιες μελλοντικές συνθήκες οι πολιτικές οι οποίες έχουν επιλεγεί είναι τρωτές. Η εξέταση αυτών των βασικών ευπαθειών (key vulnerabilities) που μπορούν δηλαδή να θεωρηθούν ως σενάρια (στο κεφάλαιο αυτό ο όρος σενάριο λαμβάνει μια διαφορετική έννοια από αυτόν που θα λάβει στα επόμενα κεφάλαια), μπορεί να προτείνει τρόπους για την επεξεργασία των νέων πολιτικών ώστε να μπορούν να προστατευθούν έναντι των ευπαθειών. Η ανάλυση προσδιορίζει έπειτα μια ή περισσότερες νέες εύρωστες υποψήφιες πολιτικές και επαναξιολογεί την απόδοση όλων των πολιτικών ενάντια στις διάφορες, πιθανές, μελλοντικές καταστάσεις. Μέσω κάθε επανάληψης, οι υποψήφιες πολιτικές γίνονται όλο και περισσότερο εύρωστες και προσδιορίζονται όλα τα βασικά σενάρια στα οποία οι πολιτικές είναι τρωτές.

Επίσης, η RDM αποφεύγει τη διαδικασία απόδοσης πιθανοτήτων σε έντονα αβέβαιες, μελλοντικές δυνάμεις. Στο τέλος της ανάλυσης, η RDM παρουσιάζει την υπόλοιπη αβεβαιότητα (remaining uncertainty) και τη διαφορική επίδοση κάθε πολιτικής (differential policy performance) στον υπεύθυνο απόφασης με έναν τρόπο που διευκολύνει το συμβιβασμό ανάμεσα στην αβεβαιότητα και την επίδοση (uncertainty and performance tradeoffs). Αυτό μπορεί να διευκολύνει τη συνεργασία και την υποστήριξη για την εφαρμογή μιας πολιτικής, ενώ αποκαλύπτεται συχνά μέσω τέτοιων αναλύσεων ότι οι διαφορετικές απόψεις σχετικ'α με το μέλλον μπορούν να μην απαιτήσουν απαραίτητα και ανόμοιες πολιτικές.

Όπως έχει ήδη περιγραφεί, οι όροι που συχνά χαρακτηρίζουν τις μακροπρόθεσμες πολιτικές προκλήσεις είναι αυτοί που καθιστούν δύσκολη την επιτυχή εφαρμογή της τυποποιημένης θεωρίας απόφασης. Η RDM υιοθετεί πέντε βασικές στρατηγικές για τις μακροπρόθεσμες πολιτικές προκλήσεις

1) Διερευνητική ανάλυση (exploratory analysis),
2) Χρήση της ευρωστίας ως κριτήριο επιλογής πολιτικής,
3) Προσδιορισμός των ευπαθειών ή των σεναρίων στις οποίες οι πολιτικές δεν αποδίδουν επαρκώς,
4) Βελτίωση των πολιτικών μέσω φραγής (hedging) ή μέσω προσαρμοστικών πολιτικών (adaptive policies),
5) Παρουσίαση της παραμένουσας αβεβαιότητας στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων

Στις υποπαραγράφους που ακολουθούν, περιγράφεται κάθε ένα από αυτά τα χαρακτηριστικά RDM αναλυτικά. Πρέπει να τονιστεί επίσης ότι η ορολογία που χρησιμοποιείται εδώ είναι διαφορετική από αυτή που χρησιμοποιεί ο Lempert. Αυτή η διατριβή επιδιώκει να γεφυρώσει την τυποποιημένη θεωρία απόφασης (standard decision theory), τον προγραμματισμό σεναρίων (scenario planning) και την RDM. Το πλήθος των αντικειμένων προς ενοποίηση οδηγεί τις ορολογίες να είναι σε διαφωνία μεταξύ τους. Στην τυποποιημένη θεωρία απόφασης ο όρος κατάσταση (state) αναφέρεται στους μελλοντικούς όρους στους οποίους οι αποφάσεις ενεργούν. Στον τυποποιημένο προγραμματισμό σεναρίου, οι γενικές απόψεις του μέλλοντος ή της κατάστασης αναφέρονται ως σενάρια. Στα [55], [56], εντούτοις, ο όρος μελλοντικό γεγονός χρησιμοποιείται όταν πρόκειται να γίνει αναφορά στην παγκόσμια κατάσταση στην οποία οι πολιτικές ενεργούν και ένα σενάριο είναι η

έκβαση μιας συγκεκριμένης πολιτικής που λαμβάνει χώρα στο συγκεκριμένο μέλλον. Τέλος, ένα σύνολο σεναρίων είναι ένα σύνολο δεδομένων που περιέχει όλους τους συνδυασμούς πολιτικών και μελλοντικών γεγονότων. Στη συνέχεια οι παγκόσμιες καταστάσεις αναφέρονται στις πολιτικές που ενεργούν ως καταστάσεις ή σενάρια (εάν γίνεται αναφορά σε μια γενικότερη άποψη μελλοντικού γεγονότος μιας συστάδας παρόμοιων καταστάσεων). Μια συγκεκριμένη έκβαση μιας πολιτικής σε μια ιδιαίτερη κατάσταση ή ένα σενάριο είναι το μελλοντικό γεγονός.

3.3.1.1 Διερευνητική Ανάλυση

Η Διερευνητική Ανάλυση (exploratory analysis) χρησιμοποιείται για να γίνει κατανοητή η συμπεριφορά των σύνθετων και έντονα αβέβαιων συστημάτων [59], [60], [61]. Η διερευνητική ανάλυση χρησιμοποιεί προγράμματα υπολογιστών όχι για να προβλέψει το μέλλον, αλλά για να αναλύσει πιθανά πειράματα, να προσδιορίσει το πως οι όροι μπορούν να εξελιχθούν στο μέλλον και να προσεγγίσει το πως οι πολιτικές μπορούν να ευημερήσουν κάτω από ένα ευρύ φάσμα πιθανών μελλοντικών όρων. Αντίθετα με τη λογική του υπολογισμού των πιθανολογικών εκβάσεων για μια πολιτική με την ανάθεση σταθερών τιμών πιθανότητας στις έντονα αβέβαιες παραμέτρους, η διερευνητική ανάλυση εξερευνά αμφίδρομα τις πολυάριθμες πιθανές εκβάσεις που λαμβάνονται με την αξιολόγηση του προγράμματος για ένα ευρύ φάσμα ιδιαίτερων και πιθανών τιμών παραμέτρου εισόδου.

Η RDM στηρίζεται στις διερευνητικές τεχνικές ανάλυσης, εν μέρει, για να εξετάσει πως οι αποδόσεις των πολιτικών ποικίλλουν σε πολλές διαφορετικές πιθανές καταστάσεις. Χρησιμοποιώντας τα εργαλεία υπολογιστών, όπως το CAR (Computer Assisted Reasoning system), ο αναλυτής είναι σε θέση να αξιολογήσει πως οι πολιτικές θα αποδώσουν σε οποιονδήποτε συνδυασμό παραμέτρων ανεπαρκώς κατανοητών ή κακώς χαρακτηρισμένων παραγόντων εισόδου. Η ανάλυση αποκαλύπτει λεπτά σημεία στη λειτουργία του συστήματος και την απόδοση των διάφορων πολιτικών που θα αγνοούνταν πιθανώς από την αξιολόγηση μιας ή μερικών πιθανολογικών προβλέψεων. Ας σημειωθεί ότι με τη χρησιμοποίηση μιας διερευνητικής στρατηγικής υπολογισμού διαμόρφωσης, η RDM δεν απαιτεί την ανάθεση πιθανοτήτων σε έντονα αβέβαιες παραμέτρους του μοντέλου.

3.3.1.1.1 Γεννήτριες Σεναρίων

Η διερευνητικά ανάλυση και η RDM χρησιμοποιούν τα προγράμματα υπολογιστών χαμηλής ανάλυσης (low-resolution computer models) ή γεννήτριες σεναρίων (scenario generators) για να αξιολογήσουν την απόδοση των πολιτικών στις πολυάριθμες, πιθανές, παγκόσμιες καταστάσεις [56]. Οι γεννήτριες σεναρίων δεν προβλέπουν το μέλλον. Αντ' αυτού περιγράφουν πολλές ανόμοιες αλλά πιθανές εκβάσεις του μέλλοντος. Μια γεννήτρια σεναρίων μπορεί να είναι ένα υπάρχον σύστημα μοντέλο (existing systems-model) που αξιολογεί χρησιμοποιώντας ειδικές τιμές παραμέτρων εισόδου, ή μπορεί να είναι ένα παράγωγο ενός πιο σύνθετου μοντέλου μειωμένης μορφής (reduced-form derivative of a more complex model). Οι γεννήτριες σεναρίων πρέπει γρήγορα και εύκολα να είναι προσαρμόσιμες, επιτρέποντας στην ανάλυση να απεικονίσει τη βελτιωμένη κατανόηση των ελλοχευουσών διαδικασιών (underlying processes), το πρόβλημα απόφασης (decision problem) και τις πολιτικές στρατηγικές (promising policy strategies).

Μια σημαντική διαφορά μεταξύ μιας γεννήτριας σεναρίων και ενός μοντέλου πιθανολογικής πρόβλεψης είναι πως με τη γεννήτρια σεναρίου εξετάζεται η αβεβαιότητα. Ενώ με το μοντέλο πρόβλεψης ορίζεται μια κατανομή πιθανότητας που προέρχεται από ιστορικά δεδομένα, άλλες μοντελοποιήσεις, πειράματα και κρίσεις ειδικών σε όλες τις άγνωστες παραμέτρους στο μοντέλο. Τα αποτελέσματα του μοντέλου περιγράφονται από κατανομές πιθανότητας. Ο βαθμός αβεβαιότητας σε ένα μοντέλο πρόβλεψης μπορεί να μειωθεί με τη βελτίωση της περιγραφής των σχετικών συναρτήσεων στο μοντέλο, τη χρησιμοποίηση ακριβέστερων δεδομένων εισόδου ή την αύξηση της χρονικής ή χωρικής ανάλυσης του μοντέλου. Αυτές οι στρατηγικές, εντούτοις, μπορούν να αυξήσουν την πολυπλοκότητα των μοντέλων πρόβλεψης. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των μοντέλων μπορεί επίσης να οδηγήσει σε μια απώλεια διαίσθησης και κατανόησης της συμπεριφοράς του μοντέλου. Τέλος, μερικοί ιδιαίτερα αβέβαιοι παράγοντες, όπως η ανθρώπινη συμπεριφορά, αγνοούνται συχνά από τα μοντέλα πρόβλεψης επειδή ο αναλυτής δεν έχει ικανοποιητικές πληροφορίες για τον παράγοντα αυτό για να ορίσει μια κατανομή πιθανότητας. Ένας κίνδυνος αυτής της προσέγγισης είναι ότι με την αγνόηση ενός παράγοντα που επηρεάζει το

μοντέλο, το μοντέλο σιωπηρά υποθέτει ότι ο παράγοντας αυτός λαμβάνει την τιμή μηδέν εάν είναι προσθετικός (additive) ή ένα εάν αυτός εάν είναι πολλαπλασιαστικός (multiplicative).

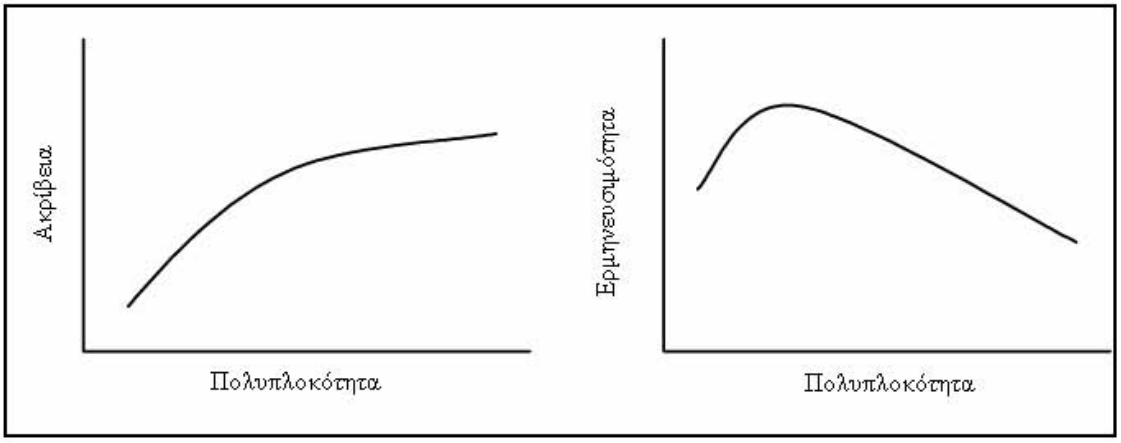
Οι γεννήτριες σεναρίων, αντίθετα, ποσοτικοποιούν μεμονωμένες, εσωτερικά συνεπή σενάρια (individual, internally consistent stories) για το μέλλον. Η εσωτερική συνέπεια επιτυγχάνεται με την περιγραφή με γνωστές σχέσεις μεταξύ των εισόδων, των ανεξάρτητων κατευθυντήριων δυνάμεων (independent driving forces) και των εξόδων. Ορίζονται μονότιμες τιμές στις αβέβαιες παραμέτρους. Αυτές οι τιμές παραμέτρων προέρχονται από τη βιβλιογραφία και μπορούν να απεικονίσουν εναλλακτικές υποθετικές καταστάσεις. Τα σενάρια διακρίνονται το ένα από το άλλο με την ανάθεση διαφορετικών συνόλων τιμών σε αυτές τις παραμέτρους. Μια καλή δοκιμή της ισχύος μιας γεννήτριας σεναρίων εξετάζει το πόσο καλά μπορεί να δώσει σύνολο προβλέψεων και να συμφωνούν με τις τιμές οι οποίες δίνονται από τα πιο λεπτομερή μοντέλα ή πόσο καλά μπορεί να περιγράψει ένα αυθαίρετο πιθανό μέλλον που προτείνεται από έναν ενδιαφερόμενο συμμέτοχο.

Οι γεννήτριες σεναρίων είναι λιγότερο σύνθετες από τα μοντέλα πρόβλεψης καθώς δεν προορίζονται να υπολογίσουν την κατανομή πιθανότητας μιας εξόδου. Μπορούν επίσης να έχουν ως σκοπό να περιλάβουν σημαντικά αλλά ιδιαίτερα αβέβαια συστατικά ενός προβλήματος απόφασης που δεν συμπεριλαμβάνονται συχνά σε ένα τυποποιημένο μοντέλο υποστήριξης απόφασης.

Οι Bigelow και Davis (2003) παρέχουν μια ταξινόμηση των μοντέλων χαμηλής ανάλυσης (low-resolution models) και της σχέσης τους με τα μοντέλα υψηλής ανάλυσης (higher-resolution models) [62]. Τα μοντέλα χαμηλής ανάλυσης μπορούν να είναι εμπειρικά (empirical), θεωρητικά (theory-based) ή μεταμοντέλα (metamodels). Τα πρώτα δύο δεν έχουν καμία άμεση σύνδεση με οποιαδήποτε υψηλής ευκρίνειας μοντέλα. Τα εμπειρικά μοντέλα είναι στατιστικές προσαρμογές δεδομένων ενώ τα θεωρητικά μοντέλα απεικονίζουν τη φαινομενολογία χαμηλής ανάλυσης [63]. Τα μεταμοντέλα παράγονται με την εγκατάσταση ενός μοντέλου χαμηλής ανάλυσης στα αποτελέσματα ενός ή περισσότερων μοντέλων υψηλής ανάλυσης. Τα μεταμοντέλα μπορούν να βασιστούν σε καθαρώς στατιστικές προσαρμογές όπως είναι οι επιφάνειες απάντησης (response surfaces) ή αποτελέσματα μοντέλων υψηλής ανάλυσης μοντέλων. Μπορούν επίσης να είναι θεωρητικά μοντέλα που αρχικά έχουν χρησιμοποιήσειν φυσικό και συμπεριφοριστικό

συλλογισμό για να προτείνουν τη δομή των μοντέλων και τις καθοριστικές παραμέτρους εισόδου στη συνέχεια αναπαραγάγουν αποτελέσματα εκτελέσεων μοντέλων υψηλής ευκρίνειας.

Οι γεννήτριες σεναρίων ανταλλάσσουν μερικές φορές την ικανότητα πρόβλεψης με την δυνατότητα της ταχύτητας απόκρισης, την ευκολία τροποποίησης ή την ερμηνευσιμότητα (interpretable). Στο Σχήμα 3.4 παρουσιάζονται εννοιολογικές περιγραφές της σχέσης μεταξύ της πολυπλοκότητας ενός μοντέλου και της ακρίβειάς του στην πρόβλεψη του μέλλοντος (στο αριστερό) και της πολυπλοκότητας του μοντέλου και της ερμηνευσιμότητας (interpretability). Δεδομένου ότι ένα μοντέλο γίνεται σύνθετο μέσω της υψηλότερης χρονικής και χωρικής ανάλυσης η δυνατότητά να προβλέπει ακριβώς τους μελλοντικούς όρους αυξάνεται. Για πολλές τροχιές της ανάπτυξης του μοντέλου, εντούτοις, οι επιστροφές στην πολυπλοκότητα μειώνονται με την αυξανόμενη πολυπλοκότητα (κοίλη μορφή στα αριστερά του Σχήματος 4).



Σχήμα 3.4. Εννοιολογική αντιπροσώπευση των σχέσεων της πολυπλοκότητας ενός μοντέλου και της ακρίβειας πρόβλεψής του (αριστερά) και της ερμηνευσιμότητας (δεξιά).

Η ερμηνευσιμότητα ενός μοντέλου (εδώ καθορίζεται αόριστα για να περιλάβει το χρόνο για την ανάλυση, τη διαισθητικότητα των αποτελεσμάτων και την ευκολία της κατανόησης της συμπεριφοράς του) αυξάνεται αρχικά με την πολυπλοκότητα δεδομένου ότι ένα μοντέλο συλλαμβάνει πιο ρεαλιστικά τους σημαντικούς παράγοντες και γίνεται έτσι πιο χρήσιμο και κατανοητό. Για ορισμένο επίπεδο πολυπλοκότητας, εντούτοις, η πρόσθετη πολυπλοκότητα μπορεί να μειώσει την ερμηνευσιμότητα και τη χρησιμότητα ενός μοντέλου (προς τα κάτω κεκλιμένη

καμπύλη στα δεξιά στο Σχήμα 3.4). Ένα σύνθετο μοντέλο συχνά γίνεται πλήρως κατανοητό από έναν ή μερικούς ανθρώπους, οι οποίοι έχουν εμπλακεί κατά την ανάπτυξή του.

Η κατάλληλη ισορροπία μεταξύ της ακρίβειας και της ερμηνευσιμότητας πρέπει να αξιολογηθεί χωριστά για κάθε εφαρμογή. Γενικά, όσο ευρύτερα καθορισμένα είναι τα ζητήματα πολιτικής τόσο ευρύτερα γίνονται και τα αποτελέσματα ενδιαφέροντος και τόσο προς τα αριστερά μετακινείται το σημείο ισορροπίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα το μοντέλο να μετατρέπεται σε ένα λιγότερο σύνθετο και λιγότερο ερμηνεύσιμο μοντέλο.

3.3.1.1.2 Σύνολα Μελλοντικών Γεγονότων

Στη διερευνητική ανάλυση, ο αναλυτής εξετάζει ένα σύνολο μελλοντικών γεγονότων που θα μπορούσε να παραχθεί μέσω της αξιολόγησης της γεννήτριας σεναρίων για κάθε πολιτική σε ένα μεγάλο σύνολο πιθανών καταστάσεων. Επιστρέφοντας στη μήτρα που χρησιμοποιήθηκε παραπάνω, γίνεται η θεώρηση ενός μελλοντικού γεγονότος f_{yz} και αντιστοιχεί στη διακριτή έξοδος m_{yz} μιας συγκεκριμένης πολιτικής l_y που λαμβάνει χώρα σε μια συγκεκριμένη κατάσταση του κόσμου x_z

$$f_{yz} \equiv m_{yz} \tag{12}$$

Ένα σύνολο μελλοντικών γεγονότων (Σχήμα 3.5) είναι έτσι ένα ισοδύναμο της μήτρας έκβασης που έχει παρουσιαστεί στο Σχήμα 3.1:

→ Καταστάσεις	x_1	⋯	x_z	⋯	x_Z
l_0	f_{01}	⋯	f_{0z}	⋯	f_{0Z}
⋮	⋮	⋱	⋮	⋰	⋮
l_y	f_{y1}	⋯	f_{yz}	⋯	f_{yZ}
⋮	⋮	⋰	⋮	⋱	⋮
l_Y	f_{Y1}	⋯	f_{Yz}	⋯	f_{YZ}
↑ Πολιτικές					

Σχήμα 3.5. Μελλοντικό σύνολο που αντιστοιχεί σε κάθε ζευγάρι πολιτικών και καταστάσεων.

Ένα σύνολο μελλοντικών γεγονότων δημιουργείται με την αξιολόγηση στο μοντέλο κάθε πολιτικής (l) χωριστά με τη χρήση δείγματος (ή πειραματικών δεδομένων) εξωγενών παραγόντων (x_j) καθορίζοντας τις καταστάσεις. Η RDM συχνά δειγματοληπτεί εξωγενείς παράγοντες ομοιόμορφα με πιθανή σειρά ή με ειδική διαδικασία δειγματοληψίας για να αποφευχθεί συστηματική απόκλιση στη δειγματοληψία. Αυτή η στρατηγική δειγματοληψίας χρησιμοποιείται για να ερευνήσει η RDM πλήρως την απόδοση των πολιτικών σε ένα ολόκληρο διάστημα πιθανών μελλοντικών καταστάσεων. Αυτή η πρακτική δεν πρέπει να συγχέεται με την ανάθεση μιας ομοιόμορφης κατανομής πιθανότητας σε εξωγενείς παράγοντες, δεδομένου ότι τα προκύπτοντα σύνολα δεν αξιολογούνται γενικά χρησιμοποιώντας δείκτες που εξετάζουν τη σχετική συχνότητα των παρατηρήσεων.

Το μέγεθος ενός συνόλου μελλοντικών γεγονότων που αξιολογείται κατ' αυτό τον τρόπο εξαρτάται από τον αριθμό πολιτικών που αξιολογούνται, τον αριθμό αβέβαιων παραμέτρων στο μοντέλο και την πυκνότητα δειγματοληψίας στις πιθανές σειρές δεδομένων για κάθε παράμετρο. Οι προηγούμενες εφαρμογές RDM έχουν παράγει σύνολα που αποτελούνται από πολλές πολιτικές και μεγάλου αριθμό καταστάσεων [56], [65], [57], ένα μεγάλο σύνολο πολιτικών και λίγων καταστάσεων [66], [57] και έναν μέτριο αριθμό πολιτικών με έναν μέτριο αριθμό καταστάσεων [55]. Τέλος, αυτή η διερευνητική στρατηγική του μοντέλου μπορεί να υιοθετηθεί για να αξιολογήσει τις πολιτικές ανεξάρτητα από τα διαφορετικά μέτρα έκβασης m αντί της χρησιμοποίησης μιας πολυπαραγοντικής συνάρτησης χρησιμότητας.

3.3.1.2 Εύρωστες Πολιτικές

3.3.1.2.1 Κριτήριο Ευρωστίας

Η ευνοϊκότερη συνθήκη (optimality) δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως κριτήριο για την επιλογή των πολιτικών εάν οι πιθανότητες ή οι προτιμήσεις των εξόδων δεν διευκρινίζονται μεμονωμένα ή εάν η δεξιά στήλη της μήτρας στο Σχήμα 3.2 (αναμενόμενη χρησιμότητα) δεν μπορεί να υπολογιστεί. Μια εξαίρεση είναι όταν μια πολιτική υπερτερεί έναντι όλων των άλλων σε όλες τις καταστάσεις. Σε αυτή την περίπτωση, η πολιτική αυτή είναι η καλύτερη ανεξάρτητα από τις πιθανότητες κάθε κατάστασης. Τέτοιες κυρίαρχες στρατηγικές σπάνια υπάρχουν. Ένα σύνολο πολιτικών L η οποία περιλαμβάνει μια κυριάρχουσα πολιτική μπορεί να είναι ουτοπική, δεδομένου ότι η πιθανότατα να υπάρχει ένας τρόπος να προσδιοριστεί μια παρόμοια πολιτική που αποδίδει ελαφρώς καλύτερα σε ένα ή μερικά από τα μελλοντικά γεγονότα αποδίδει ελαφρώς χειρότερα σε μελλοντικά γεγονότα. Ελλείψει μιας κυρίαρχης στρατηγικής, ο υπεύθυνος απόφασης πρέπει να στραφεί σε εναλλακτικά κριτήρια για τη σύγκριση της απόδοσης των πολιτικών στις καταστάσεις. Ας θεωρηθεί $K_s(l)$ ότι είναι ένα κριτήριο αξιολόγησης που απεικονίζει τις προτιμήσεις στην απόδοση της πολιτικής l έναντι των άλλων καταστάσεων (δεξιά στήλη στο Σχήμα 3.6). Εάν ένα τέτοιο αποδεκτό κριτήριο μπορεί να προσδιοριστεί, τότε ο αναλυτής θα πρέπει να επιλέξει την πολιτική που θα σημειώνει την υψηλότερη τιμή του κριτηρίου αυτού ή θα επιλέξει την πολιτική $\tilde{l}$ τέτοια ώστε $K_s(\tilde{l}) \geq K_s(l)$ για $\forall l \in L$.

$\rightarrow$ Καταστάσεις	x_1	$\cdots$	x_z	$\cdots$	x_Z	$K_X(1)$ $\downarrow$
1_0	f_{01}	$\cdots$	f_{0z}	$\cdots$	f_{0Z}	$K_S(1_0)$
$\vdots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\iddots$	$\vdots$	$\vdots$
1_y	f_{y1}	$\cdots$	f_{yz}	$\cdots$	f_{yZ}	$K_X(1_y)$
$\vdots$	$\vdots$	$\iddots$	$\vdots$	$\ddots$	$\vdots$	$\vdots$
1_Y	f_{Y1}	$\cdots$	f_{Yz}	$\cdots$	f_{YZ}	$K_X(1_Y)$
$\uparrow$ Πολιτικές						

Σχήμα 3.6. Μήτρα σεναρίου με τα κριτήρια πολιτικής αξιολόγησης.

Προσεκτικός συνυπολογισμός μπορεί να οδηγήσει στη σχετική χρησιμότητα των διαφορετικών κριτηρίων. Παραδείγματος χάριν, ένας υπεύθυνος απόφασης θα μπορούσε να επιλέξει την πολιτική με την καλύτερη δυνατή απόδοση σε μια από τις πολλές πιθανές καταστάσεις. Ένα τέτοιο κριτήριο ("maxi-best" criterion) είναι συγγενές με το να επενδύσει κανείς όλα τα χρήματα του σε λαχείο υψηλής απόδοσης. Η έκβαση είναι πιθανό να οδηγήσει στην απώλεια όλων των χρημάτων κάποιου, αλλά μια τέτοια στρατηγική μεγιστοποιεί την πιθανότητα της καλύτερης δυνατής έκβασης, κερδίζοντας δηλαδή στην περίπτωση αυτή το λαχείο. Εναλλακτικά, θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ένα κριτήριο που ελαχιστοποιεί τη μέγιστη απώλεια ("mini-max" criterion). Και οι δύο προσεγγίσεις εστιάζουν μόνο στην καλύτερη ή χειρότερη έκβαση, συχνά εις βάρος των περισσότερων άλλων. Κατά συνέπεια, αυτά τα κριτήρια δεν είναι γενικά κατάλληλα για τις περισσότερες εφαρμογές πολιτικής. Ένα μέτρο ευρωστίας είναι ένα ισορροπημένο κριτήριο για πολλά προβλήματα απόφασης πολιτικής. Μια εύρωστη πολιτική είναι γενικά μια πολιτική της οποίας η απόδοση είναι σχετικά αναίσθητη στις άγνωστες πιθανότητες των καταστάσεων και των προτιμήσεων στις εκβάσεις. Ένα τέτοιο κριτήριο είναι κατάλληλο όταν το καθιστά η αβεβαιότητα δύσκολο να αξιολογήσει αξιόπιστα την έκβαση των πιθανοτήτων [56]. Οι επόμενες δύο υποενότητες συζητούν τις επιλογές για ένα κριτήριο ευρωστίας.

3.3.1.2.2 Λύπη και Απόλυτη Απόδοση

Ένα κριτήριο ευρωστίας μπορεί να βασιστεί στην απόλυτη ή σχετική απόδοση των πολιτικών σε κάθε μελλοντική κατάσταση ή συγγενή αυτής. Τα εμπειρικά στοιχεία προτείνουν, εντούτοις, στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων να εξετάζουν περισσότερα κριτήρια από την απλή σύγκριση της απόλυτης απόδοσης (absolute performance) ή της απόλυτης αναμενόμενης απόδοσης (absolute expected performance) μιας πολιτικής όταν πρόκειται να ληφθούν αποφάσεις για μακροπρόθεσμες πολιτικές. Μια μελέτη των Kahneman και Tversky [67], παραδείγματος χάριν, προτείνει στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να επιλέγουν πολιτικές που βασίζονται στα κέρδη και τις απώλειες (gains and losses) και όχι στο συνολικό αποτέλεσμα (total outcomes). Μια τέτοια θεώρηση όσον αφορά τη χρήση κριτηρίων βασισμένα στην προοπτική ("prospect-" based decision criteria)ενδέχεται να αξιολογούσε διαφορετικά τα κέρδη από τις απώλειες. Οι Loomes και Sugden [68], [69], αξιολογώντας τα ίδια δεδομένα, ισχυρίζονται ότι οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων είναι ευαίσθητοι στη διαφορά των εκβάσεων μιας συγκεκριμένης απόφασης και στην καλύτερη έκβαση αποτελέσματος της απόφασης (Regret Theory). Οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων αισθάνονται λύπη (regret) όταν η επιλογή τους, τους οδηγεί σε μια έκβαση ουσιαστικά χειρότερα από την καλύτερη επιλογή. Αισθάνονται χαρά (rejoice) όταν η απόφασή τους οδηγεί σε μια έκβαση κοντά στην καλύτερη δυνατή.

Ο Lempert υποστηρίζει ότι ένα κριτήριο βασισμένο στη λύπη (regret-based decision criterion) είναι το πιο κατάλληλο για την αξιολόγηση των πολιτικών για την ευρωστία αφού εμφανίζεται να μιμείται το κριτήριο απόφασης πολλών υπευθύνων για τη λήψη αποφάσεων [56]. Ένα μέτρο λύπης (measure of regret) εξετάζει τη διαφορά μεταξύ της πραγματικής έκβασης (actual outcome) και της έκβασης καλύτερης επιλογής (ex post "best" choice). Εάν οι εκβάσεις με τις μεγαλύτερες τιμές του m προτιμώνται, τότε η λύπη R μιας πολιτικής l σε μια συγκεκριμένη κατάσταση x θα μπορούσε να οριστεί ως η διαφορά μεταξύ της πραγματικής έκβασης και της μέγιστης έκβασης.

$$R(l_y, x_z) = \max_{y'}(m_{y'z}) - m_{yz} \tag{13}$$

Η μέθοδος της λύπης θα αναλυθεί περαιτέρω σε αυτήν τη Μεταπτυχιακή Εργασία. Διάφορες προηγούμενες εφαρμογές της RDM έχουν χρησιμοποιηθεί ως

μέτρο ευρωστίας [56], [55]. Η χρήση ενός μέτρου λύπης βασισμένου στην απόλυτη απόδοση ή χρησιμότητα, εντούτοις, δεν αποτελεί κεντρική ιδέα στη θεωρία RDM. Κάθε εφαρμογή RDM πρέπει προσεκτικά να εξετάσει ποιο κριτήριο είναι αυτό που κάνει την επίλυση ενός προβλήματος πιο προσιτή. Μια σημαντική πιθανή μελλοντική εφαρμογή RDM θα ήταν να χρησιμοποιηθεί ένα μέτρο βασισμένο στη λύπη για να ισορροπηθούν οι προτιμήσεις οι σχετικές με τις διάφορες μετρικές πολιτικής απόδοσης.

3.3.1.2.3 Στρατηγική Κατάταξης

Μόλις επιλεχτεί ένα κριτήριο απόδοσης, ο αναλυτής πρέπει να επιλέξει μια διαδικασία για την επίδοση (performance) μιας στρατηγικής βασισμένης στην απόδοση της κάθε πιθανής εξεταζομένης κατάστασης. Οι πολυάριθμες στρατηγικές ταξινόμησης μπορούν να τοποθετηθούν σε δύο ομάδες: σε εκείνες, δηλαδή, που εξετάζουν τις μονότιμες εξόδους (single outcomes) και σε εκείνες που εξετάζουν την κατανομή της απόδοσης στη διάρκεια των μελλοντικών γεγονότων (distribution of performance across futures).

Μια τυποποιημένη υποψήφια μέθοδος βασισμένη σε μια μονότιμη έξοδο είναι το mini-max κριτήριο του Savage (Savage's mini-max criterion) [42]. Η πολιτική επιλογή βασισμένη στα mini-max κριτήρια θα προσδιορίσει την πολιτική με το λιγότερο ποσό λύπης για οποιαδήποτε μονότιμη έξοδο. Ο αναλυτής επιλέγει το l έτσι ώστε

$$\min_{y'} \max_{z'} R(l_y, s_z) \tag{14}$$

Ένα τέτοιο κριτήριο, καθώς επίσης και οποιοδήποτε βασισμένο στη μεγιστοποίηση της καλύτερης πολιτικής, εντούτοις, είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο στα μεμονωμένα πιθανά σενάρια. Αυτό μπορεί να είναι προβληματικό για τις βασισμένες στα σενάρια αναλύσεις (scenario-based analyses) που προσπαθούν να συμπεριλάβουν τις εναλλακτικές απόψεις κατά την κατασκευή των συνόλων σεναρίων. Σε πολλές περιπτώσεις ένα απίθανο σενάριο μπορεί να αποδώσει καταστροφικά σε μια καλή εκτέλεση πολιτικής. Ο συνυπολογισμός αυτού του πιθανού σεναρίου στην ανάλυση, επομένως, θα οδηγήσει στην επιλογή μιας εναλλακτικής πολιτικής που θα απέδιδε

λιγότερο καλά στα άλλα μελλοντικά γεγονότα. Άλλα κριτήρια βασισμένα απλώς στις εξόδους παρουσιάζουν παρόμοια παθολογία.

Εναλλακτικά, μπορεί να προτιμηθούν πολιτικές που οδηγούν σε έναν χαμηλό αριθμό πολιτικών που αποδίδουν κακώς. Ο Rosenhead περιγράφει ένα τέτοιο κριτήριο το οποίο ελαχιστοποιεί τον αριθμό των κακών 'πονταρισμάτων' (bad bets) [52]. Σε αυτό το κριτήριο, η απόδοση της πολιτικής είναι λιγότερο ευαίσθητη στην απόδοση σε ένα μεμονωμένο σενάριο. Αντ' αυτού, οι εύρωστες πολιτικές καθορίζονται έτσι ώστε να είναι εκείνες στις οποίες η ικανοποιητική απόδοση (satisfactory performance) επιτυγχάνεται στο μέγιστο αριθμό σεναρίων. Αυτό επισύρει την προσοχή στην έννοια ικανοποιητικές πολιτικές (satisficing policies) [70].

Η ελαχιστοποίηση των κακών 'πονταρισμάτων' μπορεί να καταστεί λειτουργική με μερικούς τρόπους. Κάποιος θα μπορούσε απλά να επιλέξει την πολιτική l που έχει εκείνο το αποτέλεσμα το οποίο υπερβαίνει ένα κατώφλι ή επίπεδο ικανοποίησης α (satisficing level) στο μέγιστο αριθμό καταστάσεων x ή να επιλέξει το l_y τέτοιο ώστε:

$$\max_{y'} \#\left\{x_z \mid f_{y'z} \geq \alpha\right\} \tag{15}$$

όπου $\#$ είναι ο αριθμός των στοιχείων του συνόλου. Θα μπορούσε επίσης να επιλεχθεί η πολιτική εκείνη της οποίας η μέση απόδοση (median performance ή quantile) είναι η μέγιστη

$$\max_{y'} med\left\{f_{y'z} \mid z = 1,\ldots,Z\right\} \tag{16}$$

όπου $med\{x_1,\ldots,x_N\}$ είναι ο στατιστικός μέσος των N τιμών $\{x_1,\ldots,x_N\}$. Με το κριτήριο ευρωστίας, δεν υπάρχει καμία αποδεδειγμένη κυριάρχουσα επιλογή για την ταξινόμηση των στρατηγικών πολιτικής.

3.3.1.3 Προσδιορισμός των Σεναρίων που τονίζουν τις Πολιτικές

3.3.1.3.1 Χαρακτηρισμός Ευπάθειας

Οι αρχικές πολιτικές είναι πιθανό να μην είναι εύρωστες σε όλα τα σενάρια, ούτε ισορροπημένες για τις προτιμήσεις όλων των υπεύθυνων για τη λήψη αποφάσεων ή/και των συμβαλλομένων μερών. Όταν βρίσκονται αντιμέτωποι με έντονα αβέβαιες εκβάσεις, οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων ενδιαφέρονται για αυτό που μπορεί να πάει στραβά. Οι καλοί υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων χρησιμοποιούν αυτήν την γνώση για να αναπτύξουν σχέδια απροόπτων (contingency plans), μειώνοντας κατά συνέπεια την ευπάθεια μιας πολιτικής όταν αυτή δεν αποδίδει καλά.

Η RDM επισύρει την προσοχή σε αυτήν την συμπεριφορά και επισημαίνει τις καταστάσεις στις οποίες οι υποψήφιες εύρωστες πολιτικές δεν αποδίδουν. Η RDM εστιάζει στις ευπάθειες των πολιτικών για δύο σημαντικούς λόγους. Καταρχάς, δεδομένου ότι οι πιθανότητες όλων των πιθανών σεναρίων είναι άγνωστες, οι υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων ενδιαφέρονται συνήθως για το πως μια επιλεγμένη πολιτική θα αποδώσει στις λιγότερο επιθυμητές περιστάσεις. Δεύτερον, ο χαρακτηρισμός των ευπαθειών των υπαρχουσών πολιτικών μπορεί να αποκαλύψει ελπιδοφόρες ενέργειες φραγής (promising hedging actions) που θα αυξήσουν την ευρωστία των πολιτικών. Αυτή η προσέγγιση στηρίζεται στην εργασία του Dewar η οποία υποστηρίζει το σχεδιασμό που βασίζεται στις υποθέσεις (assumption-based planning) [71]. [72]. Ο σχεδιασμός που βασίζεται στις υποθέσεις (Assumption Based Planning) εστιάζει σε μια συστηματική αξιολόγηση των υποθέσεων φορτίου (load-bear assumptions) ή εκείνων των οποίων η αποτυχία θα ασκούσε μεγάλες επιδράσεις στην οργάνωση και τις πιθανές εκδηλώσεις που θα ανάγκαζαν τέτοιες υποθέσεις να αποτύχουν. Στη συνέχεια προσδιορίζονται οι ενέργειες για να μειωθεί η πιθανότητα και οι συνέπειες της αποτυχίας.

Στην RDM, ο αναλυτής, συνεργαζόμενος συχνά με τα συμβαλλόμενα μέρη και τους υπεύθυνους στη λήψη αποφάσεων, χρησιμοποιεί τεχνικές απεικόνισης σε υπολογιστές καθώς και αλγορίθμους αλίευσης δεδομένων για να προσδιορίσει τις ευπάθειες μιας ή μερικών επιλεγμένων πολιτικών που προσδιορίζονται

χρησιμοποιώντας το κριτήριο ευρωστίας και ταξινομώντας τη στρατηγική (όπως περιγράφεται ανωτέρω). Οι χρήσιμοι χαρακτηρισμοί ευπάθειας είναι εκείνοι που μοιάζουν με ένα αφηγηματικό σενάριο (narrative scenario), αφού πρόκειται για συστάδες μελλοντικών γεγονότων που μπορούν να περιγραφούν με τρόπο κατάλληλο στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων και τους συμμετόχους.

Μια βασική διαφορά μεταξύ αυτών των σεναρίων που προσδιορίστηκαν μέσω του χαρακτηρισμού ευπάθειας και εκείνων που αναπτύχθηκαν μέσω των αφηγηματικών ασκήσεων σεναρίου (narrative scenario exercises) [73], [74] που αναπτύσσονται ανεξάρτητα από την πολιτική αξιολόγησης, είναι ότι η πρώτη περίπτωση σεναρίων είναι πιθανότερο να είναι εκείνη η κρισιμότερη στην επιλογή του υπεύθυνου επιλογής της πολιτικής. Παραδείγματος χάριν, εάν ένας ιθύνων θεωρεί ότι κανένα από τα σενάρια που χαρακτηρίζουν τις ευπάθειες δεν είναι πιθανό να συμβεί, μπορεί στη συνέχεια να είναι σίγουρος ότι έχει επιλέξει τη σωστή υποψήφια πολιτική. Εναλλακτικά, εάν ο ιθύνων θεωρεί ότι ένα από τα σενάρια χαρακτηρίζεται από ευπάθειες κατόπιν ο ιθύνων πρέπει ίσως να επιλέξει μια εναλλακτική πολιτική. Η RDM παρέχει έπειτα στον ιθύνοντα τις πληροφορίες για να κάνει αυτήν την επιλογή

Μια ευπάθεια μπορεί να καθοριστεί από ένα σύνολο κανόνων (set of rules) που καθορίζει τις τιμές των εξωγενών παραγόντων που οδηγούν σε χαμηλής απόδοσης εκβάσεις (poor outcomes) για μια συγκεκριμένη πολιτική. Στη συνέχεια παρατίθενται πέντε κριτήρια που πρέπει να ικανοποιηθούν σε μια ανάλυση χαρακτηρισμού ευπάθειας.

1. Οι ευπάθειες πρέπει να καθοριστούν χρησιμοποιώντας σειρές παρακείμενων τιμών των εξωγενών παραμέτρων εισόδου. Οι καταστάσεις που αντιστοιχούν στις ευπάθειες πρέπει να είναι παρόμοιες έτσι ώστε να διευκολύνεται η ερμηνευσιμότητα.
2. Οι ευπάθειες πρέπει να καθοριστούν από ένα όσο το δυνατόν μικρότερο αριθμό εξωγενών παραγόντων. Τα σύνολα κανόνων πρέπει να είναι όσο το δυνατόν απλούστερα για να διευκολύνεται η ερμηνευσιμότητα.
3. Ο αριθμός ευπαθειών πρέπει να είναι μικρός. Ιδανικά, οι σημαντικότερες ευπάθειες μιας πολιτικής θα χαρακτηρίζονταν από έναν μικρό αριθμό συνόλων κανόνων. Εάν υπάρχουν πάρα πολλές ευπάθειες, η χρησιμότητά τους για την ανάπτυξη των στρατηγικών φραγής συμβιβάζεται.

4. Κάθε σύνολο κανόνων πρέπει να καθορίσει μια υψηλή συγκέντρωση καταστάσεων που οδηγούν σε χαμηλή απόδοση. Εάν οι κανόνες είναι πάρα πολύ γενικοί, ο χαρακτηρισμός ευπάθειας θα μπορούσε να συλλάβει πολλές καλές εκβάσεις καθώς επίσης και κακές. Δεν είναι εποικοδομητικό να αναπτυχθούν φραγές ενάντια στην καλή εκτέλεση.
5. Τα σύνολα κανόνων πρέπει συλλογικά να προβάλλουν όλες τις εμφανείς ευπάθειες στο μελλοντικό σύνολο. Είναι επιθυμητό για το σύνολο κανόνων να προσδιορίσει όλες τις πιθανές ευπάθειες.

Τυπικά, ας γίνει η θεώρηση ενός σεναρίου S που είναι μια συστάδα παρακείμενων καταστάσεων (adjacent states) που καθορίζονται από σειρές παραμέτρων εισαγωγής μέσα στο διάστημα καταστάσεων X. Με τον όρο παρακείμενες καταστάσεις χαρακτηρίζονται οι καταστάσεις που περιγράφονται από διανύσματα τυχαίων μεταβλητών που χαρακτηρίζονται από την ευκλείδεια εγγύτητα (Euclidian property of nearness). Οι υπόλοιπες καταστάσεις μπορούν να απεικονιστούν με S_r έτσι ώστε:

$$S \cup S_r = X \tag{17}$$

Μια ευπάθεια θα ήταν ένα τέτοιο σενάριο, S_u, στο οποίο η υποψήφια πολιτική $\tilde{l}$ θα απέδιδε κακώς έναντι της απόδοσης όλων των άλλων καταστάσεων

$$E\left(\tilde{l}_{Sv}\right) << E\left(\tilde{l}_{Sr}\right) \tag{18}$$

Σε μια κλασική ανάλυση RDM, η απόδοση της τρέχουσας πολιτικής (ή της επιλεγμένης εναλλακτικής λύσης) σε άλλες πιθανές μελλοντικές συνθήκες αξιολογείται χρησιμοποιώντας τη διερευνητική ανάλυση, τις τεχνικές αλίευσης δεδομένων ή άλλες στατιστικές μεθόδους.

Η διερευνητική ανάλυση χρησιμοποιείται συνήθως για να προσδιορίσει τα μικρά σύνολα εξωγενών παραγόντων στα οποία οι πολιτικές είναι τρωτές σε χαμηλή απόδοση. Παραδείγματος χάριν, με την εξέταση πολλών διαφορετικών δύο ή τριών διαστάσεων γραφικών αναπαραστάσεων (two- and threedimensional area plots) με τους άξονες να αντιπροσωπεύουν τις τιμές παραμέτρου των επιλεγμένων εξωγενών παραγόντων, οι αναλυτές μπορούν να προσδιορίσουν τις σειρές των παραμέτρων εισόδου που οδηγούν τις πολιτικές καλής εκτέλεσης (good-performing policies) να παρουσιάζουν κακή απόδοση.

Αυτή η μέθοδος είναι επιτυχής στην ικανοποίηση των πρώτων και δεύτερων κριτηρίων των ιδανικών χαρακτηρισμών ευπάθειας (first and second criteria of ideal

vulnerability characterizations) που καθορίζονται ανωτέρω. Η γραφική αναπαράσταση αποκαλύπτει σειρές τιμών που οδηγούν σε εξόδους χαμηλής απόδοσης (κανόνας 1). Οι περιορισμοί της δισδιάστατης απεικόνισης περιορίζουν τους αριθμούς παραμέτρων ανά ευπάθεια που επιδεικνύονται (κανόνας 2). Γενικά, για τα απλά και καλά κατανοητά μοντέλα, είναι αρκετά εύκολο να προσδιοριστούν ή να αποκαλυφθούν οι παράγοντες που καθορίζουν τις περιοχές ευπάθειας.

Δεν υπάρχει καμία εγγύηση, εντούτοις, για το ότι η μέθοδος δε θα απαιτήσει σύνολο κανόνων για να καλύψει όλες τις ευπάθειες (κανόνας 3). Οι περιορισμοί διαστατικότητας (dimensionality constraints) μπορούν επίσης να οδηγήσουν το σύνολο κανόνων να εκταθεί σε ένα ευρύ αριθμό καταστάσεων, συμπεριλαμβανομένων πολλών καταστάσεων που οδηγούν σε καλή εκτέλεση (κανόνας 4). Τέλος, δεν υπάρχει καμία εγγύηση ότι όλες οι περιοχές ευπάθειας θα βρεθούν (κανόνας 5). Στα σύνθετα μοντέλα γίνεται ακόμα πιο δύσκολος ο προσδιορισμός των καλών περιοχών χρησιμοποιώντας τις διερευνητικές μεθόδους μόνο.

3.3.1.3.2 Υπομονετική Μέθοδος Επαγωγικού Κανόνα

Οι Lempert, Groves, Popper και Bankes χρησιμοποιήσαν έναν αλγόριθμο αλίευσης δεδομένων (data-mining algorithm), αποκαλούμενο "Υπομονετική Μέθοδο Επαγωγής Κανόνα" (Patient Rule Induction Method ή PRIM) ο οποίος πρώτα περιγράφτηκε από τον Friedman και τον Fisher για να προσδιορίσει αναλυτικά τις ευπάθειες στις υποψήφιες εύρωστες πολιτικές σε μεγάλα μελλοντικά σύνολα [55], [75]. Ο PRIM αναγνωρίζει n-διαστάσεων πλαίσια (n-dimensional “boxes”) ή υπερκύβους (hypercubes), που καθορίζονται από ένα σύνολο κανόνων που εφαρμόζονται στις παραμέτρους εισόδου που οδηγούν σε συστάδες αποτελεσμάτων που έχουν είτε ιδιαίτερα υψηλές είτε χαμηλές τιμές.

Τα πλαίσια παράγονται από ολόκληρο το σύνολο δεδομένων χρησιμοποιώντας έναν "υπομονετικό" αλγόριθμο (patient algorithm). Ο αλγόριθμος είναι υπομονετικός επειδή αρχίζει με έναν καθορισμένο κανόνα που καλύπτει ολόκληρο το σύνολο δεδομένων και καθορίζει έπειτα τους κανόνες επαυξητικά με διαδοχική αφαίρεση των μικρών πλαισίων (που καθορίζονται από μια σειρά τιμών για

μια απλή παράμετρο εισόδου). Σε κάθε επανάληψη, το απλό υποπλαίσιο που οδηγεί στη μεγαλύτερη μέση αξία του υπόλοιπου πλαισίου αφαιρείται. Αυτή η διαδικασία αποφλοίωσης (peeling procedure) παράγει μια σειρά διαδοχικά μικρότερων πλαισίων κάθε ένα με αυξανόμενο μέσο. Η αποφλοίωση σταματά μόλις το μέγεθος των πλαισίων μειωθεί έως ένα επιλεγμένο εκ των προτέρων κατώτατο όριο που αποτελεί και κατώφλι (pre-selected threshold value). Το μέγεθος της αποφλοίωσης των υποπλαισίων καθορίζεται από την παράμετρο άλφα (alpha). Το ελάχιστο μέγεθος πλαισίου ή υποστήριξη καθορίζεται από την παράμετρο βήτα (beta). Όσο μικρότερα τα υποπλαίσια, τόσο πιο " υπομονετική" είναι η στρατηγική. Πολύ μικρά υποπλαισια μπορούν, εντούτοις, να επηρεαστούν υπερβολικά από το θόρυβο (noise) στα δεδομένα παράγοντας έτσι ένα υποβέλτιστο τελικό πλαίσιο (suboptimal final box). Ο θόρυβος στα δεδομένα (noise within the data) μπορεί επίσης να οδηγήσει σε σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα κατά την αξιολόγηση διαφορετικών τυχαίων επιλεγμένων υποσυνόλων των αρχικών δεδομένων από τον αλγόριθμο PRIM.

Κάθε πλαίσιο μπορεί να χαρακτηριστεί από τη μέση τιμή της συνάρτησής του (mean function value) και ένα συγκεκριμένο επίπεδο υποστήριξης (particular level of support). Αυτές οι παράμετροι συνήθως συσχετίζονται αντίστροφα που σημαίνει ότι ένα πλαίσιο με μια μεγαλύτερη μέση τιμή περιέχει επίσης ένα μικρότερο μέρος συνολικών τιμών στο σύνολο δεδομένων.

Αν και οι Friedman και Fisher υποστηρίζουν ότι ο αλγόριθμος PRIM είναι κατά ένα μεγάλο μέρος σταθερός, οι κανόνες που καθορίζουν το τελικό πλαίσιο επηρεάζονται από τις μεταπαραμέτρους της διαδικασίας (procedure's meta-parameters). Τα προσδιορισμένα πλαίσια είναι επίσης τρωτά στο θόρυβο των δεδομένων. Στην περίπτωση ενός συνόλου σεναρίων που παράγεται από δειγματοληψία πιθανών τιμών εισόδου, ο θόρυβος θα αναφερόταν στις ακραίες και ενδεχομένως αδικαιολόγητες εκβάσεις που προκύπτουν από ιδιαίτερα σπάνιους συνδυασμούς παραμέτρων εισόδου.

Η υλοποίηση του αλγορίθμου PRIM του Friedman και Fisher παράγει πολλαπλές τροχιές αποφλοίωσης (multiple peeling trajectories), όπου κάθε τροχιά παράγεται χρησιμοποιώντας ελαφρώς διαφορετικές τιμές μεταπαραμέτρων και ελαφρώς τροποποιημένα δεδομένα εισόδου. Η γραφική απεικόνιση της μέσης τιμή του πλαισίου σε σχέση με την υποστήριξη για πολλαπλές τιμές τροχιών αποφλοίωσης

παρουσιάζονται στον αναλυτή έτσι ώστε να είναι σε θέση ευκολότερα να αποφασίσει για το τελικό πλαίσιο.

Από την τελική γραφική παράσταση τροχιάς αποφλοίωσης, ο αναλυτής επιλέγει το πλαίσιο με την πιό σωστή ισορροπία υψηλών τιμών μέσης αξίας και υποστήριξης. Το τελικό πλαίσιο που περιλαμβάνει ένα σύνολο κανόνων για τις παραμέτρους εισόδου είναι εύκολα ερμηνεύσιμο ως ευπάθεια. Για μερικές δομές δεδομένων, τα τελικά πλαίσια που παρουσιάζονται στον αναλυτή μπορούν να εστιάσουν στις διακριτές ευπάθειες (distinct vulnerabilities), επιτρέποντας στον αναλυτή να εκτιμήσει την τελική ερμηνευσιμότητα των πλαισίων σε σχέση με τη μέση τιμή και την υποστήριξη. Οι πρόσθετες ευπάθειες προσδιορίζονται από τον PRIM χρησιμοποιώντας το δεδομένο που παραμένων μετά από την αφαίρεση των δεδομένων που περιλαμβάνονται στο προηγούμενο πλαίσιο

Το τελικό πλαίσιο μπορεί συχνά να βελτιωθεί με τη ρύθμιση ορίων μέσω μιας από-κάτω-προς-τα-άνω στρατηγικής συγκόλλησης (bottom-up "pasting" strategy) και με την αφαίρεση των περιττών παραμέτρων. Αρχίζοντας από το τελικό πλαίσιο της διαδικασίας αποφλοίωσης, ο αλγόριθμος συγκόλλησης προσδιορίζει επαναληπτικά μικρά υποπλαίσια που όταν προστίθεται στο κύριο πλαίσιο έχουν ως συνέπεια μια υψηλότερη μέση τιμή. Αυτή η διαδικασία σταματά όταν δεν αυξάνει καμία επέκταση το μέσο όρο.

Τέλος, οι πλεονάζουσες παράμετροι (redundant parameters) μπορούν να εμφανιστούν εάν υπάρχει σημαντική συγγραμμικότητα (colinearity) στα δεδομένα. Ο αναλυτής μπορεί να εφαρμόσει τη γνώση κατηγορίας (class knowledge) για να προσδιορίσει και να αφαιρέσει τις περιττές παραμέτρους. Αυτή η διαδικασία υποβοηθιέται με την ταξινόμηση των κανόνων για κάθε πλαίσιο από τη σημασία τους (κάθε κανόνας περιορίζει μια απλή παράμετρο εισόδου). Ο λιγότερος σημαντικός κανόνας είναι αυτός που όταν αποβάλλεται, οδηγεί στη μικρότερη αλλαγή στη μέση αξία.

Υπάρχουν και άλλες μέθοδοι που παράγουν τέτοιες συστάδες. Ο PRIM φαίνεται ιδιαίτερα χρήσιμος για την RDM επειδή στοχεύει να βελτιστοποιήσει τόσο την ακρίβεια ταξινόμησης των πλαισίων (classification accuracy of the boxes), δηλαδή το ποσοστό των μεγάλων τιμών της συνάρτησης που περιέχονται όσο και την ερμηνευσιμότητα των πλαισίων (interpretability of the boxes) δηλαδή την απλότητα των κανόνων που απαιτούνται για να καθοριστούν τα πλαίσια.

Ο PRIM επίσης ικανοποιεί τους περισσότερους από τους όρους που περιγράφονται στην αρχή αυτού του τμήματος. Συγκεκριμένα:

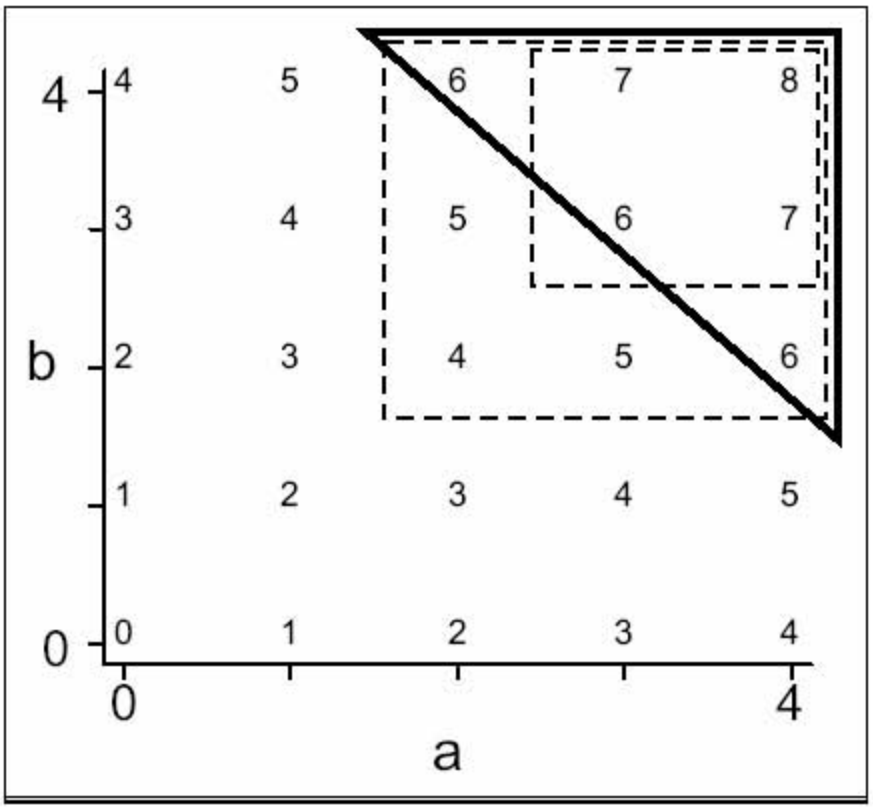
(1) καθορίζει τις ευπάθειες μέσω των κανόνων που περιορίζουν το εύρος των παραμέτρων εισόδου,

(2) επιτρέπει στον κανόνα που τίθεται ως στόχος να περιοριστεί τόσο ώστε να περιλάβει μόνο τους σημαντικότερους,

(3) παράγει πολλαπλούς κανόνες που αντιστοιχούν σε διαφορετικές ευπάθειες και επιτρέπει στον αναλυτή να παράγει έναν κατάλληλο αριθμό κανόνων και

(4) οι αναλυτές είναι σε θέση να επιλέξουν μεταξύ των υποψηφίων κανόνων που εμφανίζουν ποικιλία όσον αφορά την υποστήριξη και τη συγκέντρωση των υψηλών τιμών.

Υπάρχουν, εντούτοις, μερικοί βασικοί περιορισμοί στον αλγόριθμο PRIM. Καταρχάς, τα πλαίσια του PRIM είναι υπερκύβοι που σημαίνει ότι οι πλευρές τους είναι όλες αμοιβαία κάθετες και οι έδρες του είναι παράλληλες. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι υπερκύβοι αυτοί να μην μπορούν επαρκώς να καλύψουν τις περιοχές που είναι μη-κυβικές. Παραδείγματος χάριν, εάν η παραγωγή, z, ορίζεται ως το άθροισμα εισόδων a και b ($z = a + b$), η έξοδος θα λαμβάνει μεγάλη τιμή όταν οι είσοδοι θα λαμβάνουν και αυτές μεγάλες τιμές ενώ η έξοδος θα λαμβάνει μικρή τιμή όταν οι είσοδοι λαμβάνουν επίσης μικρές τιμές. Η έξοδος θα λαμβάνει μεσαίες τιμές (μεταξύ των προηγούμενων μεγάλων και μικρών) όταν οι είσοδοι λαμβάνουν εναλλάξ μικρές και μεγάλες τιμές (Σχήμα 3.7).



Σχήμα 3.7. Γραφική παράσταση *του z* (αριθμοί στο εσωτερικό της γραφικής παράστασης) σε σχέση με τα a και b και τους διαφορετικούς χαρακτηρισμούς των υψηλών περιοχών αξίας. Η τριγωνική περιοχή χαρακτηρίζει βέλτιστα τις περιοχές όπου z>5. Οι τετραγωνικές περιοχές είναι υποβέλτιστοι χαρακτηρισμοί που θα είχε προσδιορίσει ο PRIM.

Εάν ένας αναλυτής ενδιαφέρεται να προσδιορίσει τις εξόδους που λαμβάνουν τιμή μεγαλύτερη του 5, θα επιδίωκε ένα σύνολο κανόνων τέτοιο ώστε να παράγει την άνω τριγωνική περιοχή στο Σχήμα 3.7. Ο PRIM, εντούτοις, θα μπορούσε μόνο να προσδιορίσει μια από τις δύο υποβέλτιστες τετραγωνικές περιοχές όπως αυτές παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.7. Ο PRIM επίσης αποδίδει κακώς για σύνολα δεδομένων που έχουν τις υψηλές τιμές στις γωνίες των διαστημάτων εξόδου (output spaces).

3.3.1.4 Αναπτύσσοντας το Σύνολο Πολιτικής με Φραγές

Η RDM είναι βασισμένη στην προϋπόθεση ότι για αποφάσεις σχετικές με μακροπρόθεσμα ή έντονα αβέβαια προβλήματα πολιτικής, οποιοδήποτε αρχικό

σύνολο πολιτικών για την εκτίμηση δεν θα περιλάβει όλες τις πιθανές πολιτικές. Με τον προσδιορισμό των σεναρίων που χαρακτηρίζουν τις καταστάσεις στις οποίες οι υποψήφιες στρατηγικές δεν αποδίδουν επαρκώς, αναλυτές και υπεύθυνοι για τη λήψη αποφάσεων μπορούν να αναπτύξουν ενέργειες φραγής (hedging actions) ώστε να επεκτείνουν την ανάλυση εξέτασης πιο εύρωστων πολιτικών.

Στο χώρο προγραμματισμού των ενεργειακών πόρων, η έννοια της προσαρμοστικής διαχείρισης (adaptive management) έχει κερδίσει την προτίμηση ως ένα χρήσιμο εργαλείο για την οργάνωση των μεθόδων προγραμματισμού ενέργειας που μπορούν να προστατεύσουν ενάντια στις αβεβαιότητες. Η προσαρμοστική διαχείριση επιδιώκει στο να ενσωματώσει την ευελιξία και την εκμάθηση από στρατηγικές, ενισχύοντας κατά συνέπεια την ανθεκτικότητα των διοικητικών στρατηγικών στο αβέβαιο μέλλον.

Οι ενέργειες φραγής μπορούν να κατασταθούν λειτουργικές σε μια γεννήτρια σεναρίου με την προσθήκη πρόσθετων πολιτικών μοχλών στις υπάρχουσες πολιτικές. Χαρακτηριστικά, το διάστημα πολιτικής στρατηγικής μπορεί να επεκταθεί (από L σε L') μέσω της προσθήκης N νέων πολιτικών μοχλών (policy levers) $\hat{l}$ σε κάθε πολιτική l'

$$l' = \left(l_1, \ldots, l_S, \hat{l}_1, \ldots, \hat{l}_N\right) \in L' \tag{19}$$

Χαρακτηριστικά οι πρόσθετοι πολιτικοί μοχλοί $\hat{l}_n$ καθιστούν τις πολιτικές πιο εύκαμπτες και προσαρμόσιμες. Για παραδείγματα, οι πολιτικοί μοχλοί περιλαμβάνουν την προσθήκη μιας χρονικής διάστασης στη θέσπιση των συστατικών της πολιτικής, που εξετάζουν τις εναλλακτικές θέσεις για τα έργα υποδομής και τους εναλλακτικούς τύπους λύσεων (διαχείριση ζήτησης σε σχέση με την αύξηση της προσφοράς). Εάν η στρατηγική καθορίζει ένα χαρτοφυλάκιο ενεργειών, οι πρόσθετοι πολιτικοί μοχλοί θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύσουν τις νέες ενέργειες.

Επάνω στην επέκταση του διαστήματος πολιτικής με φραγή ενάντια σε ένα ή μερικές από τις ευπάθειες, ο αναλυτής μπορεί έπειτα να επαναξιολογήσει την απόδοση όλων των πολιτικών, συμπεριλαμβανομένων εκείνων με τους νέους πολιτικούς μοχλούς, για να προσδιορίσει μια νέα εύρωστη πολιτική, ή να προσδιορίσει το $\tilde{l}'$ τέτοιο ώστε

$$E\left(\tilde{l}'\right) \geq E\left(l'\right) \text{ για } \forall l' \in L \tag{20}$$

Όπως και πριν, μπορούν να χαρακτηριστούν οι ευπάθειες αυτής της νέας εύρωστης πολιτικής και μπορούν να προσδιοριστούν οι νέες φραγές. Εναλλακτικά, ο αναλυτής μπορεί να καθορίσει ποιες από τις προσδιορισμένες ευπάθειες δεν χρειάζονται ή δεν μπορούν να προστατευθούν. Σε αυτήν την περίπτωση, τα σενάρια που αντιπροσωπεύουν τις βασικές ευπάθειες προσδιορίζονται και χρησιμοποιούνται για να παρουσιάσουν τις βασικές πολιτικές ανταλλαγές στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι σε κάθε επανάληψη, το σύνολο πολιτικής επεκτείνεται για να περιλάβει τις πρόσφατα δημιουργημένες πολιτικές. Αυτό εξασφαλίζει ότι η αναζήτηση των βελτιωμένων πολιτικών δεν συγκλίνει σε ένα τοπικό εύρωστο μέγιστο μέσο στο πολιτικό διάστημα. Η RDM προσφέρει έτσι μια λογική προσέγγιση για την επιλεκτική αξιολόγηση ενός μικρού υποσυνόλου πιθανών πολιτικών που είναι πιθανό να είναι εύρωστες.

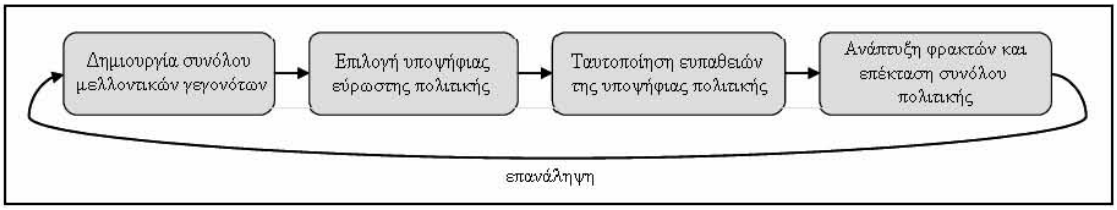
3.3.1.5 Παραμένουσες Αβεβαιότητες στους Υπεύθυνους για τη Λήψη Αποφάσεων

Είναι απίθανο όλες οι εύρωστες πολιτικές να βρεθούν αφού θα υπάρξουν πάντα μερικές καταστάσεις στις οποίες μια εύρωστη υποψήφια πολιτική δε θα αποδίδει ικανοποιητικά. Μέσω της διαδικασίας χαρακτηρισμού των ευπαθειών, η RDM προσδιορίζει τα κρίσιμα σενάρια που, εάν επρόκειτο να συμβούν, θα προέτρεπαν τους υπεύθυνους στη λήψη αποφάσεων αλλαγής της επιλογής των πολιτικών.

Το τελικό βήμα της RDM είναι η παρουσίαση των απεικονίσεων των υπόλοιπων ανταλλαγών της πολιτικής απόδοσης στα προσδιορισμένα σενάρια (εκείνες τις καταστάσεις που προκαλούν τις εύρωστες πολιτικές). Αυτό επιτρέπει στους υπεύθυνους για τη λήψη αποφάσεων (και τους συμμετόχους) να ορίσουν στις κρίσεις τους την πιθανότητα κάθε σεναρίου, παρέχοντας κατά συνέπεια την ποσοτική υποστήριξη απόφασης κατάλληλη για την αξιολόγηση της υπόλοιπης αβεβαιότητας.

3.3.2 Βασικά Βήματα για την Εύρωστη Λήψη Απόφασης

Η ανωτέρω παρουσίαση συνοψίζει τα βασικά επιμέρους συστατικά της εύρωστης λήψης απόφασης. Στη συνέχεια περιγράφονται τα γενικά βήματα μιας ανάλυσης RDM για να διευκολυνθεί η εφαρμογή της μεθοδολογίας σε πολλά διαφορετικά προβλήματα (Σχήμα 3.8).



Σχήμα 3.8. Βασικά βήματα για την Εύρωστη Λήψη Απόφασης.

3.3.2.1 Δημιουργία Συνόλου Μελλοντικών Γεγονότων

Σε πρώτη φάση, ένα μοντέλο αξιολογείται παραμετρικά σε όλες τις αβέβαιες παραμέτρους για κάθε πολιτικό μοχλό. Αυτό παράγει τη μήτρα μελλοντικών συνόλων που παρουσιάζεται στην §3.3.1.1.2. Αυτοί οι υπολογισμοί μπορούν να διευκολυνθούν μέσω της χρήσης διερευνητικού λογισμικού διαμόρφωσης (exploratory modeling software).

3.3.2.2 Επιλογή Υποψήφιας Εύρωστης Πολιτικής

Έπειτα, ο αναλυτής επιλέγει μια υποψήφια πολιτική. Για να γίνει αυτό, η απόδοση κάθε υπό εξέτασης πολιτικής ταξινομείται από την απόδοσή της σε όλες τις μελλοντικές καταστάσεις που περιλαμβάνονται στο σύνολο μελλοντικών γεγονότων. Ένα μέτρο λύπης χρησιμοποιείται συχνά για να ταξινομήσει τις στρατηγικές, δεδομένου ότι η λύπη είναι σύμφωνη με τους στόχους των υπεύθυνων για τη λήψη αποφάσεων για να αποφευχθεί η έκπληξη. Είναι επίσης λογικό να χρησιμοποιηθεί η βέλτιστη στρατηγική ως η καλύτερη στρατηγική εξέτασης υποψηφίων. Οι πιό πρόσφατες επαναλήψεις θα χρησιμοποιήσουν στη συνέχεια ένα κριτήριο ευρωστίας.

3.3.2.3 Προσδιορισμός των Βασικών Σεναρίων Εστιάζοντας στην Υποψήφια Πολιτική

Χρησιμοποιώντας τις απεικονίσεις και τον PRIM ή κάποια άλλη μέθοδο αλίευσης δεδομένων, ο αναλυτής προσδιορίζει και χαρακτηρίζει τις συστάδες των καταστάσεων στις οποίες η εύρωστη υποψήφια πολιτική είναι ιδιαίτερα τρωτή. Το σύνολο μελλοντικών γεγονότων εξετάζεται έπειτα για να προσδιοριστούν οι εναλλακτικές εύρωστες πολιτικές που αποδίδουν καλύτερα σε αυτά τα βασικά σενάρια.

3.3.2.4 Επέκταση της Πολιτικής μέσω των Φραγών και της Επανάληψης

Χρησιμοποιώντας τα βασικά σενάρια ως καθοδήγηση, ο αναλυτής (συχνά με τη συμμετοχή των υπεύθυνων για τη λήψη αποφάσεων, άλλων αναλυτών και των συμμετόχων) αναπτύσσει τις φραγές για τη βελτίωση της κύριας πολιτικής. Εάν καμία κατάλληλη επιλογή φραγής δεν μπορεί να προσδιοριστεί ή οι ευπάθειες της εύρωστης υποψηφίας στρατηγικής κρίνονται αποδεκτές, τότε οι αναλυτές προχωρούν στο επόμενο βήμα. Οι τελικές εύρωστες πολιτικές είναι συχνά διαφορετικές από εκείνες που εξετάζονται αρχικά. Είναι επίσης πιθανό να περιληφθούν προσαρμοστικά στοιχεία (adaptive elements) προκειμένου να είναι εύρωστες.

Εάν προσδιοριστούν οι φραγές, το μοντέλο αναθεωρείται έπειτα για να απεικονίσει το επεκταθέν σύνολο πολιτικής. Ο αναλυτής επιστρέφει έπειτα στο πρώτο βήμα και παράγει ένα σύνολο μελλοντικών γεγονότων. Αυτό το νέο σύνολο μελλοντικών γεγονότων θα περιλάβει μελλοντικά γεγονότα εξεταζόμενα στην προηγούμενη επανάληψη καθώς επίσης και τα νέα που απεικονίζουν το επεκταθέν σύνολο πολιτικής [76].

3.4 Επισκόπηση Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 3ο παρουσιάστηκε, γενικότερα, η μέθοδος αναγνώρισης εύρωστων στρατηγικών για τη διαχείριση ενεργειακών πόρων και ειδικά

παρουσιάστηκε η θεωρία της εύρωστης λήψης απόφασης. Λαμβάνοντας το πακέτο προγραμμάτων (ή μοντέλο) ως είσοδο τα δεδομένα εξόδου του μοντέλου TIMES από το Κεφάλαιο 2ο τα οποία επηρεάζονται από την αβεβαιότητα όπως περιγράφεται στο Κεφάλαιο 1ο, δίνει ως έξοδο με τη βοήθεια της εύρωστης λήψης αποφάσεων που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3ο το σύνολο των πιθανών εύρωστων ενεργειακών πολιτικών.

Παρόλα αυτά, οι εύρωστες ενεργειακές πολιτικές οι οποίες προκύπτουν θα πρέπει γενικά να συγκριθούν και να εξεταστούν παράλληλα με τις υπάρχουσες ενεργειακές υποδομές και τους ενεργειακούς διαδρόμους που πρόκειται να αναπτυχθούν γενικά στην Ευρωπαϊκή Ένωση και παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4ο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΙ ΔΙΑΔΡΟΜΟΙ

4.1 Γενικά

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (EU) εισάγει σήμερα τις μισές από τις ενεργειακές ανάγκες της και είναι γενικά εύκολα προβλέψιμο ότι αυτή η ενεργειακή κατάσταση θα συνεχιστεί και θα αυξηθεί σε 70% μέχρι το 2030. Ενώ η παραγωγή φυσικού αερίου της ΕΕ θα μειωθεί στο μέλλον, η γενικότερη ενεργειακή κατανάλωσή θα διπλασιαστεί στις επόμενες δύο δεκαετίες. Συγχρόνως, λόγω των αυξανόμενων αναγκών στον τομέα των μεταφορών, αναμένεται ότι η κατανάλωση πετρελαίου στην ΕΕ θα συνεχίσει να αυξάνεται. Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ προβλέπεται να αυξηθεί κατά 50% στα επόμενα 25 έτη.

Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, απαιτείται τόσο εσωτερική όσο και εξωτερική δράση στα πλαίσια της ΕΕ. Ως εσωτερική δράση στα πλαίσια της ΕΕ θεωρείται η έμφαση στις νέες ενεργειακές τεχνολογίες. Υποστηριγμένες από ερευνητικά πλαίσια (Research Framework Programme, the Technology Platforms, the Strategic Energy Technology Plan), νέες αλλά και καθαρές ενεργειακές τεχνολογίες έχουν βασικό ρόλο να διαδραματίσουν για ένα βιώσιμο μέλλον.

Όσον αφορά την εξωτερική πλευρά δράσεων, οι ενεργειακοί δίοδοι (ενεργειακοί διάδρομοι ή ενεργειακές διαδρομές) μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών θεωρούνται κρίσιμης σπουδαιότητας. Οι γειτονικές χώρες της ΕΕ είναι σημαντικοί προμηθευτές και χώρες διέλευσης του πετρελαίου και του φυσικού αερίου. Σχετικά με την ηλεκτρική ενέργεια (και ενδεχομένως το υδρογόνο στο

μέλλον), υπάρχει μια σαφής ανάγκη να βελτιωθεί η ικανότητα διασύνδεσης μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών.

De facto, τόσο οι Σκανδιναβικές όσο και οι Ανατολικές και Νότιες γειτονικές χώρες θα διαδραματίσουν έναν αυξανόμενο ρόλο στο μελλοντικό ενεργειακό ανεφοδιασμό. Όπως υπογραμμίζεται από το ερευνητικό πρόγραμμα ENCOURAGED, απαιτούνται τρία στοιχεία για την ολοκλήρωση των αγορών ενέργειας της ΕΕ και των γειτονικών χωρών:

- συμβατές διασυνδέσεις,
- συμβατό πλαίσιο αγοράς,
- συμβατές πολιτικές για το περιβάλλον.

Όταν γίνεται λόγος για μια ολοκληρωμένη ευρωπαϊκή ενεργειακή πολιτική, γίνεται λόγος στην ουσία για μια πολιτική που λαμβάνει υπόψη όλες τις πτυχές της ενέργειας. Η ακολουθούμενη πολιτική είναι τόσο εσωτερικής στόχευσης με εστίαση στην τεχνολογική ανάπτυξη όσο και εξωτερικής στόχευσης με εστίαση στις γειτονικές χώρες της ΕΕ. Οι ισχυροί και έξυπνοι ενεργειακοί διάδρομοι μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών είναι ένα βασικό στοιχείο της ενεργειακής πολιτικής της ΕΕ. Συμβάλλουν στην ασφάλεια ανεφοδιασμού, στην ανταγωνιστικότητα και στην ικανότητα υποστήριξης.

Στόχοι του Κεφαλαίου αυτού, το οποίο θα βασιστεί στα συμπεράσματα του προγράμματος ENCOURAGED (βελτιστοποίηση ενεργειακών διαδρόμων για τις ευρωπαϊκές αγορές του αερίου, της ηλεκτρικής ενέργειας και του υδρογόνου ή Energy corridor for European markets of gas, electricity and hydrogen) είναι:

- Η αξιολόγηση των οικονομικά βέλτιστων ενεργειακών διαδρόμων (ηλεκτρική ενέργεια, αέριο και υδρογόνο) και του σχετικού δικτύου υποδομής για τη σύνδεση της ΕΕ με τις γειτονικές χώρες και τις περιοχές της.
- Ο προσδιορισμός, η ποσοτικοποίηση και η αξιολόγηση των εμποδίων όπως και τα πιθανά οφέλη της οικοδόμησης των βέλτιστων ενεργειακών διαδρόμων που συνδέουν την ΕΕ με τους γείτονές της.
- Παρουσίαση των απαραίτητων πολιτικών μέτρων για την εφαρμογή των συνιστώμενων ενεργειακών διαδρόμων με μια εστίαση στην επένδυση και το γεωπολιτικό πλαίσιο.

4.1.1 Ανάγκη για Διαδρόμους Φυσικού Αερίου

Σύμφωνα με τα δύο σενάρια που χρησιμοποιούνται σε αυτό το Κεφάλαιο, δηλαδή περίπτωση σεναρίου βάσης (base case scenario) και σενάριο χαμηλής ζήτησης (low demand scenario), που είναι βασισμένα στα σενάρια μεταφορών και ενέργειας της Γενικής Διεύθυνσης της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (European Commission DG Transport and Energy scenarios) [77], η ζήτηση για εισαγωγή φυσικού αερίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση, την Ελβετία και τις Βαλκανικές χώρες θα αυξηθεί από 221bcm το 2000 σε 472bcm το 2030 στο σενάριο χαμηλής ζήτησης και στα 652bcm στην περίπτωση του σεναρίου βάσης. Αυτό θα απαιτούσε προμήθειες στις επόμενες δεκαετίες από τους παραδοσιακούς ευρωπαϊκούς προμηθευτές όπως είναι η Νορβηγία, η Ρωσία και η Βόρεια Αφρική, αλλά επίσης και την ανάπτυξη νέων πρόσθετων πόρων ανεφοδιασμού.

Η συνολική δυνατότητα ανεφοδιασμού αερίου που είναι διαθέσιμη στην Ευρώπη έχει αξιολογηθεί ότι φθάνει σε ένα επίπεδο περίπου 450bcm μέχρι το 2010, 640bcm μέχρι το 2020 και 715bcm μέχρι το 2030. Τα παραπάνω επίπεδα πρέπει να συγκριθούν με τα 304bcm που εισήχθησαν το 2005. Η Αλγερία, η Νορβηγία και η Ρωσία αναμένεται να επεκτείνουν τον κυρίαρχο ρόλο τους όσον αφορά στη δυνατότητα ανεφοδιασμού. Επιπλέον, φαίνεται να υπάρχει μια θεαματική πρόοδος της δυνατότητας ανεφοδιασμού από τη Μέση Ανατολή, την περιοχή της Κασπίας, τη Νιγηρία, την Αίγυπτο και τη Λιβύη. Αυτό σημαίνει ότι η Ευρώπη θα πρέπει να αναπτύξει τόσο νέα σωλήνωση όσο και υποδομή LNG (Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο ή ΥΦΑ ή Liquid Natural Gas).

Η αναγνώριση των οικονομικά βέλτιστων διαδρόμων αερίου στην ΕΕ έχει μελετηθεί χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ισορροπίας αγοράς για την Ευρώπη και λαμβάνοντας υπόψη τις προβλέψεις τις σχετικές με τη δυνατότητα ανεφοδιασμού, τις προβλέψεις τις σχετικές με τη ζήτηση, τις ικανότητες μεταφοράς και τις δαπάνες ανεφοδιασμού, καθώς επίσης και τα ζητήματα που συνδέονται με τη συμπεριφορά αγοράς και την ασφάλεια του ανεφοδιασμού. Οι αγωγοί (pipelines) αναμένονται να παραμείνουν τα κυρίαρχα μέσα της μεταφοράς αερίου στην Ευρώπη στις επόμενες δεκαετίες. Στο σενάριο αναφοράς, η ζήτηση επένδυσης είναι 126M€. Αυτό το πλαίσιο ανάπτυξης περιλαμβάνει αγωγούς, εγκαταστάσεις αποθήκευσης καθώς επίσης και σταθμούς ρευστοποίησης και αεριοποίησης. Ο Πίνακας 4.1 συνοψίζει τους

σημαντικότερους διαδρόμους φυσικού αερίου που απαιτούν προτεραιότητα στην οικοδόμηση.

Έργο	Προμηθευτής	Από	Προς	Ικανότητα (bcm)	Επένδυση (M€)	Προγραμματισμένη έναρξη εργασιών
Medgaz	Αλγερία	Hassi R'Mel	Ισπανία	8-10	1300	Τέλος 2008
GALSI	Αλγερία	Hassi R'Mel	Ιταλία	8-10	1200	2009-2010
ITG-IGI	Κασπία	Ελλάδα	Ιταλία	8-10	950	2011
Nord Stream	Ρωσία	Vyborg	Γερμανία	2×27.5	4000	2010
Langeled	Νορβηγία	Ormen Lange	Ηνωμένο Βασίλειο	22-24	1000	2006-2007
Nabucco	Κασπία	Τουρκία σύνορα	Αυστρία	25-30	4600	2010
Συνολική επιπρόσθετη ικανότητα ανεφοδιασμού στην Ευρώπη				98.5-139		

Πίνακας 4.1. Κύρια προγράμματα αγωγών στην Ευρώπη.

Η πραγματοποίηση των προαναφερθέντων προγραμμάτων αγωγών θα μπορούσε να παράσχει πρόσθετα 100bcm/έτος ικανότητα εισαγωγών στην Ευρώπη από την αρχή της επόμενης δεκαετίας. Πρέπει να σημειωθεί, εντούτοις, ότι αυτά τα προγράμματα εστιάζουν κυρίως στη μεταφορά περισσότερου αερίου στην Ευρωπαϊκή αγορά, ενώ λιγότεροι είναι οι πάροχοι που ενδιαφέρονται για την ανάπτυξη των αναγκαίων διασυνδέσεων εντός Ευρώπης. Επιπλέον, τα αναγγελθέντα προγράμματα LNG υπόσχονται μια πρόσθετη ικανότητα εισαγωγών περίπου 100bcm/έτος από την αρχή της επόμενης δεκαετίας.

Ο αριθμός των προτεινόμενων προγραμμάτων θα μπορούσε να υποστηρίξει την ιδέα της μη ύπαρξης κανενός προβλήματος επένδυσης στη διεθνή υποδομή αερίου στην Ευρώπη. Πρέπει να υπογραμμιστεί, εντούτοις, ότι πολλά από αυτά τα προγράμματα έχουν αναγγελθεί εδώ και αρκετό διάστημα και ότι πολλά από αυτά τα προγράμματα απαιτούν μακροχρόνιες χρονικές ανοχές για την ολοκλήρωση τους.

Τελικά, το συμπέρασμα από τα παραπάνω είναι ότι δε θα ευδοκιμήσουν όλα τα προγράμματα και είναι επομένως απαραίτητο να εξασφαλιστεί τουλάχιστον ο απαραίτητος πρόσθετος ανεφοδιασμός σε εύθετο χρόνο.

Στην καρδιά της οικονομικής επένδυσης, το ζήτημα είναι η σχέση μεταξύ της αβεβαιότητας (uncertainty), του κόστους των επενδύσεων (cost of investments) και της αποδοτικότητας (profitability). Τα παραδείγματα που παρουσιάζονται δείχνουν ότι μερικά προγράμματα παραμένουν βιώσιμα ενώ άλλα είναι περισσότερο δύσκολο να πραγματοποιηθούν και μπορεί να χρειαστούν πολιτική ή ρυθμιστική υποστήριξη.

- Ο Nord Stream αποτελεί ένα μεγάλο παράκτιο αγωγό (2×27.5bcm) στη θάλασσα της Βαλτικής, που συνδέει άμεσα τη Ρωσία με τη Γερμανία. Ενώ η EON, η Wintershall και η Gasunie είναι επίσημοι συνεργάτες, ο αγωγός σχεδιάστηκε και αποφασίστηκε χωρίς οποιαδήποτε συμφωνία ανεφοδιασμού με τους εισαγωγείς. Προωθούμενος από τη Gazprom, στοχεύει στην παράκαμψη των χωρών διέλευσης όπως η Ουκρανία και η Λευκορωσία. Υποστηριγμένος από μερικές μεγάλες εταιρίες, αυτό το έργο δεν φαίνεται να αντιμετωπίζει σημαντικά εμπόδια στην υλοποίησή του. Ως νότιο παρακλάδι του αγωγού North Stream είναι ο αγωγός South Stream ο οποίος ενώνει Ρωσία και Ελλάδα. Μπορεί επίσης να θεωρηθεί και ο αγωγός South Stream ως σημαντικός προς ανάλυση αγωγός παρόλα αυτά λόγω της πρόσφατης συμφωνίας του αναμένονται εξελίξεις σε αυτό το ζήτημα.
- Το πρόγραμμα Medgaz (8bcm) από την Αλγερία στην Ισπανία προτάθηκε αρχικά από τη CEPSA και τη Sonatrach για να εξασφαλίσει τον ανεφοδιασμό αερίου της Ισπανίας. Γρήγορα, διάφοροι συνεργάτες εισήγαγαν το πρόγραμμα, συμπεριλαμβανομένων των κύριων ισπανικών επιχειρήσεων ενέργειας καθώς επίσης και της Total, της GDF και της BP. Στην πραγματικότητα, η Medgaz στοχεύει επίσης στη Γαλλία και την ευρωπαϊκή αγορά. Προωθημένη από τους εισαγωγείς, η απόφαση επένδυσης έχει ληφθεί στο τέλος του 2006 και ο αγωγός θα είναι λειτουργικός από το 2009.
- Ο αγωγός Galsi (8 έως 10bcm) από την Αλγερία στην Ιταλία μέσω της Σαρδηνίας, είναι μια κοινή πρωτοβουλία της Sonatrach, της Enel, της Edison και διάφορων άλλων συνεργατών, διατηρώντας ο καθένας από ένα μικρό μέρος της ικανότητας του αγωγού. Σε αντίθεση με τον Nord Stream, ο Galsi

δεν απολαμβάνει της υποστήριξης ενός ή δύο μεγάλων εισαγωγέων που θα μπορούσαν να παρέχουν εγγυήσεις για τη μελλοντική ρυθμαπόδοση.

- Το πρόγραμμα Nabucco είναι ένας μεγάλος αγωγός (25-30bcm) που στοχεύει άμεσα να συνδέσει τους πόρους φυσικού αερίου της Κασπίας και της Μέσης Ανατολής με τις αγορές αερίου της ΕΕ. Ενώ τα πιθανά οφέλη αυτού του προγράμματος είναι πολύ σημαντικά από την άποψη της διαφοροποίησης του ανεφοδιασμού και της υποκίνησης ανταγωνισμού, ο αγωγός αυτός παραμένει δύσκολος στην ολοκλήρωσή του λόγω της πολυπλοκότητας των ζητημάτων και των δυσκολιών που παρουσιάζονται λόγω της διαδρομής διέλευσης αλλά και στο συντονισμό των επενδύσεων στην υποδομή παραγωγής και διέλευσης.
- Μερικά έργα αεριοποίησης LNG προωθούνται μάλλον εύκολα όταν υποστηρίζονται από τους κατέχοντες υπεύθυνη θέση ή τους μεγάλους παραγωγούς (όπως ο σταθμός Fos που αναπτύσσεται από τη Gaz de France, και άλλοι σταθμοί σε Ισπανία και Ηνωμένο Βασίλειο), ενώ έργα αεριοποίησης που προάγονται από νεοεισερχόμενους (όπως ο σταθμός του Πρίντεζι που αναπτύσσεται από την British Gas καθώς επίσης και διάφοροι άλλοι σταθμοί στην Ιταλία) καθυστερούν λόγω των διοικητικών εμποδίων και των εμπορικών κινδύνων.

Στην πραγματικότητα, το επίπεδο των εμποδίων στην επένδυση σε αυτά τα υψηλής έντασης κεφαλαίου έργα υποδομής φυσικού αερίου μπορεί να αφορά την έκθεση αυτών των επενδύσεων σε τρεις διαφορετικούς τύπους κινδύνων που είναι:

- ο κίνδυνος αγοράς (αβεβαιότητα στην τιμή και τον όγκο),
- ο ρυθμιστικός κίνδυνος (αντίκτυπος των κανόνων και του κανονισμού αγοράς) και
- ο πολιτικός κίνδυνος (αβεβαιότητα σχετικά με τις διεθνείς σχέσεις και τη συμμετοχή διάφορων καθεστώτων διέλευσης).

Αυτοί οι κίνδυνοι επηρεάζουν την αναμενόμενη κερδοφορία και επομένως την απόφαση για την επένδυση. Η μεγαλύτερη δυσκολία εμφανίζεται στα έργα μεσοπορείας (midstream promoted projects) που περιλαμβάνουν τόσο αγωγούς όσο και εγκαταστάσεις LNG οι οποίες προορίζονται για τη διείσδυση στις αγορές.

Επομένως, για να προωθήσει την επένδυση στις ενεργειακές διόδους, η δράση των φορέων χάραξης πολιτικής πρέπει ειδικότερα να εστιάσει στη μείωση των προαναφερθέντων κινδύνων. Μεταξύ των προτεινόμενων επιλογών είναι η

ολοκλήρωση της εσωτερικής αγοράς, η άρση των εμποδίων στην είσοδο των μη-κατεχόντων υπεύθυνη θέση, η έγκριση των ρυθμίσεων κοινοπραξίας, η άδεια των μακροπρόθεσμων συμβάσεων με παροχές ανοικτών διαδικασιών εποχής, η ανάπτυξη η βασισμένη στην αγορά διαδικασιών διανομής για την επιφύλαξη και τη χρήση ικανότητας μεταφοράς αερίου. Οι ρυθμιστικοί κίνδυνοι θα μπορούσαν να μειωθούν με την ενίσχυση της προβλεψιμότητας και της διαφάνειας του κανονισμού. Οι διεθνείς πολιτικοί κίνδυνοι θα μπορούσαν να μειωθούν από την αφαίρεση των τοπικών εμποδίων στα προγράμματα, την προώθηση των υπαρχόντων οργανισμών τακτοποίησης διαφωνιών και την αύξηση του διαλόγου και της εμπιστοσύνης μεταξύ των χωρών που συμμετέχουν στη μεταφορά του αερίου από τους βασικούς προμηθευτές έξω από την ΕΕ στις αγορές της ΕΕ.

4.1.2 Ανάγκη για Διαδρόμους Ηλεκτρικής Ενέργειας

Προκειμένου να προσδιοριστούν και να αξιολογηθούν οι οικονομικοί βέλτιστοι διάδρομοι ηλεκτρικής ενέργειας που συνδέουν την ΕΕ με τις γειτονικές της χώρες μακροπρόθεσμα, αρχικά πρέπει να υπολογιστούν οι δαπάνες των πιθανών προγραμμάτων ενίσχυσης και σε δεύτερη φάση να υπολογιστούν με τη χρήση βελτιστοποιημένου μοντέλου πολλών περιοχών τα οφέλη κάθε πρόσθετης διασύνδεσης συστημάτων. Τα οφέλη των ενισχύσεων μεταφοράς υπολογίστηκαν βάσει της υποκατάστασης της επίπτωσης της ακριβής παραγωγής με φτηνότερη και περιέλαβαν την οικονομική επίδραση της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Τα οφέλη από την άποψη της αξιοπιστίας και της επάρκειας συστημάτων δε λήφθηκαν υπόψη. Τα οφέλη από την άποψη του αυξανόμενου ανταγωνισμού μεταξύ των συμμετεχόντων της αγοράς, που θα μπορούσαν να είναι σημαντικά σε μερικές περιπτώσεις, επίσης δεν εξετάζονται. Τα οφέλη από την άποψη της βελτιωμένης ασφάλειας του ανεφοδιασμού για τις χώρες της ΕΕ, η διαφοροποίηση της εξαγωγής και η δημιουργία της εσωτερικής αξίας για τις γειτονικές χώρες (που είναι εξαγωγείς του φυσικού αερίου) δεν εξετάζεται άμεσα, επειδή η μετάφραση αυτών των εννοιών σε νομισματική αξία είναι πολύ δύσκολη και αμφισβητήσιμη. Επομένως, η ανάπτυξη της διασύνδεσης ως αποτέλεσμα της

ανάλυσης κόστος-οφέλους (cost-benefit analysis) θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι βασίζεται σε ένα σχετικά συντηρητικό υπολογισμό ωφελειών.

Δύο σύνολα μοντέλων προσομοίωσης εκτελέστηκαν για να αξιολογήσουν και να βελτιστοποιήσουν τις ικανότητες μεταφοράς μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών:

- Μια μεσοπρόθεσμη αξιολόγηση (έτος 2015), που λαμβάνει υπόψη την παρουσία υπαρχουσών σημαντικών εσωτερικών δυσχερειών στο σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ (π.χ. Ισπανία–Γαλλία, τα Ιταλικά σύνορα, Βέλγιο–Γαλλία, κ.λπ.), το οποίο επηρεάζει την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία ανταλλάσσεται μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών.
- Μια μακροπρόθεσμη αξιολόγηση (έτος 2030). Για αυτό το έτος υποτίθεται ότι η ανάπτυξη της εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ολοκληρώνεται και ότι το δίκτυο μεταφοράς δεν παρακωλύεται από σημαντική συμφόρηση στις διασυνοριακές διασυνδέσεις μεταξύ των χωρών στην Κεντρική Ευρώπη.

Η αναγνώριση και αξιολόγηση της ανάγκης για τους πιθανούς διαδρόμους διασύνδεσης και της ικανότητας μεταξύ της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των γειτονικών χωρών μέχρι το 2030 έδωσε τα ακόλουθα συμπεράσματα. Μια σημαντική αύξηση ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας αναμένεται μεταξύ των κύριων συνόρων της ΕΕ (νότια σύνορα με Βόρεια Αφρική, νοτιοανατολικά σύνορα με Τουρκία, ανατολή με IPS/UPS σύστημα). Υπολογίζεται αυτή η ανταλλαγή να κυμανθεί από 110TWh μέχρι 180TWh (από 10MTOE σε 15MTOE), τα οποία αντιπροσωπεύουν ακόμα ένα σχετικά μικρό ποσοστό της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ και τις γειτονικές περιοχές δηλαδή το 2-4% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ των 27 κρατών (περίπου 4700TWh το 2030) ή το 1-2% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και των σαράντα τεσσάρων χωρών που διερευνώνται στη μελέτη (8000TWh το 2030).

Όσον αφορά τη βέλτιστη ανάπτυξη της ικανότητας διασύνδεσης μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών, τα κύρια αποτελέσματα της μελέτης μπορούν να συνοψιστούν στις παρακάτω υποπαραγράφους.

4.1.2.1 Ανάγκη Νέας Διασυνοριακής Ικανότητας μεταξύ της Τουρκίας και της Νοτιοανατολικής Ευρώπης

Προβλέπονται μεγάλες εξαγωγές από την Τουρκία (χρησιμοποίηση του 85%-100% της ικανότητας). Μια 2000MW βραχυπρόθεσμη ικανότητα μεταφοράς αναμένεται για τα επόμενα έτη, ενώ αυτήν την περίοδο η διασύνδεση είναι εκτός λειτουργίας λόγω τεχνικών λόγων. Μια αύξηση της ικανότητας μεταφοράς μέχρι 5000MW είναι οικονομικά εφικτή μακροπρόθεσμα, χρησιμοποιώντας εναέριες γραμμές εναλλασσόμενου ρεύματος (εναλλασσόμενο ρεύμα), των οποίων οι εκτιμώμενες δαπάνες είναι 70M€ για κάθε σύνδεση.

4.1.2.2 Ανάγκη Νέας Ικανότητας Διασύνδεσης μεταξύ της Βόρειας Αφρικής και της Νότιας Ευρώπης

Παρά τις υψηλές δαπάνες επένδυσης (400M€ για μια υποβρύχια σύνδεση 1000MW), σημαντικά οφέλη αναμένονται με τη βοήθεια των μεγάλων εξαγωγών ηλεκτρικής ενέργειας από τη Βόρεια Αφρική όπως προβλέπεται αν θεωρηθεί ένα ποσοστό χρησιμοποίησης 90%-100% της διαθέσιμης ικανότητας. Τα οφέλη θα μπορούσαν να δικαιολογήσουν μια αύξηση της ικανότητας διασύνδεσης μέχρι περίπου 5000MW το 2030 (η ικανότητα τρέχουσας μεταφοράς είναι 800MW). Οι αναμενόμενες μελλοντικές βέλτιστες οικονομικές ανταλλαγές της ηλεκτρικής ενέργειας με την Αφρική θα πραγματοποιηθούν εάν τα σχέδια επένδυσης για την παραγωγή στη Βόρεια Αφρική τελεσφορήσουν (σχέδια +300% στην περίοδο 2005-2030) και εάν οι υγιείς λειτουργικοί μηχανισμοί για τις διασυνοριακές συναλλαγές (π.χ. επέκταση των ισχυόντων κανονισμών και των πολιτικών της ΕΕ) οργανωθούν και πραγματοποιηθούν.

4.1.2.3 Προσδοκία Αμφίδρομου Εμπορίου Ηλεκτρικής Ενέργειας στα Σύνορα με την Ανατολική Ευρώπη

Χάρη στις υπάρχουσες γραμμές, μια ικανότητα μεταφοράς 5100MW είναι θεωρητικά εφικτή τόσο στα σύνορα Ουκρανίας με Λευκορωσία (UCTE και Ρωσική Ομοσπονδία) όσο και στα σύνορα Ουκρανίας και Λευκορωσίας, ακόμα κι αν η πρώτη γραμμή δε χρησιμοποιείται πλήρως σήμερα λόγω των μη σύγχρονων συστημάτων και της επακόλουθης λειτουργίας νησίδων (island mode). Η ευκαιρία της διασύνδεσης των συστημάτων των IPS/UPS (η IPS/UPS αποτελείται από ανεξάρτητα συστήματα ισχύος των κρατών της Βαλτικής που είναι η Λετονία, η Λιθουανία και η Εσθονία, της Αρμενίας, του Αζερμπαϊτζάν, της Λευκορωσίας, της Γεωργίας, της Μολδαβίας, του Καζακστάν, του Κιργιζιστάν, του Τατζικιστάν, της Ουκρανίας και του Ουζμπεκιστάν και του συστήματος ισχύος της Ρωσίας. Η NORDEL που είναι το σύστημα NORDic ELectricity περιλαμβάνει της επιχειρήσεις ηλεκτρισμού με τα συστήματα μεταφοράς των χωρών της Δανίας, της Φινλανδία, της Ισλανδία, της Νορβηγία και της Σουηδίας) και των UCTE (UCTE είναι η ένωση για το συντονισμό της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας, η ένωση των επιχειρήσεων συστημάτων μεταφοράς στην ηπειρωτική Ευρώπη) και η χρησιμοποίηση των υπαρχουσών ικανοτήτων υπογραμμίζεται από το εμπόριο (40TWh/έτος) και στις δύο κατευθύνσεις που προβλέπεται από τη μελέτη. Ένα παρόμοιο αποτέλεσμα επιτυγχάνεται τόσο για τα σύνορα της Ρωσικής Ομοσπονδίας με τις χώρες της Βαλτικής όσο και για τα σύνορα Φινλανδίας και Ρωσικής Ομοσπονδίας με 30TWh/έτος ανταλλαγών.

Η διπλής κατευθυντικότητας αναμενόμενο εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται από αξιοπρόσεκτες εποχιακές παραλλαγές. Ειδικά την κρύα περίοδο, οι UCTE και οι NORDEL αναμένονται να παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στο σύστημα IPS/UPS, που συμβάλλει στην αντιμετώπιση των μέγιστων φορτίων στη Ρωσική Ομοσπονδία και την Ουκρανία και που μειώνει την ανάγκη της ηλεκτρικής παραγωγής από τις ξεπερασμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας. Αυτό το απροσδόκητο φαινόμενο επιβάλλει την ανάγκη και τη σημασία της επέκτασης της ικανότητας διασύνδεσης επίσης και με τις γειτονικές χώρες. Εντούτοις οι αβεβαιότητες για τις Ρωσικές εξελίξεις, π.χ. το επίπεδο τιμών καυσίμων, το μέλλον της πυρηνικής ενέργειας και η τρέχουσα έλλειψη επενδύσεων στο ρωσικό τομέα της

παραγωγής, είναι σημαντικές και είναι δύσκολο να προβλεφθεί η πορεία αυτών των αβεβαιοτήτων στο μέλλον.

Οι συνολικές επενδύσεις που απαιτούνται για την πραγματοποίηση αυτών των οικονομικά βέλτιστων υποδομών υπολογίζονται ως εξής:

- τουλάχιστον 300Μ€ για να πραγματοποιηθούν τέσσερις νέες γραμμές εναλλασσόμενων ρευμάτων (AC) μεταξύ της Τουρκίας και της ΕΕ,
- περίπου 2000Μ€ για να πραγματοποιηθούν τέσσερις υποβρύχιες άμεσες τρέχουσες (HVDC) συνδέσεις υψηλής τάσης μεταξύ της Βόρειας Αφρικής και της νότιας Ευρώπης (εκτίμηση: 1000MW ανά καλώδιο),
- περίπου 200Μ€ για να πραγματοποιηθεί μια υποβρύχια σύνδεση HVDC που θα συνδέει την Τουρκία και την Κύπρο.

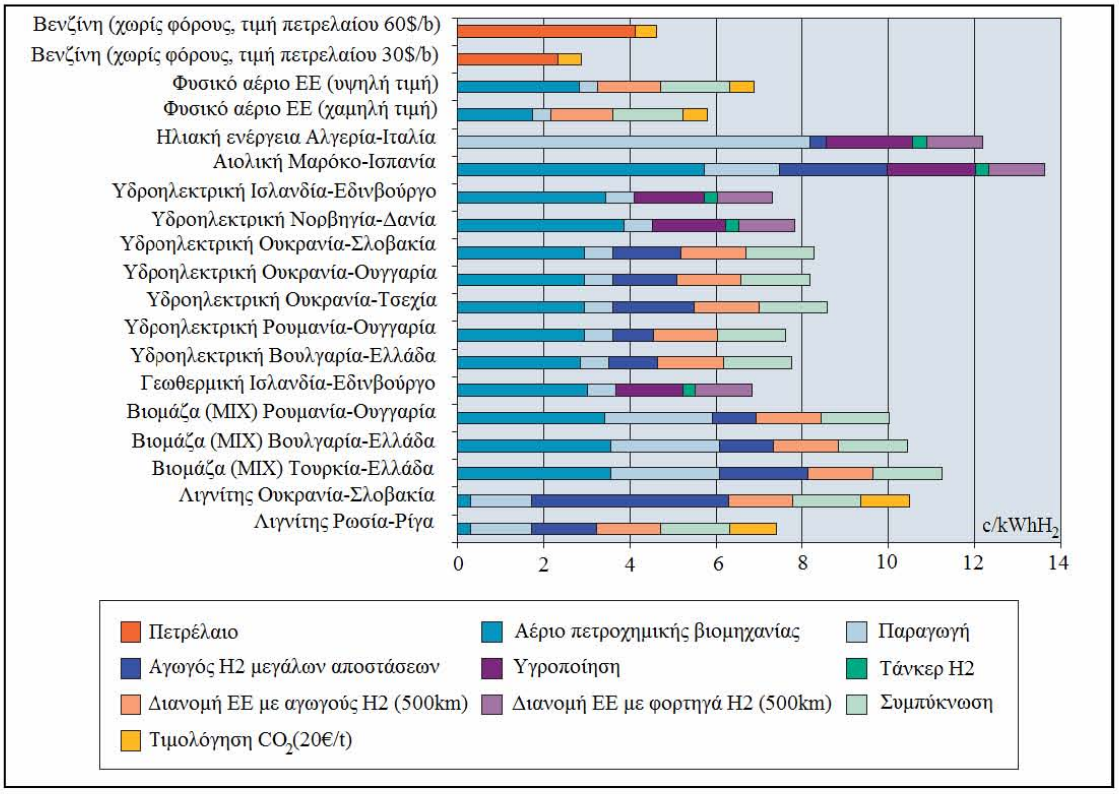
Οι επενδύσεις που απαιτούνται για μια μελλοντική αρχική διασύνδεση μεταξύ των χωρών της Ανατολικής Ευρώπης (ευρωπαϊκό μέρος της Ρωσικής ομοσπονδίας, της Λευκορωσίας, της Ουκρανίας και της Μολδαβίας) και του συστήματος UCTE δεν μπορεί να ποσοτικοποιηθεί επειδή αυτό το σχήμα ανάπτυξης εξαρτάται έντονα από τις τεχνικές λύσεις που θα υιοθετηθούν.

4.1.3 Ανάγκη για Διαδρόμους Υδρογόνου

Τα σημερινά συστήματα ενέργειας και μεταφορών είναι κυρίως βασισμένα στους ενεργειακούς μεταφορείς φυσικών καυσίμων (fossil energy carriers), οι οποίοι πρέπει να αλλαχτούν στο μέλλον για να γίνουν πιο βιώσιμοι. Οι ανησυχίες σχετικά με την ασφάλεια του ενεργειακού ανεφοδιασμού, την αλλαγή του κλίματος, την τοπική ατμοσφαιρική ρύπανση και την αυξανόμενη τιμή των ενεργειακών υπηρεσιών ασκούν αυξανόμενη επίδραση στις πολιτικές αποφάσεις σε όλο τον κόσμο. Όλο και περισσότερο, το υδρογόνο θεωρείται ως το καύσιμο που μπορεί να προσφέρει μια σειρά ωφελειών με σεβασμό στο περιβάλλον αφού πρόκειται για μια μορφή καθαρής ενέργειας, εάν παράγεται από καθαρές πηγές. Έτσι δημιουργώντας μια μεγάλη αγορά για υδρογόνο ως μια ενεργειακή εναλλακτική, το υδρογόνο θα μπορούσε να προσφέρει μια αποτελεσματική λύση για την κάλυψη τόσο των στόχων του ελέγχου εκπομπής όσο και της ασφάλειας του ενεργειακού ανεφοδιασμού. Το υδρογόνο, σχεδόν, δεν παρουσιάζει καθόλου εκπομπές στο σημείο τελικής χρήσης, είναι

δευτεροβάθμιος ενεργειακός μεταφορέας που μπορεί να ληφθεί από οποιαδήποτε πηγή αρχικής ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετικές εφαρμογές (κινητές, στάσιμες και φορητές εφαρμογές). Αλλά δεδομένου ότι οι εσωτερικοί ενεργειακοί πόροι της ΕΕ είναι περιορισμένοι, το ερώτημα που μπορεί να τεθεί είναι εάν είναι μια οικονομικά εφικτή καθώς επίσης και βιώσιμη επιλογή να παραχθεί το υδρογόνο έξω από την ΕΕ και να εισαχθεί διανύοντας μεγάλες αποστάσεις μέχρι τους καταναλωτές της ΕΕ.

Για να απαντηθεί αυτή η ερώτηση, πρέπει να προβλεφθεί η πιθανή ζήτηση υδρογόνου στην ΕΕ μακροπρόθεσμα. Έπειτα, πρέπει να εντοπιστούν τα πιθανά φτηνότερα κέντρα παραγωγής υδρογόνου συμπεριλαμβανομένων των δαπανών μεταφοράς του υδρογόνου. Στο επόμενο βήμα, οι δαπάνες των επιλεγμένων διαβάσεων υδρογόνου συγκρίνονται με το κόστος μεταφοράς των συμβατικών καυσίμων όπως είναι η βενζίνη, κάτι το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1.



Σχήμα 4.1. Σύγκριση του υδρογόνου με τις συμβατικές δαπάνες ανεφοδιασμού καυσίμων στις αγορές της ΕΕ το 2040.

Στο Σχήμα 4.1 δεν έχουν συμπεριληφθεί οι φόροι και τα αντισταθμιστικά οφέλη προκειμένου να υπάρξει μια δίκαιη βάση για τη σύγκριση. Για αυτό το λόγο, μπορεί

λανθασμένα να υποτεθεί ότι οι φόροι και οι αποδοχές των διαφορετικών καυσίμων είναι παρόμοιοι και επομένως η απόφαση δεν είναι σχετική.

Για την κατάλληλη σύγκριση, προστίθενται οι δαπάνες της διανομής υδρογόνου στην Ευρώπη και της συμπίεσης στο σταθμό. Επιπλέον, τα αρνητικά αποτελέσματα των εκπομπών άνθρακα συμπεριλαμβάνονται με νομισματικούς όρους για βασισμένες σε φυσικά καύσιμα πορείες με μια υπόθεση δαπανών 20€/tCO_2. Αυτή τη στιγμή, ο τομέας των μεταφορών δεν καλύπτεται από το σχέδιο Ευρωπαϊκών εκπομπών, αλλά η μελλοντική ένταξή του τομέα των μεταφορών σε αυτό το σχέδιο ή σε άλλα πολιτικά όργανα κλίματος δεν μπορεί να αποκλειστεί. Επιπλέον, η ACEA (Ευρωπαική Ένωση κατασκευαστών Αυτοκινήτου ή European Automotive Manufacturers Association) έχει αναλάβει μια εθελοντική δέσμευση απέναντι στην Ευρωπαϊκή Επιτροπή να μειώσει τις εκπομπές του CO_2 από τα καύσιμα μεταφορών.

Εν περιλήψει και βάσει της ανάλυσης των δυνατοτήτων τόσο της οικονομικής δυνατότητας όσο και της πραγματοποίησης των διαφορετικών επιλογών-διαδρόμων υδρογόνου με πηγές στις γειτονικές χώρες, συμπεριλαμβανομένης μιας σύγκρισης δαπανών με την εσωτερική παραγωγή υδρογόνου EU25 (ως συγκριτική μέτρηση επιδόσεων), μπορούν να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

- Οι διαδρομές ανεφοδιασμού από εισαγωγή υδρογόνου είναι ιδιαίτερα ελκυστικές μακροπρόθεσμα, αφού μπορούν να συμβάλουν σημαντικά στους πολιτικούς στόχους της ΕΕ για ενεργειακό ανεφοδιασμό και τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου εάν η ικανότητα υποστήριξης είναι ο βασικός στόχος.
- Η εισαγωγή του ανανεώσιμου υδρογόνου θα μπορούσε να αρχίσει αρχικά από μερικούς επιλεγμένους διαδρόμους μετά από την εισαγωγή του υδρογόνου ως καύσιμο μεταφορών, που αναμένεται από το 2015 και μετά. Οι αρχικές πηγές θα μπορούσαν να είναι η Νορβηγία και η Ισλανδία.
- Όταν υπάρξει μια σημαντική ζήτηση υδρογόνου (ως καύσιμο μεταφορών), όταν δηλαδή τα οχήματα υδρογόνου θα γίνουν περισσότερα από το 10% στο συνολικό απόθεμα οχημάτων (κάτι το οποίο αναμένεται περίπου το 2030 με 2040), είναι δυνατό ένα ευρύ χαρτοφυλάκιο ανεφοδιασμού.
- Ακόμα και όταν χρησιμοποιείται το ανανεώσιμο αέριο πετροχημικής βιομηχανίας, το κόστος ανεφοδιασμού (χωρίς φόρο) πολλών διαβάσεων είναι σχεδόν διπλάσιο του τρέχοντος κόστους της βενζίνης.

- Λόγω της σχετικής επιρροής των εξόδων μεταφοράς στα οικονομικά των διαδρόμων υδρογόνου, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη μόνο οι μεγάλης κλίμακας πηγές παραγωγής προκειμένου να χρησιμοποιηθούν οι οικονομίες κλίμακας για να μειωθούν οι σχετικά υψηλές σημερινές δαπάνες.
- Από όλες τις επιλογές διαδρόμων που αναλύονται, το υδρογόνο από την υδροηλεκτρική ή γεωθερμική ενέργεια από την Ισλανδία προσφέρει τη μικρότερη τιμή και τα χαμηλότερα εμπόδια όσον αφορά τον ανταγωνισμό εναλλακτικής χρήσης του. Ακολουθεί η εισαγωγή υδρογόνου που παράγεται από υδροηλεκτρική ενέργεια από τη Νορβηγία και τη Ρουμανία. Οι διάδρομοι αυτοί είναι ελπιδοφόροι αλλά έχουν ορισμένους περιορισμούς, π.χ. υδρογόνο από αιολική ενέργεια και ηλιακή ενέργεια στη Βόρεια Αφρική (υψηλή δυνατότητα, αλλά και σχετικό υψηλό κόστος) και υδρογόνο βασισμένο στη βιομάζα από τη Ρουμανία, τη Βουλγαρία και την Τουρκία. Είναι συγκριτικά φτηνό, αλλά αυτές οι επιλογές συναντούν διάφορες εναλλακτικές εφαρμογές πολύ ανταγωνιστικές.

Πρέπει να σημειωθεί ότι πολλές αβεβαιότητες περιβάλλουν τα κύρια συμπεράσματα σχετικά με το οικονομικό, το εφικτό και τις υποθέσεις που κρύβονται κάτω από τους αξιοσύστατους διαδρόμους για τους τρεις τύπους ενεργειακών μεταφορέων. Εντούτοις οι προτεινόμενοι ενεργειακοί διάδρομοι με τις γειτονικές χώρες μπορούν να θεωρηθούν σχετικά εύρωστες επιλογές. Ο βαθμός ευρωστίας των επιλογών αυτών αποτελεί και το αντικείμενο της περαιτέρω μελέτης.

4.1.4 Υπόβαθρο της Μελέτης

Σε διάφορες επίσημες δημοσιεύσεις της, η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει υπογραμμίσει επανειλημμένα το ρόλος της ως δύναμη σταθερότητας και εγγύηση βιώσιμης ανάπτυξης στην Ευρώπη. Επίσης, έχει διατυπώσει ως βασικούς στόχους της ενεργειακής πολιτικής τους εξής:

- ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού ανεφοδιασμού,
- ενίσχυση της εσωτερικής αγοράς ενέργειας,
- ανάπτυξη των βιώσιμων αγορών ενέργειας.

Σύμφωνα με πολλές μελέτες που έγιναν για λογαριασμό της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, για τη σύσταση ενεργειακών σεναρίων και για την Πράσινη Βίβλος [78], η εξάρτηση της ΕΕ27 σε προμήθειες αερίου από τις γειτονικές χώρες αναμένεται να αυξηθεί από 40% σε 70% ή και περισσότερο μέχρι το 2030. Συνεπώς ο ρόλος των τρεχουσών και μελλοντικών γειτονικών χωρών στην ανάπτυξη των αγορών ενέργειας της ΕΕ, δεδομένου ότι είναι οι κύριοι προμηθευτές αερίου και πετρελαίου και συχνά βασικά σημεία διέλευσης του πετρελαίου και του φυσικού αερίου στην ΕΕ γίνεται πιο σημαντικός. Αλλά όχι μόνο οι εισαγωγές του πετρελαίου και του φυσικού αερίου της ΕΕ θα αυξηθούν σημαντικά στις επόμενες δεκαετίες, αλλά επίσης και οι ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας και ίσως σε μια ύστερη περίοδος να αυξηθεί και ο ανεφοδιασμός υδρογόνου από τις γειτονικές χώρες. Με αυτόν τον τρόπο αυτές οι χώρες επίσης ωφελούνται της εσωτερικής αγοράς και γίνονται ένα μέρος των ενεργειών της ΕΕ. Οι ενέργειες αυτές της ΕΕ στην ουσία στοχεύουν στην ενσωμάτωση στις αγορές ενέργειας της ΕΕ των περιβαλλουσών χωρών.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή προάγει επίσης ιδιαίτερα την ανάπτυξη μιας αποτελεσματικά λειτουργούσας υποδομής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και αερίου εντός της ΕΕ και μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών της με τον καθορισμό των έργων διασύνδεσης διευρωπαϊκής σπουδαιότητας (TEN-E programme).

Τα περισσότερα από τα προγράμματα διασχίζουν διάφορα εθνικά σύνορα και είναι σημαντικά για διάφορα κράτη μέλη της ΕΕ και τις γειτονικές τους χώρες. Τα διευρωπαϊκά ενεργειακά δίκτυα είναι ακέραια στους γενικούς στόχους ενεργειακής πολιτικής της Ευρωπαϊκής Ένωσης, δηλαδή αυξάνοντας την ανταγωνιστικότητα στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας και αερίου, ενισχύεται η ασφάλεια του ανεφοδιασμού και η προστασία του περιβάλλοντος.

Το πρώτο σύνολο οδηγιών για τα διευρωπαϊκά ενεργειακά δίκτυα υιοθετήθηκε από το Συμβούλιο και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο τον Ιούνιο του 1996 [79]. Οι οδηγίες αυτές έχουν τροποποιηθεί αρκετές φορές έτσι ώστε να απεικονίζουν τις εξελίξεις στην εσωτερική αγορά για τις προμήθειες ηλεκτρικής ενέργειας και αερίου [80]. Οι νέες οδηγίες που εκδόθηκαν το 2003 καθόρισαν τα προγράμματα προτεραιότητας που κυρίως ασχολούνται με την ασφάλεια του ανεφοδιασμού και την ανταγωνιστική λειτουργία της εσωτερικής αγοράς ενέργειας [81]. Έχουν

αναγνωριστεί δώδεκα άξονες προτεραιότητας, επτά για δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας και πέντε για δίκτυα φυσικού αερίου.

Εν ολίγοις, η ολοκλήρωση του ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος μπορεί μόνο να επιτευχθεί με την οικοδόμηση των απαραίτητων ενεργειακών έργων υποδομής και των συνδέσεων μεταξύ των εθνικών συστημάτων, αποφεύγοντας ενεργειακές περιοχών ή μερικές χ.ωρες της ΕΕ για να διευκολυνθεί έτσι το εμπόριο ενέργειας μεταξύ των χωρών. Συνεπώς, η ικανότητα ενεργειακών συνδέσεων είναι ένας βασικός όρος τόσο για τους γενικούς στόχους της ενεργειακής πολιτικής της ΕΕ όσο και για μια βιώσιμη εσωτερική ασφάλεια της ανταγωνιστικής αγοράς της ενέργειας και ενεργειακού ανεφοδιασμού των καταναλωτών. Εντούτοις, για να ικανοποιηθούν αυτοί οι στόχοι πρέπει να πραγματοποιηθούν υποδομές αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζονται μακροχρόνιο διάστημα για να κατασκευαστούν και να είναι πλήρως λειτουργικές. Συνεπώς κάποιος μπορεί να πει ότι για την ανάπτυξη ικανών υποδομών για την ενεργειακή μεταφορά χρειάζεται επίσης ένα μακροπρόθεσμο όραμα στις εξελίξεις που διαμορφώνουν και που οδηγούν την υποδομή. Ιδιαίτερα, εάν περισσότερες χώρες και διαφορετικά συστήματα πρέπει να συνδεθούν, τότε απαιτείται μια εις βάθος ανάλυση των μακροπρόθεσμων βασικών οδηγών όπως οι κοινωνικοοικονομικές αλλαγές, οι αλλαγές της τεχνολογίας, οι ανταλλαγές και τα εμπόδια. Ο καθορισμός των οδηγών αυτών διαμορφώνει και την υποδομή στις επόμενες δεκαετίες.

4.1.5 Στόχοι, Προσέγγιση και Δομή του Προγράμματος ENCOURAGED

Το πρόγραμμα ENCOURAGED έχει αρχίσει στις αρχές του 2005 για τον προσδιορισμό και την αξιολόγηση των οικονομικά βέλτιστων ενεργειακών διαδρόμων με την οικοδόμηση νέων διαδρομών ή επεκτάσεων αυτών για τον ανεφοδιασμό με ηλεκτρική ενέργεια, φυσικό αέριο και υδρογόνου μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών καθώς επίσης και τον προσδιορισμό των εμποδίων και των ωφελειών της σύνδεσης των διαφορετικών ευρωπαϊκών ενεργειακών συστημάτων. Οι στόχοι του προγράμματος είναι:

- Η αξιολόγηση των οικονομικών βέλτιστων ενεργειακών διαδρόμων (ηλεκτρική ενέργεια, αέριο και υδρογόνο) και η αξιολόγηση της σχετικής

υποδομής δικτύων για τη σύνδεση της ΕΕ με τις γειτονικές χώρες και τις περιοχές της.

- Προσδιορισμός, ποσοτικοποίηση και αξιολόγηση των εμποδίων και των πιθανών ωφελειών της οικοδόμησης των βέλτιστων συνδέσεων ενεργειακών διαδρόμων της ΕΕ με τους γείτονές της.
- Σύσταση απαραιτήτων πολιτικών μέτρων για την εφαρμογή των συνιστώμενων ενεργειακών διαδρόμων με εστίαση στην επένδυση και το διεθνές πολιτικό πλαίσιο.

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει τρεις παράλληλες μελέτες, μια για κάθε τύπο ενεργειακού διαδρόμου, δηλαδή μελέτη για την ηλεκτρική ενέργεια, μελέτη για το αέριο και μελέτη για το υδρογόνο. Στην πρώτη φάση, οι μελέτες περιλαμβάνουν μια πρόβλεψη της αναμενόμενης ζήτησης και προσφοράς ανά χώρα μακροπρόθεσμα στην Ευρώπη. Στη συνέχεια γίνεται μια αξιολόγηση των δυσαναλογιών μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης ανά ευρωπαϊκή χώρα και περιοχή. Στη δεύτερη φάση, σε κάθε μελέτη αξιολογείται η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να προκύψει από διασύνδεση ή κατασκευή νέων υποδομών ή επεκτάσεων των υπαρχουσών υποδομών για τη σύνδεση των διαφορετικών συστημάτων/των χωρών ηλεκτρικής ενέργειας και τη σύνδεση της διαφορετικής ζήτησης φυσικού αερίου στις αγορές/χώρες/περιοχές της ΕΕ με προμήθειες αερίου από τις εκτός της Ευρωπαϊκής Ένωσης χώρες.

Στην τρίτη φάση αναλύονται οι επενδύσεις και τα εμπόδια για τις επενδύσεις αυτές στα προγράμματα σύνδεσης. Οι παράλληλες μελέτες ολοκληρώνονται με την πρόταση ανάπτυξης ενός αριθμού οικονομικά ελκυστικών διαδρόμων ηλεκτρικής ενέργειας, αερίου και υδρογόνου με τις γειτονικές χώρες της ΕΕ.

Στα πλαίσια του προγράμματος, για την εφαρμογή των έργων υποδομής ηλεκτρικής ενέργειας και αερίου, οι βασικοί όροι επένδυσης και το σχετικό διεθνές πολιτικό πλαίσιο αναθεωρήθηκαν και οι πιθανές βελτιώσεις αναλύθηκαν και προτάθηκαν.

Ας σημειωθεί ότι προκειμένου να εξασφαλιστεί μια λογική συμβατότητα μεταξύ των αποτελεσμάτων των μελετών για τους τρεις διαφορετικούς τύπους ενεργειακών διαδρόμων, χρησιμοποιήθηκαν ως σενάριο αναφοράς τα ενεργειακά σενάρια για την ενέργεια και τις μεταφορές της ΕΕ που δημοσιεύθηκαν από τη

Γενική Διεύθυνση της ΕΕ [82] όσον αφορά την πρόβλεψη για αέριο, ηλεκτρική ενέργεια και υδρογόνο μακροπρόθεσμα στην Ευρώπη.

Στη συνέχεια του Κεφαλαίου αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης για τις απαραίτητες συνδέσεις αερίου και τη σχετική υποδομή. Παρουσιάζονται επίσης τα βασικά αποτελέσματα της μελέτης για τις διασυνδέσεις ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών, η δυνατότητα πραγματοποίησης και τα πιθανά οφέλη των διαφορετικών διαδρομών για τη μεγάλης απόστασης μεταφορά του υδρογόνου. Τελικά, συνοψίζονται μερικά από τα κύρια ευρήματα και τα συμπεράσματα τα σχετικά με τους προτεινόμενους ενεργειακούς διαδρόμους για την Ευρώπη.

4.2 Αξιολόγηση των Διαδρόμων Φυσικού Αερίου

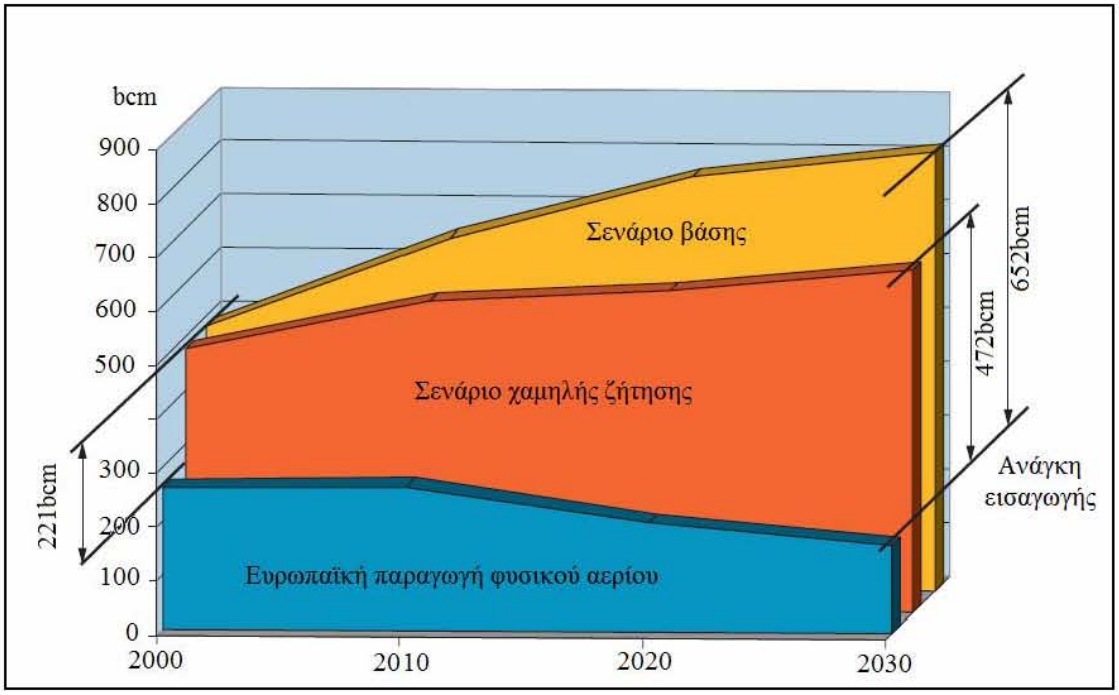
Λόγω της αυξανόμενης ζήτησης φυσικού αερίου της διευρυμένης Ευρωπαϊκής Ένωσης και των μειωμένων εσωτερικών προμηθειών αερίου, η ΕΕ θα αντιμετωπίσει μια αυξανόμενη εξάρτηση εισαγωγών κατά τη διάρκεια των επόμενων δεκαετιών. Οι γειτονικές περιοχές της Ευρώπης διατηρούν σημαντικά αποθέματα και πόρους που θα μπορούσαν να καλύψουν την αύξηση στη ζήτηση της ΕΕ σε μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Με την ανάπτυξη των διαφορετικών χρήσεων, ειδικά για την ηλεκτρική παραγωγή, το αέριο κερδίζει όλο και περισσότερο έδαφος στην ευρωπαϊκό ενεργειακό ανεφοδιασμό. Η ουσιαστική άνοδος στη ζήτηση κατά τη διάρκεια της προηγούμενης δεκαετίας εξηγεί τον ουσιαστικό ρόλο που η ΕΕ δίνει στο φυσικό αέριο.

Η εξασφάλιση αλλά και η αύξηση του ανεφοδιασμού με αέριο για την ικανοποίηση της αυξανόμενης ζήτησης στην ΕΕ, εντούτοις, απαιτεί τεράστιες επενδύσεις σε όλα τα τμήματα της αλυσίδας αερίου συμπεριλαμβανομένης της εξερεύνησης και ανάπτυξης, της διεθνούς διέλευσης και των προς τα κάτω υποδομών (γραμμές αερίου και αποθήκευση). Αυτές οι επενδύσεις θα πραγματοποιηθούν κυρίως από τις ενεργειακές επιχειρήσεις και, επομένως, θα απαιτήσουν ένα κατάλληλο κλίμα επένδυσης, το οποίο όχι μόνο περιλαμβάνει οικονομικές εκτιμήσεις αλλά και ένα σταθερό πολιτικό περιβάλλον, ένα σαφές ρυθμιστικό καθεστώς και τη δυνατότητα για τις επιχειρήσεις αερίου να αναπτύξουν τις απαραίτητες στρατηγικές συνεργασίες.

Στη συνέχεια, αξιολογείται η μελλοντική μακροπρόθεσμη ζήτηση για εισαγωγή αερίου (2010-2020-2030) και η δυνατότητα ανεφοδιασμού για την διευρυμένη Ευρωπαϊκή Ένωση ενώ επίσης αναγνωρίζονται οι μελλοντικές ανάγκες διαδρόμων αερίου λαμβάνοντας υπόψη τις προοπτικές προσφοράς και ζήτησης, την υπάρχουσα και προτεινόμενη υποδομή, τις δαπάνες ανεφοδιασμού καθώς επίσης και τα θεσμικά, στρατηγικά και γεωπολιτικά ζητήματα. Ένα πανευρωπαϊκό μοντέλο δικτύων αερίου χρησιμοποιείται για να αναλύσει και να προσδιορίσει την οικονομική βέλτιστη επέκταση των συνδέσεων αερίου, των εγκαταστάσεων LNG και των διαδρομών αποθήκευσης (διάδρομοι) που απαιτούνται για να ικανοποιήσουν τη μακροπρόθεσμη ζήτηση φυσικού αερίου στην ΕΕ μέχρι το 2030. Τέλος, αναγνωρίζονται τα βασικά εμπόδια, τα πιθανά μέτρα και οι πολιτικές για να δημιουργηθεί ένα ευνοϊκότερο κλίμα επένδυσης για τη βιομηχανία που θα επενδύσει σε υποδομή αερίου.

4.2.1 Μακροπρόθεσμη Ζήτηση, Εισαγωγή Φυσικού Αερίου και Ανάπτυξη Ανεφοδιασμού

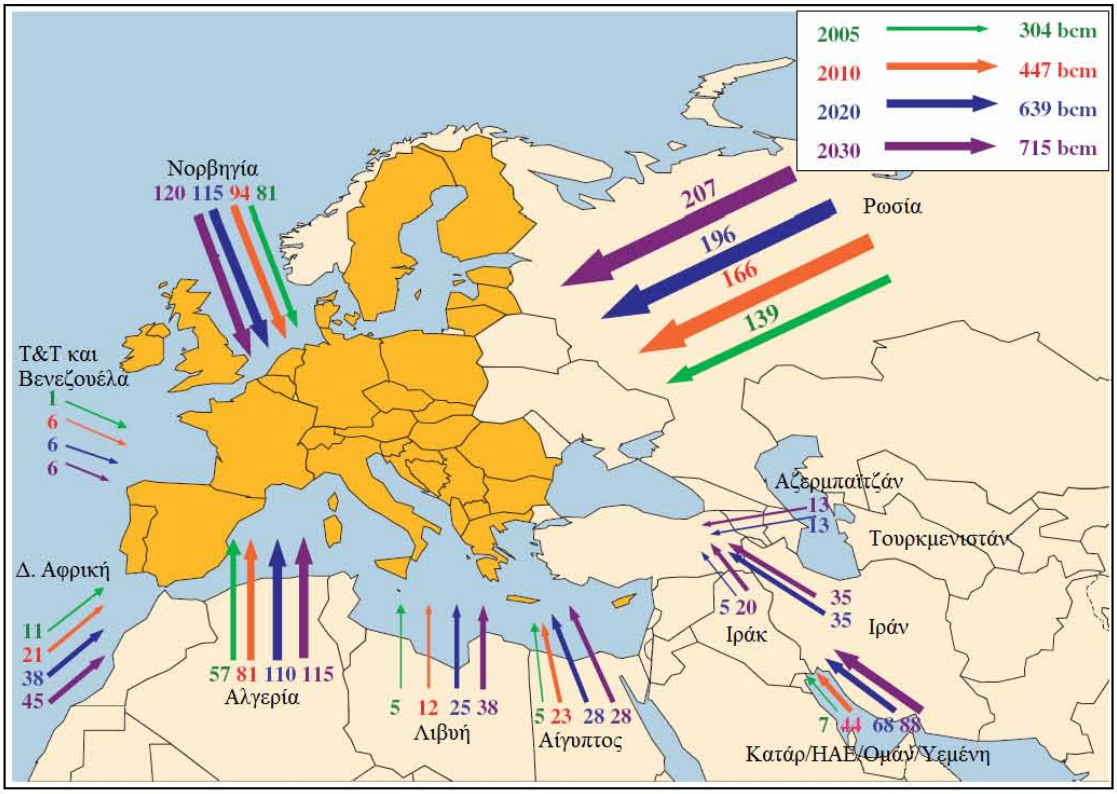
Η ζήτηση εισαγωγών είναι η διαφορά μεταξύ της εγχώριας ζήτησης και της εσωτερικής παραγωγής. Σύμφωνα με τα δύο σενάρια που χρησιμοποιούνται (περίπτωση βάσης σεναρίου και περίπτωση σεναρίου χαμηλής ζήτησης) που είναι βασισμένα στα επίσημα ενεργειακά σενάρια της DG-TREN, η ζήτηση εισαγωγών αερίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση, την Ελβετία και τις Βαλκανικές χώρες θα αυξηθεί από 221bcm το 2000 σε 472bcm το 2030 στο σενάριο χαμηλής ζήτησης και σε 652bcm στο σενάριο βάσης (Σχήμα 4.2).



Σχήμα 4.2. Ανάγκες εισαγωγής φυσικού αερίου για Ευρωπαϊκή Ένωση, Ελβετία και Βαλκανικές χώρες σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή, σενάρια DG TREN.

Αυτό θα απαιτούσε προμήθειες στις επόμενες δεκαετίες από τους παραδοσιακούς ευρωπαϊκούς προμηθευτές αερίου όπως είναι η Νορβηγία, η Ρωσία και η Βόρεια Αφρική καθώς επίσης και την ανάπτυξη νέων πρόσθετων πόρων ανεφοδιασμού.

Το Σχήμα 4.3 παρουσιάζει συνοπτικά αποτελέσματα της αξιολόγησης του ΟΜΕ για την εξωτερική μακροπρόθεσμη δυνατότητα ανεφοδιασμού αερίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση, την Ελβετία και στις Βαλκανικές χώρες.



Σχήμα 4.3. Δυνατότητα εξαγωγής αερίου των κύριων παραγωγών προς την Ευρωπαϊκή Ένωση, την Ελβετία και τις Βαλκανικές χώρες.

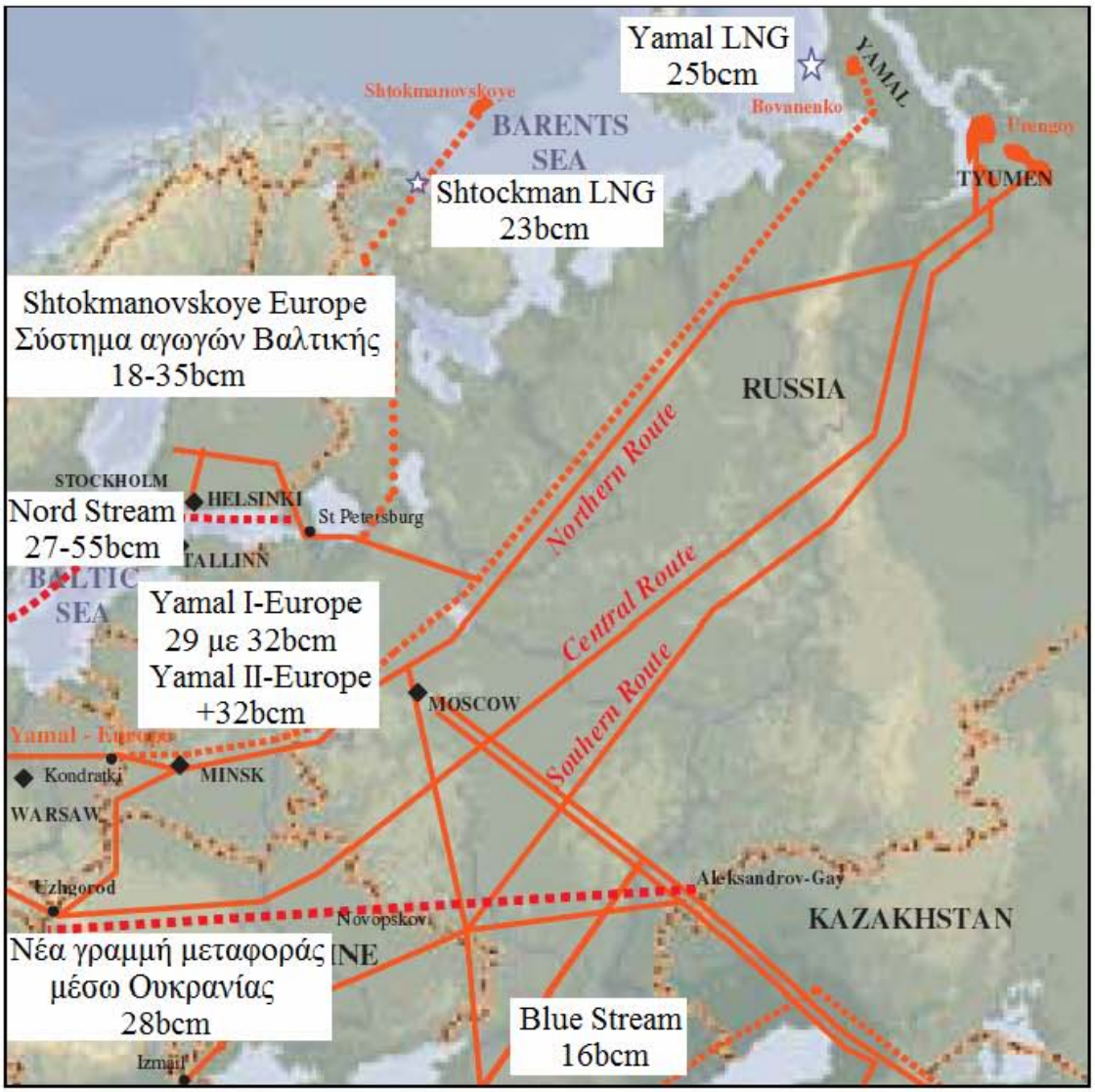
Η δυνατότητα ανεφοδιασμού αντιστοιχεί στους μέγιστους όγκους αερίου που αυτές οι βασικές χώρες παραγωγοί αερίου θα μπορούσαν να εξαγάγουν στην Ευρώπη σε μία δεδομένη στιγμή.

Αυτή η αξιολόγηση είναι βασισμένη στις γεωλογικές πληροφορίες (επιφυλάξεις και πόροι), στις στρατηγικές χωρών, στις στρατηγικές επιχειρήσεων, στον προγραμματισμό, στις εξελίξεις της αγοράς σε θεσμικό και γεωπολιτικό επίπεδο καθώς επίσης και στην ανάπτυξη της παγκόσμιας αγοράς αερίου συμπεριλαμβανομένου του γεγονότος ότι η Ευρώπη πρέπει να ανταγωνιστεί με άλλες παγκόσμιες αγορές για να προσελκύσει μελλοντικές προμήθειες αερίου.

Η συνολική δυνατότητα ανεφοδιασμού αερίου που είναι διαθέσιμη στην Ευρώπη έχει αξιολογηθεί ότι φθάνει στο επίπεδο των 450bcm μέχρι το 2010, 640bcm μέχρι το 2020 και 715bcm μέχρι το 2030, το οποίο πρέπει να συγκριθεί με τα 304bcm που εισήχθησαν το 2005. Φυσικά όλος αυτός ο πιθανός ανεφοδιασμός δεν θα πραγματοποιηθεί στο μέλλον εάν οι απαιτήσεις εισαγωγών δεν τον απαιτούν. Εντούτοις, αν οι απαιτήσεις σε αέριο είναι υψηλότερες από τον αναμενόμενο πρόσθετο όγκο αερίου στην Ευρώπη που έχει προβλεφθεί, τότε πρόσθετοι όγκοι

αερίου στην Ευρώπη θα μπορούσαν να παρασχεθούν ειδικά (αλλά όχι μόνο) από τη Ρωσία και το Κατάρ. Αυτές οι χώρες όχι μόνο έχουν μια τεράστια δυνατότητα εφεδρείας αλλά και η κατανομή τους μεταξύ των διαφορετικών παγκόσμιων αγορών μπορεί να προσαρμοστεί στις διαφορετικές απαιτήσεις ζήτησης.

Η Αλγερία, η Νορβηγία και η Ρωσία αναμένεται να επεκτείνουν τον κυρίαρχο ρόλο τους όσον αφορά στη δυνατότητα ανεφοδιασμού. Επιπλέον, φαίνεται να υπάρχει μια θεαματική πρόοδος της δυνατότητας ανεφοδιασμού από τη Μέση Ανατολή (ειδικά Κατάρ), τη Νιγηρία, την Αίγυπτο και τη Λιβύη. Αυτό σημαίνει ότι η Ευρώπη θα πρέπει να αναπτύξει σημαντική νέα σωλήνωση και υποδομή LNG. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται η ύπαρξη των κεντρικών αγωγών και οι απαραίτητες μελλοντικές εξελίξεις διαδρόμων αερίου από τη Ρωσία στην Ευρώπη για να καταστήσουν την προαναφερθείσα δυνατότητα ανεφοδιασμού διαθέσιμη για την Ευρώπη.



Σχήμα 4.4. Ρωσική εξαγωγή αερίου. Υποδομή και προγράμματα διέλευσης.

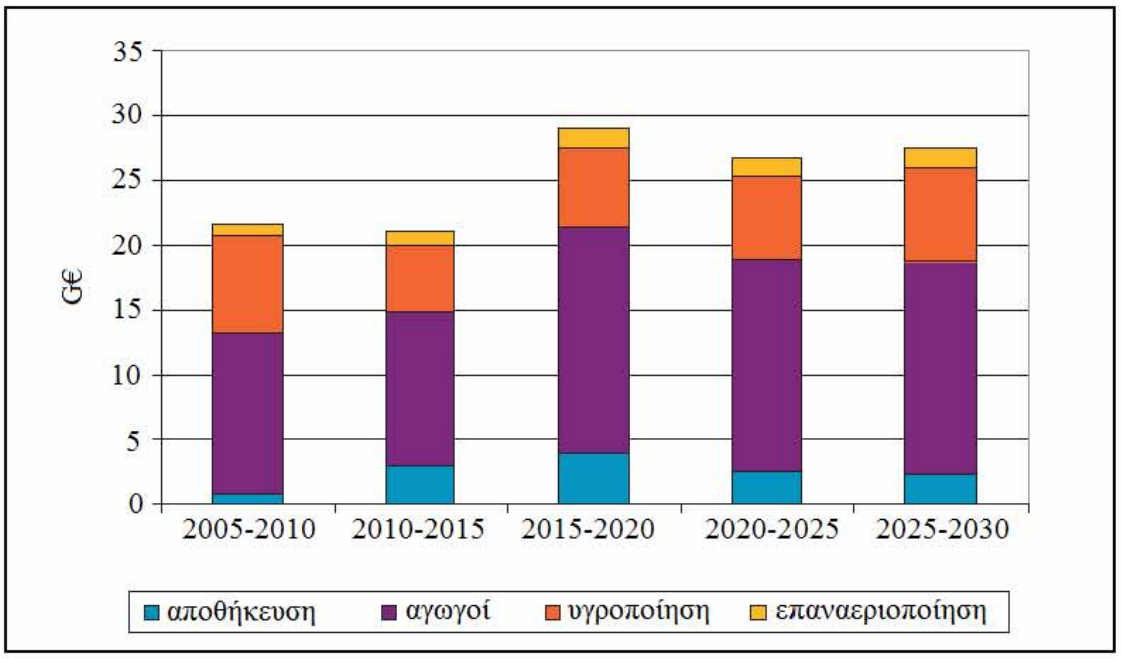
Επιπλέον, είναι σημαντικό να αναπτυχθούν οι άμεσες διαδρομές εξαγωγής αερίου από την περιοχή της Κασπίας στην Ευρώπη μέσω της Τουρκίας και ενδεχομένως άμεσα μέσω της Μαύρης Θάλασσας στην Ευρώπη, καθώς επίσης και η ανάπτυξη διαφόρων νέων αλυσίδων LNG, ειδικά από τον Περσικό Κόλπο, τη Βόρεια Αφρική και τη Δυτική Αφρική που θα φθάνουν στις διάφορες χώρες της ΕΕ.

4.2.2 Αναμενόμενη Ανάπτυξη των Διαδρόμων Αερίου στην ΕΕ

Η αναγνώριση των οικονομικών βέλτιστων διαδρόμων αερίου στην ΕΕ έχει μελετηθεί χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο ισορροπίας αγοράς για την Ευρώπη και

λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες προβλέψεις δυνατότητας και ζήτησης ανεφοδιασμού, τις ικανότητες μεταφορών, τις δαπάνες ανεφοδιασμού καθώς επίσης και τα ζητήματα που συνδέονται με τη συμπεριφορά αγοράς και την ασφάλεια του ανεφοδιασμού. Τέσσερα σενάρια έχουν αναπτυχθεί. Σε αυτά τα σενάρια περιλαμβάνονται ένα σύνηθες επιχειρησιακό σενάριο (business-as-usual) ή σενάριο αναφοράς (reference scenario), ένα σενάριο χαμηλής ζήτησης φυσικού αερίου, ένα σενάριο υψηλής ζήτησης φυσικού αερίου και ένα σενάριο αναβολής της επένδυσης (που απεικονίζει το αποτέλεσμα ενός αβέβαιου κλίματος επένδυσης στο οποίο οι επενδύσεις στην υποδομή αναβάλλονται). Τα σενάρια αυτά χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν τις ανάγκες για υποδομές σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

Οι αγωγοί αναμένεται να παραμείνουν τα κυρίαρχα μέσα μεταφοράς αερίου στην Ευρώπη στις επόμενες δεκαετίες. Σύμφωνα με τις προσομοιώσεις του μοντέλου, οι αγωγοί θα αποτελούν το 83% (χαμηλή ζήτηση), το 81% (υψηλή ζήτηση και αναφορά) ή το 77% (αναβολή) της ικανότητας μεταφορών το 2030, ενώ τα υπόλοιπα μέρη καλύπτονται από LNG. LNG αναμένεται να φθάσει από το Κατάρ (33%), τη Νιγηρία (25%), την Αλγερία (17%), την Αίγυπτο (15%) και άλλες χώρες (10%) και κατευθυνόμενο κυρίως προς κατανάλωση στο Ηνωμένο Βασίλειο (28%), την Ισπανία (19%), την Ιταλία (18%), τη Γαλλία (15%), τη Μπενελούξ (13%) και άλλες χώρες (7%) στην Ευρώπη. Σύμφωνα με τα διαφορετικά σενάρια, οι συνολικές ανάγκες επένδυσης από το 2005 ως το 2030 υπολογίζονται μεταξύ 90G€ (χαμηλή ζήτηση) και 164G€ (υψηλή ζήτηση). Στο σενάριο αναφοράς, οι απαιτήσεις είναι 126G€ (Σχήμα 4.5).



Σχήμα 4.5. Απαιτήσεις επένδυσης στις υποδομές αερίου (Ευρωπαϊκή Ένωση, Ελβετία, Βαλκανικές χώρες και Τουρκία) για το σενάριο αναφοράς.

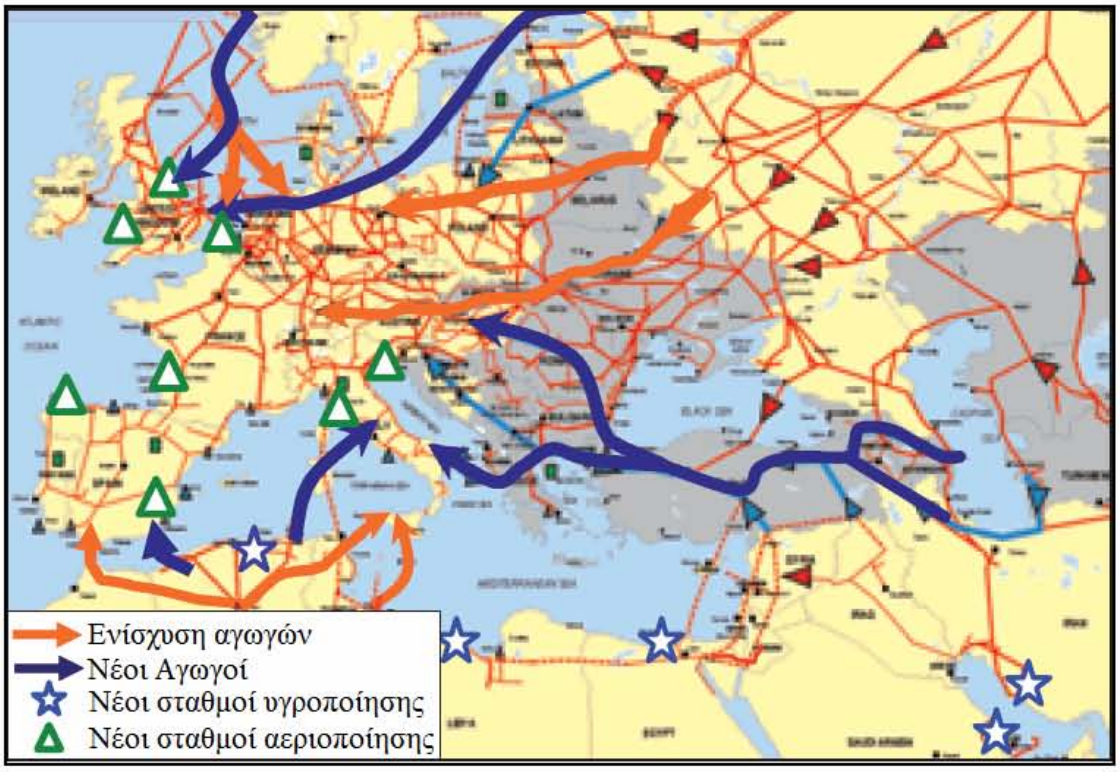
Στο Σχήμα 4.5, παρουσιάζονται οι αγωγοί, οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης και οι σταθμοί ρευστοποίησης και αεριοποίησης.

Τα αποτελέσματα του μοντέλου για το σενάριο αναφοράς δείχνουν ότι οι συνδέσεις αγωγών από τη Βόρεια Αφρική στη Νότια Ευρώπη, από τη Νορβηγία στο Ηνωμένο Βασίλειο, από την Τουρκία στα Βαλκάνια και στην Κεντρική Ευρώπη πρέπει να λάβουν την πιο υψηλή προτεραιότητα, επειδή οι προκύπτουσες ικανότητες απαιτούνται μέχρι το 2010. Δεύτερης προτεραιότητας σύνδεση είναι η σύνδεση μεταξύ Τουρκίας στο πρόγραμμα της Ιταλίας που απαιτείται μέχρι το 2015. Η τρίτη προτεραιότητα αφορά τις ενισχύσεις της Νορβηγία-ΕΕ, Νορβηγία-Ρωσία και Τουρκία-Βαλκανικές χώρες, επειδή αυτές οι συνδέσεις αγωγών απαιτούνται περίπου μέχρι 2020. Κατά την εκτέλεση του μοντέλου, έχει υποτεθεί ότι η σύνδεση Ρωσία-Γερμανία μέσω της θάλασσας της Βαλτικής χτίζεται και θα είναι λειτουργική σύμφωνα με το σχέδιο περίπου το 2010.

Επιπλέον, βάση του σεναρίου αναφοράς, διάφορες άλλες συνδέσεις αγωγών μέσα στην Ευρώπη πρέπει επίσης να πραγματοποιηθούν ή να ενισχυθούν το συντομότερο δυνατόν. Αυτές οι συνδέσεις αφορούν κυρίως τους αγωγούς από το νότο στο βορρά (συνδέοντας Ιταλία, Ισπανία και τα Βαλκάνια με την υπόλοιπη Ευρώπη) και τη σύνδεση της Γερμανίας με τις Βαλτικές χώρες. Αυτό απαιτείται

προκειμένου να αποφευχθεί να γίνει το ενδοκοινοτικό δίκτυο αερίου μια σημαντική δυσχέρεια για την επέκταση των προμηθειών αερίου από έξω από την ΕΕ. Στην πραγματικότητα, η πραγματοποίηση αυτών των ενδοκοινοτικών συνδέσεων αερίου, εάν ολοκληρωθεί στην επόμενη δεκαετία, θα οδηγήσει σε περισσότερες εμπορικές συναλλαγές μεταξύ των διαφορετικών ευρωπαϊκών αγορών αερίου και επομένως θα επιτρέψει χαμηλότερες τιμές τελικών χρηστών στην ΕΕ.

Είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι σε περίπτωση αναβολής επένδυσης (σενάριο αναβολής), οι τιμές συνόρων αερίου (gas border price) θα αυξάνονταν κατά περίπου 25% σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Φαίνεται επομένως πολύ σημαντικό να τεθούν σε ισχύ τα σωστά κίνητρα για τα έργα υποδομής τα οποία πρέπει να εφαρμοστούν σε εύθετο χρόνο. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6, διάφοροι δίοδοι αερίου είναι στο στάδιο ενίσχυσης ή στο στάδιο της ανάπτυξης.



Σχήμα 4.6. Τρέχουσες και μελλοντικές εξελίξεις διαδρόμων αερίου στην Ευρώπη.

Οι παραδοσιακές διαδρομές στην Ευρώπη ενισχύονται. Επιπλέον, έξι νέες σωληνώσεις είναι αυτήν την περίοδο υπό ανάπτυξη, δηλαδή η σωλήνωση από τη Νορβηγία στο Ηνωμένο Βασίλειο (σωλήνωση Langeled), από τη Ρωσία στη Γερμανία μέσω της θάλασσας της Βαλτικής (Nord Stream), από την Αλγερία στην

Ισπανία (Medgaz) και στην Ιταλία (Galsi) μέσω της Μεσογείου. Μια άλλη σημαντική διαδρομή υπό μελέτη είναι ο διάδρομος αερίου από τη Μέση Ανατολή και την περιοχή της Κασπίας σε ολόκληρη την Τουρκία, που παρατείνεται περαιτέρω από τις σωληνώσεις σε ολόκληρη την Ελλάδα (διασύνδεση Τουρκία-Ελλάδα-Ιταλία) ή μέσω των ανατολικών Βαλκανίων στην Αυστρία (σωλήνωση Nabucco). Αυτός είναι ο αποκαλούμενος τέταρτος διάδρομος που θα επιτρέψει στην Ευρώπη να διαφοροποιήσει αρκετά τις πηγές ανεφοδιασμού της.

Διάφοροι σταθμοί LNG είναι ήδη υπό κατασκευή ή έχουν αναγγελθεί να κατασκευαστούν τα ερχόμενα έτη στις διάφορες ευρωπαϊκές χώρες. Η διείσδυση LNG είναι ιδιαίτερα θεαματική στο Ηνωμένο Βασίλειο και αναμένεται να γίνει ουσιαστική επίσης στην Ιταλία. Εντούτοις, μερικά από αυτά τα προγράμματα εκτίθενται σε πολλά διοικητικά εμπόδια, ειδικά στην Ιταλία.

Η πραγματοποίηση των προαναφερθέντων προγραμμάτων αγωγών θα μπορούσε να παρέχει μια πρόσθετη ικανότητα εισαγωγών 100bcm/έτος στην Ευρώπη από την αρχή της επόμενης δεκαετίας (Πίνακας 4.1). Πρέπει να σημειωθεί, εντούτοις, ότι αυτά τα προγράμματα εστιάζουν κυρίως στη μεταφορά περισσότερου αερίου στην ευρωπαϊκή αγορά, αλλά λιγότεροι πάροχοι είναι εστιασμένοι στην ανάπτυξη των αναγκαίων διασυνδέσεων μέσα στην Ευρώπη. Είναι χρήσιμο επομένως να ερευνηθούν τα κίνητρα που θα βγάλουν από το αδιέξοδο την εσωτερική αγορά αερίου της ΕΕ. Επιπλέον, τα αναγγελθέντα προγράμματα LNG θα αντιπροσώπευαν μια πρόσθετη ικανότητα εισαγωγών περίπου 100bcm/έτος από την αρχή της επόμενης δεκαετίας.

4.2.3 Εμπόδια στις Επενδύσεις

Η έκθεση στον κίνδυνο και η δυνατότητα προστασίας των επενδυτών από τον κίνδυνο ασκούν άμεση επίδραση στα κίνητρα ικανότητας υποστήριξης και επένδυσης των μακροπρόθεσμων προγραμμάτων. Όπως παρουσιάζεται στον Πίνακα 2, μπορούν να αναγνωριστούν τρεις κατηγορίες προγραμμάτων οι οποίες είναι λίγο ως πολύ τρωτές σε διαφορετικούς κινδύνους. Αυτές οι τρεις κατηγορίες είναι τα προγράμματα προώθησης εξαγωγής (π.χ. Nord Strem), τα προγράμματα προώθησης εισαγωγής (π.χ.

LNG Medgaz, σταθμοί Fos LNG) και τα προγράμματα προώθησης μέσης πορείας (π.χ. Galsi, Nabucco, τα περισσότερα τελικά προγράμματα LNG).

	Προώθηση εξαγωγής	**Προώθηση εισαγωγής**	**Προώθηση μέσης πορείας**
Εξαγωγικές εταιρίες	Ηγέτης	Συνεργάτης	Συνεργάτης/δεν περιλαμβάνεται
Εισαγωγικές	Συνεργάτης	Leader	Συνεργάτης/δεν περιλαμβάνεται
Παραγωγοί/μεταφορικοί ιδιώτες	Συνεργάτης (μερικές φορές)	Συνεργάτης	Ηγέτης/συνεργάτης
Εισερχόμενοι	Πολύ σπάνια	Συνεργάτης	Ηγέτης/συνεργάτης
Αριθμός συνεργατών	Μικρός	Μικρός	Υψηλός
Ευπάθεια στο κίνδυνο αγοράς	Χαμηλός	Χαμηλός	Υψηλός
Τύπος ρυθμιστικού κινδύνου	Λίγοι κίνδυνοι	Επιβεβλημένο μερίδιο αγοράς	Πρόσβαση τρίτου
Κύρια πολιτική διάσταση	Διεθνείς σχέσεις	Ασφάλεια του ανεφοδιασμού	Ανταγωνισμός

Πίνακας 4.2. Κύρια χαρακτηριστικά των προγραμμάτων εισαγωγών ανά κατηγορία.

Τα προγράμματα προώθησης εξαγωγής και εισαγωγής είναι σχετικά τα ευκολότερα να υλοποιηθούν λόγω των μεγάλων μεριδίων αγοράς και της οικονομικής ικανότητας των επενδυτών.

Τα περισσότερο δύσκολα προγράμματα να πραγματοποιηθούν είναι τα μέσης πορείας, τόσο οι αγωγοί όσο και οι εγκαταστάσεις LNG, τα οποία στοχεύουν στη διείσδυση στις αγορές. Αυτή η κατηγορία είναι πιο τρωτή στον κίνδυνο και μπορεί να απαιτήσει πολιτική υποστήριξη δεδομένου ότι αυτά τα προγράμματα προωθούν τον ανταγωνισμό και την ποικιλομορφία του ανεφοδιασμού.

Επιπλέον, η προώθηση των προγραμμάτων μέσης πορείας μπορεί να βασιστεί σε ένα ρυθμισμένο λειτουργικό καθεστώς (regulated operating regime) ή ένα καθεστώς εμπόρου (merchant-operating regime). Η πραγματοποίηση των ρυθμισμένων προγραμμάτων επένδυσης αερίου μπορεί να εμποδιστεί από την πολιτική και τους ρυθμιστικούς κινδύνους, ενώ η πραγματοποίηση των εμπορικών

προγραμμάτων επένδυσης αερίου είναι ευάλωτο περισσότερο από τους κινδύνους αγοράς.

4.2.4 Συστάσεις για τη Βελτίωση των Όρων Επένδυσης

Το θέμα που εξετάζεται σε αυτήν την υποπαράγραφο είναι το πως μπορεί να μετριαστούν οι επενδυτικοί κίνδυνοι των έργων υποδομής αερίου που συνδέουν την ΕΕ με τους γειτονικούς προμηθευτές της. Οι τρέχουσες Ευρωπαϊκές αγορές αερίου μπορούν ακόμα να χαρακτηριστούν γενικά από την ημιτέλεια του ανταγωνιστικού καθεστώτος τους. Είναι επομένως σημαντικό να βελτιωθεί η λειτουργία της αγοράς, η βελτίωση του ρυθμιστικού συστήματος και η σταθερότητα του διεθνούς πολιτικού πλαισίου για να μειωθούν οι κίνδυνοι των επενδυτών και να βελτιωθεί το κλίμα επένδυσης. Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι διεθνείς υποδομές αερίου αποτελούνται από διαφορετικά τμήματα αρχίζοντας από τις εγκαταστάσεις παραγωγής συνεχίζοντας προς τους καταναλωτές, συνδέοντας συχνά περιοχές με διαφορετικά καθεστώτα αγοράς. Οι αγορές και ο κανονισμός πρέπει επομένως να επιτρέψουν την ανάπτυξη των εμπορικών συμφωνιών για να εξασφαλίσουν μια δίκαιη μοιρασιά και μια προστασία απέναντι στον επενδυτικό κίνδυνο που απορρέει από τους άνω προς τους κάτω συνεργάτες.

Επομένως, για να προωθηθεί η επένδυση στους διαδρόμους αερίου, η δράση των φορέων χάραξης πολιτικής πρέπει ειδικότερα να εστιάσει στη μείωση των κινδύνων αγοράς, των ρυθμιστικών κινδύνων και των πολιτικών κινδύνων. Κατωτέρω δίνουμε μερικές συστάσεις που έχουν αναπτυχθεί σε ειδικά εργαστήρια και διμερείς συζητήσεις με όλους τους κύριους συμμετόχους (βιομηχανία, ρυθμιστές, επενδυτές, έμποροι, φορείς χάραξης πολιτικής αερίου, κ.λπ).

4.2.4.1 Μετριασμός Κινδύνου Αγοράς

Ξετυλίγοντας την αλυσίδα αερίου, η μείωση της προς τα κάτω προστασίας αγοράς και η ανάπτυξη του ανταγωνισμού αυξάνουν τους κινδύνους που πρέπει να καλυφθούν από τους παρόχους. Για να διευκολυνθεί η κάλυψη, συστήνεται:

- Ολοκλήρωση της εσωτερικής αγοράς το συντομότερο δυνατόν για να βοηθηθούν οι χονδρέμποροι και οι υπεύθυνοι στην ανάπτυξη διαδρόμων προστατεύοντάς τους από τους κινδύνους αγοράς και βελτίωση της ποιότητας των σημάτων αγοράς. Αυτό περιλαμβάνει μια ευρύτερη πρόσβαση στις εθνικές αγορές και την ικανότητα σωληνώσεων με την ανάπτυξη των διασυνδέσεων, την ομογενοποίηση του κανονισμού στην Ευρώπη, τη βελτίωση της ρευστότητας των πλημνών αερίου, κ.λπ.
- Κατάργηση των εμποδίων στην είσοδο τη σχετική με την υπερβολική αγοραστική δύναμη των κατεχόντων υπεύθυνη θέση και την έλλειψη διαφάνειας στη χρήση και την κατανομή της ικανότητας υποδομής.
- Παροχή ειδικής θέσης στις προς τα πάνω ρυθμίσεις όπως η ενίσχυση κοινοπραξιών που περιλαμβάνουν διαφόρους συνεργάτες. Για να διευκολύνουν την εμπορευματοποίηση του αερίου, τέτοιες κοινοπραξίες πρέπει να θεωρηθούν ως ενιαίος προμηθευτής αερίου και όχι ως κοινοπραξία μεμονωμένων παραγωγών αερίου.
- Άδεια σε μακροπρόθεσμες συμβάσεις μεταξύ των προς τα πάνω/μέσης πορείας παρόχων και των προς τα κάτω επιχειρήσεων προκειμένου να δημιουργηθεί μια ικανή διακοπή των κινδύνων μεταξύ των προς τα πάνω παρόχων (τεχνικοί κίνδυνοι μεταφοράς), και προς τα κάτω επιχειρήσεων (εμπορικοί κίνδυνοι). Εντούτοις αυτές οι μακροπρόθεσμες συμβάσεις πρέπει να εφαρμοστούν, συμπεριλαμβανομένων των ανοικτών διαδικασιών εποχής και βασισμένων στην αγορά μηχανισμών κατανομής για την επιφύλαξη και τη χρήση ικανότητας.
- Συγχρόνως, η δημιουργία των υγρών σημείων αγορών (liquid spot markets) και των δευτεροβάθμιων οικονομικών αγορών πρέπει να ενθαρρυνθεί προκειμένου να επιτραπεί η κατάλληλη φραγή των κινδύνων όγκου και τιμών και για να καταστήσει τις μακροπρόθεσμες συμβάσεις πιο αποδοτικές σε μια ανταγωνιστική και ενσωματωμένη ευρωπαϊκή αγορά αερίου.

4.2.4.2 Μετριασμός Ρυθμιστικού Κινδύνου

Η ρύθμιση προσαρμόζεται τακτικά ανάλογα με την εξέλιξη των ανεπιθύμητων συνθηκών στην αγορά (πρόσβαση τρίτων, τιμολόγηση, κ.λπ.). Οι ρυθμίσεις πρέπει να είναι διαφανείς στην ικανότητα, να δημιουργήσουν όργανα μετριασμού κινδύνου και να είναι προβλέψιμες για τους επενδυτές (οι αλλαγές κανονισμού δεν πρέπει να εισαγάγουν πρόσθετη αβεβαιότητα). Για να μετριαστούν οι ρυθμιστικοί κίνδυνοι συστήνεται:

- Σαφής καθορισμός των ορίων της Ευρωπαϊκής εσωτερικής αγοράς αερίου και βελτίωση του συντονισμού των προγραμμάτων στα σύνορα προκειμένου να εξεταστούν τα διαφορετικά καθεστώτα, τα επιτόκια, οι κίνδυνοι και το εισόδημα από προγράμματα επενδύσεων για τις σχετικές χώρες. Είναι επίσης σημαντικό να εξεταστεί η θέση των κρατών της ΕΕ στις διεθνείς διόδους.
- Δημιουργία πιο προβλέψιμου κανονισμού. Η ρυθμιστική αβεβαιότητα μπορεί να οδηγήσει τους επενδυτές στην καθυστέρηση των επενδύσεών τους. Είναι επομένως σημαντικό να κατασταθεί η δυναμική κανονισμού διαφανέστερη με σαφείς δηλώσεις των μακροπρόθεσμων πολιτικών προτεραιοτήτων.

4.2.4.3 Μετριασμός του Διεθνούς Πολιτικού Κινδύνου

Εκτός από την αβεβαιότητα τη σχετική με τις Ευρωπαϊκές αγορές και τον κανονισμό, η διεθνής διάσταση του εμπορίου αερίου αυξάνει την έκθεση σε πολιτικούς κινδύνους όπως είναι ειδικότερα η θεσμική αστάθεια στις χώρες παραγωγής και στις χώρες διέλευσης, οι συγκρούσεις μεταξύ των κυβερνήσεων κ.τ.λ. Βελτιώνοντας το πανευρωπαϊκό πολιτικό πλαίσιο μπορεί να ενισχυθεί το κλίμα επένδυσης. Όταν οι διάδρομοι είναι βασικοί για την ασφάλεια του ανεφοδιασμού αλλά εμποδίζονται από την πολιτική αβεβαιότητα, η ΕΕ μπορεί να διαδραματίσει έναν σημαντικό πολιτικό και οικονομικό ρόλο. Οι ακόλουθες ενέργειες συστήνονται:

- Αφαίρεση των τοπικών θεσμικών και νομικών εμποδίων στην ανάπτυξη των νέων προγραμμάτων. Αυτό ισχύει ιδιαίτερα για τους σταθμούς αεριοποίησης, που καθυστερούν συχνά ή που αναβάλλονται για διοικητικούς και πολιτικούς λόγους.

- Οικονομική ενίσχυση των διαδρόμων προτεραιότητας. Όταν οι επενδύσεις, που θεωρούνται σημαντικές για την ασφάλεια του ανεφοδιασμού, δεν μπορούν να ολοκληρωθούν αποκλειστικά βάσει των εμπορικών εκτιμήσεων αγοράς (π.χ. έλλειψη εγγυήσεων ρυθμαπόδοσης), πρέπει να υποστηριχθούν από θεσμικά δάνεια (EIB, EBRD) ή από άλλες εγγυήσεις.
- Διεθνείς οργανισμοί τακτοποίησης διαφωνιών. Η κατοχή αξιόπιστων διαιτητών για να διαιτητεύσουν διεθνείς διαφωνίες παρέχει πρόσθετη ασφάλεια στους επενδυτές. Περαιτέρω ανάπτυξη ενεργειών της Συνθήκης Ενεργειακών χαρτών και άλλων υπερεθνικών οργανισμών πρέπει να υποστηριχθεί από την ΕΕ.
- Ανάπτυξη του διαλόγου για τη βελτίωση της διεθνούς σταθερότητας και για την εμπιστοσύνη μεταξύ των χωρών εισαγωγής, παραγωγής και διέλευσης λαμβάνοντας υπόψη το συμφέρον όλων των περιληφθέντων συμβαλλόμενων μερών. Συστήνεται να αναπτυχθούν στρατηγικές συνεργασίες μεταξύ της ΕΕ και των σημαντικότερων χωρών ανεφοδιασμού και διέλευσης αερίου. Αυτό μπορεί να γίνει επεκτείνοντας το διάλογο ΕΕ-Ρωσία και ΕΕ με άλλους ζωτικής σημασίας ενεργειακούς προμηθευτές για την Ευρώπη.

4.3 Αξιολόγηση των Διαδρομών Ηλεκτρικής Ενέργειας

4.3.1 Εισαγωγή και Μεθοδολογία

Τα Ευρωπαϊκά όργανα υπογράμμισαν κατά τη διάρκεια των πρόσφατων ετών τη σημασία μιας μεγαλύτερης ανάπτυξης της ικανότητας διασύνδεσης για την εφαρμογή μιας ανοικτής και ανταγωνιστικής εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκής Ένωσης (EU). Στην Πράσινη Βίβλο για μια Ευρωπαϊκή Στρατηγική για τη Βιώσιμη, Ανταγωνιστική και Ασφαλή Ενέργεια [83] προτάθηκε ως ζήτημα η ανάπτυξη ενός σχεδίου διασύνδεσης προτεραιότητας προκειμένου να αυξηθεί η ικανότητα διασύνδεσης για την ενεργειακή πολιτική της ΕΕ για τα ερχόμενα έτη. Ένας από τους βασικούς παράγοντες για την ανάπτυξη ενός πανευρωπαϊκού διασυνδεμένου συστήματος θα μπορούσε να είναι η πιθανή επέκταση

του σύγχρονου συστήματος UCTE προς ανατολάς και προς νότια σε απάντηση των αιτημάτων που προέρχονται από άλλα συστήματα (π.χ. Τουρκία, Ουκρανία, Βόρεια Αφρική). Αυτή η επέκταση θα μπορούσε να καθορίσει την ευκαιρία να αυξηθεί η εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας και η ικανότητα μεταφοράς.

Στη Μεταπτυχιακή αυτή Εργασία, αρχικά ορίστηκε ένας διάδρομος ηλεκτρικής ενέργειας ως κάθε σημείο του συστήματος όπου κίνδυνοι ικανότητας μεταφοράς (διασύνδεση) είναι μη επαρκείς, με άλλα λόγια κάθε σημείο του πανευρωπαϊκού συστήματος όπου μπορεί να υπάρξει ένα καθαρό κοινωνικοοικονομικό όφελος από πρόσθετες επενδύσεις στην ικανότητα μεταφοράς. Με αυτό τον ορισμό και εξετάζοντας την ιστορική ανάπτυξη των ευρωπαϊκών συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, οι διάδρομοι ηλεκτρικής ενέργειας βρίσκονται κανονικά στα σύνορα μεταξύ των χωρών, στα σύνορα μεταξύ των διαφορετικών λιμνών ισχύος της ΕΕ και, προφανώς, στα σύνορα μεταξύ Ευρωπαϊκής Ένωσης και γειτονικών χωρών, στα οποία εστιάζει η έρευνα.

Δεύτερον, για κάθε διάδρομο ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζουμε τις δαπάνες των πιθανών προγραμμάτων ενίσχυσης και υπολογίζουμε μέσω μιας ανάλυσης βελτιστοποίησης (ελάχιστου κόστους αποστολής ή least-cost dispatch) τα οφέλη που μπορούν να αποκομισθούν με κάθε υπερτιθέμενη ενίσχυση. Τα οφέλη της ενίσχυσης μεταφοράς υπολογίζονται αναφερόμενα στην έννοια της αντικατάστασης της ακριβούς παραγωγής με φτηνότερη και συμπεριλαμβανομένης της οικονομικής επίδρασης της μείωσης των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Τα οφέλη από την άποψη της αξιοπιστίας συστημάτων και της επάρκειας δεν λαμβάνονται υπόψη. Τα οφέλη από την άποψη του αυξανόμενου ανταγωνισμού μεταξύ των συμμετεχόντων αγοράς, που θα μπορούσαν να είναι σημαντικά σε μερικές περιπτώσεις, επίσης δεν εξετάζονται. Τα οφέλη από την άποψη της βελτιωμένης ασφάλειας του ανεφοδιασμού για τις χώρες της ΕΕ, η διαφοροποίηση εξαγωγής και η δημιουργία της εσωτερικής αξίας για τις γειτονικές χώρες (που είναι εξαγωγείς του φυσικού αερίου) δεν εξετάζονται ρητά. Επομένως, η διασύνδεση αναπτύσσεται ως αποτέλεσμα της ανάλυσης κόστος-οφέλους που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως βάση μιας σχετικά συντηρητικής αποτίμησης οφελών.

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων υπολογισμών του μοντέλου εκτελέστηκε μια παραδοσιακή κοινωνική και οικονομική αξιολόγηση κόστους-οφέλους (με άλλα λόγια, καθαρού οφέλους) των επιλεγμένων ενισχύσεων

των διαδρόμων διασύνδεσης. Οι αξιολογήσεις υποστηρίζουν συμπεράσματα, τα οποία θα μπορούσαν να είναι χρήσιμα στο να υποστηρίξουν το μέρος του σχεδίου προτεραιότητας της ΕΕ σχετικά με τους διαδρόμους διασύνδεσης μεταξύ της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των γειτονικών χωρών.

4.3.2 Ζήτηση Ηλεκτρικής Ενέργειας και Άλλες Κύριες Υποθέσεις

Δύο σύνολα προσομοιώσεων εκτελούνται για να αξιολογήσουν και να βελτιστοποιήσουν τις ικανότητες μεταφοράς μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών:

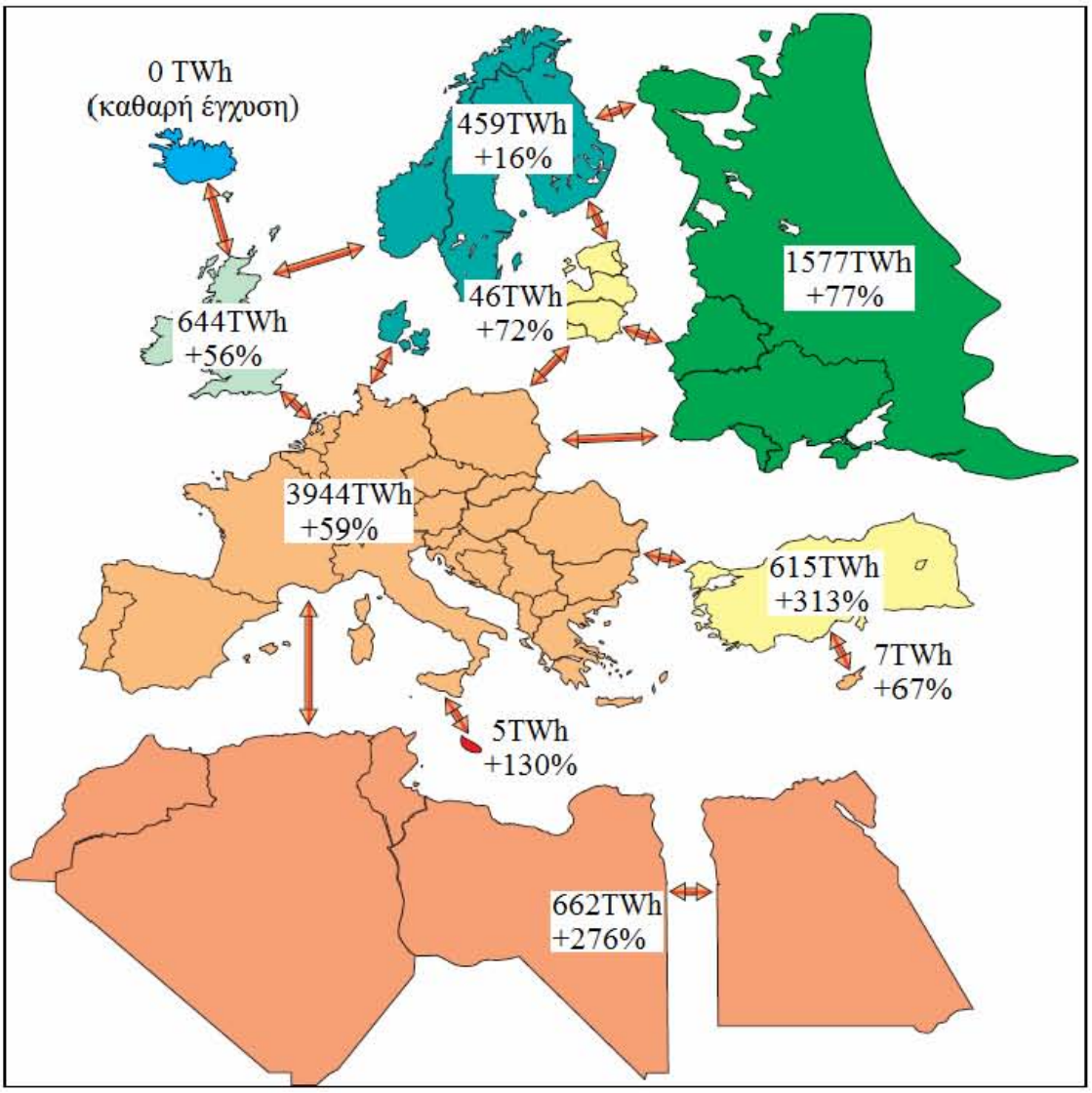
- Μια ενδιάμεση (έτος 2015) αξιολόγηση, που λαμβάνει υπόψη την παρουσία υπαρχουσών σημαντικών εσωτερικών δυσχερειών στο σύστημα μετάδοσης ηλεκτρικής ενέργειας της ΕΕ (π.χ.: Ισπανία–Γαλλία, τα Ιταλικά σύνορα, Βέλγιο–Γαλλία, κ.λπ.), το οποίο επηρεάζει την ηλεκτρική ενέργεια που ανταλλάσσεται μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών.
- Μια μακροπρόθεσμη (έτος 2030) αξιολόγηση. Μέχρι αυτό το έτος υποτίθεται ότι η ανάπτυξη της εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα ολοκληρωθεί και ότι το δίκτυο μετάδοσης δεν παρακωλύεται από σημαντική συμφόρηση στις διασυνοριακές διασυνδέσεις μεταξύ των χωρών της ΕΕ.

Η βασική ιδέα της ανάλυσης βελτιστοποίησης είναι να μιμηθεί το μοντέλο τη λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση και τις διαμορφώσεις των γειτονικών χωρών προκειμένου να αξιολογηθούν τα οικονομικά βέλτιστα για τους πιθανούς διαδρόμους ηλεκτρικής ενέργειας. Μια από τις βασικές υποθέσεις είναι ότι, τουλάχιστον σε μια μακροπρόθεσμη προοπτική, οι τιμές αγοράς, που θεωρούνται οι κύριοι οδηγοί των ανταλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των χωρών και των περιφερειακών συστημάτων, θα βασιστούν πρώτιστα στις δαπάνες παραγωγής. Επομένως, η αξιολόγηση των μελλοντικών ενεργειακών ανταλλαγών εκτελείται με τη βοήθεια ενός εργαλείου βελτιστοποίησης παραγωγής πολλών περιοχών που καθορίζει την ελάχιστου κόστους αποστολή της παραγωγής των μονάδων λαμβάνοντας υπόψη τις περιορισμένες ικανότητες μεταφοράς μεταξύ των περιοχών στις οποίες το πλήρες σύστημα υποδιαιρείται.

Το συνολικό ενεργειακό κόστος που ελαχιστοποιείται περιλαμβάνει το κόστος ενεργειακής παραγωγής για τις θερμοηλεκτρικές γεννήτριες και το κόστος του σκορπίσματος φορτίων. Για να λάβει υπόψη την επίδραση των περιορισμών εκπομπής αερίων θερμοκηπίου, λαμβάνεται υπόψη μια προσέγγιση δαπανών ευκαιρίας. Ένα πρόσθετο κόστος προστίθεται στο κόστος καυσίμων το οποίο καθορίζεται για κάθε τύπο γεννήτριας, συσχετισμένο με τη μελλοντική τιμή των επιδομάτων εμπορικών συναλλαγών εκπομπής στο EU-ETS (Emission Trading Scheme).

Οι 44 χώρες της μελέτης ομαδοποιούνται στις περιοχές UCTE (Αλβανία, Αυστρία, Βέλγιο, Βοσνία-Ερζεγοβίνη, Βουλγαρία, Κροατία, Τσεχία, Γαλλία, Γερμανία, Ελλάδα, Ουγγαρία, Ιταλία, Λουξεμβούργο, FYROM, οι Κάτω Χώρες, Πολωνία, Πορτογαλία, Ρουμανία, Σερβία και Μαυροβούνιο, Σλοβακία, Σλοβενία, Ισπανία), Βρετανικοί Νήσοι (Ιρλανδία και Ηνωμένο Βασίλειο), NORDEL (Δανία, Φινλανδία, Νορβηγία και Σουηδία), τα κράτη της Βαλτικής (Εσθονία, Λετονία, Λιθουανία), βόρεια Αφρική (Μαρόκο, Αλγερία, Τυνησία, Λιβύη και Αίγυπτος), ανατολική Ευρώπη (ευρωπαϊκό μέρος της ρωσικής ομοσπονδίας, Λευκορωσία, Ουκρανία και Μολδαβία) και Τουρκία. Στην ανάλυση του 2015, λήφθηκαν υπόψη σημαντικές τρέχουσες δυσχέρειες στην ΕΕ και επομένως η περιοχή UCTE χωρίστηκε σε μικρότερα μπλοκ που είναι η Ιβηρική χερσόνησος (Ισπανία και Πορτογαλία), Γαλλία, Ιταλία, το γερμανικό μπλοκ (Γερμανία, Μπενελούξ, Ελβετία και Αυστρία) και το μπλοκ της Κεντρικής Ευρώπης (οι άλλες χώρες). Ας σημειωθεί ότι αυτός ο χωρισμός σε μικρότερα μπλοκ καθορίζεται βάσει της παρουσίας συμφόρησης εντός της ΕΕ, η οποία επηρεάζει συχνά την ηλεκτρική ενέργεια που ανταλλάσσει η ΕΕ με τις γειτονικές χώρες.

Η διασύνδεση των συστημάτων της Κύπρου, της Ισλανδίας και της Μάλτας ερευνάται στη μακροπρόθεσμη ανάλυση. Τα συστήματα του μοντέλου και οι διάδρομοι ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2030 παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.7, το οποίο παρουσιάζει τις προβλέψεις ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και την αύξησή της κατά την περίοδο 2005-2030.



Σχήμα 4.7. Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας το 2030 και ποσοστό αύξησης την περίοδο 2005-2030 σε κάθε περιοχή του συστήματος.

Η αξιοπρόσεκτη αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε μερικές γειτονικές περιοχές, όπως η Βόρεια Αφρική και η Τουρκία, αναμένεται να υποκινήσει την ογκώδη εγκατάσταση νέων εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας και να επηρεάσει έντονα τον πιθανό όγκο της ανταλλάξιμης ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της ΕΕ και αυτών των περιοχών μακροπρόθεσμα.

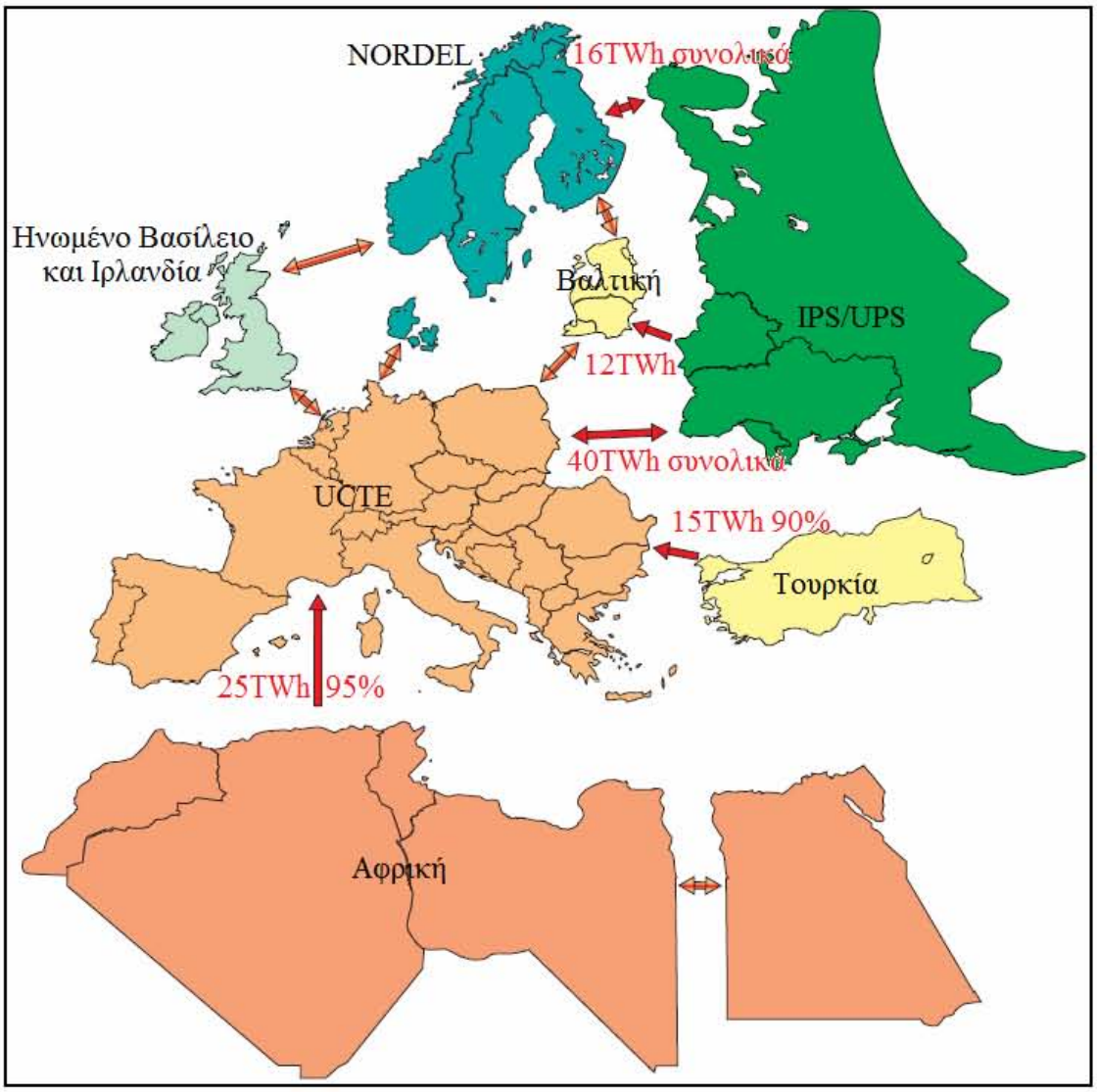
4.3.3 Βέλτιστη Ανάπτυξη των Διαδρόμων Ηλεκτρικής Ενέργειας μεταξύ της ΕΕ και των Γειτονικών Χωρών

4.3.3.1 Ανταλλαγές

Από την αξιολόγηση των βέλτιστων διαδρόμων που προέκυψε από την εκτέλεση ενός μοντέλο πολλών περιοχών προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα. Όσον αφορά τη διάσταση της εμπορίας ηλεκτρικής ενέργειας, αναμένεται μια σημαντική αύξηση στις μελλοντικές διασυνοριακές ανταλλαγές στα σύνορα της ΕΕ σε σχέση με τις τρέχουσες διασυνοριακές ανταλλαγές στα ιδιαίτερα στα σύνορα Φινλανδίας-Ρωσικής ομοσπονδίας, Κεντρικής Ευρώπης–Ουκρανία και Ισπανίας–Μαρόκου (συνολικά για 20TWh/έτος). Εντούτοις, οι συνολικές ανταλλαγές των κύριων συνόρων (νότια σύνορα με Βόρεια Αφρική, ανατολικά σύνορα με σύστημα IPS/UPS) θα καλύψουν ένα σχετικά μικρό ποσοστό της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ και τις γειτονικές περιοχές.

Οι όγκοι ανταλλαγής υπολογίζονται να κυμανθούν από 110TWh/έτος μέχρι 180TWh/ έτος (από 10Mtoe σε 15Mtoe), τα οποία αντιστοιχούν σε 2-4% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ27 (περίπου 4700TWh/έτος το 2030) ή 1-2% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στις 44 χώρες που ερευνώνται στη μελέτη (8000TWh/έτος το 2030).

Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζονται οι γενικές τιμές ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε κύριο σύνορο (main borders), βασισμένες στο σενάριο περίπτωσης βάσης με μια μέτρια ενίσχυση των ικανοτήτων μεταφοράς.



Σχήμα 4.8. Σύνθεση των ανταλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας (όγκοι, κατευθύνσεις και ποσοστό χρησιμοποίησης το 2030, σενάριο αναφοράς).

Τελικά, τονίζεται ότι η αξιολογημένη δυνατότητα για τις ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας δεν πρέπει να θεωρηθεί ως υποκατάστατο των εισαγωγών αερίου της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Αυτοί οι εμπορικοί όγκοι θα έχουν μόνο έναν περιορισμένο και συμπληρωματικό ρόλο έναντι των εισαγωγών αερίου. Οι ανταλλαγές της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν έναν διαφορετικό ρόλο και παρακινούνται από διαφορετικές κινήσεις σε σχέση με τις μεγάλες εισαγωγές του φυσικού αερίου.

4.3.3.2 Ικανότητες Μεταφοράς

Όσον αφορά τη βέλτιστη ανάπτυξη της ικανότητας διασύνδεσης ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών, τα κύρια αποτελέσματα της μελέτης είναι:

- Ανάγκη της νέας διασυνοριακής ικανότητας μεταξύ της Τουρκίας και της νοτιοανατολικής Ευρώπης. Προβλέπονται μεγάλες εξαγωγές από την Τουρκία προς την Ευρώπη (χρησιμοποίηση 85-100% της ικανότητας). Μια ικανότητα μεταφοράς 2000MW αναμένεται βραχυπρόθεσμα για τα επόμενα έτη, ενώ αυτήν την περίοδο η διασύνδεση είναι εκτός λειτουργίας λόγω τεχνικών λόγων. Μια αύξηση της ικανότητας μεταφοράς σε 5000MW είναι οικονομικά πιθανή μακροπρόθεσμα, χρησιμοποιώντας τις εναέριες γραμμές εναλλασσόμενου ρεύματος (εναλλασσόμενο ρεύμα), των οποίων οι εκτιμώμενες δαπάνες είναι 70Μ€ για κάθε σύνδεση.
- Ανάγκη της νέας ικανότητας διασύνδεσης μεταξύ της Βόρειας Αφρικής και της Νότιας Ευρώπης. Παρά τις υψηλές δαπάνες επένδυσης (π.χ. 400Μ€ για μια υποβρύχια σύνδεση1000MW), τα μεγάλα οφέλη αναμένονται μέσω των μεγάλων εξαγωγών ηλεκτρικής ενέργειας από τη Βόρεια Αφρική τότε δηλαδή που το ποσοστό χρησιμοποίησης θα είναι 90-100%. Τα οφέλη μπορούν να δικαιολογήσουν μια αύξηση της ικανότητας διασύνδεσης μέχρι περίπου 5000MW το 2030 (η ικανότητα τρέχουσας μεταφοράς είναι 800MW). Οι αναμενόμενες μελλοντικές ιδανικές οικονομικές ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας με την Αφρική θα πραγματοποιηθούν εάν τα σχέδια επένδυσης για την παραγωγή στη Βόρεια Αφρική αναληφθούν από τις ενδιαφερόμενες χώρες (σχέδια: +300% στην περίοδο 2005-2030) και οργανωθούν και ισχύσουν υγιείς λειτουργικοί μηχανισμοί για τις διασυνοριακές συναλλαγές (π.χ. επέκταση των ισχυόντων κανονισμών και των πολιτικών της ΕΕ).
- Η προσδοκία του αμφίδρομου εμπορίου ηλεκτρικής ενέργειας στα σύνορα της Ανατολικής Ευρώπης. Χάρη στις ήδη υπάρχουσες γραμμές, μια ικανότητα μεταφοράς 5100MW είναι θεωρητικά διαθέσιμη και στα σύνορα Ουκρανίας-Λευκορωσίας (UCTE και Ρωσική ομοσπονδία) και Ουκρανίας-Λευκορωσίας, ακόμα κι αν η πρώτη γραμμή δεν χρησιμοποιείται πλήρως σήμερα λόγω της λειτουργίας μη σύγχρονων συστημάτων και λόγω της λειτουργίας νησίδας.

- Ανάγκη των συνδέσεων των μεσογειακών χωρών-νησιών μακροπρόθεσμα. Οι αναλύσεις που προέκυψαν από το μοντέλο φωτίζουν την ευκαιρία της διασύνδεσης των μεσογειακών χωρών και των νησιών στο πανευρωπαϊκό σύστημα (μια σύνδεση Κύπρου–Τουρκία που εκτιμάται περίπου στα 500MW και μια σύνδεση Μάλτας–Ιταλίας που εκτιμάται περίπου στα 300MW) σε έναν μακροπρόθεσμο ορίζοντα.

4.3.3.3 Επενδύσεις

Με βάση την αναλυθείσα επέκταση των συνδέσεων στα σύνορα της ΕΕ, οι συνολικές επενδύσεις που απαιτούνται για την πραγματοποίηση αυτών των οικονομικών βέλτιστων υποδομών υπολογίζονται ως εξής:

- τουλάχιστον 300Μ€ για την πραγματοποίηση τεσσάρων νέων γραμμών εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) μεταξύ της Τουρκίας και της ΕΕ,
- περίπου 2000Μ€ για την πραγματοποίηση τεσσάρων υποβρυχίων άμεσα τρεχουσών (HVDC) συνδέσεων υψηλής τάσης μεταξύ της Βόρειας Αφρικής και της Νότιας Ευρώπης (εκτίμηση: 1000MW κάθε καλώδιο),
- περίπου 200Μ€ για την πραγματοποίηση μιας υποβρύχιας σύνδεσης HVDC που συνδέει την Τουρκία και την Κύπρο.

Οι επενδύσεις που απαιτήθηκαν για μια μελλοντική αρχική διασύνδεση μεταξύ των χωρών της Ανατολικής Ευρώπης (Ευρωπαϊκό μέρος της Ρωσικής ομοσπονδίας, της Λευκορωσίας, της Ουκρανίας και της Μολδαβίας) και του συστήματος UCTE δεν ποσοτικοποιήθηκαν, επειδή αυτές οι διαμορφώσεις εξαρτώνται έντονα από τις τεχνικές λύσεις που θα υιοθετηθούν. Ο κατάλογος των απαραίτητων επενδύσεων και οι σχετικές δαπάνες τους που συντάσσονται και στις δύο πλευρές της ηλεκτρικής διεπαφής είναι ένα από τα κύρια ζητήματα που απασχολούν τις αναμεμιγμένες χώρες [84].

Τέλος, αξίζει να υπενθυμιστεί ότι έντονα αβέβαιοι παράγοντες είναι η υποτιθέμενη συμβατότητα συστημάτων, η μελλοντική ανάπτυξη διασύνδεσης με τις γειτονικές περιοχές και τα επίπεδα τιμών ενέργειας στο μεσοπρόθεσμο και το μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Στους αβέβαιους παράγοντες θα μπορούσαν να

προστεθούν η ανάπτυξη και η ικανότητα παραγωγής στη Ρωσική ομοσπονδία, τη Βόρεια Αφρική και την Τουρκία.

4.3.4 Εμπόδια και Συστάσεις για την Εφαρμογή των Διαδρόμων

Η διαδικασία διαβουλεύσεων με τους συμμετόχους αποκαλύπτει διάφορα εμπόδια για την εκμετάλλευση και την ανάπτυξη των διαδρόμων ηλεκτρικής ενέργειας. Τα σημαντικότερα εμπόδια, διαφορετικά σε φύση στα διάφορα σύνορα, είναι:

- Μεταξύ της Τουρκίας και της Νοτιοανατολικής Ευρώπης, το τρέχον εμπόδιο για την εκμετάλλευση της ύπαρχουσας και της δημιουργούμενης ικανότητας διασύνδεσης είναι κυρίως τα τεχνικά εμπόδια που ανακύπτουν (δηλ. η ανάγκη της προσαρμογής του Τουρκικού συστήματος ισχύος στα πρότυπα UCTE, με ιδιαίτερη ανησυχία στο θέμα της βελτίωσης του ελέγχου συχνότητας).
- Στα σύνορα της Ανατολικής Ευρώπης, το κύριο τεχνικό εμπόδιο είναι η ασύγχρονη λειτουργία των μεγάλων συστημάτων ισχύος IPS/UPS, UCTE και NORDEL. Αυτό το ζήτημα καθορίζει την ανάγκη σχετικά μεγάλων επενδύσεων, των οποίων η κατανομή μεταξύ των χωρών παραμένει ένα σημείο τριβής.
- Μεταξύ της Βόρειας Αφρικής και της Νότιας Ευρώπης, οι εθνικοί χειριστές συστημάτων μεταφοράς (TSOs), και οι χώρες τους, ενδιαφέρονται για τα νέα προγράμματα διασύνδεσης όπως καταδεικνύεται σαφώς από τις διάφορες μελέτες σκοπιμότητας. Αλλά ο πιθανός αντίκτυπος των πολύ υψηλών επενδύσεων στα εθνικά δασμολόγια είναι σήμερα ένα σημαντικό μειονέκτημα. Για αυτόν τον λόγο η Red Eléctrica de España (Ισπανία) και η Terna Rete Elettrica Nazionale (Ιταλία) δεν περιλαμβάνουν προγράμματα διασύνδεσης με τη Βόρεια Αφρική στον παρόντα εθνικό προγραμματισμό μεταφοράς τους. Η εναλλακτική λύση της ρυθμισμένης επένδυσης, δηλαδή ένα καθεστώς εμπόρου (merchant approach) με τους ιδιωτικούς επενδυτές, είναι υπό έρευνα από μερικές επιχειρήσεις και φαίνεται να είναι μια εφικτή εναλλακτική επιλογή.

Οι συζητήσεις με τους ενδιαφερόμενους αποκάλυψαν ότι η χρηματοδότηση των διαδρόμων ηλεκτρικής ενέργειας δε θεωρείται ένα σημαντικό εμπόδιο για τις ρυθμισμένες επενδύσεις από τους χειριστές συστημάτων μετάδοσης (Transmission System Operators ή TSOs). Τα TSOs είναι έτοιμα να αναλάβουν τις απαραίτητες επενδύσεις στην ικανότητα διασύνδεσης υπό τον όρο ότι αυτό γίνεται μέσα σε ένα σταθερό ρυθμιστικό κλίμα επένδυσης και αυτό υποστηρίζεται από το TSO της γειτονικής χώρας.

Εντούτοις, η έλλειψη ενός σταθερού και συνεπούς νομικού και ρυθμιστικού πλαισίου για τους διαδρόμους διασύνδεσης (τα εισοδήματα TSOs είναι συχνά ρυθμισμένα μέσω των διαφορετικών εθνικών ρυθμιστικών σχεδίων) ενεργεί ως εμπόδιο στην επένδυση και ως παράγοντας καθυστέρησης. Επιπλέον, οι μακροχρόνιες διαδικασίες έγκρισης, εμποδίζουν την ανάπτυξη δικτύου. Το συμπέρασμα είναι ότι τα πλαίσια διακανονισμού πρέπει να γίνουν διαφανέστερα, σταθερά και προβλέψιμα και να εναρμονιστούν όσο το δυνατόν περισσότερο μεταξύ των διαφορετικών συστημάτων. Επίσης, οι διαδικασίες έγκρισης πρέπει να είναι γρηγορότερες και περισσότερο ικανές από σήμερα.

Ενώ η πολιτική και οι ρυθμιστικοί κίνδυνοι παρακωλύουν την πραγματοποίηση των καθορισμένων διαδρόμων ηλεκτρικής ενέργειας, οι κίνδυνοι αγοράς συνδέονται κυρίως με τους εμπορικούς διαδρόμους. Αυτοί οι κίνδυνοι των αγορών που προέρχονται από ανεπαρκή γνώση των τιμών μπορούν να μετριαστούν μέσω της αποδοχής μακροπρόθεσμων συμβαλλόμενων και ενισχυτικών οργάνων για τις διεθνείς συλλογικές επιχειρήσεις. Προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί ο αρνητικός αντίκτυπος της μακροπρόθεσμης εργολαβίας στο χονδρικό ανταγωνισμό αγοράς η προσοχή πρέπει να δοθεί στην παρουσία ανταγωνιστικών στοιχείων σε αυτές τις μακροπρόθεσμες συμβάσεις. Σε περίπτωση εμπορικών συλλογικών επιχειρήσεων πρέπει να αναγνωριστεί ότι μια κατάλληλη αξιολόγηση και μια διανομή του κόστους/κινδύνου και των εισοδημάτων προγράμματος μεταξύ των περιληφθεισών επιχειρήσεων είναι μια βασική προϋπόθεση στην ανάπτυξη των διαδρόμων διασύνδεσης. Επιπλέον, ο ρόλος των ρυθμιστών και TSOs στους εμπορικούς ηλεκτρικούς διαδρόμους πρέπει να είναι ξεκάθαρος.

Τελικά, αυξάνοντας το συντονισμό μεταξύ TSOs σε ένα περιφερειακό επίπεδο αυτό θα ενίσχυε τη διαφάνεια και τη δυνατότητα πραγματοποίησης τόσο των ρυθμιστικών όσο και των εμπορικών προγραμμάτων διαδρόμων ηλεκτρικής

ενέργειας. Ο περιφερειακός συντονισμένος προγραμματισμός πρέπει να βελτιωθεί περαιτέρω για να βελτιστοποιήσει το συνολικό σύστημα και τα οφέλη για όλους τους καταναλωτές στην περιοχή.

Οι αποφάσεις οι σχετικές με τα ευρωπαϊκά προγράμματα ενεργειακής προτεραιότητας αποδεικνύουν μια αυξανόμενη συνειδητοποίηση στην ΕΕ της σημασίας των διαδρόμων ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της ΕΕ και των γειτονικών χωρών της [85]. Δύο από τα τριάντα ένα προγράμματα ηλεκτρικής ενέργειας Ευρωπαϊκού συμφέροντος αφορούν τα κράτη των κύριων συνόρων της Ευρωπαϊκής Ένωσης και περιλαμβάνουν ένα κράτος μέλος της ΕΕ και έναν (τρέχοντα) γείτονα. Τέτοια προγράμματα έχουν γίνει για τις γραμμές μεταξύ της Ελλάδας και της Τουρκίας (άξονας προτεραιότητας EL.4) και την ηλεκτρική σύνδεση Τυνησίας και Ιταλίας (άξονας προτεραιότητας EL.9). Αυτή η συνειδητοποίηση των ενεργειακών προτεραιοτήτων από την ΕΕ θα αυξηθεί στο μέλλον. Ένας σημαντικός ρόλος για την κοινωνική ανάλυση κόστος-οφέλους είναι ότι μπορεί να βοηθήσει τα εθνικά, περιφερειακά, Ευρωπαϊκά κυβερνητικά και ρυθμιστικά όργανα στην αξιολόγηση του αντίκτυπου των προτεινόμενων προγραμμάτων για την ικανότητα υποστήριξης, τον ανταγωνισμό και την ασφάλεια του ανεφοδιασμού. Όταν ένα πρόγραμμα διασύνδεσης αξιολογείται ως ευεργετικό για τη χώρα και για την ΕΕ, τα κατάλληλα σχέδια οικονομικής ενίσχυσης πρέπει να καθοριστούν για να ευνοήσουν την ανάπτυξή του. Επιπλέον, νέοι μηχανισμοί για τη θέση, την πρόοδο και τα πιθανά προβλήματα στην ανάπτυξη των προγραμμάτων ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να επιβληθούν σε εθνικό, περιφερειακό και επίπεδο ΕΕ.

4.4 Αξιολόγηση των Διαδρόμων Υδρογόνου

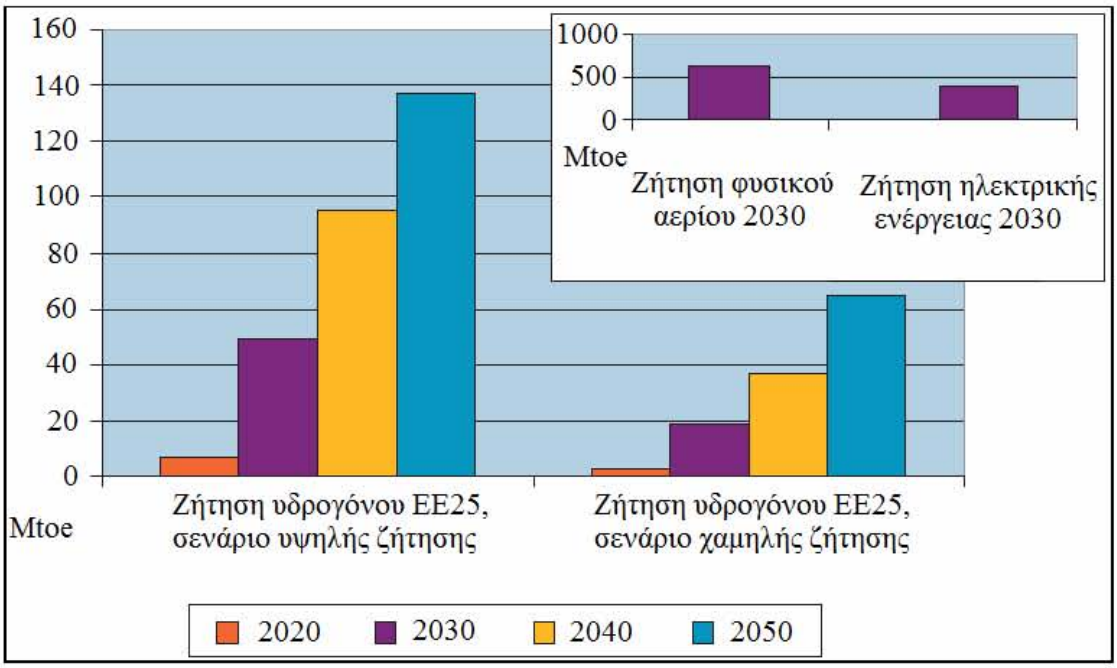
4.4.1 Εισαγωγή και Μεθοδολογία

Τα σημερινά συστήματα ενέργειας και μεταφορών είναι κυρίως βασισμένα στους ενεργειακούς μεταφορείς φυσικών καυσίμων (fossil energy carriers), οι οποίοι πρέπει να αλλαχτούν στο μέλλον για να γίνουν πιο βιώσιμοι. Όλο και περισσότερο, το υδρογόνο θεωρείται ως προσφορά μιας σειράς ωφελειών με σεβασμό στο

περιβάλλον αφού πρόκειται για μια μορφή καθαρής ενέργειας, εάν παράγεται από καθαρές πηγές. Αλλά δεδομένου ότι οι εσωτερικοί ενεργειακοί πόροι της ΕΕ είναι περιορισμένοι, η ερώτηση που τίθεται είναι εάν είναι μια οικονομικά εφικτή καθώς επίσης και βιώσιμη επιλογή να παραχθεί το υδρογόνο έξω από την ΕΕ και να εισαχθεί σε πολύ μεγάλες αποστάσεις στους καταναλωτές μέσα στην ΕΕ.

4.4.2 Πιθανή Ζήτηση για Υδρογόνο στην ΕΕ

Για τον υπολογισμό της ανάπτυξης της ζήτησης υδρογόνου μακροπρόθεσμα στην Ευρώπη δύο σενάρια χρησιμοποιήθηκαν. Το πρώτο που χρησιμοποιήθηκε προβλέπει χαμηλό μερίδιο διείσδυσης υδρογόνου ενώ το δεύτερο υψηλό μερίδιο διείσδυσης υδρογόνου, με έναν χρονικό ορίζοντα μέχρι το 2050. Οι υποθέσεις και τα σενάρια είναι βασισμένα στις μελέτες του προγράμματος HyWays [86], ένα ενσωματωμένο πρόγραμμα της ΕΕ που στοχεύει στην ανάπτυξη ενός ευρωπαϊκού οδικού χάρτη για το υδρογόνο [87]. Σύμφωνα με το HyWays, η ζήτηση για υδρογόνο αξιολογείται για 6 ευρωπαϊκά κράτη: Γερμανία, Γαλλία, Ιταλία, Ηνωμένο Βασίλειο, Κάτω Χώρες και Νορβηγία. Για τη μελέτη στα πλαίσια του προγράμματος ENCOURAGED, η ζήτηση υδρογόνου των 6 κρατών προβάλλεται στη ζήτηση υδρογόνου των ΕΕ25, ανάλογα με τον πληθυσμό. Υποτίθεται ότι το υδρογόνο χρησιμοποιείται κυρίως στον τομέα των μεταφορών. Στο Σχήμα 4.9 παρουσιάζεται η ζήτηση υδρογόνου που υποτίθεται για την ΕΕ25 σύμφωνα με τα σενάρια υψηλής διείσδυσης και τα σενάρια χαμηλής ζήτησης μέχρι το 2050. Για τη σύγκριση, συμπεριλαμβάνονται επίσης και τα επίσημα σενάρια της Ευρωπαϊκής Επιτροπής [87] για το φυσικό αέριο και της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για ΕΕ25 το 2030.



Σχήμα 4.9. Μακροπρόθεσμος προβλέψεις ζήτησης για υδρογόνο, φυσικό αέριο και ηλεκτρική ενέργεια για ΕΕ25.

Από αυτήν την σύγκριση γίνεται σαφές ότι η υποτιθέμενη ζήτηση υδρογόνου γίνεται σχετικά μεγάλη από το 2030 και μετά. Φυσικά, οι υποθέσεις για τη μελλοντική ζήτηση υδρογόνου υπόκεινται σε αβεβαιότητες επειδή δεν είναι ακόμα σίγουρο εάν το υδρογόνο θα γίνει ένα ουσιαστικό μέρος του ενεργειακού συστήματος. Στο επίσημο ενεργειακό σενάριο αναφοράς της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, το υδρογόνο δεν συμπεριλαμβάνεται ως σημαντικός ενεργειακός μεταφορέας. Άλλα προγράμματα, όπως το WETO H2, που προβλέπουν την προοπτική ζήτησης παγκόσμιας ενέργειας για την περίοδο 2050 [167] ή η Αντιπροσωπεία Διεθνούς Ενέργειας (Προοπτική Παγκόσμιας Ενέργειας ή World Energy Outlook of the International Energy Agency), υποθέτουν τη διείσδυση υδρογόνου στα σενάρια με μια ακριβή πολιτική κλίματος και υψηλές τιμές πετρελαίου και φυσικού αερίου και ακόμη μεγαλύτερη διείσδυση μόνο όταν συμβεί μια σημαντική ανακάλυψη στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των στηλών ή κυττάρων καυσίμων (fuel cells) και της αποθήκευσης υδρογόνου (hydrogen storage).

4.4.3 Πιθανές Πηγές Υδρογόνου έξω από την ΕΕ

Με βάση την ανάλυση των υπαρχουσών μελετών οκτώ κέντρα παραγωγής υδρογόνου έξω από την ΕΕ25 και έξι τύποι πετροχημικής βιομηχανίας αερίου επιλέγονται για την περαιτέρω σε βάθος ανάλυση. Το υδρογόνο μπορεί να προκύψει είτε από το αέριο πετροχημικής βιομηχανίας είτε από καθαρές πηγές ή ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, δηλαδή ηλιακή θερμική ενέργεια, ισχύ αέρα (αιολική ενέργεια), γεωθερμική ισχύ, υδροηλεκτρική ενέργεια και βιομάζα. Σαν εξαίρεση, ένας διάδρομος υδρογόνου βασισμένος στο λιγνίτη συμπεριλαμβάνεται επίσης στη μελέτη, επειδή οι άφθονες πηγές φτηνού λιγνίτη υπάρχουν και η μεταφορά του λιγνίτη δεν είναι βιώσιμη εναλλακτική λύση λόγω της χαμηλής αξίας θέρμανσης αυτού του ενεργειακού μεταφορέα. Μετασχηματισμένος σε υδρογόνο, ο λιγνίτης επίσης συμβάλει στην αύξηση της ποικιλομορφίας του ανεφοδιασμού και με έναν τρόπο στην ασφάλεια του ενεργειακού ανεφοδιασμού της Ευρώπης. Τα επιλεγμένα κέντρα παραγωγής υδρογόνου εκτός της Ευρώπης είναι το Μαρόκο, η Αλγερία, η Ισλανδία, η Νορβηγία, η Ρουμανία, η Βουλγαρία, η Τουρκία και η Ουκρανία.

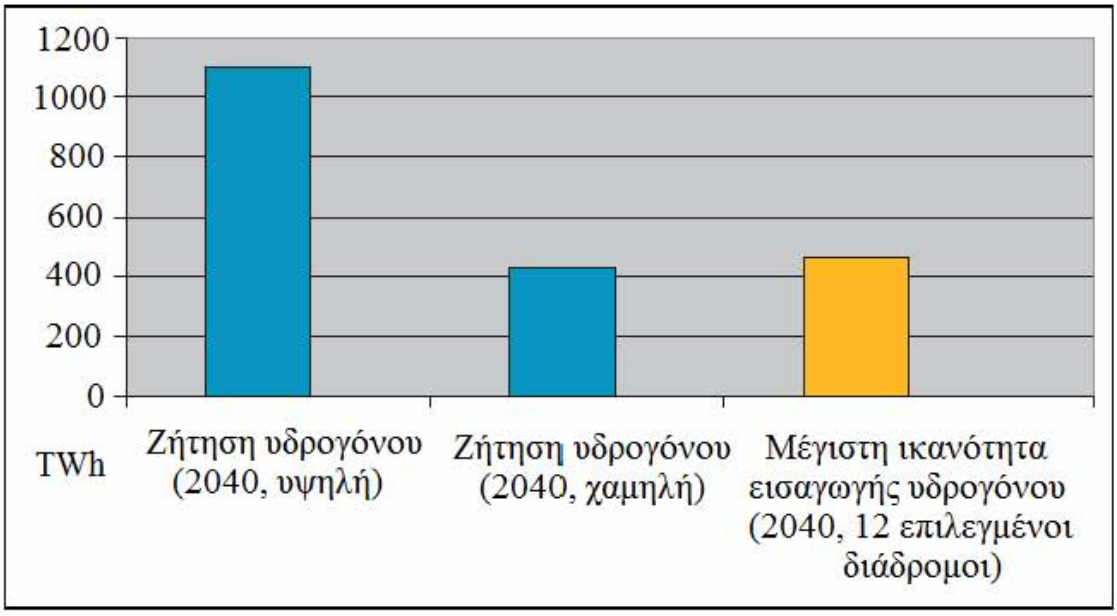
Οι επιλογές διαδρόμων παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.10.



Σχήμα 4.10. Επιλεγμένα κέντρα παραγωγής υδρογόνου.

Για τις επιλεγμένες έντεκα επιλογές παραγωγής υδρογόνου εκτός της Ευρώπης, μια λεπτομερής ανάλυση εκτελείται λαμβάνοντας υπόψη και την πρόσθετη δυνατότητα αερίου από την πετροχημική βιομηχανία ή την ηλεκτρική ενέργειας που εάν χρησιμοποιηθεί μπορεί να βοηθήσει στην παραγωγή υδρογόνου. Υπολογίζεται επίσης το ποσό υδρογόνου που θα μπορούσε να παραχθεί ετησίως. Η πρόσθετη δυνατότητα μπορεί και να οριστεί ως εφικτή δυνατότητα (ίση με τη θεωρητικά εφικτή δυνατότητα σε ένα ορισμένο έτος στις περιπτώσεις όπου όλα τα σημερινά υπάρχοντα εμπόδια υπερνικούνται και όλοι οι οδηγοί είναι αποτελεσματικοί) μείον την πραγματοποιημένη δυνατότητα (ίση με τη σημερινή ακαθάριστη εσωτερική παραγωγή της εξεταζόμενης πηγής ενέργειας). Η Βόρεια Αφρική έχει τη μεγαλύτερη πρόσθετη δυνατότητα (αιολική και ηλιακή), ακολουθούμενη από την Τουρκία (βιομάζα) και τη Νορβηγία (υδροηλεκτρική). Στο Σχήμα 4.11 η συνολική δυνατότητα των δώδεκα κέντρων παραγωγής υδρογόνου εκτός της Ευρώπης ικανοποιεί τη

συνολική απαίτηση υδρογόνου του σεναρίου χαμηλής διείσδυσης υδρογόνου το 2040 και τη σχεδόν μισή ζήτηση του σεναρίου υψηλής διείσδυσης υδρογόνου.

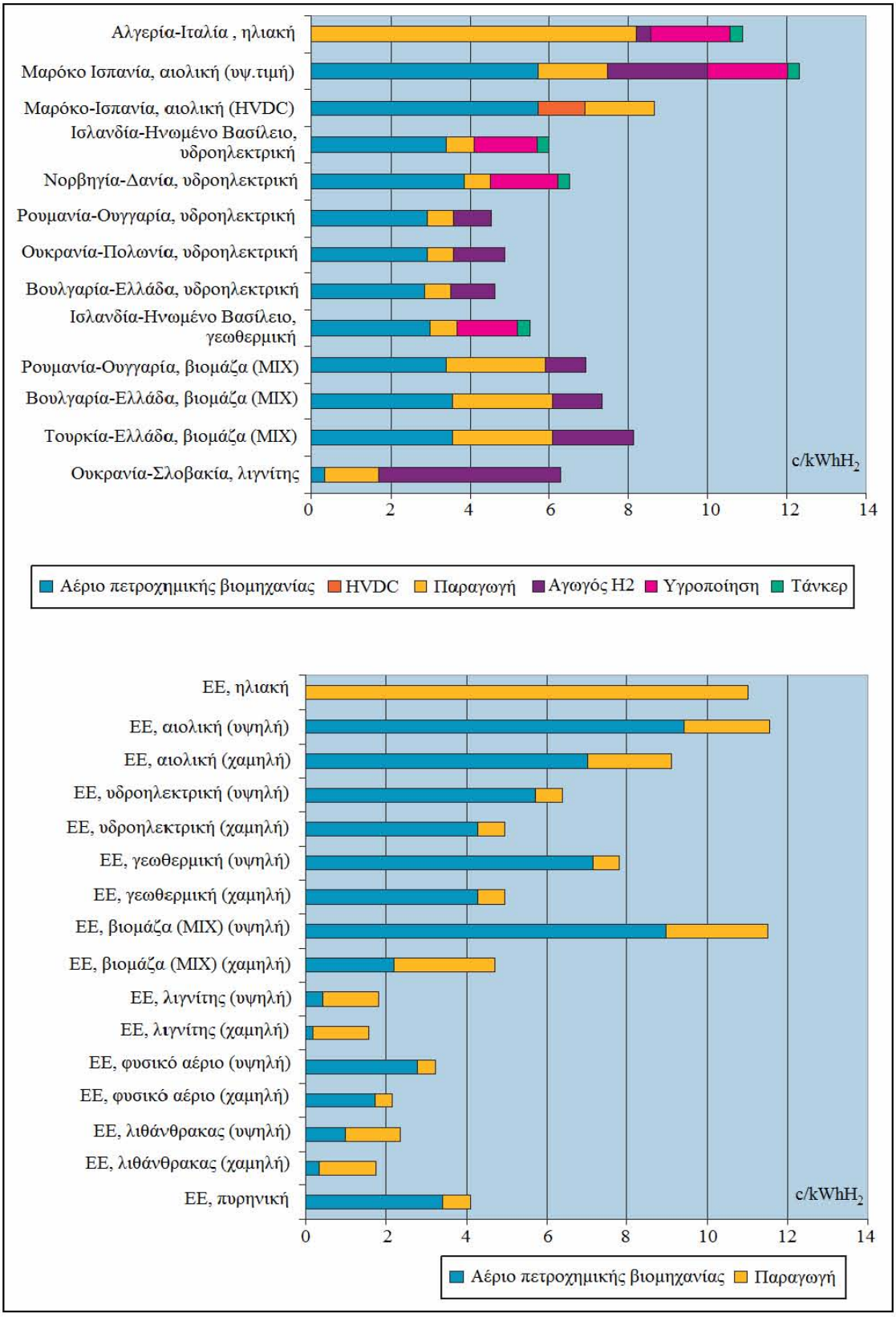


Σχήμα 4.11. Ζήτηση υδρογόνου σύμφωνα με τα σενάρια HyWays και μέγιστη δυνατότητα εισαγωγών το 2040 για 12 επιλεγμένους διαδρόμους υδρογόνου.

Με άλλα λόγια η συνολική παραγωγή θα μπορούσε να τροφοδοτήσει με ενέργεια το μισό στόλο των Ευρωπαϊκών οχημάτων (εάν αυτά τροφοδοτούνται αποκλειστικά με κύτταρα καυσίμων).

4.4.4 Προσδιορισμός της Δυνατότητας Πραγματοποίησης του Ανεφοδιασμού Υδρογόνου σε Μεγάλες Αποστάσεις

Για να προσδιοριστεί ακριβέστερα η ανάγκη για διαδρόμους υδρογόνου πρέπει να αξιολογηθεί και να συγκριθεί με τις δαπάνες ανεφοδιασμού υδρογόνου των διαφορετικών πηγών παραγωγής μέσα και έξω από την ΕΕ. Το Σχήμα 4.12 παρουσιάζει τις δαπάνες υδρογόνου μέσω των διαφορετικών διαδρόμων μέσα στην Ευρώπη μέχρι το 2040.



Σχήμα 4.12. Σύγκριση του κόστους παραγωγής υδρογόνου και του κόστους μεγάλης απόστασης μεταφοράς από τις επιλεγμένες γειτονικές χώρες με την Ευρώπη με την Ευρωπαϊκή παραγωγή υδρογόνου από τις εσωτερικές πηγές με χρονική προοπτική μέχρι το 2040.

Αυτά τα ευρωπαϊκά στοιχεία χρησιμοποιούνται για να αξιολογήσουν τη δυνατότητα πραγματοποίησης των διαδρόμων υδρογόνου. Οι δαπάνες διαδρόμων περιλαμβάνουν τις δαπάνες παραγωγής και τις δαπάνες μεταφοράς υδρογόνου σε μεγάλες αποστάσεις. Ως ηλιακή παραγωγή υδρογόνου (ηλιακή θερμική ή ηλιακή) στην Αλγερία θεωρείται η επιλογή του ηλιακού θερμικού διαχωρισμού ύδατος και όχι η ηλεκτρόλυσης. Κατά συνέπεια, καμία ηλεκτρική ενέργεια δεν απαιτείται και καμία δαπάνη αερίου πετροχημικής βιομηχανίας δεν αναλαμβάνεται σε αυτήν την περίπτωση. Στην περίπτωση της μεταφοράς με σκάφος (τάνκερ), συμπεριλαμβάνονται επίσης οι δαπάνες ρευστοποίησης. Η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των απευθείας γραμμών υψηλής τάσης στην Ευρώπη μπορεί να υπολογιστεί ως μια επιλογή διαδρόμων. Οι επιλογές παραγωγής υδρογόνου στην Ευρώπη περιλαμβάνουν μόνο τις δαπάνες παραγωγής. Λόγω της μεγάλης μεταβλητότητας του κόστους των πηγών αερίου πετροχημικής βιομηχανίας και ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη, εξετάζεται η περίπτωση ενός (χαμηλού και υψηλού) κόστους. Η διανομή στην Ευρώπη και η βελτίωση στη θέση της χρήσης (συμπίεση/ρευστοποίηση) δεν συμπεριλαμβάνονται επειδή αυτές οι δαπάνες δεν είναι σχετικές κατά τη σύγκριση αυτών των διαδρόμων υδρογόνου με την επιλογή της εσωτερικής παραγωγής υδρογόνου.

Επόμενο βήμα είναι η σύγκριση των δαπανών των επιλεγμένων διαβάσεων υδρογόνου και των συμβατικών καυσίμων μεταφορών, όπως η βενζίνη, (Σχήμα 4.1). Τα δεδομένα που παρουσιάζονται δεν έχουν λάβει υπόψη τους φόρους και το ενεργητικό προκειμένου να υπάρξει μια δίκαιη βάση για τη σύγκριση και μπορεί να υποτεθεί ότι οι φόροι και οι αποδοχές των διαφορετικών καυσίμων είναι παρόμοιες.

Εν περιλήψει και βάσει της ανάλυσης των δυνατοτήτων και της οικονομικής δυνατότητας πραγματοποίησης των διαφορετικών επιλογών διαδρόμων υδρογόνου με τις πηγές στις γειτονικές χώρες, συμπεριλαμβανομένης μιας σύγκρισης δαπανών με το εσωτερικό υδρογόνο η παραγωγή στην EE25 (ως συγκριτική μέτρηση επιδόσεων) μπορούν να προκύψουν τα ακόλουθα συμπεράσματα (συμπληρωματικά με τα προηγούμενα):

- Το υδρογόνο δεν είναι ένα ελκυστικό μέσο μεταφορών για την ηλεκτρική ενέργεια. Εάν η ηλεκτρική ενέργεια είναι επιθυμητή ως τελικό προϊόν, η μεταβίβαση της ηλεκτρικής ενέργειας είναι συνήθως οικονομικότερη σε σχέση με την παραγωγή, τη μεταφορά και την επανηλέκτριση (re-

relectrification) του υδρογόνου, π.χ. στα κύτταρα καυσίμων, λόγω της καλύτερης ικανότητας και του χαμηλότερου κόστους.

- Εάν ένα ορυκτό αέριο πετροχημικής βιομηχανίας όπως το φυσικό αέριο, η πυρηνική ενέργεια ή ο άνθρακας χρησιμοποιείται ως πηγή για την παραγωγή υδρογόνου τότε ο ενεργειακός μεταφορέας πρέπει να μεταφερθεί άμεσα (ή σε περίπτωση πυρηνικής ενέργειας μέσω της ηλεκτρικής ενέργειας), λόγω της χαμηλότερης ενεργειακής πυκνότητας του υδρογόνου και επειδή η υποδομή για τη μεταφορά αερίου και άνθρακα υπάρχει ήδη.
- Η χρησιμοποίηση της πυρηνικής ενέργειας ως επιλογή παραγωγής για τη μεγάλης απόστασης μεταφορά υδρογόνου στην Ευρώπη έχει περιορισμούς όπως ότι είναι φτηνότερο να μεταφερθεί ουράνιο ή εμπλουτισμένο ουράνιο ή ακόμα και ηλεκτρική ενέργεια αντί του υδρογόνου. Επίσης η πολιτική αποδοχή της χρησιμοποίησης της πυρηνικής ενέργειας σε μερικές χώρες μπορεί να προκαλέσει αξεπέραστα προβλήματα.

Σε αυτήν τη Μεταπτυχιακή Εργασία αναλύθηκε η δυνατότητα των διαφορετικών επιλογών διαδρόμων που καλύπτουν έναν αρκετά μεγάλο αριθμό επιλογών αερίου πετροχημικής βιομηχανίας/ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή του υδρογόνου. Αλλά επίσης δεν μπορεί να αποκλειστεί το υδρογόνο που παράγεται από την ωκεάνια ισχύ (ocean power) ή από τον παράκτιο αέρα (offshore wind) στη Βόρεια Αφρική στο πολύ μακρινό μέλλον. Επομένως συστήνεται να συνεχιστεί η έρευνα στην ανάλυση του πιθανού κόστους παραγωγής των διαφορετικών νέων πηγών.

4.5 Συμπεράσματα

Προτού δώσουμε μια περίληψη των κύριων συμπερασμάτων είναι σημαντικό να επισημανθούν οι διαφορές μεταξύ των λειτουργιών και των χαρακτηριστικών των τριών κατηγοριών ενεργειακών διαδρόμων (αέριο, ηλεκτρική ενέργεια και υδρογόνο) όπως παρουσιάστηκαν. Αυτές οι διαφορές οδηγούν σε διαφορετικούς στόχους, οδηγούς, ανάγκες για υποδομή μεταφοράς και προτεραιότητες σχετικά με τα αποτελέσματα, τις πολιτικές και τις συστάσεις. Οι τρεις τύποι ενεργειακών διαδρόμων μπορούν να χαρακτηριστούν γενικά ως εξής:

- Οι διάδρομοι αερίου πρέπει να αναπτυχθούν για να ικανοποιήσουν την αυξανόμενη δυσαναλογία μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης στην Ευρώπη. Οι σύγχρονες τάσεις μπορούν να μεταφραστούν σε αυξανόμενες ανάγκες εισαγωγών στην Ευρώπη και ως εκ τούτου απαίτηση σημαντικών ροών αερίου (και δημιουργία υποδομών) από τις χώρες παραγωγούς έξω από την περιοχή της ΕΕ. Οι διάδρομοι αερίου είναι μεγάλες διεθνείς υποδομές που φθάνουν σε μήκος αρκετών χιλιάδων χιλιομέτρων και με αυτόν τον τρόπο απαιτούν τεράστιες επενδύσεις και απαίτηση μεγάλου χρονικού διαστήματος για την υλοποίηση των έργων.
- Οι διάδρομοι ηλεκτρικής ενέργειας συνίστανται κυρίως στις διασυνδέσεις μεταξύ των κρατών μελών στην περιφέρεια της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των γειτονικών χωρών έξω από την ΕΕ, επιτρέποντας, αρχικά, ισορροπία προσφοράς και ζήτησης ισχύος και στις δύο πλευρές της διασύνδεσης και, κατά δεύτερο λόγο, συμβάλλοντας στην ανάπτυξη των ενεργειακών αλληλεξαρτήσεων μεταξύ των χωρών. Στο τεχνικό κομμάτι, οι αποστάσεις των διαδρόμων ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο σύντομες από εκείνες που απαιτούνται για τη σύνδεση των περιοχών παραγωγής αερίου με τις καταναλωτικές αγορές μέσα στην ΕΕ. Οι ροές ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να είναι αμφίδρομες και είναι σημαντικό για τη βελτιστοποίηση και ενίσχυση της σταθερότητας και των δύο συνδεδεμένων συστημάτων. Οι όγκοι των ανταλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλοί, έναντι των μεταφερόμενων όγκων φυσικού αερίου.
- Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από περιβαλλοντικά ήπιες πηγές (που βρίσκονται και εκτός ΕΕ) και μπορεί να είναι μια χρήσιμη μορφή εναλλακτικής μορφής ενέργειας (αντίθετα προς την ηλεκτρική ενέργεια, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί). Στην ουσία δηλαδή το υδρογόνο είναι η υπόσχεση για περιβαλλοντικά καθαρή ενέργεια στην Ευρώπη. Εντούτοις, το υδρογόνο και επομένως οι διάδρομοι υδρογόνου είναι περισσότερο μια επιλογή για το πολύ μακροπρόθεσμο μέλλον εξαιτίας των σχετικά υψηλών δαπανών μιας τέτοιας μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων και της εσωτερικής προτεραιότητας για την τοπική χρήση.

4.5.1 Διάδρομοι Αερίου

Από τη φύση τους, οι διάδρομοι αερίου στην Ευρώπη αποτελούνται από μεγάλες διεθνείς υποδομές συμπεριλαμβανομένων δραστηριοτήτων προς τα άνω (upstream activities) που είναι η εξερεύνηση και η παραγωγή, δραστηριοτήτων μεσοπορείας (midstream activities) που είναι η επεξεργασία του αερίου και η μεταφορά του είτε υπό υψηλή πίεση είτε ως LNG και δραστηριοτήτων προς τα κάτω (downstream activities) που είναι η μεταφορά και η διανομή εντός της ΕΕ. Επιπλέον, τα ζητήματα φυσικού αερίου άμεσα αφορούν και την ενεργειακή ασφάλεια της ΕΕ επηρεάζοντας και τα θέματα της ασφάλειας του ενεργειακού ανεφοδιασμού που επηρεάζεται από την ηλεκτρική ενέργεια. Κατά συνέπεια, οι οδηγοί για την οικοδόμηση των διαδρόμων αερίου είναι πολύ διαφορετικοί από εκείνους για την ηλεκτρική ενέργεια και το υδρογόνο. Η αυξανόμενη εξάρτηση της ΕΕ σε αέριο που παρέχεται από τις ξένες χώρες παραγωγούς και η αυξανόμενη απόσταση μεταξύ των Ευρωπαϊκών κρατών και των νέων περιοχών παραγωγών θέτουν διαφορετικές προκλήσεις σχετικές με το κόστος της ανάπτυξης των προγραμμάτων, τη διέλευση από διαφορετικές χώρες και το συντονισμό όλων των περιληφθέντων συμβαλλόμενων μερών.

Οι συνιστώμενες προτεραιότητας σύμφωνα με το πρόγραμμα ENCOURAGED [168] εξετάζουν την ανάπτυξη αγωγών αερίου από τη Νορβηγία, Ρωσία, Βόρεια Αφρική και από την περιοχή της Κασπίας/Μέσης Ανατολής μέσω της Τουρκίας καθώς επίσης και διάφορες αλυσίδες LNG κυρίως από τη Μέση Ανατολή και την Αφρική. Στην καρδιά των συμπερασμάτων είναι η σχέση μεταξύ της μακροπρόθεσμης δυναμικής της Ευρωπαϊκής αγοράς αερίου, του κινδύνου και της λήψης απόφασης επένδυσης. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα ζητήματα της αβεβαιότητας αγοράς, της ρυθμιστικής αστάθειας και του διεθνούς πολιτικού κινδύνου πρέπει να αντιμετωπιστούν. Η πρόκληση για τους φορείς χάραξης πολιτικής έγκειται, πράγματι, στο να παράσχουν αρκετή ασφάλεια στους επενδυτές κρατώντας τη συνοχή της ανταγωνιστικής δομής των προς τα κάτω αγορών αερίου. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μέσω της εφαρμογής συγκεκριμένων νόμων και κανονισμών που θα εξασφαλίζουν ότι οι επενδυτές θα λάβουν τα οφέλη από τις πρωτοβουλίες που θα λάβουν, μέσω της ανάπτυξης της εσωτερικής αγοράς της ΕΕ που θα γίνει με έναν τρόπο που θα παρέχει υγιείς δυνατότητες αποτροπής του κινδύνου, μέσω της

καθιέρωσης σαφών ρυθμιστικών οδηγιών που θα δημιουργήσουν ένα πλέγμα εύρωστης νομοθεσίας και μέσω της προώθησης ενός διεθνούς διαλόγου θα ενισχύσει τις σταθερές σχέσεις μεταξύ των χωρών παραγωγής, των χωρών διέλευσης και των χωρών εισαγωγής.

4.5.2 Διάδρομοι Ηλεκτρικής Ενέργειας

Εκτελέστηκε μια κοινωνική αξιολόγηση κόστους-οφέλους (με άλλα λόγια, ανάλυση καθαρού οφέλους) του επιλεγμένου αριθμού των ενδεχομένως ενδιαφερουσών ενισχύσεων των διαδρόμων ηλεκτρικής ενέργειας διασύνδεσης και τα συμπεράσματα των αξιολογήσεων υποστηρίζουν τη χρησιμότητα της υποστήριξης του σχεδίου διασυνδέσεων προτεραιότητας της ΕΕ σχετικά με τους διαδρόμους ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των γειτονικών χωρών.

Μια λεπτομερής ανάλυση της αναμενόμενης προσφοράς, ζήτησης, κόστους ηλεκτρικής ενέργειας και τιμών σε 44 χώρες του πανευρωπαϊκού συστήματος καταδεικνύει και ποσοτικοποιεί τις περαιτέρω επεκτάσεις της ικανότητας διασύνδεσης (μέχρι 5000MW στα νότια σύνορα με Βόρεια Αφρική, μέχρι 5000MW στα νοτιοανατολικά σύνορα με την Τουρκία, μέχρι 5100MW στα ανατολικά σύνορα με τα συστήματα UCTE και IPS/UPS) οι οποίες θα παράσχουν καθαρά οφέλη για την ΕΕ και τους γείτονές της. Συνεπεία αυτής της πιθανής επέκτασης ικανότητας μεταφοράς, οι συνολικές ανταλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας των κύριων συνόρων αναμένονται να αυξηθούν μέχρι 150TWh/ έτος. Το αναμενόμενο εμπόριο και τα πιθανά οφέλη των διευκρινισμένων διαδρόμων εξαρτώνται εντούτοις από διάφορες σημαντικές υποθέσεις σχετικές με την ανάπτυξη της ικανότητας παραγωγής, με το μίγμα καυσίμων του, τον κανονισμό και τις πολιτικές για το περιβάλλον, ειδικά στις γειτονικές χώρες, των οποίων η ανάπτυξη είναι πιο αβέβαιη.

Ερευνήθηκαν τα εμπόδια για την εφαρμογή των διαδρόμων, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι αυτοί είναι διάφοροι και διαφορετικής φύσης σε κάθε σύνορο. Εντούτοις, από την πλευρά των συμμετόχων φαίνεται επίσης ότι η χρηματοδότηση των διαδρόμων ηλεκτρικής ενέργειας δε θεωρείται ένα σημαντικό εμπόδιο για τις ρυθμισμένες επενδύσεις από τους χειριστές συστημάτων μετάδοσης (TSOs). Γενικά τα TSOs είναι έτοιμα να αναλάβουν τις απαραίτητες επενδύσεις για την εξασφάλιση

της ικανότητα διασύνδεσης υπό τον όρο ότι αυτές εκτελούνται μέσα σε ένα σταθερό ρυθμιστικό κλίμα επένδυσης. Για τη διασύνδεση μεταξύ της Βόρειας Αφρικής και της Νότιας Ευρώπης (που χαρακτηρίζονται από τις πολύ υψηλές προς τα άνω επενδύσεις), η εναλλακτική εμπορική προσέγγιση με τους ιδιωτικούς επενδυτές είναι υπό έρευνα από μερικές επιχειρήσεις και θα μπορούσε να είναι μια εφικτή επιλογή στο μέλλον.

4.5.3 Διάδρομοι Υδρογόνου

Πάλι τα χαρακτηριστικά, οι οδηγοί και ιδιαίτερα ο συγχρονισμός των διαδρόμων υδρογόνου είναι διαφορετική από τους διαδρόμους αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας. Επειδή αναμένεται ότι περίπου το 2030 οι όγκοι απαίτησης στην ΕΕ θα ανέλθουν σε υψηλά επίπεδα, επιβάλλεται η παροχή από κέντρα παραγωγής υδρογόνου μεγάλου ανεφοδιασμού και έτσι χαμηλότερου κόστους, η ανάγκη μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων και η δημιουργία εγκαταστάσεων μεταφοράς μεγάλων αποστάσεων. Η επιλογή του υδρογόνου έχει σαν αποτέλεσμα τη στροφή σε πιο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Αυτό θέτει πρόσθετες αβεβαιότητες στη διαθεσιμότητα, τις δαπάνες και την πιθανότητα της χρησιμοποίησης αυτών των πηγών. Οι επιλογές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την ικανοποίηση της εσωτερικής ενεργειακής ζήτησης αντί της παραγωγής του υδρογόνου για μεγάλες απόστασης και η σχετικά ακριβή μεταφορά στα κράτη μέλη της ΕΕ είναι ελκυστικές και πιθανές. Παρόλα αυτά, τα ευρήματα σχετικά με το υδρογόνο δείχνουν ότι με τις σχετικά υψηλές τιμές και την ελάττωση των εξόδων παραγωγής και μεταφοράς υδρογόνου (μη απίθανο μακροπρόθεσμα πολύ) διάφορες επιλογές είναι εφικτές να φέρουν το υδρογόνο στις αγορές της ΕΕ.

4.5.4 Τελικές Παρατηρήσεις

Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν την εφαρμογή (επένδυση) στις συνιστώμενες οικονομικές βέλτιστες ενεργειακές διαδρομές με τις γειτονικές χώρες της ΕΕ σαφώς κατέδειξαν ότι ενέργειες και πολιτικές της ΕΕ απαιτούνται επειγόντως

ώστε να επιταχυνθεί η πραγματοποίηση και η σωστή λειτουργία της εσωτερικής αγοράς αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας, π.χ. με την ενίσχυση του συντονισμού μεταξύ TSOs που δημιουργεί μια ισχυρότερη εξωτερική ενεργειακή πολιτική της ΕΕ, με την ενίσχυση του διαλόγου και τη σύσφιξη της συνεργασίας με τις γειτονικές χώρες της ΕΕ.

Ας σημειωθεί ότι η φιλελευθεροποίηση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και αερίου στην ΕΕ, που οδήγησε γενικά στην τρέχουσα παρουσίαση της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τις μεταφορές αερίου από την προσφορά και τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας και αντίστοιχα του αερίου, αύξησε τον ρόλο και τις ευθύνες των TSOs για έγκαιρες επενδύσεις υποδομής και συνεπώς την πραγματοποίηση των βασικών πολιτικών στόχων της ΕΕ όπως η πραγματοποίηση των ανταγωνιστικών αγορών, η ασφάλεια ανεφοδιασμού και η βιώσιμη ανάπτυξη.

Το συμπέρασμα είναι ότι απαιτείται περισσότερη έρευνα στους ελλοχεύοντες παράγοντες των επενδύσεων, περισσότερη έρευνα στην ενεργειακή υποδομή και απαιτούνται περισσότερες πολιτικές ενέργειες που να υποστηρίζουν το ρόλο των TSOs και της αγοράς για τη διευκόλυνση της επένδυσης στα επόμενα έτη. Τέλος, ζητήματα όπως τα αναμενόμενα αυξανόμενα μερίδια αγοράς των ανανεώσιμων ενεργειακών πόρων και η ανάγκη για περισσότερο ενεργειακό εμπόριο πρέπει να αναλυθούν και να σκιαγραφηθούν οι επιδράσεις τους στις επόμενες δεκαετίες στην απαραίτητη ενεργειακή υποδομή στην Ευρώπη [169], [170].

4.6 Επισκόπηση Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 4ο παρουσιάστηκε η κατάσταση με τους ενεργειακούς διαδρόμους της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το πακέτο προγραμμάτων (ή μοντέλο) και γενικότερα ο υπολογιστής δίνει ως αποτέλεσμα το σύνολο των εύρωστων ενεργειακών στρατηγικών. Παρόλα αυτά η τελική απόφαση λαμβάνεται από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων οι οποίοι θα πρέπει να γνωρίζουν τη σύγχρονη ενεργειακή πραγματικότητα όσον αφορά τις υπάρχουσες ενεργειακές υποδομές και τους ενεργειακούς διαδρόμους που διατρέχουν και θα διατρέχουν γενικά την Ευρωπαϊκή Ένωση και ειδικά για την παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία τις Σκανδιναβικές χώρες. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι πέραν των οικονομικών

δεικτών που πρέπει να ληφθούν υπόψη, η ενεργειακή διαχείριση αποτελεί και σοβαρό θέμα πολιτικής και διπλωματίας.

Στο Κεφάλαιο 5ο θα γίνει η σύνδεση με το Κεφάλαιο 4ο όσον αφορά την ενεργειακή επισκόπηση των Σκανδιναβικών χωρών και πως αυτές αλληλεπιδρούν ενεργειακά με την Ευρωπαϊκή Ένωση. Έτσι στο Κεφάλαιο 5ο που ακολουθεί θα παρουσιαστεί μια επισκόπηση του ενεργειακού συστήματος των Σκανδιναβικών χωρών (υποδομές και ενεργειακοί διάδρομοι).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΤΩΝ ΣΚΑΝΔΙΝΑΒΙΚΩΝ ΧΩΡΩΝ

5.1 Εισαγωγή

Σαν μέρος αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας, χρησιμοποιήθηκε μοντέλο του ενεργειακού συστήματος που περιγράφει την ηλεκτρική ενέργεια και την παραγωγή θερμότητας στις Σκανδιναβικές χώρες με τη χρήση της πρότυπης γεννήτριας TIMES. Από το να γίνει μια λεπτομερής και περιεκτική περιγραφή του Σκανδιναβικού ενεργειακού συστήματος (λεπτομέρειες σχετικά με το ενεργειακό σύστημα των Σκανδιναβικών χωρών παρουσιάζονται στο Παράρτημα Β) προτιμήθηκε να δημιουργηθεί ένα απλουστευμένο μοντέλο με μια διαφανή δομή. Ο σκοπός του μοντέλου είναι να καταδειχθεί η χρήση των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων της πρότυπης γεννήτριας σχετικά με το Σκανδιναβικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Κατόπιν, το μοντέλο μπορεί να χρησιμεύσει ως μια βάση για τη δημιουργία ενός πιο πιστού μοντέλου είτε της Φινλανδίας είτε των Σκανδιναβικών χωρών.

Σε αυτό το Κεφάλαιο περιγράφεται το μοντέλο που έχει αναπτυχθεί. Αρχικά, παρουσιάζεται η γενική δομή της παραγωγής θερμότητας και ισχύος στις μεμονωμένες περιοχές ενώ στη συνέχεια εξηγείται ο τρόπος ανταλλαγής ισχύος μεταξύ περιοχών. Δεδομένου ότι η υδρενέργεια και η συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ισχύος έχουν μια σημαντική θέση στη Σκανδιναβική παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, η διαμόρφωσή τους περιγράφεται χωριστά. Στο τελευταίο

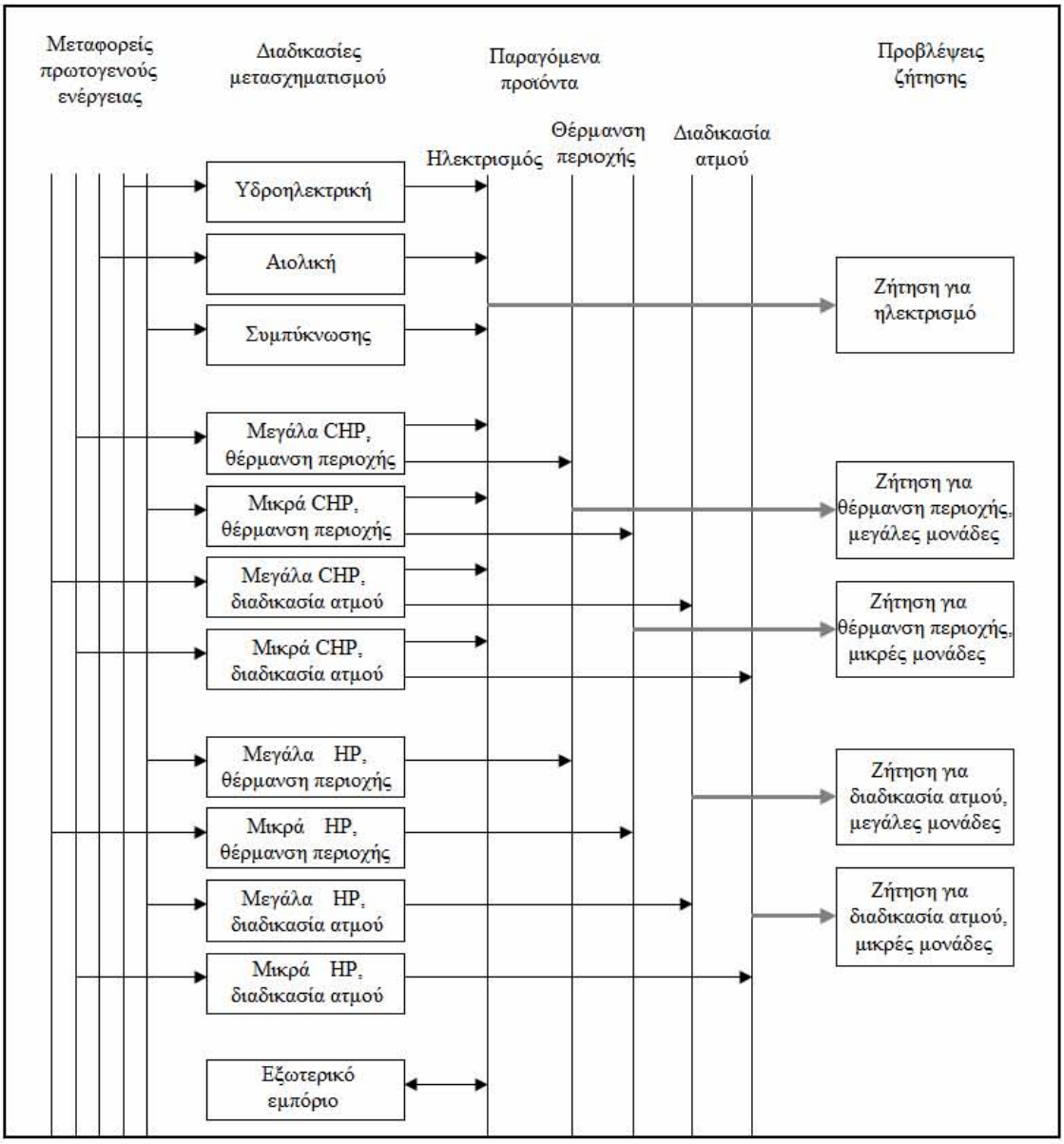
τμήμα, παρουσιάζονται τα στοιχεία και οι χρησιμοποιούμενες παράμετροι του μοντέλου.

5.2 Επισκόπηση του Μοντέλου

Το μοντέλο εστιάζει κυρίως στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Φινλανδίας, το οποίο περιγράφεται με περίπου 60 διαδικασίες και τέσσερα δίκτυα για τη θέρμανση περιοχής (district heat) και τη διαδικασία ατμού (process steam). Και στη θερμότητα και στην παραγωγή ατμού, οι μεγάλης κλίμακα και οι μικρής κλίμακας εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας συνδέονται με τα χωριστά δίκτυα. Η διαμόρφωση της θερμότητας και της παραγωγής ατμού μέσα στις άλλες τρεις περιοχές (Σουηδία, Νορβηγία και Δανία) είναι λιγότερο ακριβής. Ένα δίκτυο θερμότητας και ένα δίκτυο ατμού έχουν περιληφθεί στη Σουηδία και τη Δανία, ενώ στη Νορβηγία μόνο ένα δίκτυο το οποίο περιλαμβάνει θερμότητα περιοχής και διαδικασία ατμού. Επιπλέον, η παραγωγή ατμού σε αυτές τις περιοχές περιλαμβάνει μόνο τη συμπαραγωγή ενώ στις Φινλανδικές εγκαταστάσεις παραγωγής ατμού, οι εγκαταστάσεις αυτές ανταγωνίζονται με τις μονάδες CHP. Υδρενέργεια είναι διαθέσιμη στη Νορβηγία, τη Σουηδία και τη Φινλανδία ενώ πυρηνική ενέργεια χρησιμοποιείται στη Σουηδία και τη Φινλανδία. Η υδρενέργεια και η πυρηνική ενέργεια απεικονίζονται με μια διαδικασία η κάθε μια σε εκείνες τις περιοχές όπου είναι διαθέσιμες.

Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Δανίας μοιάζει με αυτό της Φινλανδίας αφού είναι και οι δύο έντονα βασισμένα στη θερμοηλεκτρική παραγωγή ενέργειας, που χαρακτηρίζεται από το μεγάλο μέρος παραγωγής CHP και της χρησιμοποίησης της θερμότητας περιοχής. Στη Νορβηγία, σχεδόν όλη η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται με την υδρενέργεια και η χρήση της θερμότητας περιοχής είναι ελάχιστη. Στη Σουηδία, η παραγωγή υδρενέργειας και πυρηνικής ενέργειας συμπληρώνεται από την παραγωγή CHP. Η χρησιμοποίηση της θερμότητας περιοχής είναι υπολογίσιμη αν και όχι σε τέτοια ευρεία κλίμακα όσο στη Φινλανδία και τη Δανία. Η Δανία περιγράφεται με 30 διαδικασίες, ενώ η Σουηδία και η Νορβηγία περιγράφονται κατά προσέγγιση από 20 διαδικασίες η κάθε μια.

Μια απλουστευμένη έκδοση του Φινλανδικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.



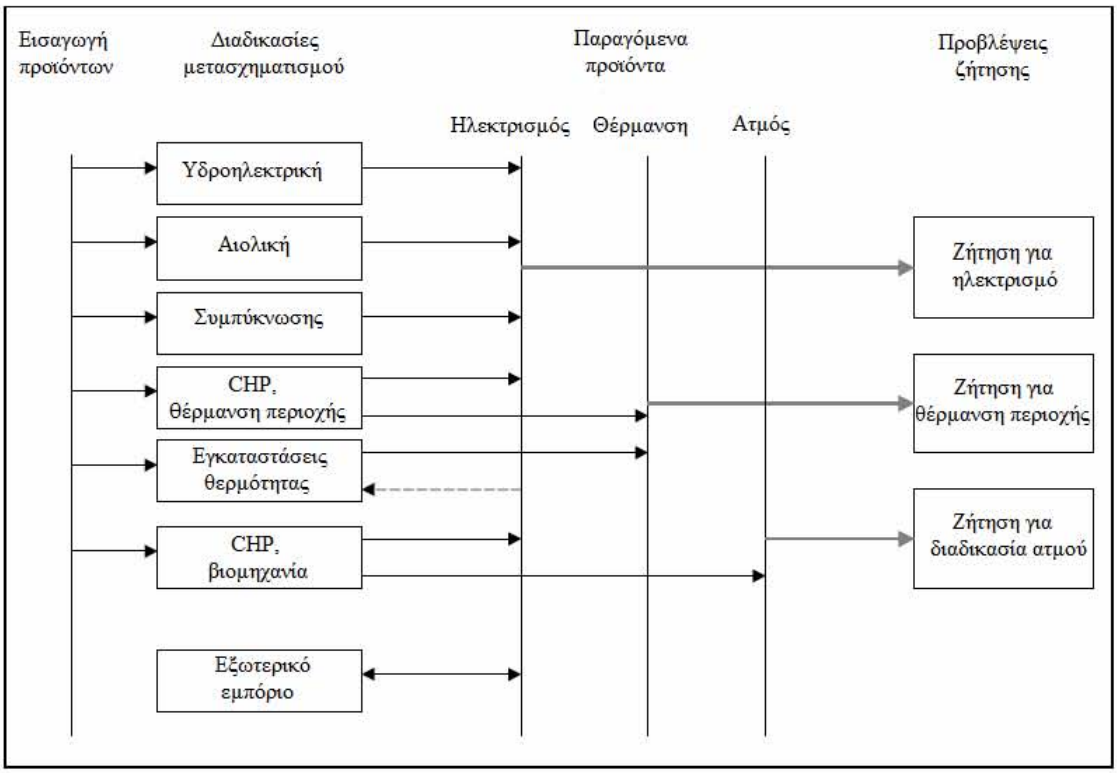
Σχήμα 5.1. Η δομή του Φινλανδικής υπομονάδας.

Οι μεταφορείς πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούνται για τη θερμότητα και για την παραγωγή ενέργειας (π.χ., άνθρακας, τύρφη, ουράνιο, αέρας και νερό) απεικονίζονται με τις κάθετες γραμμές στην αριστερή πλευρά στο Σχήμα 5.1. Οι μεταφορείς πρωτογενούς ενέργειας ρέουν στις διαδικασίες μετασχηματισμού, οι οποίες παράγουν είτε την ηλεκτρική ενέργεια είτε τη θερμότητα είτε και τα δύο. Επιπλέον, αυτές οι διαδικασίες έχουν συνήθως και υποπροϊόντα όπως είναι οι εκπομπές, αλλά παραλείπονται στο Σχήμα 5.1 για λόγους σαφήνειας. Οι διαδικασίες

μετασχηματισμού στο Σχήμα 5.1 αντιστοιχούν στις ομάδες διαδικασιών του μοντέλου παραδείγματος χάριν, η ενέργεια συμπύκνωσης (condensing power) περιλαμβάνει τις διαδικασίες που περιγράφουν τους στροβίλους φυσικού αερίου (gas turbines), τα θερμοηλεκτρικά εργοστάσια άνθρακα (coal fired power plants) και τις εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας (nuclear power plants) μεταξύ πολλών άλλων.

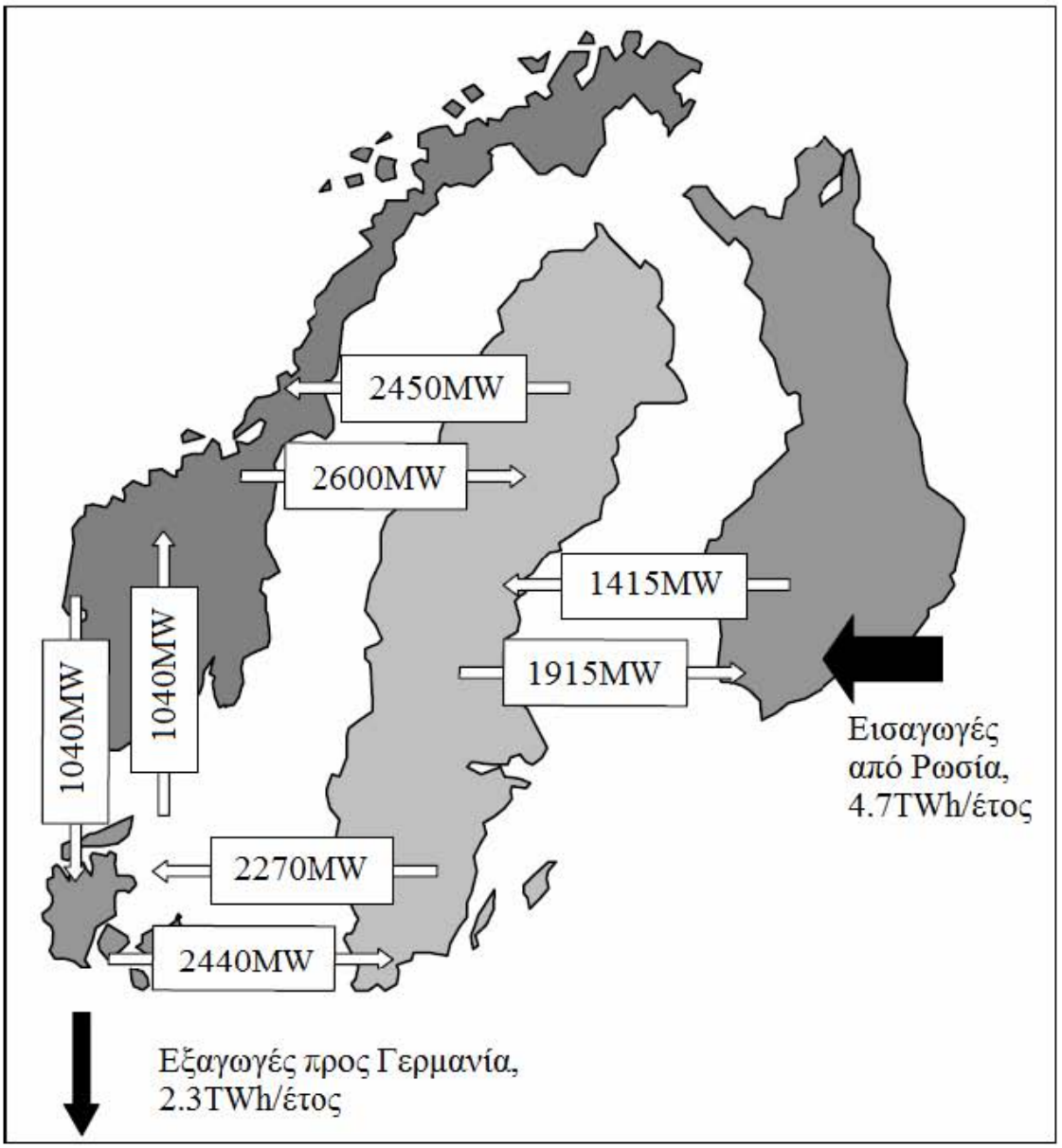
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη Φινλανδική υπομονάδα (finnish module) τόσο η θέρμανση περιοχής όσο και η διαδικασία ατμού διαιρέθηκαν σε δύο προϊόντα (commodities). Αυτό ήταν απαραίτητο προκειμένου να αποφευχθούν οι λύσεις όπου μεγαλύτερα, αποδοτικότερα προϊόντα μονάδων CHP και θερμοηλεκτρικές εγκαταστάσεις θα παρήγαγαν υπερβολικά με αποτέλεσμα να μειώνεται η παραγωγή των μικρών μονάδων. Με τα χωριστά προϊόντα, οι μεγάλες και μικρές μονάδες έχουν χωριστές απαιτήσεις που πρέπει να ικανοποιούνται και το πρόβλημα μπορεί να αποφευχθεί τουλάχιστον σε κάποιο επίπεδο. Η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια καθώς επίσης και για θερμότητα περιοχής όσο και για διαδικασίες ατμού δίνεται εξογενώς στο μοντέλο.

Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζεται το πλαίσιο που χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση της Σουηδίας, της Νορβηγίας και της Δανίας, με εξαίρεση το μικρό ποσό υδρενέργειας της Δανίας το οποίο δεν έχει περιληφθεί στο μοντέλο. Αντίθετα με τη Φινλανδική υπομονάδα, κανένας διαχωρισμός δεν έγινε μεταξύ των μεγάλων και μικρών μονάδων και έτσι η θέρμανση περιοχής όσο και η διαδικασία ατμού περιγράφονται με ένα προϊόν. Επιπλέον, στην περιοχή της Νορβηγίας και η θέρμανση περιοχής και η διαδικασία ατμού έχουν συνδυαστεί σε ένα προϊόν θερμότητας (heat commodity). Το τονισμένο βέλος στο Σχήμα 5.2 απεικονίζει τη μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας στις αντλίες θερμότητας και τους ηλεκτρικούς λέβητες, οι οποίοι χρησιμοποιούνται στη Νορβηγία και τη Σουηδία για την παραγωγή θέρμανσης περιοχής.



Σχήμα 5.2. Η δομή των μοντελοποιημένων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στη Σουηδία, τη Νορβηγία και τη Δανία. Η Δανέζικη υπομονάδα δεν περιλαμβάνει την υδρενέργεια ενώ στη Νορβηγική υπομονάδα ο ατμός και η θέρμανση έχουν συνδυαστεί σε ένα προϊόντα.

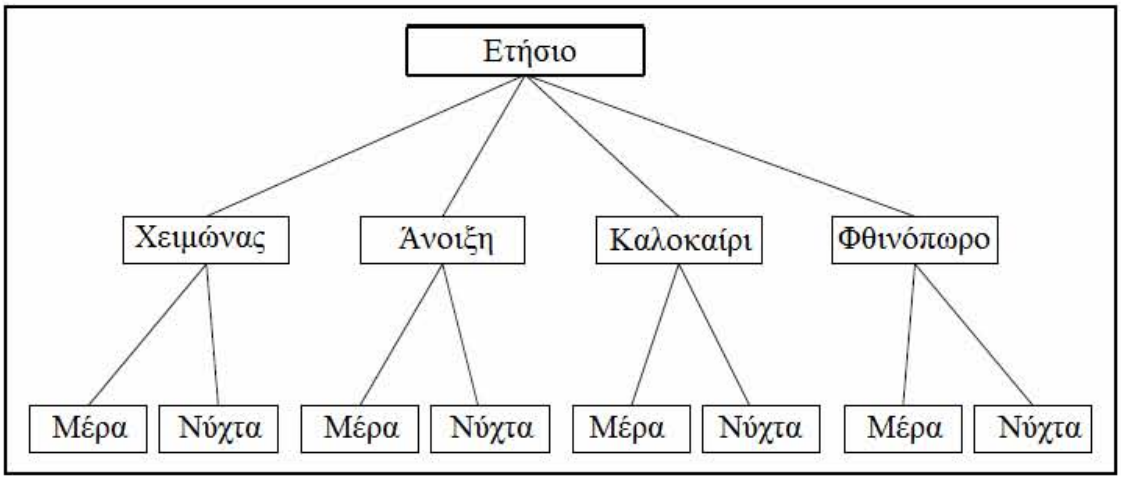
Το εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των τεσσάρων περιοχών διαμορφώνεται ρητά ενώ το εμπόριο με τις εξωτερικές περιοχές δίνεται εξογενώς. Η εσωτερική ανταλλαγή ενέργειας πραγματοποιείται μέσω των διαδικασιών ανταλλαγής, οι οποίες, όπως και όλες οι άλλες διαδικασίες, περιγράφονται από την υπάρχουσα ικανότητα μαζί με άλλες τεχνικές και οικονομικές παραμέτρους όπως για παράδειγμα το κόστος επένδυσης και η διάρκεια ζωής. Οι διαδικασίες ανταλλαγής με τις ικανότητές τους (όγκος) περιγράφονται στο Σχήμα 5.3 [88].



Σχήμα 5.3. Το εμπόριο της ηλεκτρικής ενέργειας στο μοντέλο. Τα άσπρα βέλη με την ικανότητα μεταφοράς παριστάνουν το διαμορφωμένο εσωτερικό εμπόριο, ενώ τα μαύρα βέλη παριστάνουν το εξωγενώς δεδομένο εμπόριο με τις εξωτερικές περιοχές.

Προβλήματα στην ικανότητα μεταφοράς μεταξύ των νότιων και των περιοχών του κέντρου της Νορβηγίας περιορίζουν μερικές φορές τις εισαγωγές της χώρας από τη Δανία, τα οποία έχουν ληφθεί υπόψη με την ανάθεση υψηλότερων δαπανών δραστηριότητας στη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τη Δανία στη Νορβηγία. Κατά συνέπεια, στο μοντέλο η Νορβηγία εισάγει κατευθείαν από τη Δανία μόνο όταν χρησιμοποιείται ήδη πλήρως η ικανότητα μεταφοράς μέσω της Σουηδίας.

Στη Σκανδιναβία, η εισροή στις δεξαμενές κατά τη διάρκεια της άνοιξης διαφέρει σε μεγάλο βαθμό σε σχέση με αυτήν κατά τη διάρκεια του φθινοπώρου. Το νερό που προέρχεται από το λιώσιμο του χιονιού γεμίζει τις δεξαμενές γρήγορα την άνοιξη, ενώ οι βροχές του φθινοπώρου οδηγούν σε μια πιο ομαλή αλλά και πιο μικρή εισροή. Προκειμένου να μοντελοποιηθεί η εποχιακή συμπεριφορά του περιεχομένου των δεξαμενών νερού και της ρυθμιζόμενης παραγωγής υδρενέργειας, στο μοντέλο συμπεριλήφθηκαν τέσσερις εποχές. Κάθε εποχή υποδιαιρείται σε δύο ημερήσιες χρονοσχισμές (timeslices) αντιπροσωπεύοντας το πρωινό μέγιστο φορτίο (daytime peak load) και το φορτίο νυχτερινής βάσης (nighttime base load) και έτσι ένα έτος διαιρείται συνολικά σε οκτώ χρονοσχισμές. Οι χρονοσχισμές, το επίπεδο ιεραρχίας και η ταξινόμησή τους παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4. Κάθε περίοδος αποτελείται στο χαμηλότερο επίπεδο της από οκτώ χρονοσχισμές, οι οποίες απεικονίζονται σε διαδοχική διάταξη.

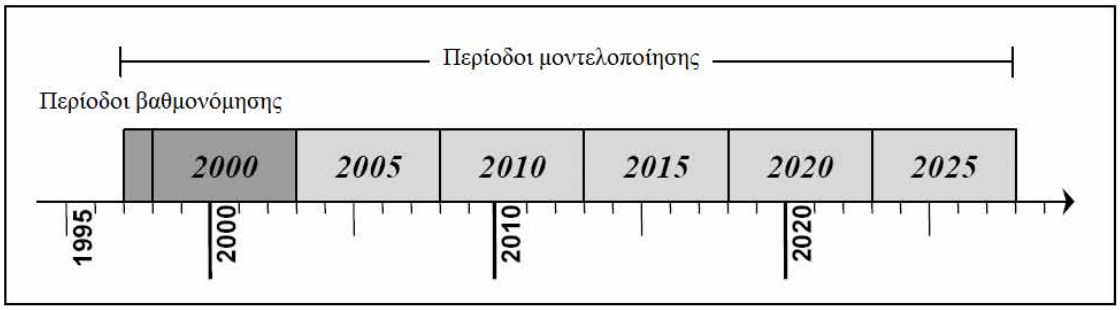
Οι τέσσερις εποχές στο μοντέλο είναι ο χειμώνας, η άνοιξη, το καλοκαίρι και το φθινόπωρο. Ο χειμώνας έχει πέντε μήνες ενώ το καλοκαίρι αποτελείται από τρεις μήνες και η διάρκεια της άνοιξης και του φθινοπώρου είναι δύο μήνες. Τα παραπάνω παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

Εποχή	Διάρκεια (χρόνια)	Αντιστοιχία μηνών
Χειμώνας	0.414	Νοέμβριος-Μάρτιος
Άνοιξη	0.167	Απρίλιος και Μάιος
Καλοκαίρι	0.252	Ιούνιος, Ιούλιος και Αύγουστος
Φθινόπωρο	0.167	Σεπτέμβριος και Οκτώβριος

Πίνακας 5.1. Οι τέσσερις εποχές, η διάρκειά τους και η αντιστοιχία των μηνών όπως χρησιμοποιούνται στο μοντέλο.

Η διαίρεση είναι βασισμένη στα χαρακτηριστικά και το επίπεδο μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στη Φινλανδία και τη Σουηδία. Οι χρονοσχισμές που παρουσιάζουν τις ημερήσιες περιόδους φορτίου ημέρας και νύχτας είναι ίσες στη διάρκεια.

Οι μοντελοποιημένες περίοδοι καλύπτουν συνολικά μια χρονική έκταση 31 ετών από την αρχή του 1997 έως το τέλος του 2027. Το έτος 1997 επιλέχτηκε να είναι η πρώτη περίοδος βαθμολόγησης, δεδομένου ότι η παραγωγή υδρενέργειας ήταν κοντά στο μέσο όρο και τα περισσότερα δεδομένα ήταν διαθέσιμα για αυτό το έτος. Η επόμενη περίοδος, 2000, αντιπροσωπεύει έναν μέσο όρο των ετών μεταξύ 1998 και 2002, και χρησιμοποιείται για την πρότυπη βαθμολόγηση επίσης. Οι πραγματικές περίοδοι της μοντελοποίησης αποτελούνται από τις περιόδους 2005, 2010, 2015, 2020 και το 2025, κάθε μια έχοντας διάρκεια πέντε ετών (Σχήμα 5.5).



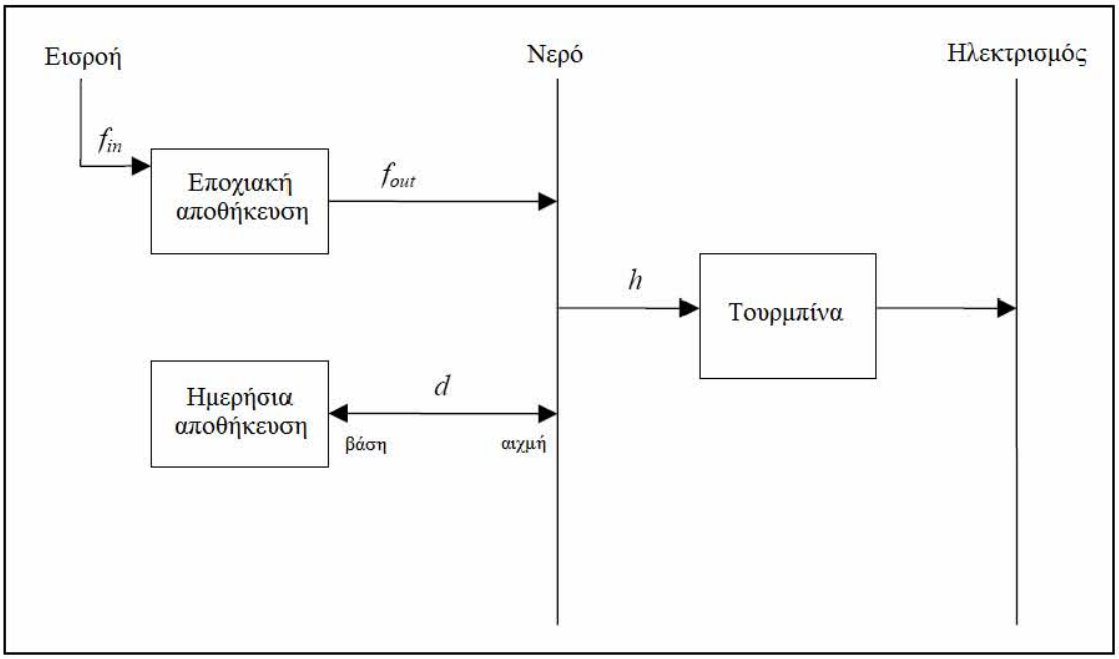
Σχήμα 5.5. Ο ορίζοντας του μοντέλου.

5.3 Μοντελοποίηση Υδρενέργειας

Η παραγωγή υδρενέργειας μπορεί να διαιρεθεί σε ρυθμισμένη (regulating) και μη ρυθμισμένη (non-regulating) παραγωγή. Οι μεγάλες εποχιακές δεξαμενές

αποθηκεύουν το νερό κατά τη διάρκεια της υψηλής εισροής την άνοιξη και το καλοκαίρι, ενώ το απαλλάσσουν κατά τη διάρκεια της υψηλότερης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας το χειμώνα. Με τη ρύθμιση της απαλλαγής μιας τέτοιας εποχιακής δεξαμενής, επίσης η ηλεκτρική παραγωγή των συνδεδεμένων εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας μπορεί να ρυθμιστεί. Στα συστήματα ποταμών χωρίς ρύθμιση της δεξαμενής, η παραγωγή των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας εξαρτάται από τη φυσική εισροή. Οι μεμονωμένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας μπορούν να περιέχουν φράγματα αποθήκευσης, τα οποία επιτρέπουν τον κανονισμό μεταξύ της ημερήσιων αιχμών και της παραγωγής βάσεων ως ένα ορισμένο βαθμό.

Η ρυθμισμένη υδρενέργεια έχει διαμορφωθεί με τρεις διαδικασίες που περιγράφουν την εποχιακή δεξαμενή (αποθήκευση), την ημερήσια δεξαμενή (αποθήκευση) και τις εγκαταστάσεις υδρενέργειας (Σχήμα 5.6).



Σχήμα 5.6. Η υδρενέργεια μπορεί να περιγραφεί με τρεις διαδικασίες που είναι η εποχιακή αποθήκευση, η ημερήσια αποθήκευση και ο στρόβιλος.

Και στις εποχιακές και στις ημερήσιες δεξαμενές δίνονται τα όρια δραστηριότητας, τα οποία θέτουν το ανώτερο όριο στο επίπεδο αποθήκευσης σε οποιαδήποτε χρονοσχισμή. Η εισροή δεξαμενών καθορίζεται για κάθε εποχή και η χρήση της ετήσιας εισροής βελτιστοποιείται υπό τους περιορισμούς της ικανότητας

εγκαταστάσεων δεξαμενών και της παραγωγής ενέργειας. Χαρακτηρίζοντας την εισροή στη χρονοσχισμή i ως $f_{in,i}$, την εκροή με $f_{out,i}$ και το ποσό του νερού που αποθηκεύεται στη δεξαμενή με A_t, το επίπεδο αποθήκευσης στη χρονοσχισμή $i+1$ υπολογίζεται από την εξίσωση

$$A_{i+1} = A_i + f_{in,i} - f_{out,i} \quad (1)$$

Κατά συνέπεια το επίπεδο αποθήκευσης υπολογίζεται στην αρχή κάθε χρονοσχισμής. Η εκροή μιας εποχιακής δεξαμενής παραμένει σταθερή και κατά τη διάρκεια της αιχμής και του φορτίου βάσεων, ενώ η ημερήσια δεξαμενή χρεώνεται κατά τη διάρκεια του φορτίου βάσεων και εκφορτίζεται κατά τη διάρκεια του μέγιστου φορτίου. Το ποσό ύδατος που οδηγείται στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας (h_i) είναι απλά το ποσό των εκροών

$$h_i = f_{out,i} + d_i \quad (2)$$

όπου d_i είναι η εισροή/εκροή της ημερήσιας δεξαμενής (η τιμή του d_i είναι θετική όταν αδειάζει η δεξαμενή και αρνητική όταν γεμίζει). Η ημερήσια δεξαμενή μπορεί μόνο να αποθηκεύσει μέσα σε μια εποχή. Το ποσό που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια του μέγιστου φορτίου πρέπει να αποθηκευτεί κατά τη διάρκεια του φορτίου βάσης την ίδια εποχή. Όλη η εισροή περνά από την εποχιακή δεξαμενή που πρέπει να απαλλαχθεί προκειμένου να χρεωθεί η ημερήσια δεξαμενή και για να παραγάγει την ηλεκτρική ενέργεια στις εγκαταστάσεις υδρενέργειας.

Η μη ρυθμισμένη υδρενέργεια δεν έχει διαμορφωθεί χωριστά, αλλά έχει περιληφθεί ως μέρος της ρύθμισης του συστήματος υδρενέργειας. Η ετήσια εισροή σε κάθε χώρα έχει υπολογιστεί να είναι το μέσης ετήσιας τιμής ποσό παραγωγής υδρενέργειας [88] και η αποδοτικότητα στροβίλων έχει τεθεί στο 100%. Οι διαστάσεις των ημερήσιων δεξαμενών έχουν καθοριστεί κατά τέτοιο τρόπο ώστε η διαμορφωμένη παραγωγή υδρενέργειας να μοιάζει με την πραγματική παραγωγή υδρενέργειας κατά τη διάρκεια του φορτίου αιχμών και βάσεων. Παραδείγματος χάριν, η ρύθμιση της υδρενέργειας είναι περιορισμένη το καλοκαίρι, λόγω των δυσχερειών στην ικανότητα μεταφοράς και τον κίνδυνο της υπερχείλισης στις μικρότερες δεξαμενές. Συνεπώς, η διαφορά μεταξύ της αιχμής και της παραγωγής φορτίου βάσης το καλοκαίρι περιορίζεται ώστε να είναι χαμηλότερη από ότι στις άλλες εποχές. Στον Πίνακα 2, η μέγιστη διαφορά ισχύος παραγωγής μεταξύ

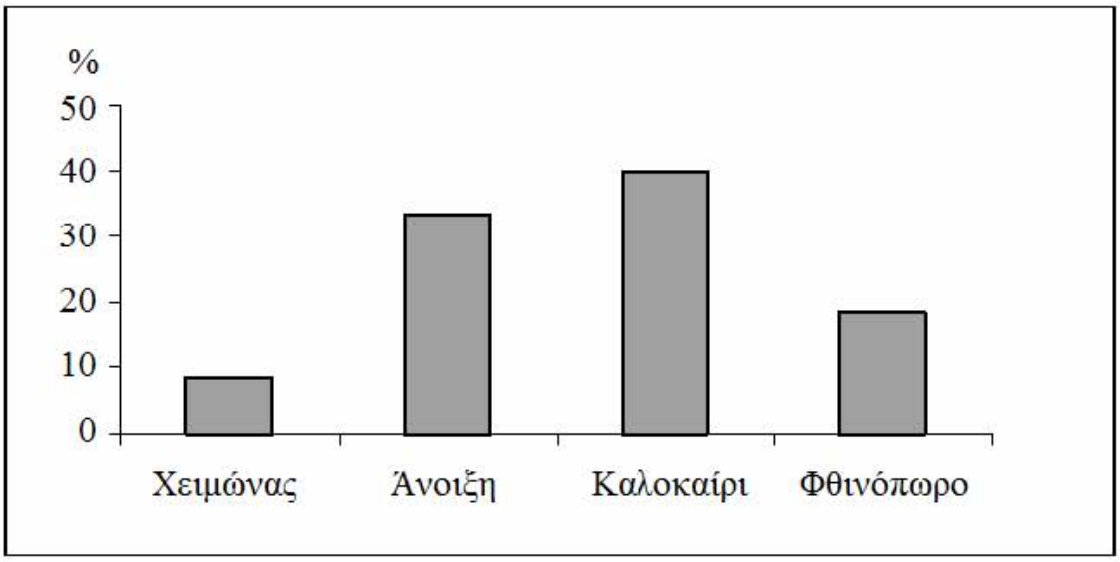
χειμερινής ημέρας και χειμερινής νύχτας δίνεται για κάθε περιοχή όπως καθορίζονται από τη διάσταση της ημερήσιας αποθήκευσης.

	Νορβηγία	Σουηδία	Φινλανδία
Πραγματική χωρητικότητα δεξαμενών, TWh	81.5	33.6	4.9
Μοντελοποιημένη εποχιακή ικανότητα αποθήκευσης, TWh	44.1	20.4	3.0
Μέγιστη διαφορά της ισχύος μεταξύ της παραγωγής μιας χειμερινής μέρας και μιας χειμερινής νύχτας, GW	11.0	5.5	1.2

Πίνακας 5.2. Πραγματική και μοντελοποιημένη εποχιακή ικανότητα αποθήκευσης και μέγιστη διαφορά παραγωγικής ισχύος ημέρας και νύχτας κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Η πραγματική ικανότητα δεξαμενών λαμβάνεται από Nordel (1999).

Η εποχιακή ικανότητα δεξαμενών έχει καθοριστεί βασισμένη στις μέσες τιμές του εθνικού περιεχομένου δεξαμενών κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '90 Λόγω της απρόβλεπτης εισροής, πρέπει να διατηρηθεί ένα μη αμελητέο ποσό επιφυλάξεων και έτσι η ικανότητα μιας δεξαμενής μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο μερικώς. Παραδείγματος χάριν, αν και η ικανότητα δεξαμενών στη Νορβηγία ανέρχεται σε 81.7TWh, σε ένα μέσο έτος το περιεχόμενο δεξαμενών ποικίλλει από 29.4TWh στην αρχή της άνοιξης σε 73.5TWh στα τέλη του καλοκαιριού [89]. Υπολογισμένη ως διαφορά της υψηλότερης και χαμηλότερης τιμής, στην εποχιακή δεξαμενή στη Νορβηγική υπομονάδα έχει δοθεί μια ικανότητα 44.1TWh. Οι κατ'εκτίμηση ικανότητες δεξαμενών στις Σουηδικές και Φινλανδικές υπομονάδες είναι 20.4 TWh και 3.0TWh αντίστοιχα, ενώ το ποσό των πραγματικών ικανοτήτων σε αυτές τις χώρες είναι 33.5TWh και 4.9TWh, όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Η κατανομή της εποχιακής εισροής, που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.7, είναι βασισμένη στις στατιστικές εισροής της Σουηδίας [90].



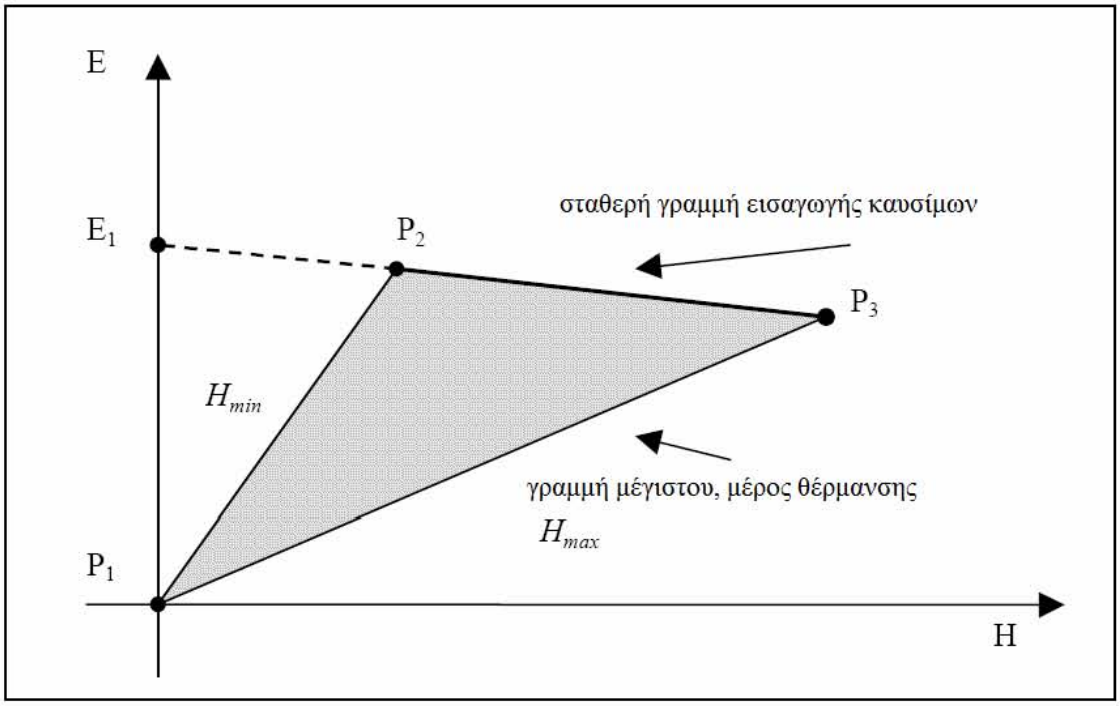
Σχήμα 5.7. Ο σχετικός ρυθμός εισροής σε κάθε εποχή.

Η εισροή στο τέλος της άνοιξης και στην αρχή του καλοκαιριού προέρχεται από το λιώσιμο του χιονιού και είναι πολύ έντονη. Εντούτοις, όπως η εισροή στο μοντέλο υπολογίζεται ως εποχιακός μέσος όρος, η αιχμή δεν είναι ορατή στο Σχήμα 5.7. Περιστασιακά, έντονες βροχοπτώσεις προκαλούν επίσης ισχυρή εισροή το φθινόπωρο, αλλά οι μέσες τιμές παραμένουν κάτω από τις τιμές της άνοιξης και του καλοκαιριού. Το χειμώνα, η θερμοκρασία στις Σκανδιναβικές χώρες βρίσκεται συνήθως αρκετά κάτω από 0°C και οι χιονοπτώσεις δεν συμβάλλουν στην εισροή πριν από την άνοιξη.

5.4 Μοντελοποίηση της Συνδυασμένης Θέρμανσης και Παραγωγή Ισχύος

Οι στρόβιλοι αντίθλιψης (back pressure turbines) παράγουν θέρμανση και ηλεκτρική ενέργεια με ένα σταθερό ρυθμό που μπορεί να δοθεί άμεσα στο μοντέλο ως παράμετρος διαδικασίας. Οι εγκαταστάσεις CHP με τους εύκαμπτους τρόπους λειτουργίας δηλαδή στρόβιλοι συμπύκνωσης με απομάστευση, εντούτοις (extraction condensing turbines) είναι πιο περίπλοκες να διαμορφωθούν. Ο χρήστης πρέπει να καθορίσει την κλίση της σταθερής γραμμής εισαγωγής καυσίμων β και της αποδοτικότητας τρόπου συμπύκνωσης n_{cm}. Δίνεται επίσης το μέγιστο και ελάχιστο μερίδιο θέρμανσης $H_{\max}$ και $H_{\min}$ αντίστοιχα στα προϊόντα παραγωγής που περιέχουν την παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια και θέρμανση.

Θεωρείται μια διαδικασία συμπύκνωσης εξαγωγής η οποία αποτελείται από δύο χωριστές διαδικασίες, όπου η πρώτη διαδικασία μετατρέπει τις εισαγωγές καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια και η δεύτερη διαδικασία μετατρέπει ένα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας σε θέρμανση. Η αποδοτικότητα τρόπου συμπύκνωσης είναι η αποδοτικότητα όταν παράγεται μόνο ηλεκτρική ενέργεια (το σημείο E_1 στο Σχήμα 5.8) και η κλίση της σταθερής γραμμής εισαγωγής καυσίμων καθορίζει την αναλογία με την οποία η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε θέρμανση.



Σχήμα 5.8. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης με τους στροβίλους εξαγωγής συμπύκνωσης. Η σκιασμένη περιοχή απεικονίζει τους συνδυασμούς ταυτόχρονης παραγωγής θέρμανσης και ισχύος.

Παραδείγματος χάριν, με μια κλίση 0.2, μια μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να μετατραπεί σε πέντε μονάδες θέρμανσης. Στο Σχήμα 5.7, η παραγωγή θέρμανσης και ισχύος είναι περιορισμένες στη σκιασμένη περιοχή από τα μέγιστα και ελάχιστα ποσά θέρμανσης και τη μέγιστη γραμμή εισαγωγής καυσίμων.

Συχνά η μέγιστη ακαθάριστη αποδοτικότητα $n_{\max}$ μιας διαδικασίας CHP είναι γνωστή και πρέπει να υπολογιστεί η αποδοτικότητα του τρόπου συμπύκνωσης. Ας γίνει η υπόθεση ότι με μια μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να παραχθεί τουλάχιστον μια μονάδα θέρμανσης (δηλαδή $0 \le \beta \le 1$), που συμβαίνει ουσιαστικά

με όλες τις υπάρχουσες τεχνολογίες. Κατά συνέπεια, η μέγιστη αποδοτικότητα θα επιτευχθεί όταν μεγιστοποιείται το μέρος παραγωγής της θέρμανσης $H_{\max}$ και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ελαχιστοποιείται $E_{\min}$. Η ηλεκτρική ενέργεια και η θέρμανση είναι τα μόνα προϊόντα στην εξεταζόμενη ομάδα παραγωγής, ως εκ τούτου οι τιμές που θα λάβουν τα δύο αυτά μέρη είναι ένα. Η μέγιστη ακαθάριστη αποδοτικότητα (maximum gross efficiency) μπορεί να οριστεί ως

$$n_{\max} = \frac{E_{\min} + H_{\max}}{F} = \frac{1}{F} \tag{2}$$

όπου F είναι η εισαγωγή καυσίμων. Αφ' ετέρου, η εισαγωγή καυσίμων μπορεί να υπολογιστεί ως εξαρτώμενη από την αποδοτικότητα του τρόπου συμπύκνωσης (condensing mode efficiency) και της κλίσης της σταθερής γραμμής εισαγωγής καυσίμων από την εξίσωση

$$F = \frac{E_{\min} + \beta \cdot E_{\max}}{n_{cm}} \tag{3}$$

Συνδυάζοντας αυτές τις δύο εξισώσεις η ακόλουθη σχέση μεταξύ της μέγιστης ακαθάριστης αποδοτικότητας και της αποδοτικότητας τρόπου συμπύκνωσης δίνεται από τη σχέση

$$n_{cm} = n_{\max} \cdot \left(E_{\min} + \beta \cdot H_{\max}\right) \tag{4}$$

Αν και όλοι οι διαφορετικοί συνδυασμοί παραγωγής θέρμανσης και ισχύος που καθορίζονται από τη σκιασμένη περιοχή στο Σχήμα 5.8 είναι δυνατοί, στην πραγματικότητα μόνο τρεις λύσεις υπάρχουν. Είτε η διαδικασία δεν χρησιμοποιείται (P_1) ή χρησιμοποιείται στην πλήρη ισχύ και η ηλεκτρική παραγωγή μεγιστοποιείται (P_2) ή η παραγωγή θέρμανσης είναι μεγιστοποιημένη (P_3). Μικρές αλλαγές στις παραμέτρους μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλες διαφοροποιήσεις στην παραγωγή CHP που καθιστά τη συμπεριφορά ενός μοντέλου ασταθή. Επομένως, χρειάζεται να εισαχθούν σφιχτοί περιορισμοί.

Στο μοντέλο που έχει αναπτυχθεί, στις διαδικασίες συμπύκνωσης με απομάστευση στη Φινλανδία έχει δοθεί ένα ευρύ φάσμα για το διαθέσιμο μερίδιο παραγωγής θερμότητας, το οποίο μπορεί στις περισσότερες περιπτώσεις να ποικίλει μεταξύ 30% και 70% της συνολικής παραγωγής. Η αποδοτικότητα αυτών των διαδικασιών αυξάνεται όσο αυξάνεται και το μερίδιο των αυξήσεων θερμότητας. Μόνο το καλοκαίρι, όταν η ζήτηση θερμότητας είναι χαμηλή, μερικές διαδικασίες CHP στο μοντέλο χρησιμοποιούν πραγματικά τη μέγιστη παραγωγή ηλεκτρικής

ενέργειας. Η θέρμανση περιοχής που παράγουν οι μονάδες CHP χρησιμοποιείται για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε μεγάλη έκταση στη Δανία από ότι στη Φινλανδία, ακόμα κι αν η κατανάλωση θερμότητας στη Φινλανδία είναι εντατικότερη. Επομένως, η θέρμανση έχει ένα μερίδιο μόνο 33%–38% της μέσης ετήσιας παραγωγής στις Δανέζικες μονάδες CHP μεγάλης κλίμακας. Ήταν απαραίτητο να περιοριστεί το μερίδιο παραγωγής της θέρμανσης αναλόγως και στις διαδικασίες συμπύκνωσης εξαγωγής στη Δανέζικη υπομονάδα, διαφορετικά οι μεγάλες μονάδες CHP θα είχαν παράσχει ένα υπερβολικό ποσό θέρμανσης περιοχής αφήνοντας τις εγκαταστάσεις θέρμανσης σχεδόν άχρηστες. Αφού όλη η θέρμανση περιοχής των διαδικασιών CHP και οι εγκαταστάσεις θέρμανσης έχουν συνδεθεί στο ίδιο δίκτυο θερμότητας, οι ευνοϊκότερες διαδικασίες θα παρήγαγαν όλη την καταναλωμένη θέρμανση εάν οι πρόσθετοι περιορισμοί δεν είχαν δοθεί. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολλά χωριστά δίκτυα θέρμανσης και επίσης οι ακριβότερες εγκαταστάσεις θέρμανσης πρέπει να λειτουργήσουν ακόμα κι αν η φτηνότερη ικανότητα παραγωγής θέρμανσης σε άλλα δίκτυα δεν χρησιμοποιήθηκε πλήρως.

Ένα άλλο πρόβλημα που δημιουργείται από το συνδυασμό των δικτύων θέρμανσης και σχετικά με τη μοντελοποίηση CHP είναι το πως θα περιοριστεί η ετήσια περίοδος διαθεσιμότητας ή χρησιμοποίησης μέγιστου φορτίου μιας διαδικασίας. Παραδείγματος χάριν, λόγω της απαίτησης θέρμανσης, πολλή θέρμανση περιοχής που παράγεται από τις εγκαταστάσεις CHP στη Φινλανδία έχει μια περίοδο χρησιμοποίησης μέγιστου φορτίου περίπου 4500 ωρών ετησίως, αν και τεχνικά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν περίπου 8000 ώρες ετησίως. Η διαίρεση ενός έτους σε αρκετές εποχές με τα ποικίλα φορτία θέρμανσης περιορίζει τη μέγιστη χρησιμοποίηση των διαδικασιών CHP μέχρι ενός ορισμένου βαθμού. Εντούτοις, εάν στις διαδικασίες ορίζεται η πραγματική τεχνική διαθεσιμότητα, οι οικονομικώς πιο αποδοτικές διαδικασίες μπορούν να παραγάγουν υπερβολικά δεδομένου ότι όλη η ικανότητα παραγωγής συνδέεται με το ίδιο δίκτυο θέρμανσης. Με τον περιορισμό της διαθεσιμότητας στο επίπεδο πραγματικής παραγωγής, η ευελιξία του προτύπου συγκεράζεται. Ένας στρόβιλος συμπύκνωσης με απομάστευση που μεγιστοποιεί την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας έχει μια πιο αδύνατη εξάρτηση από την απαίτηση θέρμανση από αυτή για την οποία η μεγιστοποίηση της παραγωγής θερμότητας είναι ευνοϊκή κατά συνέπεια, μια υψηλότερη διαθεσιμότητα πρέπει να

επιτραπεί για τις διαδικασίες που παράγουν ακόμη και στην περίπτωση συμπύκνωσης. Επιπλέον, η αυστηρά περιορισμένη διαθεσιμότητα πρέπει να ελεγχθεί στα σενάρια όπου η κατανάλωση θερμότητας επηρεάζεται, επειδή η αυξανόμενη ζήτηση θέρμανσης επιτρέπει φυσικά την αυξανόμενη παραγωγή για τις μεμονωμένες μονάδες CHP.

Στο μοντέλο TIMES, η διαθεσιμότητα μιας διαδικασίας μπορεί να περιοριστεί από τον παράγοντα διαθεσιμότητας (NCAP_AF) και από τον ετήσιο παράγοντα διαθεσιμότητας (NCAP_AFA). Ο παράγοντας διαθεσιμότητας περιορίζει τη δραστηριότητα μιας διαδικασίας κάτω από μια δεδομένη τιμή σε όλες τις χρονοσχισμές, ενώ ο ετήσιος παράγοντας διαθεσιμότητας περιορίζει τη συνολική ετήσια δραστηριότητα. Ο παράγοντας NCAP_AFA δίνει στο μοντέλο την ελευθερία να αποφασίσει πως η ετήσια παραγωγή διαιρείται μεταξύ των χρονοσχισμών, επιτρέποντας σε μια διαδικασία μια διαθεσιμότητα 100% σε μια συγκεκριμένη χρονοσχισμή. Η τεχνική διαθεσιμότητα μπορεί εύκολα να διαμορφωθεί με τον παράγοντα NCAP_AF, ενώ ο παράγοντας NCAP_AFA είναι κατάλληλος για την περίοδο χρησιμοποίησης μέγιστου φορτίου. Όταν η διαθεσιμότητα στις διαδικασίες CHP διαμορφώνεται με τον παράγοντα NCAP_AFA, η παραγωγή μιας μεμονωμένης διαδικασίας σε μια δεδομένη χρονοσχισμή φαίνεται να είναι σχεδόν τυχαία δεδομένου ότι η παραγωγή CHP λύνεται συνολικά. Παραδείγματος χάριν, μια εγκατάσταση CHP θα μπορούσε να λειτουργήσει στην πλήρη ισχύ της κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού και να μην λειτουργήσει καθόλου κατά τη διάρκεια του χειμώνα, κάτι το οποίο σημαίνει ότι άλλες τρεις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας αναπτύσσουν δραστηριότητες σε πλήρη ίσχυ κατά τη διάρκεια του χειμώνα και καθόλου κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Αν η παραγωγή μιας μεμονωμένης διαδικασίας σε μια ορισμένη χρονοσχισμή συμπεριφέρεται παράλογα, η ετήσια παραγωγή μιας διαδικασίας είναι εύκολο να ελεγχτεί με τον παράγοντα NCAP_AFA καθιστώντας το μοντέλο απλούστερο να διαχειριστεί. Εάν η διαθεσιμότητα διαμορφώνεται με την παράμετρο NCAP_AF τότε οι μεμονωμένες διαδικασίες συμπεριφέρονται λογικά, αλλά το πρόβλημα με την υπερβολική παραγωγή των περισσότερων οικονομικώς αποδοτικών εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας εμφανίζεται κατά τη διάρκεια των μερικών φορτίων. Το πρόβλημα θα μπορούσε να αποφευχθεί με την ανάθεση σε κάθε διαδικασία μιας χωριστής διαθεσιμότητας για κάθε χρονοσχισμή, αλλά η εύρεση των σωστών τιμών θα ήταν δύσκολη και

χρονοβόρα. Η ενέργεια αυτή θα μείωνε την ικανότητα του μοντέλου και λίγα θα κερδίζονταν σε σύγκριση με τη χρησιμοποίηση της παραμέτρου NCAP_AFA. Κατά συνέπεια, η διαθεσιμότητα των διαδικασιών CHP και οι εγκαταστάσεις θέρμανσης στο μοντέλο έχουν διαμορφωθεί χρησιμοποιώντας την παράμετρο NCAP_AFA.

Είναι επίσης δυνατό να οριστούν και οι δύο παράγοντες περιορισμού διαθεσιμότητας σε μια διαδικασία. Αυτό είναι λογικό μόνο στην περίπτωση που ο NCAP_AFA είναι ο κυρίαρχος περιορισμός στο ετήσιο επίπεδο. Κατόπιν, ο NCAP_AF περιορίζει τη μέγιστη διαθεσιμότητα σε κάθε χρονοσχισμή αλλά δεν περιορίζει και την ετήσια διαθεσιμότητα (ειδάλλως ο περιορισμός NCAP_AFA δεν θα απαιτούνταν).

Στο μοντέλο, μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις θέρμανσης CHP έχουν περιλήφθουν γενικά ως διαδικασίες εξαγωγής συμπύκνωσης. Σαν εξαίρεση, οι διαδικασίες ηλεκτροπαραγωγής με τους στροβίλους αερίου, που έχουν υψηλή ισχύ ή μεγάλη ροή θέρμανσης, έχουν περιληφθεί ως στρόβιλοι αντίθλιψης. Επίσης όλες οι βιομηχανικές μονάδες CHP και οι μικρής κλίμακας μονάδες CHP με την παραγωγή θέρμανσης περιοχής θεωρούνται ως διαδικασίες αντίθλιψης (back pressure process). Στον Πίνακα 3 παριστάνονται οι περίοδοι χρησιμοποίησης μέγιστου φορτίου για τις διαφορετικές διαδικασίες.

	Φινλανδία	Δανία	Σουηδία, Νορβηγία
CHP, θέρμανση περιοχής	4500	5500	4500
CHP, θέρμανση περιοχής (παλιάς τεχνολογίας)	3500	-	-
CHP, βιομηχανία	6500	6500	6500
Εγκαταστάσεις θέρμανσης περιοχής	4800	4800	4800
Εγκαταστάσεις διαδικασίας ατμού	7000	-	-

Πίνακας 5.3. Περίοδος χρησιμοποίησης μέγιστου φορτίου για διαφορετικές διαδικασίες (ώρες/έτος). Οι τιμές είναι μόνο αντιπροσωπευτικές και μπορούν να διαφέρουν μεταξύ των μεμονωμένων διαδικασιών μέσα σε μια ομάδα διαδικασίας.

Όπως αναφέρεται ανωτέρω, μονάδες εξαγωγής συμπύκνωσης CHP στη Δανία λειτουργούν συχνά στην κατάσταση συμπύκνωσης και, συνεπώς, τους δίνεται μια πιο μεγάλη περίοδος χρησιμοποίησης από αυτή που τους δίνεται στη Φινλανδία. Οι τιμές είναι αρχικά υπολογισμένες με βάση τα διαθέσιμα στατιστικά στοιχεία αλλά μερικές τροποποιήσεις έχουν γίνει κατά τη διάρκεια της πρότυπης βαθμολόγησης.

5.5 Δεδομένα Μοντέλου

Τα δεδομένα του μοντέλου έπρεπε να συγκεντρωθούν από διάφορες πηγές, το οποίο έχει φυσικά μια επιρροή στη συνέπεια και την αξιοπιστία του μοντέλου. Μια βάση δεδομένων των λειτουργουσών εγκαταστάσεων ισχύος και θέρμανσης στη Φινλανδία έχει αποκτηθεί από το VTT, τεχνικό ερευνητικό κέντρο της Φινλανδίας. Οι διαθέσιμες στατιστικές έχουν χρησιμοποιηθεί και για την πρότυπη βαθμολόγηση και για τον καθορισμό της υπάρχουσας ικανότητας ηλεκτρικής παραγωγής στη Δανία, τη Νορβηγία και τη Σουηδία [91], [92], [88], [93].

Οι κυριότεροι τύποι εγκαταστάσεων παραγωγής ισχύος και θέρμανσης έχουν ληφθεί υπόψη στη Φινλανδική υπομονάδα, ενώ στη Σουηδία και τη Νορβηγία η υπάρχουσα ικανότητα έχει αθροιστεί σε λίγες διαδικασίες. Στη Δανία, οι εναλλακτικές λύσεις της νέας ικανότητας στη συνδυασμένη παραγωγή θέρμανσης και ισχύος συγκεντρώνονται στις μικρής κλίμακας μονάδες, οι οποίες έχουν επεκταθεί έντονα τα τελευταία χρόνια. Ένας συγκεκριμένος διαχωρισμός μεταξύ των μεγάλης και μικρής κλίμακας εγκαταστάσεων ισχύος και θέρμανσης έχει γίνει μόνο στη Φινλανδική υπομονάδα. Η ικανότητα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των περιοχών υποτίθεται ότι παρέμεινε στο υπάρχον επίπεδο, και λήφθηκε υπόψη μια εισαγωγή 4,700MWh/έτος από τη Ρωσία στη Φινλανδία καθώς επίσης και μια εξαγωγή 2,300MWh/έτος από τη Δανία στη Γερμανία.

Για να δοθεί ένα παράδειγμα σχετικά με τις παραμέτρους που έχουν οριστεί στις διαδικασίες, οι παράμετροι θερμοηλεκτρικών εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής φυσικού αερίου CHP παριστάνονται στον Πίνακα 4.

Τεχνικός χρόνος ζωής (έτη)	25
Οικονομικός χρόνος ζωής (έτη)	20
Κόστοι επένδυσης (EUR/PJ,a)	100000000
Σταθερά Κόστη (EUR/PJ,a)	415000
Μεταβλητά Κόστη (EUR/PJ,a)	88000
Χρόνος Κατασκευής (έτη)	2
Παράγοντας ετήσιας διαθεσιμότητας	0.55
Ικανότητα	0.9
Εγκατεστημένη ικανότητα (PJ/a)	60.80
Μερίδιο εξόδου προϊόντος	
Ηλεκτρισμός	0.5
Θέρμανση	0.5
Εκπομπές (ton/PJ)	
CO_2	56000
CH_4	0.30
N_2O	1.50

Πίνακας 5.4. Παράμετροι διαδικασιών συνδυασμένου κύκλου θερμοηλεκτρικής εγκατάστασης φυσικού αερίου CHP.

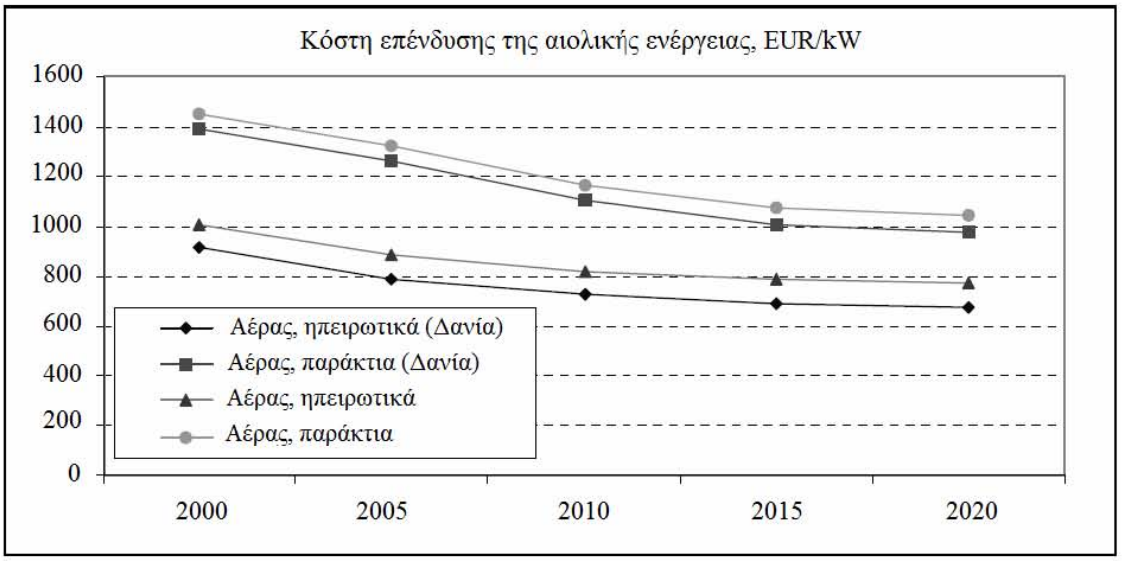
Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να θέσει τα ανώτερα, χαμηλότερα ή σταθερά όρια για τις παραμέτρους όπως είναι η εγκατεστημένη ικανότητα ή το μερίδιο εισόδου και εξόδου προϊόντων. Οι αποδοτικότητες, λόγος ισχύος προς θέρμανση και οι δαπάνες επένδυσης των επιλεγμένων τεχνολογιών παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.

Τύπος εγκατάστασης	**Λόγος ισχύος προς θέρμανση**	**Αποδοτικότητα καθαρής ενέργειας**				**Κόστη επένδυσης, EUR/kW(e+h)**
		1985	2000	2015	2000	2015
Παραγωγή ισχύος						
Κονιοποιημένος άνθρακας	-	0.37	0.44	0.46	950	950
Πετρέλαιο	-	0.38	0.38	0.38	600	600
NGCC	-	-	0.55	0.59	510	510
AFBC	-	-	0.39	0.40	1060	1060
PFBC	-	-	0.44	0.45	1170	1010
IGCC	-	-	0.46	0.50	1230	1040
CHP, θέρμανση περιοχής						
Κονιοποιημένος άνθρακας	0.43	0.85	0.87	0.88	363	363
AFBC, μεγάλης κλίμακας	0.51	0.85	0.86	0.87	410	410
AFBC, μικρής κλίμακας	0.35	0.81	0.85	0.86	410	410
NGCC, μεγάλης κλίμακας	1.00	-	0.90	0.90	315	315
NGCC, μικρής κλίμακας	0.92	-	0.87	0.87	315	315
PFBC, μεγάλης κλίμακας	0.72	-	0.86	0.87	552	552
CHP, βιομηχανία						
AFBC, μεγάλης κλίμακας	0.32	0.87	0.87	0.87	347	347
Λέβητας αποκατάστασης	0.20	0.78	0.82	0.83	388	388
IGCC	0.54	-	0.86	0.86	538	530
IGCC, άνθρακας/βιομάζα/τύρφη	0.82	-	0.86	0.86	757	640
Συντομογραφίες: NGCC= Ηλεκτροπαραγωγή φυσικού αερίου (Natural Gas Combined Cycle), AFBC= Ατμοσφαιρική καύση σε ρευστοποιημένη κλίνη (Atmospheric Fluidised Bed Combustion), PFBC= Καύση ρευστοποιημένης κλίνης υπό πίεση (Pressurised Fluidised Bed Combustion), IGCC= Ενσωματωμένη ηλεκτροπαραγωγή αεριοποίησης (Integrated Gasification Combined Cycle)						

Πίνακας 5.5. Εκτιμήσεις παραμέτρου για τις επιλεγμένες τεχνολογίες παραγωγής ισχύος και θέρμανσης.

Μερικές από τη τις μεγάλης κλίμακας μονάδες CHP θέρμανσης περιοχής έχουν μοντελοποιηθεί ως στρόβιλοι εξαγωγής συμπύκνωσης, το οποίο σημαίνει ότι ο λόγος

ισχύος προς θέρμανση μπορεί να αυξηθεί. Οι δαπάνες επένδυσης για τις εγκαταστάσεις αιολικής ενέργειας υποτίθεται ότι ήταν ελαφρώς χαμηλότερες στη Δανία από ότι στις άλλες Σκανδιναβικές χώρες, οι οποίες μπορούν να φανούν στο Σχήμα 5.9. Το γενικό επιτόκιο προεξόφλησης έχει τεθεί 5% στο μοντέλο.

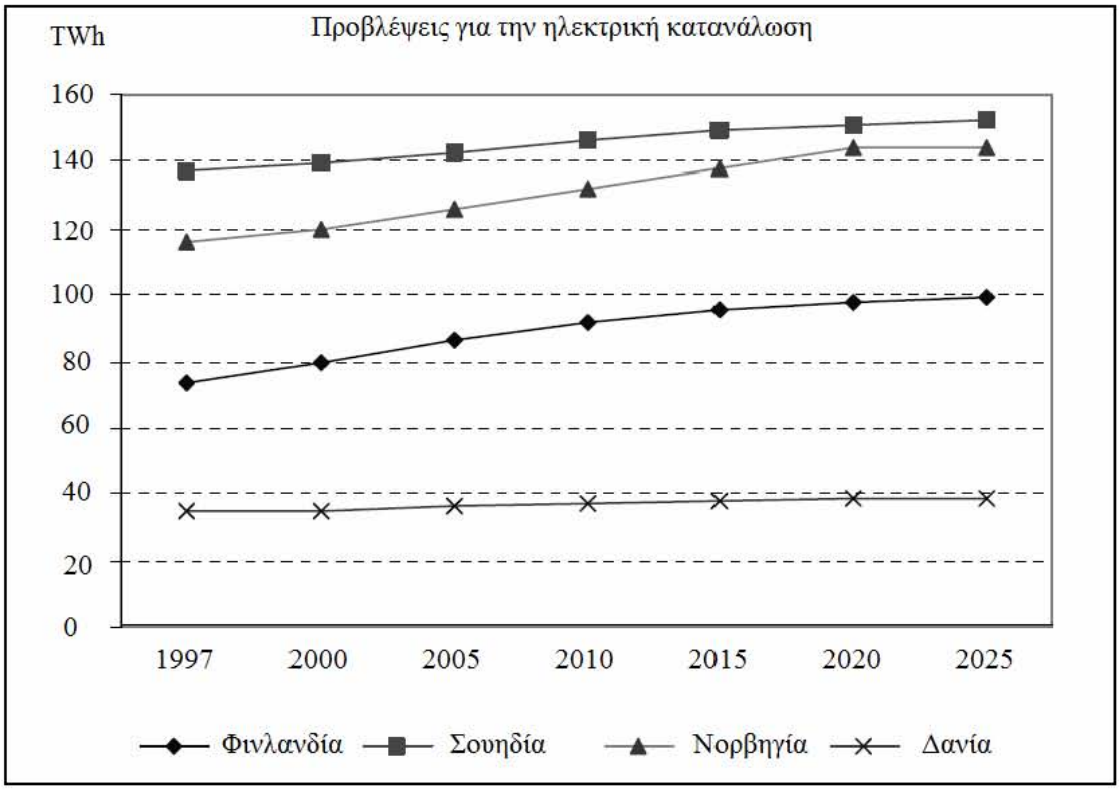


Σχήμα 5.9. Υποθέσεις για τις δαπάνες επένδυσης των εγκαταστάσεων παραγωγής αιολικής ενέργειας στη Δανία και τις άλλες Σκανδιναβικές χώρες.

Ο προσδιορισμός της εποχιακής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας είναι βασισμένος στις μηνιαίες στατιστικές ζήτησης. Στη Νορβηγία, τη Σουηδία και τη Δανία η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι περισσότερο συγκεντρωμένη το χειμώνα από ότι στη Φινλανδία όπου το υψηλό μερίδιο της βιομηχανικής κατανάλωσης απαλύνει τις εποχιακές αιχμές. Επιπλέον, η ηλεκτρική θέρμανση είναι πιο κοινή στη Νορβηγία και τη Σουηδία από ότι στη Φινλανδία, με αποτέλεσμα να αυξάνεται το χειμερινό μερίδιο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτές τις χώρες. Επίσης η διαφορά μεταξύ της υψηλότερης και χαμηλότερης ζήτησης κατά τη διάρκεια μιας ημέρας είναι υψηλότερη στη Νορβηγία και τη Σουηδία όπου η ρυθμιζόμενη υδρενέργεια προσφέρει αφθονία στη χαμηλότερου κόστους ισχύος αιχμής (low cost peaking power). Η κατανομή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας μεταξύ κάθε χρονοσχισμής υποτίθεται ότι παραμένει σταθερή καθ' όλη τη διάρκεια των περιόδων μοντελοποίησης. Παραδείγματος χάριν, η κατανάλωση χειμερινής μέγιστης ηλεκτρικής ενέργειας στη Φινλανδία αντιστοιχεί στο 25.2% της συνολικής ετήσιας κατανάλωσης σε κάθε περίοδο. Η χρονοσχισμή της κατανάλωσης ηλεκτρικής

ενέργειας στο χειμερινό μέγιστο στο μοντέλο απεικονίζεται μια χειμερινή ημέρα κατανάλωσης κατά μέσον όρο, η οποία είναι περίπου 20% χαμηλότερη από το ετήσιο μέγιστο φορτίο στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας κάθε χώρας. Επομένως, μια εξίσωση αιχμής (peaking equation) έχει εφαρμοστεί για να εξασφαλίσει την επαρκή ικανότητα δεξαμενών (adequate reserve capacity).

Οι προβολές βασικών γραμμών για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε περιοχή του μοντέλου παριστάνεται στο Σχήμα 5.10.



Σχήμα 5.10. Προβλέψεις για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προβλέψεις δεν περιλαμβάνουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή της θέρμανσης περιοχής, η οποία είναι σημαντική στη Σουηδία.

Η ηλεκτρική κατανάλωση στη Φινλανδία θα αυξηθεί στα 100TWh μέχρι το έτος 2025, το οποίο αντιστοιχεί σε μια αύξηση περίπου 35% έναντι της κατανάλωσης το 1998. Η εκτίμηση είναι σύμφωνα με το στόχο της ενεργειακής στρατηγικής του Υπουργείου εμπορίου και βιομηχανίας [94]. Με βάση το σενάριο αναφοράς τον Nou [95], η Νορβηγική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έχει υπολογιστεί να αυξηθεί κατά 19% μεταξύ 1998 και 2025, οδηγώντας σε μια κατανάλωση 144TWh στην τελευταία περίοδο.

Σύμφωνα με το Energiemyndigheten [96], η αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στη Σουηδία θα είναι αρκετά αργή και η συνολική κατανάλωση, αποκλείοντας τη ζήτηση ισχύος στις αντλίες θερμότητας και τους ηλεκτρικούς λέβητες, φθάνει σε 147TWh το 2010. Στο μοντέλο, η Σουηδική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έχει υπολογιστεί να φθάσει σε 153TWh μέχρι το έτος 2025, το οποίο αντιστοιχεί σε μια αύξηση περίπου 10% έναντι του επιπέδου κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας 1998, στους ηλεκτρικούς λέβητες και αντλίες θερμότητας έχει αποκλειστεί από τη ζήτηση δεδομένου ότι καθορίζεται από το μοντέλο. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται αργά επίσης στη Δανία, και μια αύξηση 9% μεταξύ 1998 και 2025 έχει τεθεί στο μοντέλο. Η ζήτηση για τη θέρμανση περιοχής υποτίθεται ότι αυξήθηκε κατά προσέγγιση 10% στη Φινλανδία και τη Δανία και κατά 20% στη Σουηδία και η Νορβηγία μεταξύ 2005 και 2025, ενώ οι διαδικασίες ατμού υπολογίζονται να παρουσιάσουν αύξηση κατά 15% στη Δανία και κατά 20% και στη Φινλανδία και στη Σουηδία κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου.

Πρόσθετοι περιορισμοί έχουν οριστεί για να περιορίσουν τη χρησιμοποίηση της πυρηνικής ενέργειας, του φυσικού αερίου, των βιολογικών καυσίμων και της τύρφης. Η επέκταση της πυρηνικής ενέργειας έχει απαγορευθεί στα περισσότερα από τα σενάρια, και έτσι η παραγωγή περιορίζεται στο τρέχον επίπεδο. Οι εισαγωγές φυσικού αερίου στη Φινλανδία είναι περιορισμένες λόγω των εκτιμήσεων της ασφάλειας ανεφοδιασμού. Εντούτοις, οι περιορισμοί επιτρέπουν μια συγκεκριμένη αύξηση του 60% μεταξύ 1997 και 2025. Στη Δανία και τη Σουηδία, ο ρυθμός κατανάλωσης φυσικού αερίου στη δεκαετία του '90 έχει υποτεθεί ότι παρέμεινε σταθερός καθ' όλη τη διάρκεια των περιόδων του μοντέλου. Έχει επίσης ληφθεί υπόψη η οικονομική δυνατότητα της χρήσης βιοενέργειας στη Φινλανδία [97] και η οικονομική δυνατότητα της Σουηδίας [96]. Η δυνατότητα της ανανεώσιμης ενεργειακής χρήσης στη Δανέζικη υπομονάδα είναι βασισμένη στο Energiestyrelsen [98], όπου προϋποτίθεται ότι το μερίδιο της ανανεώσιμης ενέργειας θα αυξηθεί κατά έναν μέσο όρο 1% ανά έτος. Τα Νορβηγικά όρια στη χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου και της βιομάζας είναι βασισμένα στο Nou [95]. Μια περίληψη των προβλέψεων και των περιορισμών κατανάλωσης ενέργειας παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.

TWh/έτος	Φινλανδία			Σουηδία			Νορβηγία			Δανία		
Περίοδος:	05	15	25	05	15	25	05	15	25	05	15	25
Κατανάλωση												
ηλεκτρισμού[1]	86	96	99	142	149	153	126	168	144	36	38	39
θέρμανση περιοχής	31	33	35	53	57	59	2	3	3	33	36	38
διαδικασία ατμού[2]	68	77	82	18	20	21	-	-	-	4	4	5
Άνω όριο κατανάλωσης												
φυσικού αερίου	42	53	58	11	17	22	17	39	61	33	47	53
τύρφης	25	31	36	3	4	5	-	-	-	-	-	-
βιοκαύσιμα[3]	61	69	74	55	60	63	6	8	10	19	24	26

[1]αποκλείοντας την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στις αντλίες θερμότητας και τους ηλεκτρικούς λέβητες

[2]στη Σουηδία, τη Νορβηγία και τη Δανία, μόνο η παραγωγή ατμού στις μονάδες CHP έχει περιληφθεί στο μοντέλο

[3]περιλαμβάνει τα ρευστά απόβλητα, τα βασισμένα στο ξύλο καύσιμα, το ενεργειακό άχυρο και τα απόβλητα

Πίνακας 5.6. Προβλέψεις βασικών γραμμών για την κατανάλωση προϊόντων και περιορισμοί για τις περιόδους 2005, 2015 και 2025.

Η μέση παραγωγή υδρενέργειας στη Νορβηγία υποτίθεται ότι αυξήθηκε κατά προσέγγιση κατά 10% μεταξύ 2000 και 2025, ενώ στη Σουηδία και τη Φινλανδία υποτίθεται ότι παρέμεινε στο τρέχον επίπεδο.

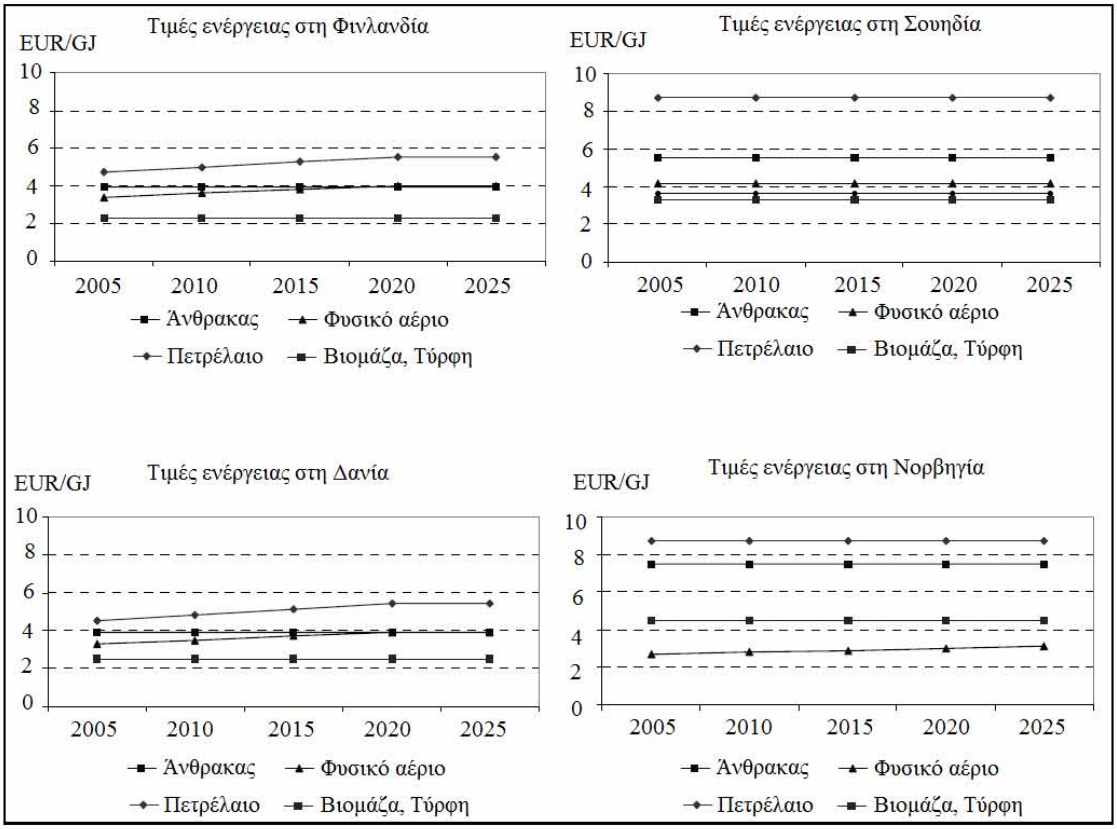
Οι τιμές ενέργειας στη Φινλανδία και τη Σουηδία έχουν λήφθει από τις στατιστικές τιμές ενέργειας του 1998, συμπεριλαμβανομένων των φόρων καυσίμων [91], [93]. Οι τιμές ενέργειας στη Νορβηγία τίθενται να είναι παρόμοιες με εκείνες της Σουηδίας με εξαίρεση την τιμή του φυσικού αερίου που έχει χαμηλώσει εντυπωσιακά και την τιμή της τύρφης και της βιομάζας που έχουν αυξηθεί. Οι Δανέζικες τιμές και η φορολογία είναι βασισμένες στις Φινλανδικές τιμές με μια μικρή μείωση στην τιμή του άνθρακα και του φυσικού αερίου και μια αύξηση στην τιμή των βιοκαυσίμων. Στο σενάριο βασικών γραμμών, οι τιμές τόσο του φυσικού αερίου όσο και του πετρελαίου αναμένονται να αυξηθούν κατά ένα μέγιστο 20%

μέχρι το έτος 2025, ενώ οι άλλες τιμές καυσίμων παραμένουν σταθερές. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 7.

	Φινλανδία		Δανία		Σουηδία		Νορβηγία	
EUR/GJ	2005	2025	2005	2025	2005	2025	2005	2025
Άνθρακας	3.90	3.90	3.27	3.27	5.51	5.51	7.51	7.51
Φυσικό αέριο	3.40	4.00	3.30	3.90	5.8	5.8	2.70	3.10
Αργό πετρέλαιο	4.70	5.55	4.50	5.40	8.69	8.69	8.69	8.69
Τύρφη	2.29	2.29	-	-	3.63	3.63	-	-
Βιοκαύσιμα[1]	2.29	2.29	2.51	2.51	3.31	3.31	4.5	4.5
[1] Στη Φινλανδική υπομονάδα η τιμή της πολτοποίησης των αποβλήτων είναι 2.0EUR/GJ								

Πίνακας 5.7. Υποθέσεις βασικών γραμμών για τις τιμές καυσίμων συμπεριλαμβανομένων και των φόρων.

Στη Φινλανδική υπομονάδα, τα πολτοποιημένα απόβλητα έχουν διαμορφωθεί χωριστά ενώ στις άλλες ενότητες που τα πολτοποιημένα απόβλητα συμπεριλαμβάνονται στα βιολογικά καύσιμα. Μια σύγκριση των τιμών καυσίμων μεταξύ κάθε περιοχής παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.11.



Σχήμα 5.11. Υποτιθέμενη ανάπτυξη των τιμών ενέργειας σε κάθε περιοχή του μοντέλου.

Οι εκπομπές των τριών σημαντικότερων αερίων θερμοκηπίου δηλαδή το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το μεθάνιο (CH_4) και το νιτρώδες οξείδιο (N_2O) περιλήφθηκαν στο μοντέλο. Οι εκπομπές του CO_2 καθορίζονται συνολικά από το ποσό και τον τύπο καυσίμων που χρησιμοποιούνται από τη διαδικασία, ενώ οι εκπομπές CH_4 και N_2O εξαρτώνται επίσης από την τεχνική καύσης της διαδικασίας. Οι παράγοντες εκπομπής παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.

Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα σε kT/PJ			
Άνθρακας	93.0	Τύρφη	104.9
Πετρέλαιο	79.0	Βιοκαύσιμα	-
Φυσικό αέριο	56.0		
Εκπομπές μεθανίου και νιτρώδων οξειδίων σε kT/PJ			
Τεχνική καύσης	Καύσιμο	CH_4	N_2O
Κονιορτοποιημένη καύση	Άνθρακας	0.004	0.002
Κονιορτοποιημένη καύση	Τύρφη	0.002	0.002
Κονιορτοποιημένη καύση, μικρής κλίμακας	Τύρφη, ξύλο	0.005	0.030
Κονιορτοποίηση	Βιομηχανικό CHP	0.021	0.003
Λέβητας αποκατάστασης	Απόβλητα	0.001	0.001
AFBC	Άνθρακας, τύρφη, ξύλο	0.012	0.030
PFBC	Άνθρακας, τύρφη, ξύλο	0.004	0.030
IGCC	Άνθρακας, τύρφη, ξύλο	0.004	0.002
NGCC	Φυσικό αέριο	0.003	0.001
FT+WHB	Φυσικό αέριο	0.003	0.001

Πίνακας 5.8. Παράγοντες εκπομπής για τα καύσιμα και τις επιλεγμένες τεχνικές καύσης.

Στα αποτελέσματα, οι εκπομπές CH_4 και N_2O μετασχηματίζονται στα ισοδύναμα του αντίτιμα του CO_2 από τους συνήθως χρησιμοποιημένους παράγοντες βάρους 21 και 310, αντίστοιχα. Αυτοί οι παράγοντες βάρους έχουν υπολογιστεί από τη συνεισφορά των αερίων αυτών στο φαινόμενο του θερμοκηπίου για μία περίοδο 100 ετών [99], [100].

5.6 Επισκόπηση Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 5ο παρουσιάστηκε η μοντελοποίηση του ενεργειακού συστήματος των Σκανδιναβικών χωρών. Το πακέτο προγραμμάτων (ή μοντέλο) το οποίο αναπτύχθηκε εφαρμόστηκε για την ενεργειακή περίπτωση των Σκανδιναβικών χωρών και για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η ενεργειακή επισκόπηση της κατάστασης που επικρατεί σε αυτές τις χώρες.

Παρόλα αυτά το πακέτο προγραμμάτων για να δώσει αποτελέσματα θα πρέπει να λάβει δεδομένα εισόδου. Αυτά τα δεδομένα εισόδου περιγράφονται στο Κεφάλαιο 6ο όπου παρουσιάζονται τα ενεργειακά σενάρια τα οποία θα απασχολήσουν την Μεταπτυχιακή αυτή εργασία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΕΝΑΡΙΑ

6.1 Εισαγωγή

Τα συνολικά εννέα σενάρια, που θα παρουσιαστούν σε αυτό το Κεφάλαιο αναλύθηκαν με τη χρήση του μοντέλου. Πρώτιστο κίνητρο για τα διαφορετικά σενάρια είναι να καταδειχθεί η λογική συμπεριφορά του μοντέλου στις ποικίλες παραμέτρους και περιπτώσεις. Συνεπώς, μόνο τα αποτελέσματα που επιτυγχάνονται στο σενάριο με τις υποθέσεις βασικών γραμμών (scenario with base-line assumptions), αποκαλούμενο και ως σενάριο αναφοράς, περιγράφονται με κάποια λεπτομέρεια, ενώ τα αποτελέσματα των άλλων σεναρίων αντιμετωπίζονται σε ένα γενικότερο επίπεδο. Έχει περιληφθεί επίσης μια ανάλυση της παραγωγής υδρενέργειας κάτω από ποικίλες εισροές ως μέρος του σεναρίου αναφοράς.

Εκτός από το σενάριο αναφοράς, έχουν υπολογιστεί δύο σύνολα σεναρίων. Η συμπεριφορά του μοντέλου εξετάζεται με τέσσερα σενάρια επικύρωσης (four validation scenarios) όπου για ορισμένες παραμέτρους δίνονται ακραίες εκτιμήσεις. Σε ένα από τα σενάρια, όλοι οι φόροι έχουν αφαιρεθεί από την τιμή του άνθρακα και η τιμή του τίθεται στα 1.33EUR/PJ, το οποίο παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια όλων των περιόδων. Στο δεύτερο σενάριο επικύρωσης, παρουσιάζεται η περίπτωση της ελεύθερης επέκτασης της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας στη Σουηδία και τη Φινλανδία. Στο σενάριο χαμηλής ζήτησης, η ζήτηση ισχύος και θερμότητας υποτίθεται ότι παραμένει σταθερή στο επίπεδο του 1997, ενώ στο σενάριο υψηλής

ζήτησης, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται δύο φορές γρηγορότερα απο ότι στην υπόθεση των βασικών γραμμών.

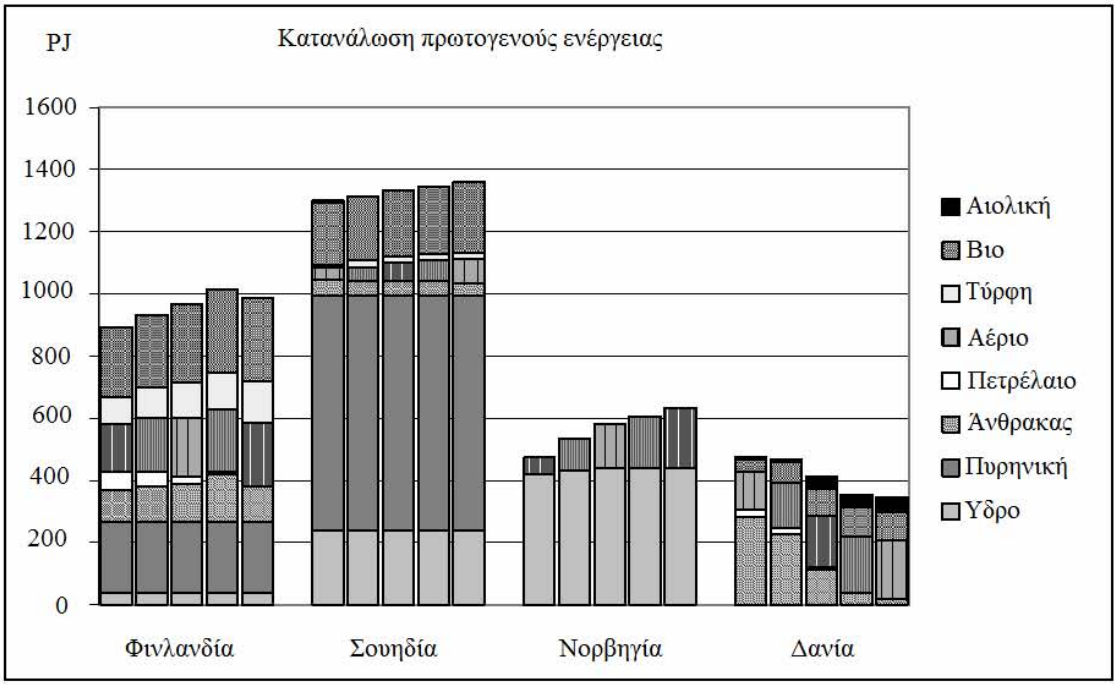
Το δεύτερο σύνολο σεναρίων χρησιμοποιείται για την απότομη ανάλυση (rough analysis) του Σκανδιναβικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στο πρώτο σενάριο ανάλυσης, η ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των Σκανδιναβικών χωρών απορρίπτεται προκειμένου να εξεταστούν τα οφέλη του εμπορίου. Η Νορβηγία έχει την άδεια ελεύθερα να επεκτείνει τη χρησιμοποίηση του φυσικού της αερίου. Επίσης στο δεύτερο σενάριο ανάλυσης, κανένα όριο για την κατανάλωση φυσικού αερίου δεν τίθεται για τη Νορβηγία εντούτοις, το εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας επιτρέπεται με την υπάρχουσα ικανότητα. Στο τρίτο σενάριο, η Σουηδική παραγωγή πυρηνικής ενέργειας καταργείται σταδιακά μέχρι το 2015 ενώ η Φινλανδία αποκτά νέα ικανότητα πυρηνικής ενέργειας. Στο τελευταίο σενάριο ανάλυσης περιλαμβάνονται οι περιορισμοί οι σχετικοί με τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που προβλέπουν την σταθεροποίηση των εκπομπών σε Σουηδία και Νορβηγία και μείωση σε Δανία και Φινλανδία.

6.2 Σενάριο Αναφοράς

Στο σενάριο αναφοράς κανένας περιορισμός όσον αφορά τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου δε γίνεται. Εντούτοις, οι υποθέσεις περιλαμβάνουν μερικά μέτρα για τις μειώσεις εκπομπής όπως οι υπάρχοντες φόροι του CO_2 στα ορυκτά καύσιμα και οι φορολογικές απαλλαγές στα καύσιμα από ξύλο. Για την αιολική ενέργεια δεν έχει περιληφθεί καμία επιχορήγηση. Η χρησιμοποίηση της πυρηνικής ενέργειας έχει περιοριστεί στο τρέχον επίπεδο καθ' όλη τη διάρκεια των περιόδων του μοντέλου σε Σουηδία και Φινλανδία ενώ για τις εισαγωγές του φυσικού αερίου έχει επιτραπεί μια μέτρια αύξηση.

6.2.1 Κατανάλωση Πρωτογενούς Ενέργειας

Η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας για ηλεκτρισμό, η θερμότητα περιοχής και η παραγωγή διαδικασιών ατμού για κάθε περιοχή του μοντέλου απεικονίζεται στο Σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1. Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας σε σχηματική αναπαράσταση τριών διαστάσεων.

Μετά από μια μάλλον ισχυρή αύξηση, η αρχική κατανάλωση ενέργειας στη Φινλανδική υπομονάδα (Finnish module) μειώνεται ελαφρώς στην τελευταία περίοδο, που αντιστοιχεί στα έτη από το 2023 ως το 2027. Η προέλευση αυτής της μείωσης είναι κυρίως η ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη Σουηδία δηλαδή το 2020 οι εισαγωγές από τη Σουηδία μειώνονται αρκετά λόγω των αλλαγών στη Δανέζικη παραγωγική ικανότητα (το εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας τμημάτων). Κατά συνέπεια, η Φινλανδική παραγωγή ισχύος και η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, αυξάνονται σχετικά έντονα το 2020. Το 2025, το μερίδιο των εισαγωγών στο Φινλανδικό ανεφοδιασμό ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται πάλι, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως μείωση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Φυσικά, η σταθεροποιήσιμη ζήτηση θερμότητας και ισχύος καθώς επίσης και οι βελτιώσεις

αποδοτικότητας στις τεχνολογίες ενεργειακής μετατροπής συμβάλλουν επίσης στη μειωμένη κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας.

Η χρησιμοποίηση της υδροηλεκτρικής και πυρηνικής ενέργειας στη Φινλανδία και τη Σουηδία παραμένει σταθερή (στο ανώτατο όριο που επιτράπηκε στο μοντέλο). Η χρήση του άνθρακα έχει μια ανοδική τάση στη Φινλανδία. Εντούτοις, οι αυξανόμενες εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας από τη Σουηδία την τελευταία περίοδο ελαττώνουν την κατανάλωση άνθρακα σε σύγκριση με το 2020. Στη Σουηδία, η χρήση του άνθρακα παραμένει σχετικά σταθερή με μόνο μια ελαφριά μείωση κατά τη διάρκεια των τελευταίων περιόδων του μοντέλου. Το μερίδιο των προϊόντων πετρελαίου στη Φινλανδική παραγωγή ισχύος και θερμότητας μικραίνει κάθε περίοδο, μέχρι το 2020 όποτε η χρησιμοποίηση του πετρελαίου γίνεται ελάχιστη. Στη Σουηδία, η χρήση των προϊόντων πετρελαίου για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας θεωρείται αμελητέα καθ' όλη τη διάρκεια των περιόδων του μοντέλου.

Το φυσικό αέριο, η τύρφη και τα βιολογικά καύσιμα χρησιμοποιούνται κατά το μέγιστο δυνατό στο σενάριο αναφοράς τόσο στη Φινλανδία όσο και στη Σουηδία. Η κατανάλωση φυσικού αερίου στη Φινλανδία αυξάνεται από 150PJ το 2005 σε 210PJ το 2025, ενώ στη Σουηδία η χρησιμοποίηση αερίου αυξάνεται κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου από 40PJ σε 80PJ. Η τύρφη χρησιμοποιείται κυρίως στη Φινλανδία, αλλά και σε μικρή έκταση στη Σουηδία. Στο χρονικό ορίζοντα που χρησιμοποιείται στο μοντέλο, η χρήση της τύρφης αυξάνεται από 90PJ σε 130PJ στη Φινλανδία και από 12PJ σε 18PJ στη Σουηδία, ενώ η χρησιμοποίηση των βιολογικών καυσίμων αυξάνεται κατά 46PJ στη Φινλανδία και κατά 25PJ στη Σουηδία. Στο σενάριο αναφοράς, η αιολική ενέργεια παραμένει αντοικονομική στη Φινλανδία, τη Σουηδία και τη Νορβηγία την τελευταία περίοδο.

Στη Νορβηγία, η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας μαζί με την ανάπτυξη των εξαγωγών οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Αυτή η αύξηση σχεδόν συνολικά καλύπτεται από την εντατική επέκταση στη χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου. Στο τέλος της δεκαετίας του '90, η χρήση του φυσικού αερίου ήταν σχεδόν ανύπαρκτη, ενώ το έτος 2025 οι τομείς εξόρυξης αερίου της Βόρειας Θάλασσας δίνουν 178PJ για τη Νορβηγική παραγωγή ισχύος και θερμότητας. Δεδομένου ότι η δυνατότητα για την ανάπτυξη υδρενέργειας στη Νορβηγία είναι η μεγαλύτερη μεταξύ των Σκανδιναβικών χωρών, η μέση παραγωγή επιτρέπεται να αυξηθεί από το παρόν κατά περίπου 10% μέχρι το έτος 2025.

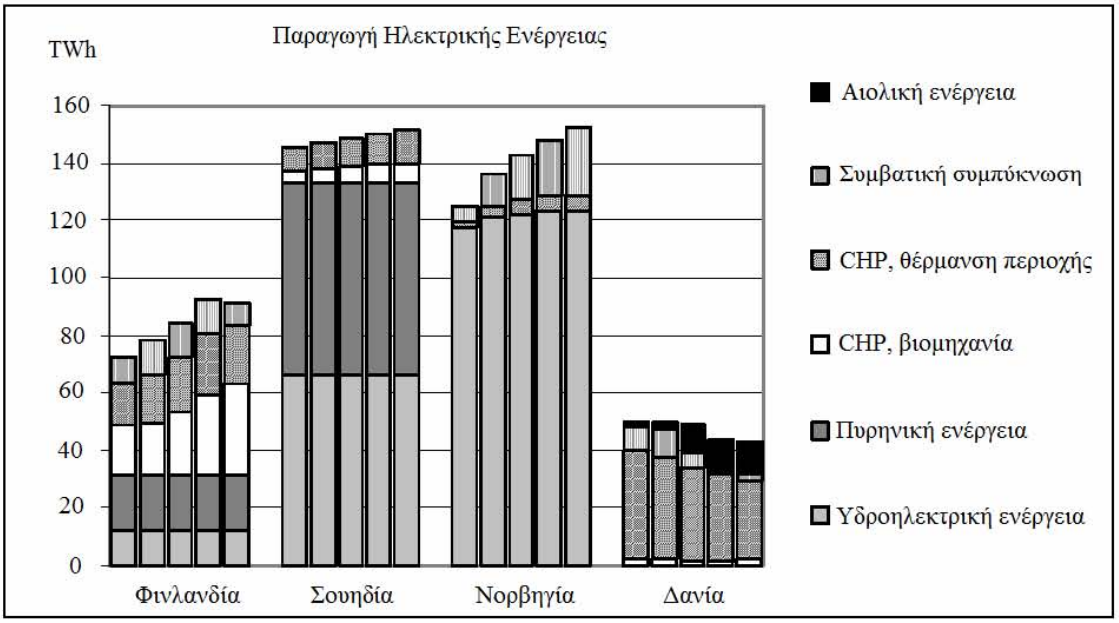
Το κυρίαρχο χαρακτηριστικό γνώρισμα στη Δανέζικη χρήση πρωτογενούς ενέργειας σε όλο τον χρονικό ορίζοντα του μοντέλου είναι η αντικατάσταση των προϊόντων άνθρακα και πετρελαίου από το φυσικό αέριο και τους ανανεώσιμους ενεργειακούς μεταφορείς. Η σταθεροποιήσιμη ζήτηση θερμότητας και ισχύος, οι βελτιώσεις αποδοτικότητας στις τεχνολογίες ενεργειακής μετατροπής και η μετατόπιση προς την ενέργεια που δίνει το φυσικό αέριο και ο αέρας σε χρήση με την πρωτογενή ενέργεια οδηγούν στη μειωμένη κατανάλωση ενέργειας. Οι παλαιότερες μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις άνθρακα και οι εγκαταστάσεις πετρελαίου CHP έχουν σχετικά χαμηλό λόγο ισχύος προς θερμότητα και χρησιμοποιούνται συχνά στη λειτουργία συμπύκνωσης. Δεδομένου ότι οι παλαιότερες εγκαταστάσεις CHP αντικαθίστανται με τις εγκαταστάσεις ηλεκτροπαραγωγής CHP φυσικού αερίου, μπορεί να παραχθεί περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια συμπαραγωγής λόγω του εντυπωσιακά υψηλότερου λόγου ισχύος προς θερμότητα. Κατά συνέπεια, η γενική αποδοτικότητα της ισχύος και του συστήματος θερμότητας αυξάνεται αρκετά, συμβάλλοντας σε μείωση στην κατανάλωση αρχικής ενέργειας.

Εκτός από το φυσικό αέριο, η χρησιμοποίηση των ανανεώσιμων ενεργειακών μεταφορέων, συμπεριλαμβανομένων της βιομάζας και της ενέργειας από τον αέρα, διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στο Δανέζικο ενεργειακό ανεφοδιασμό. Στο σενάριο αναφοράς, η χρήση των βιολογικών καυσίμων αυξάνεται από 40PJ το 2005 σε 94PJ το 2025, και η χρησιμοποίηση της αιολικής ενέργειας αυξάνεται από το παρόν 7PJ στο 40PJ την τελευταία περίοδο του μοντέλου. Λαμβάνοντας υπόψη την αποδοτικότητα των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων άνθρακα στη λειτουργία συμπύκνωσης, το 2025 μόνο από την αιολική ενέργεια μειώνεται η ανάγκη για άνθρακα κατά περίπου 100PJ, ποσό το οποίο αντιστοιχεί στη μισή από την κατανάλωση άνθρακα στη Δανέζικη ηλεκτρική παραγωγή το 1998.

6.2.2 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Στο μοντέλο, το μεγαλύτερο μέρος της πρωτογενούς ενέργειας χρησιμοποιείται για την ηλεκτρική παραγωγή και επομένως η αύξηση της εθνικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ακολουθεί το σχέδιο της κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας. Η παραγωγή ισχύος στη Φινλανδία και τη Νορβηγία

χαρακτηρίζονται από αρκετά ισχυρή αύξηση, ενώ στη Σουηδία η παραγωγή αυξάνεται μόνο ελαφρώς και στη Δανία μειώνεται όπως μπορεί να φανεί στο Σχήμα 6.2.



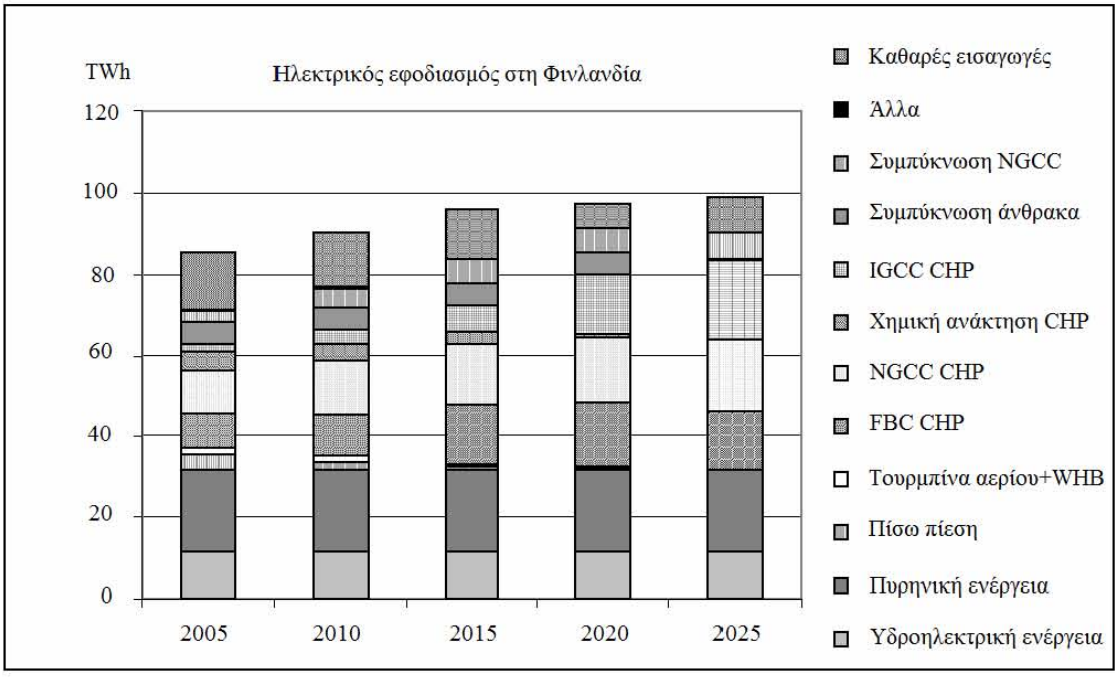
Σχήμα 6.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 2005, το 2010, το 2015, το 2020 και το 2025 για κάθε περιοχή του μοντέλου.

Η συμβατική ισχύς συμπύκνωσης χάνει το μερίδιο στο συνολικό ανεφοδιασμό ηλεκτρικής ενέργειας ιδιαίτερα στη Δανία αλλά και στη Φινλανδία κατά τη διάρκεια της τελευταίας περιόδου. Εντούτοις, λόγω της μικρής ζήτησης θερμότητας στη Νορβηγία, το μερίδιο της συμβατικής συμπύκνωσης κλιμακώνεται. Στη Σουηδία, η συμβατική ισχύς συμπύκνωσης δεν εμφανίζεται στη λύση.

Η αύξηση της Σουηδικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καλύπτεται πρώτιστα από τη συμπαραγωγή ισχύος και θερμότητας περιοχής. Ιδιαίτερα, η καύση σε παφλάζουσα ρευστοποιημένη κλίνη (fluidized bed combustion) και οι τεχνολογίες συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου (natural gas combined-cycle ή NGCC) επεκτείνουν και αντικαθιστούν την παλαιότερη ικανότητα CHP. Στη Νορβηγία, η αύξηση στη παραγωγή ισχύος λόγω συμπύκνωσης καθώς επίσης και της μικρής αύξησης του CHP προέρχεται από την επέκταση των εγκαταστάσεων NGCC. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, στη Νορβηγική υπομονάδα λαμβάνεται υπόψη μόνο ένα δίκτυο θερμότητας και συμπεριλαμβάνεται η θερμότητα περιοχής και η ζήτηση διαδικασίας ατμού.

Οι αλλαγές στο Δανέζικο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιθανώς οι πιο εκτενείς των τεσσάρων περιοχών του μοντέλου. Οι εγκαταστάσεις "παλαιού" άνθρακα και οι εγκαταστάσεις νάφθα CHP αντικαθίστανται συνολικά από NGCC και εγκαταστάσεις ρευστοποιημένων καύσεων. Αν και ο λόγος της ισχύος προς θερμότητα στη Δανέζικη συμπαραγωγή αυξάνεται εντυπωσιακά, η συνολική ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στις μονάδες CHP μειώνεται λόγω της συχνής λειτουργίας σε τρόπο συμπύκνωσης των παλαιότερων, αντικατεστημένων εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας. Στη Δανία, η αιολική ενέργεια γίνεται ανταγωνιστική στην περίοδο 2008-2012, και μετά επεκτείνεται έντονα. Εντούτοις, η παράκτια αιολική ενέργεια παραμένει ασύμφορη σε όλο τον ορίζοντα του μοντέλου.

Η αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη Φινλανδία είναι κυρίως βασισμένη στη συνδυασμένη παραγωγή ισχύος και θερμότητα. Η αύξηση είναι ιδιαίτερα ισχυρή μεταξύ της βιομηχανικής συμπαραγωγής, που προκαλείται από τη σχετικά έντονα αυξανόμενη ζήτηση της διαδικασίας ατμού, από το αυξανόμενο μερίδιο της συμπαραγωγής στην παραγωγή ατμού και από τον αυξανόμενο ρυθμό ισχύος προς θερμότητα μέσω της εισαγωγής των τεχνολογιών αεριοποίησης. Η ηλεκτρική παραγωγή στις εγκαταστάσεις θερμότητας περιοχής CHP αυξάνεται επίσης, αν και η αύξηση δεν είναι τόσο εντατική όσο με τις βιομηχανικές μονάδες. Η προέλευση της αύξησης είναι παρόμοια με εκείνη στη βιομηχανική συμπαραγωγή, εκτός από το ότι οι τεχνολογίες αεριοποίησης δεν χρησιμοποιούνται στην παραγωγή θερμότητας περιοχής. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στη Φινλανδική υπομονάδα απεικονίζεται από τις τεχνολογίες στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3. Ανεφοδιασμός ηλεκτρικής ενέργειας στη Φινλανδική υπομονάδα από τις τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων στην παραγωγής τόσο των μονάδων παραγωγής θερμότητας περιοχής όσο και αυτών που παράγουν διαδικασίες ατμού όπως επίσης και τις καθαρές εισαγωγές.

Στις βιομηχανικές μονάδες μεγάλης κλίμακας, το μερίδιο της παραγωγής χωριστών διαδικασιών ατμού καταστέλλεται γρήγορα μέσω μιας επέκτασης της ικανότητας των μονάδων CHP. Πάλι, οι ρευστοποιημένες καύσεις και οι τεχνολογίες συνδυασμένου κύκλου φυσικού αερίου αποτελούν την αύξηση στη συμπαραγωγή του ηλεκτρισμού και των διαδικασιών ατμού. Προς το τέλος του ορίζοντα του μοντέλου, οι χημικοί λέβητες αποκατάστασης αντικαθίστανται από ενσωματωμένες μονάδες συνδυασμένου κύκλου αεριοποίησης (IGCC). Ο μέσος λόγος ισχύος προς θερμότητα στους αντικατεστημένους λέβητες είναι 0.21, ενώ στις μονάδες IGCC είναι 0.54. Δεδομένου ότι οι λέβητες αποκατάστασης είναι βασισμένοι στην πολτοποίηση των αποβλήτων αποτελούν περίπου τη μισή από την παραγωγή των διαδικασιών ατμού στη Φινλανδία, με αποτέλεσμα ο αντίκτυπος στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να είναι ξεχωριστός.

Σε αντίθεση με τις μονάδες μεγάλης κλίμακας, η παραγωγή ατμού χωρίς συμπαραγωγή αυξάνεται εντυπωσιακά μεταξύ των μικρής κλίμακας μονάδων, ενώ η συνολική ηλεκτρική παραγωγή των μικρών βιομηχανικών εγκαταστάσεων CHP παραμένει κατά προσέγγιση στο τρέχον επίπεδο. Η δομή της συμπαραγωγής,

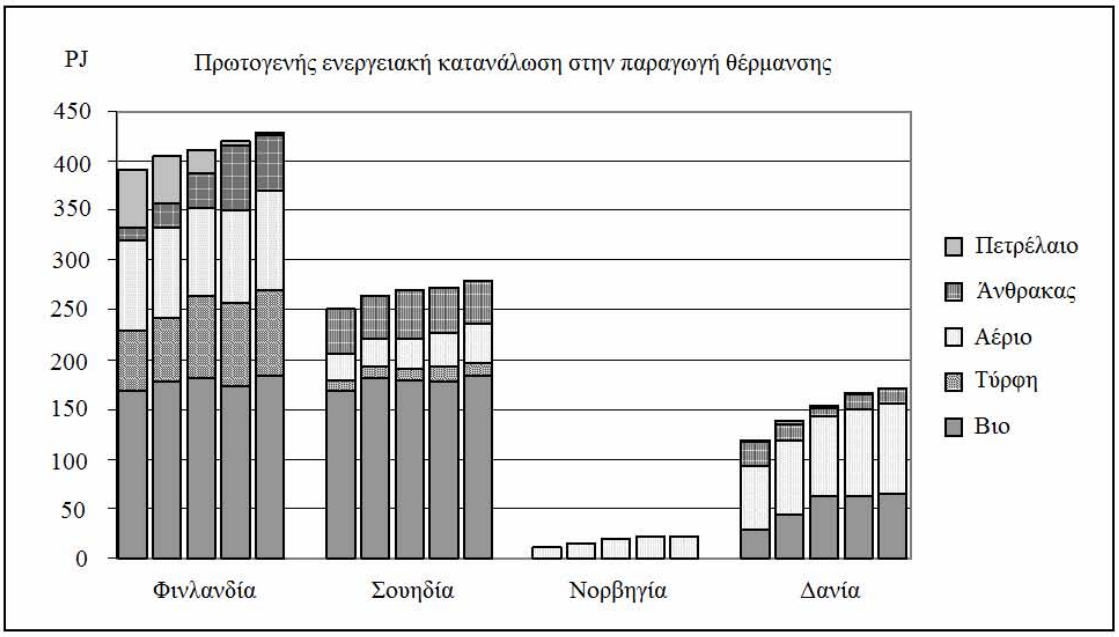
εντούτοις, μετασχηματίζεται αρκετά όταν οι τεχνολογίες ρευστοποίησης και αργότερα οι τεχνολογίες IGCC αντικαθιστούν τους υπάρχοντες καυστήρες πετρελαίου και φυσικού αερίου καθώς επίσης και τις μονάδες με την θερμοκονιοποίηση.

Ανάλογα με την παραγωγή ατμού, στην παραγωγή θερμότητας περιοχής το μερίδιο των εγκαταστάσεων θερμότητας μεγάλης κλίμακας μικραίνει, ενώ αναπτύσσεται η ικανότητα συμπαραγωγής. Η καύση σε παφλάζουσα ρευστοποιημένη κλίνη και οι έντονα επεκτανόμενες εγκαταστάσεις NGCC αντικαθιστούν τους αφοπλισμένους κονιοποιημένους καυστήρες καυσίμων και τους στροβίλους αερίου με λέβητες διατήρησης σταθερής θερμοκρασίας. Από τις νέες τεχνολογίες, ούτε η IGCC ούτε η καύση ρευστοποιημένης κλίνης υπό πίεση δε γίνονται οικονομικές στη συμπαραγωγή θερμότητας περιοχής. Το μερίδιο της συμπαραγωγής μεταξύ των μικρής κλίμακας μονάδων αυξάνεται, αλλά η αύξηση είναι σαφώς πιο αργή από ότι αυτή των μεγάλων μονάδων. Η ισχυρότερη αύξηση πραγματοποιείται μέσω της επέκτασης των εγκαταστάσεων καύσης σε παφλάζουσα ρευστοποιημένη κλίνη ενώ η χρησιμοποίηση των καυστήρων πετρελαίου και φυσικού αερίου τερματίζεται.

Η συμβατική παραγωγή ισχύος συμπύκνωσης προέρχεται σχεδόν συνολικά από τις κονιοποιημένες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας θερμότητας άνθρακα. Το φυσικό αέριο, η τύρφη και η βιομάζα χρησιμοποιούνται στην παραγωγή ισχύος μέσω συμπύκνωσης μόνο σε μικρά ποσά και η αιολική ενέργεια παραμένει αντιοικονομική στον ορίζοντα στο μοντέλο. Στην τελευταία περίοδο, η παραγωγή της ισχύος από συμπύκνωση άνθρακα μειώνεται λόγο του αφοπλισμό της παλαιάς ικανότητας.

Όπως στην περίπτωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, επίσης στην παραγωγή θερμότητας περιοχής η επέκταση του CHP είναι προεξέχουσα ενώ οι λέβητες θερμότητας χάνουν το μερίδιο αγοράς τους. Η μόνη εξαίρεση είναι στη Σουηδία, όπου οι υψηλότερες τιμές καυσίμων μειώνουν τις εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας και αυξάνουν τη χωριστή παραγωγή θερμότητας. Το μοντέλο περιλαμβάνει την παραγωγή διαδικασίας ατμού μόνο στις εγκαταστάσεις CHP στη Σουηδία, τη Νορβηγία και τη Δανία. Στη Φινλανδική υπομονάδα, όπου συμπεριλαμβάνονται επίσης οι λέβητες ατμού, ο ατμός που παράγεται στις εγκαταστάσεις CHP αυξάνει το μερίδιο αγοράς τους μεταξύ των μεγάλων μονάδων. Μέσα στις μικρές μονάδες, εντούτοις, οι λέβητες ατμού είναι πιο κερδοφόροι από τις μονάδες CHP.

Η χρήση των πηγών ενέργειας στη θερμότητα περιοχής και την παραγωγή διαδικασίας ατμού παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.4.



Σχήμα 6.4. Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στη θερμότητα περιοχής και παραγωγή διαδικασίας ατμού μεταξύ 2005 και 2025. Στη Σουηδία, τη Νορβηγία και τη Δανία η παραγωγή διαδικασίας ατμού περιλαμβάνει μόνο τις μονάδες CHP.

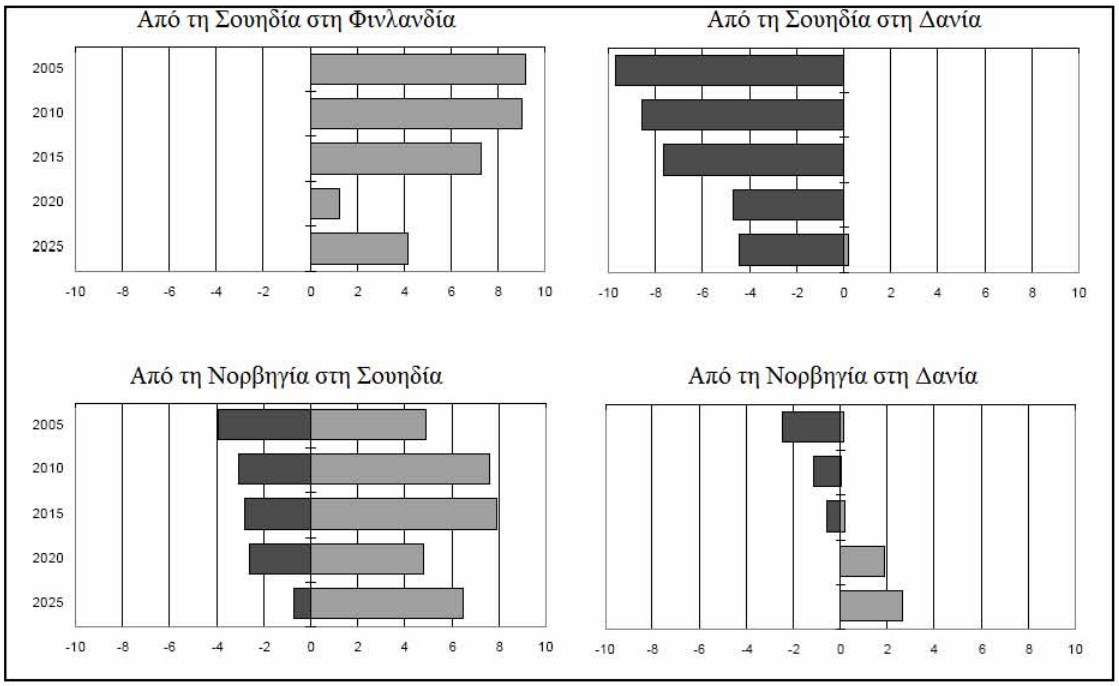
Λόγω της βιομηχανικής χρήσης της πολτοποίησης των υγρών, τα βιοκαύσιμα έχουν ένα σημαντικό μερίδιο στη γενική παραγωγή θερμότητας και ατμού. Στη Φινλανδία, η τύρφη καταναλώνεται και στις μονάδες βιομηχανικής CHP και στις μονάδες θέρμανσης περιοχής, αλλά στη Σουηδία η κατανάλωση πραγματοποιείται κυρίως στους λέβητες θερμότητας. Η χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου επεκτείνεται και στις μονάδες παραγωγής θερμότητας CHP. Η αυξανόμενη κατανάλωση άνθρακα αντικαθιστά τη χρήση του ακριβότερου πετρελαίου στη Φινλανδία, ενώ στις άλλες χώρες η χρησιμοποίηση του άνθρακα στην παραγωγή θερμότητας παραμένει σχεδόν σε ένα σταθερό επίπεδο.

Το μερίδιο της συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ισχύος γίνεται σαφώς υπερβολικό στο μοντέλο. Στη Φινλανδία, το τρέχον ποσοστό του CHP στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι κάτω από 35%, ενώ στο μοντέλο το ποσοστό αυξάνεται πάνω από το 60%. Αυτή η δυσανάλογη αύξηση στην παραγωγή CHP προέρχεται, προ πάντων, από το επίπεδο λεπτομέρειας του μοντέλου (model's detail level), εύρημα το οποίο είναι υπερβολικό για μια ρεαλιστική περιγραφή ενός

σύνθετου συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο καθορισμός των δεδομένων του μοντέλου και η συμπερίληψη πρόσθετων περιορισμών θα μπορούσε να έχει καταστήσει τη συμπεριφορά του προτύπου ρεαλιστικότερη. Εντούτοις, χωρίς να φέρουν αλλαγή στο μοντέλο, αυτές οι ρυθμίσεις θα οδηγούσαν στην ελάττωση της διαφάνειας του μοντέλου και έτσι το μοντέλο αφέθηκε στην παρούσα κατάστασή του.

6.2.3 Εμπόριο Ηλεκτρισμού

Η δομή του ετήσιου εμπορίου ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των περιοχών του μοντέλου παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.5.



Σχήμα 6.5. Εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας (θετικές τιμές) και εισαγωγές (αρνητικές τιμές) σε TWh/ έτος από τη Νορβηγία και τη Σουηδία στις άλλες περιοχές του μοντέλου.

Στις πρώτες περιόδους, η Δανία είναι ο σημαντικότερος εξαγωγέας ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ οι εισαγωγές είναι υψηλότερες στη Φινλανδία. Λόγω της επέκτασης της παραγωγικής ικανότητας ισχύος από καύση φυσικού αερίου, η Νορβηγία γίνεται καθαρός εξαγωγέας κατά τη διάρκεια της περιόδου 2010. Προς το τέλος του χρονικού ορίζοντα του μοντέλου, οι καθαρές εισαγωγές αυξάνονται εντυπωσιακά στη Σουηδία, ενώ στη Φινλανδία τείνουν να μειωθούν. Εντούτοις, λαμβάνοντας υπόψη την εξέταση

των σταθερών εισαγωγών 4.7TWh από τη Ρωσία, η Φινλανδία παραμένει σαφώς καθαρός εισαγωγέας κατά τη διάρκεια όλων των περιόδων του μοντέλου.

Κατά τη διάρκεια των πρώτων περιόδων, οι εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας από τη Σουηδία στη Φινλανδία είναι εντατικές και την ημέρα και την νύχτα, εκτός από το χειμώνα που πραγματοποιούνται εισαγωγές κυρίως κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτή η συμπεριφορά απεικονίζει την εξάρτηση του εμπορίου ηλεκτρικής ενέργειας στη Σουηδική παραγωγή υδρενέργειας την άνοιξη όπου οι δεξαμενές αρχίζουν να γεμίζουν και η αφθονία της υδρενέργειας είναι διαθέσιμη, ενώ το χειμώνα οι πόροι υδρενέργειας γίνονται λιγοστοί και μπορούν να διατηρηθούν ουσιαστικά για τη μέγιστη παραγωγή φορτίων. Δεδομένου ότι οι ετήσιες εισαγωγές από τη Σουηδία γίνονται χαμηλότερες προς το τέλος του ορίζοντα του μοντέλου, πραγματοποιούνται κυρίως κατά τη διάρκεια των θερινών ημερών και των νυχτών καθώς επίσης και κατά τη διάρκεια των χειμερινών ημερών.

Λόγω της κυριαρχίας της υδρενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η Νορβηγία εξάγει την ηλεκτρική ενέργεια στη Σουηδία συνήθως κατά τη διάρκεια της ημέρας και εισάγει ηλεκτρική ενέργεια από τη Σουηδία κατά τη διάρκεια της νύχτας. Οι Νορβηγικές εξαγωγές λαμβάνουν χώρα κυρίως το χειμώνα, ενώ η Σουηδία εξάγει στη Νορβηγία και τις άλλες εποχές. Η παραγωγή υδρενέργειας στη Σουηδία αναγκάζεται να είναι υψηλή το καλοκαίρι, επειδή οι δεξαμενές είναι πολύ μικρές για να αποθηκεύσουν όλη την εισροή. Μέσω των θερινών εξαγωγών και των χειμερινών εισαγωγών, εντούτοις, οι μεγαλύτερες δεξαμενές της Νορβηγίας χρησιμοποιούνται επίσης για τη Σουηδική υδρενέργεια. Οι εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας από τη Δανία στη Σουηδία πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια των νυχτών όλες τις εποχές, και είναι σαφώς υψηλότερου μεγέθους από τις Σουηδικές νυχτερινές εξαγωγές στη Νορβηγία. Κατά συνέπεια, η Δανία παράγει την ηλεκτρική ενέργεια φορτίων βάσεων και για τη Σουηδία και για τη Νορβηγία.

Κατά τη διάρκεια των πρώτων περιόδων, η ανταλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ της Δανίας και της Νορβηγίας αποτελείται από Δανέζικες νυχτερινές εξαγωγές στη χειμερινή εποχή. Οι εξαγωγές μειώνονται βαθμιαία και εξαντλούνται μέχρι την περίοδο 2020. Στην περίοδο του 2015, η Νορβηγία αρχίζει να εξάγει ηλεκτρική ενέργεια στη Δανία κατά τη διάρκεια των θερινών ημερών. Στις επόμενες περιόδους, οι πρωινές εξαγωγές παραμένουν εντατικότερες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, αν και πραγματοποιούνται επίσης και σε άλλες εποχές. Τα

χαρακτηριστικά του εμπορίου ενέργειας γίνονται κατανοητά εύκολα με την εξέταση του Νορβηγικού συστήματος που βασίζεται στην υδρενέργεια. Η Νορβηγία έχει την ικανότητα να παραγάγει την ηλεκτρική ενέργεια για τη μέγιστη κατανάλωση φορτίων ειδικά το καλοκαίρι, ενώ το χειμώνα η ανάγκη για εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται.

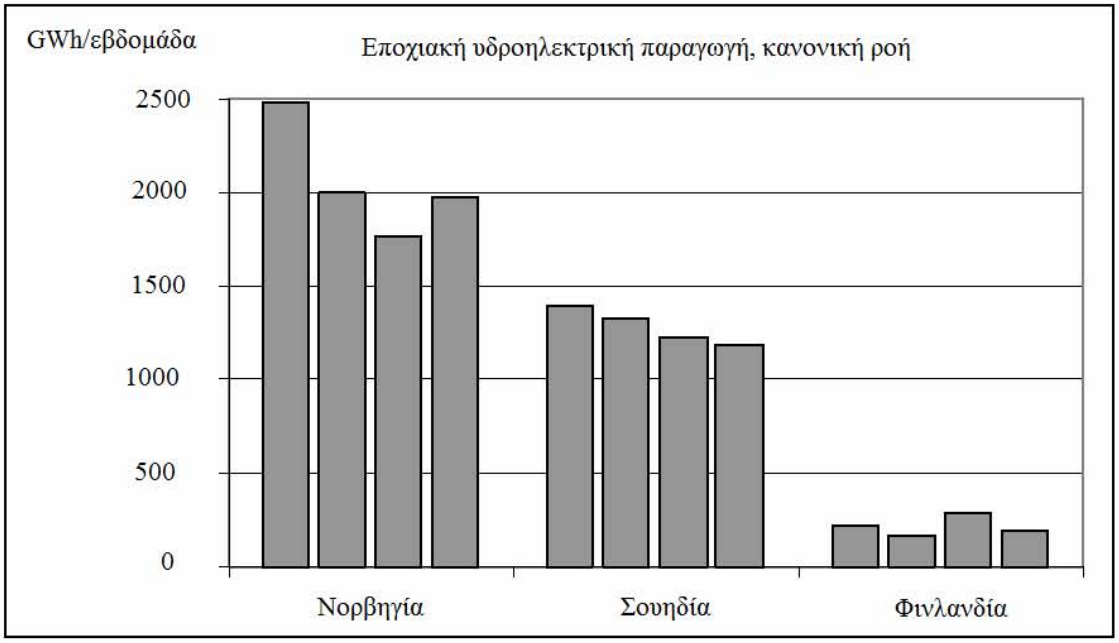
6.2.4 Παραγωγή Υδρενέργειας

Η συμπεριφορά της παραγωγής υδρενέργειας εξετάστηκε με τρεις διαφορετικές εισροές που αντιστοιχούν σε κανονικά, υγρά και ξηρά έτη. Η ετήσια κατανομή της εισροής παρέμεινε ίδια σε κάθε περίπτωση, μόνο το μέγεθος της εισροής ποικίλει ανάλογα με τις πραγματικές ελάχιστες και μέγιστες τιμές στη δεκαετία του '90 όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

TWh/έτος	Νορβηγία	Σουηδία	Φινλανδίας
Υγρά	122.4	75.0	12.9
Κανονικά	111.3	68.2	11.8
Ξηρά	94.6	50.5	8.8

Πίνακας 6.1. Εισροές των υγρών, κανονικών και ξηρών περιόδων σε κάθε περιοχή σε TWh.

Όπως έχει περιγραφεί, οι εποχιακές ικανότητες των δεξαμενών έχουν μειωθεί κατά 39% στη Σουηδία και τη Φινλανδία και κατά 46% στη Νορβηγία προκειμένου να ληφθούν υπόψη τα περιθώρια επιφύλαξης και η μη προβλεψιμότητα του καιρού. Η εποχιακή παραγωγή υδρενέργειας, που υπολογίζεται ως μέσος όρος των παραγωγών φορτίων αιχμών και βάσεων, στη Νορβηγία, τη Σουηδία και τη Φινλανδία παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.6 για την περίπτωση της κανονικής εισροής.



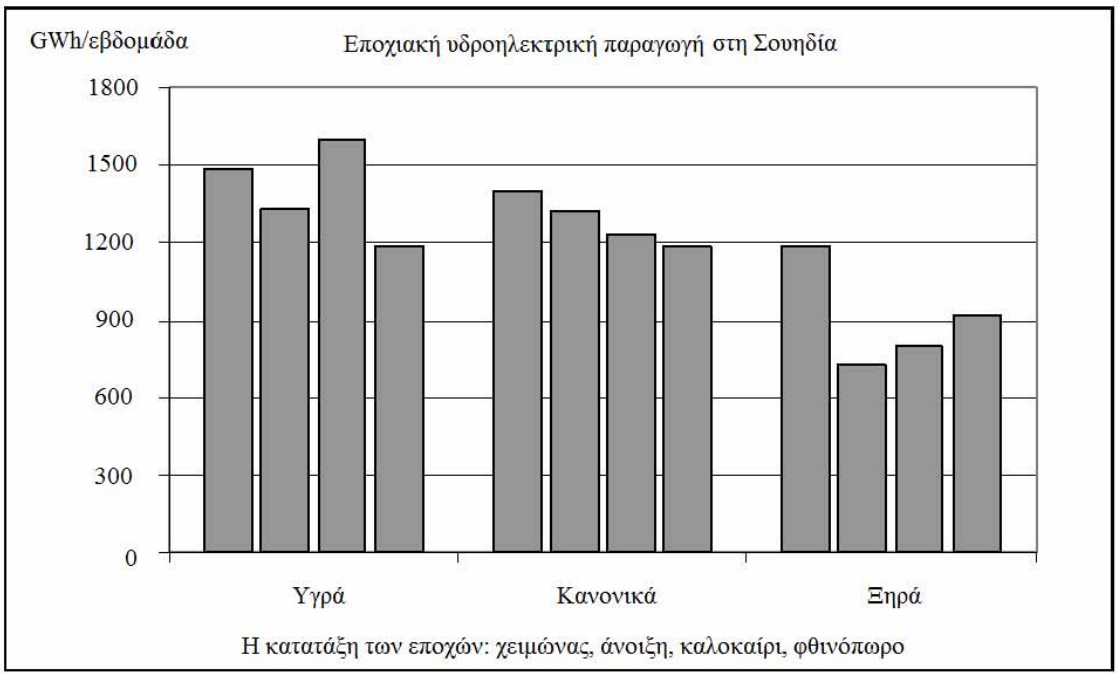
Σχήμα 6.6. Εποχιακή παραγωγή υδρενέργειας στη Νορβηγία, τη Σουηδία και τη Φινλανδία με κανονική εισροή.

Η μοντελοποιημένη παραγωγή υδρενέργειας ακολουθεί ικανοποιητικά τα σχέδια της πραγματικής παραγωγής, δεδομένου ότι το επίπεδο εποχιακής παραγωγής είναι σωστού μεγέθους στις τρεις περιοχές με τη χρησιμοποίηση υδρενέργειας. Στη Σουηδία, καμία μεγάλη, συστηματική παραλλαγή δεν υπάρχει μεταξύ των διαφορετικών εποχών. Το μερίδιο της μη-ρύθμισης της παραγωγής υδρενέργειας στη Φινλανδία είναι υψηλό έναντι των γειτόνων της, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί ως αυξανόμενη παραγωγή κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Από τη στιγμή που η παραγωγή υδρενέργειας αρκεί για σχεδόν όλη την ηλεκτρική παραγωγή της Νορβηγίας, συσχετίζεται έντονα με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, και έτσι η παραγωγή είναι σαφώς υψηλότερη το χειμώνα από ότι το καλοκαίρι.

Όταν η εισροή αυξάνεται ή μειώνεται έντονα, το ετήσιο σχέδιο παραγωγής στη Νορβηγική υπομονάδα παραμένει παρόμοιο όπως στην περίπτωση της κανονικής εισροής. Με άλλα λόγια, το μερίδιο κάθε εποχής στην ετήσια παραγωγή παραμένει περίπου σταθερό αν και η εισροή και η ετήσια παραγωγή, ποικίλλουν. Αυτό υπονοεί ότι οι δεξαμενές στη Νορβηγία είναι αρκετά μεγάλες να αποθηκεύσουν τις εισροές που είναι αρκετά παραπάνω από το μέσο όρο. Όταν η παραγωγή υδρενέργειας μένει κάτω από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η Νορβηγία εισάγει την ηλεκτρική ενέργεια που χρειάζεται από τη Σουηδία και τη Δανία. Η μέση παραγωγή υδρενέργειας το χειμώνα αυξάνεται από 2,480GWh/ εβδομάδα κατά 10% στα

2,730GWh/ εβδομάδα στην περίπτωση της υψηλής εισροής και μειώνεται μέχρι 14% στα 2,130GWh/ εβδομάδα στην περίπτωση της χαμηλής εισροής.

Η ικανότητα δεξαμενών στη Σουηδία είναι περιορισμένη σε σύγκριση με αυτήν της Νορβηγίας. Κατά συνέπεια, η μεταβαλλόμενη εισροή έχει διαφορετικά αποτελέσματα στα σχέδια παραγωγής τα οποία παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7.



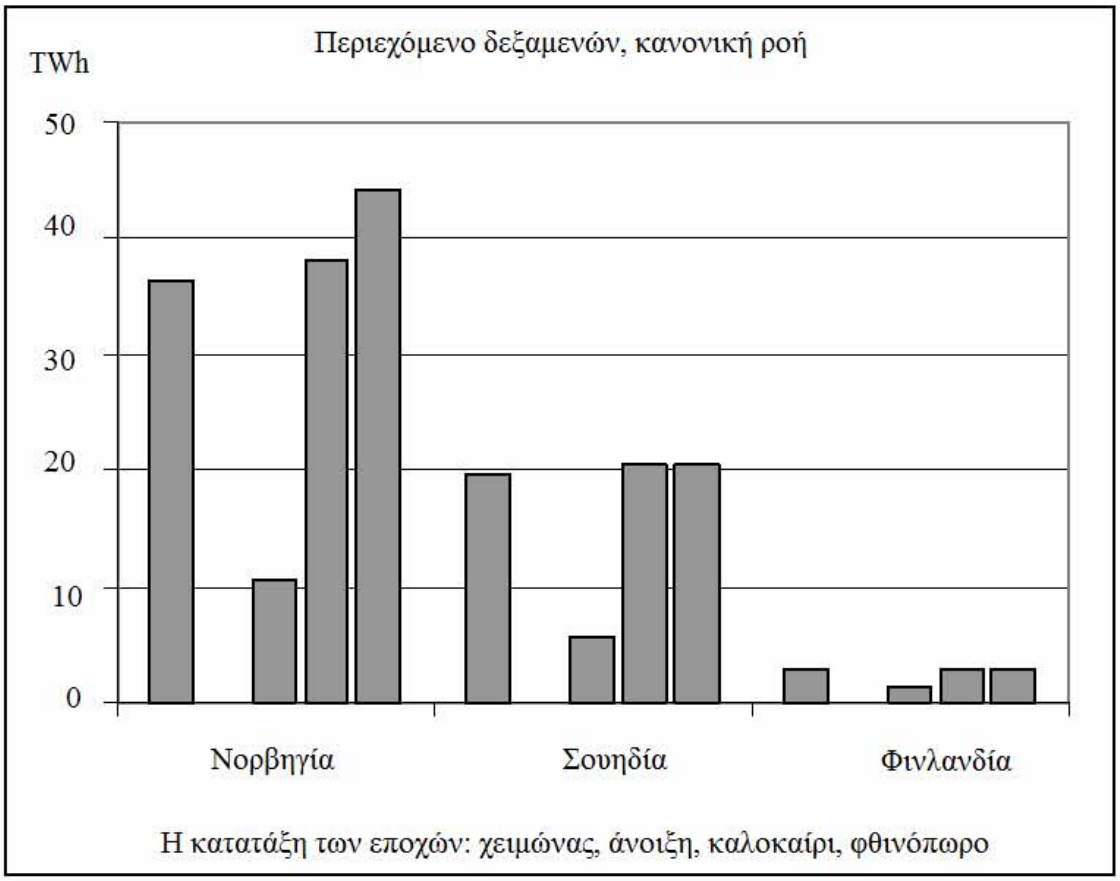
Σχήμα 6.7. Εποχιακή παραγωγή υδρενέργειας στη Σουηδική υπομονάδα με την υψηλή, κανονική και χαμηλή εισροή.

Με την κανονική εισροή, η μέση εποχιακή παραγωγή υδρενέργειας ποικίλλει λίγο κατά τη διάρκεια του έτους. Μια πολύ χαμηλή εισροή μειώνει την ηλεκτρική παραγωγή κυρίως κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, ενώ τα υδραγωγεία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ισχύος το χειμώνα. Η υψηλή εισροή γεμίζει τις δεξαμενές ήδη νωρίς το καλοκαίρι και η παραγωγή πρέπει να αυξηθεί. Η παραγωγή το χειμώνα αυξάνεται μόνο ελαφρώς, γιατί οι δεξαμενές είναι πολύ μικρές για να αποθηκεύσουν το υπερβολικό νερό του καλοκαιριού.

Η συμπεριφορά της παραγωγής υδρενέργειας στη Σουηδική υπομονάδα απεικονίζει επαρκώς την πραγματική αλληλοεξάρτηση της παραγωγής και την εισροή στη δεκαετία του '90. Στην πραγματικότητα, η διανομή της ετήσιας εισροής μπορεί να ποικίλει εντυπωσιακά, το οποίο, φυσικά, ασκεί έντονη επίδραση στην παραγωγή ισχύος. Παραδείγματος χάριν, οι δυνατές βροχές του φθινοπώρου θα αύξαναν

κανονικά την παραγωγή ισχύος της εποχής επειδή οι δεξαμενές είναι ήδη γεμάτες από το καλοκαίρι. Ο αντίκτυπος της ποικίλης εισροής στην παραγωγή υδρενέργειας στη Φινλανδική υπομονάδα είναι παρόμοιος με τον αντίκτυπο στη Σουηδική υπομονάδα δηλαδή με την αυξανόμενη εισροή, η ισχύς παραγωγής αυξάνεται μόνο ελαφρώς το χειμώνα, ενώ η αύξηση το καλοκαίρι είναι ουσιαστική.

Στο Σχήμα 6.8 απεικονίζεται η κατάσταση του περιεχομένου δεξαμενών στην αρχή κάθε εποχής για την περίπτωση της κανονικής εισροής.



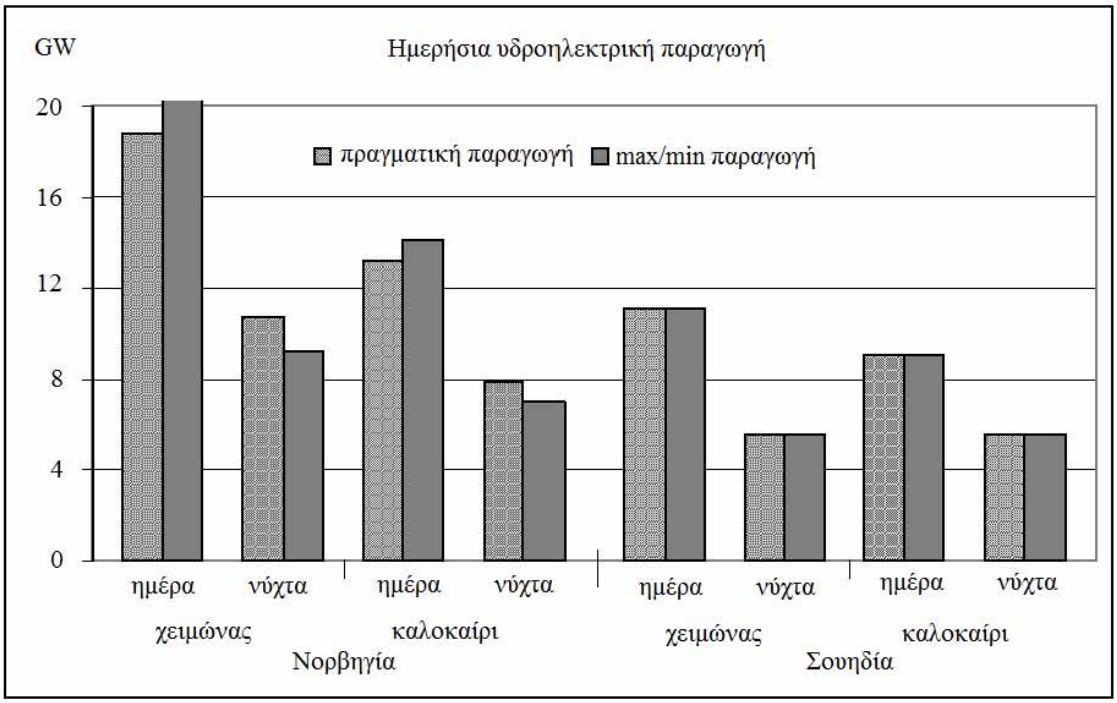
Σχήμα 6.8. Περιεχόμενο δεξαμενών στην αρχή κάθε εποχής με κανονική εισροή. Το μέγιστο αναφέρεται στο ανώτερο όριο ικανότητας δεξαμενών

Μετά από την εντατική παραγωγή του χειμώνα, οι δεξαμενές είναι συνολικά κενές καθώς η άνοιξη φθάνει. Η έντονα αυξανόμενη εισροή αρχίζει να γεμίζει τις δεξαμενές την άνοιξη, και στο τέλος του καλοκαιριού οι δεξαμενές γεμίζουν στο μέγιστο στη Σουηδία και τη Φινλανδία. Μόνο στη Νορβηγία η ικανότητα αποθήκευσης είναι διαθέσιμη επίσης μετά από το καλοκαίρι. Το φθινόπωρο, η παραγωγή υδρενέργειας υπερβαίνει την εισροή στη Νορβηγία και τη Σουηδία. Τέλος, το χειμώνα το υπόλοιπο

περιεχόμενο δεξαμενών με τη μικρή εισροή χρησιμοποιείται πλήρως για την παραγωγή ισχύος.

Στην αρχή του φθινοπώρου, το επίπεδο του Νορβηγικού περιεχομένου δεξαμενών είναι 38.0TWh, το οποίο αντιστοιχεί στο 86% της ικανότητας αποθήκευσης. Στην περίπτωση υψηλής εισροής, το επίπεδο αυξάνεται σε 42.7TWh και χρησιμοποιείται το 97% της ικανότητας δεξαμενών. Κατά τη διάρκεια της χαμηλής εισροής, το επίπεδο περιεχομένου δεξαμενών φθάνει μόνο στο 75% του μεγίστου. Στη Σουηδία, το περιεχόμενο δεξαμενών παραμένει στη μέγιστη τιμή επίσης στο τέλος του φθινοπώρου εάν η εισροή είναι υψηλή. Με τη χαμηλή εισροή, εντούτοις, η ικανότητα αποθήκευσης ποτέ δε θα χρησιμοποιηθεί πλήρως με αποτέλεσμα το 92% του περιεχομένου του μεγίστου στην αρχή του φθινοπώρου. Στη Φινλανδία, οι δεξαμενές χρησιμοποιούνται πλήρως στην αρχή του φθινοπώρου και του χειμώνα ανεξάρτητα από την εισροή.

Οι παραλλαγές στην ημερήσια παραγωγή υδρενέργειας στη Νορβηγία και τη Σουηδία παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.9 για τις εποχές του χειμώνα και του καλοκαιριού.

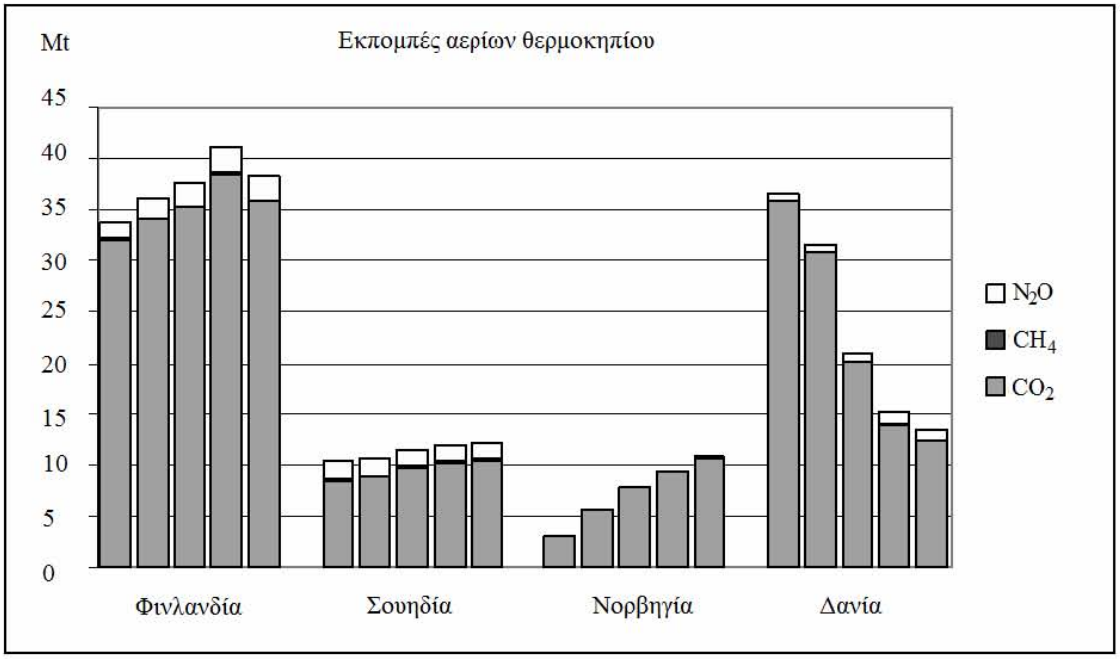


Σχήμα 6.9. Η παραγωγή υδρενέργειας κατά τη διάρκεια του φορτίου ημέρας και νύχτας στην περίπτωση της κανονικής ανώτατης/ελάχιστης παραγωγής εισροής αντιπροσωπεύει το σύνολο ορίων παραγωγής από την ημερήσια αποθήκευση.

Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζονται οι παραγωγές ημέρας και νύχτας που αντιστοιχούν στη μέγιστη χρησιμοποίηση της ημερήσιας αποθήκευσης. Στις Σουηδικές και Φινλανδικές υπομονάδες, οι ικανότητες της ημερήσιας αποθήκευσης είναι πλήρως χρησιμοποιημένες σε όλες τις εποχές. Στη Νορβηγία, εντούτοις, η πρωινή παραγωγή υδρενέργειας θα μπορούσε να αυξηθεί κατά 1.5GW, ακόμα κι αν η Νορβηγία παρήγαγε ήδη ηλεκτρική ενέργεια πλεονάσματος για εξαγωγή κατά τη διάρκεια της ημέρας. Η Νορβηγική παραγωγή υδρενέργειας φθάνει σε 18.8GW κατά τη διάρκεια των χειμερινών ημερών, το οποίο είναι 75% υψηλότερο από την παραγωγή των χειμερινών νυχτών. Στη Σουηδία και τη Φινλανδία, η παραγωγή ημέρας είναι σχεδόν ακριβώς δύο φορές υψηλότερη από την παραγωγή κατά τη διάρκεια των νυχτών το χειμώνα. Η παραγωγή υδρενέργειας φθάνει στη μέγιστη ισχύ 11.1GW στη Σουηδία και 2.2 GW στη Φινλανδία. Δεδομένου ότι η παραγωγή ισχύος στο μοντέλο αντιπροσωπεύει τη μέση παραγωγή κατά τη διάρκεια της εν λόγω χρονοσχισμής, οι μέγιστες τιμές είναι χαμηλότερες από την πραγματική παραγωγή κατά τη διάρκεια του υψηλότερου φορτίου.

6.2.5 Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου

Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου σε κάθε περιοχή του μοντέλου παρουσιάζονται σε διοξείδιο του άνθρακα στο Σχήμα 6.10.



Σχήμα 6.10. Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου το 2005, το 2010, το 2015, το 2020 και το 2025. Τα αποτελέσματα δίνονται σε ισοδύναμα Mτ διοξειδίου του άνθρακα όταν οι εκπομπές CH_4 και N_2O πολλαπλασιάζονται με τους παράγοντες βάρους 21 και 310.

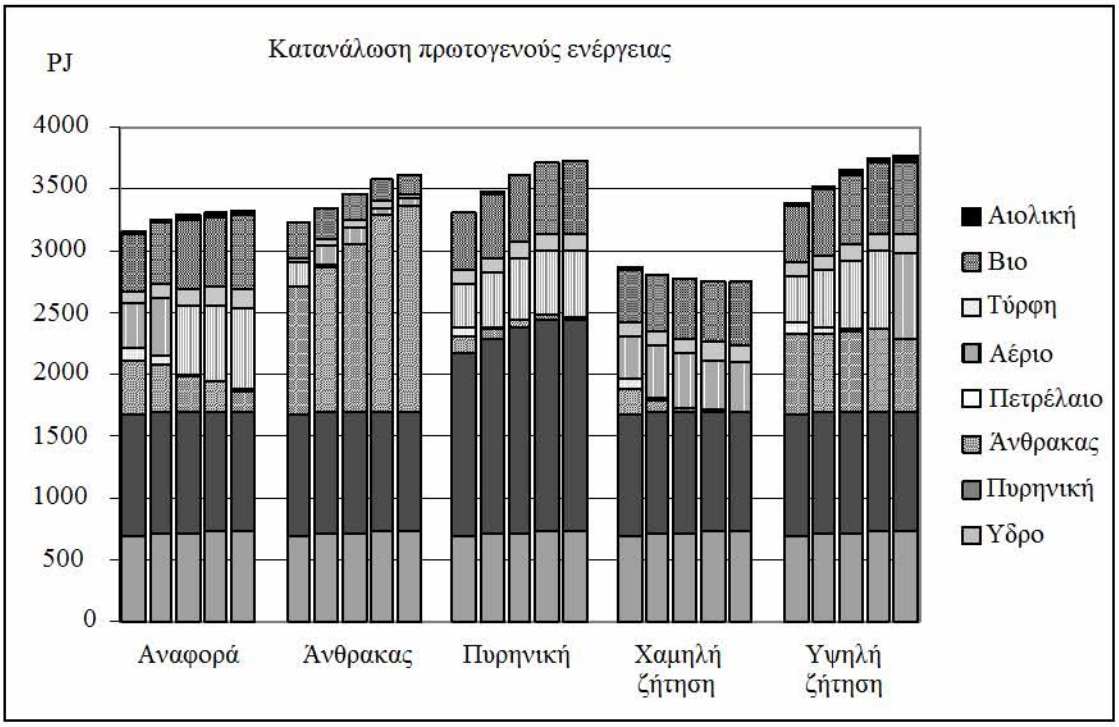
Το διοξείδιο του άνθρακα είναι σαφώς το σημαντικότερο αέριο του θερμοκηπίου κατά την παραγωγή ισχύος και θερμότητας, γιατί αποτελεί ένα μερίδιο πάνω από το 90% των εκπομπών. Το υπόλοιπο μέρος προέρχεται ουσιαστικά από το νιτρώδες οξείδιο. Λόγω της μεγαλύτερης χρησιμοποίησης της καύση σε παφλάζουσα ρευστοποιημένη κλίνης, οι εκπομπές N_2O στη Φινλανδία και τη Σουηδία είναι σημαντικότερες από ότι στη Νορβηγία και τη Δανία. Οι εκπομπές CH_4 παραμένουν μικρές στον τομέα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θέρμανσης.

Λόγω της αύξησης των εκπομπών του CO_2, οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου αυξάνονται σε όλες τις άλλες περιοχές εκτός από στη Δανία. Εντούτοις, η μείωση στο Δανέζικο σύστημα είναι αρκετά ισχυρή, τέτοια που μπορεί να χαμηλώσει τις συνολικές εκπομπές στις Σκανδιναβικές χώρες κατά 10% μεταξύ του 2005 και του 2025. Η ιδιαίτερα ισχυρή μείωση στις Δανέζικες εκπομπές του CO_2 μεταξύ των περιόδων 2010 και 2015 προέρχεται από μια εκτενή επέκταση της ικανότητας της αιολικής ενέργειας. Επιπλέον, η αντικατάσταση της χρησιμοποίησης του άνθρακα με το φυσικό αέριο στην παραγωγή ισχύος και θερμότητας καθώς επίσης και οι μειώσεις των εξαγωγών μειώνουν τις εκπομπές του CO_2 στη Δανία καθ' όλη τη διάρκεια των περιόδων του μοντέλου. Στη Νορβηγία, η αξιοσημείωτη αύξηση των εκπομπών του

CO_2 προκύπτει κατά ένα μεγάλο μέρος από την επέκταση της χρησιμοποίησης του φυσικού αερίου.

6.3 Σενάρια Επικύρωσης

Η συνολική κατανάλωση αρχικής ενέργειας όλων των περιοχών του μοντέλου στα σενάρια αναφοράς και επικύρωσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11.

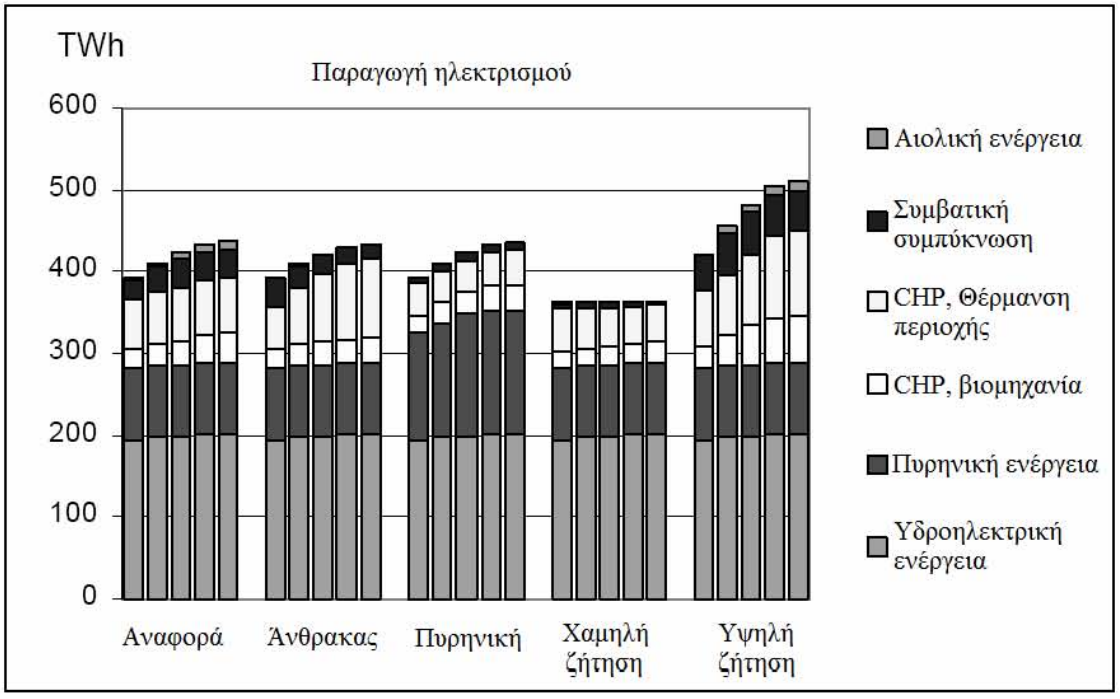


Σχήμα 6.11. Η συνολική κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας των περιοχών του μοντέλου στα σενάρια αναφοράς και σενάρια επικύρωσης για τις περιόδους 2005, 2010, 2015, 2020 και 2025.

Στο σενάριο του άνθρακα (Coal scenario), η τιμή του άνθρακα πέφτει σε 1.33EUR/PJ, το οποίο αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στην τιμή του άνθρακα χωρίς φόρους στη Σκανδιναβία. Η δραστική επίδραση στη χρήση πρωτογενούς ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11. Αποκλείοντας την υδροηλεκτρική και την πυρηνική ενέργεια, ο άνθρακας αντικαθιστά τους άλλους μεταφορείς αρχικής ενέργειας με αποτέλεσμα να διευρύνεται το μερίδιο συμμετοχής του στο 85% της παραγωγής ισχύος και θέρμανσης. Δεδομένου ότι η τιμή του άνθρακα έχει τεθεί χαμηλότερα από

την τιμή που δίνεται για την πολτοποίηση των αποβλήτων, ακόμη και η χρησιμοποίηση των βιολογικών καυσίμων στη βιομηχανία αντικαθίσταται βαθμιαία με την αυξανόμενη χρήση του άνθρακα.

Οι χαμηλές τιμές του άνθρακα έχουν ως αποτέλεσμα την επέκταση της ικανότητας των μονάδων CHP με στροβίλους συμπύκνωσης και αυτές οι μονάδες χρησιμοποιούν τη λειτουργία παραγωγής ισχύος με συμπύκνωση συχνότερα από ότι γίνεται στην περίπτωση αναφοράς. Στο μοντέλο, οι στρόβιλοι συμπύκνωσης συμπεριλαμβάνονται μόνο στη συμπαραγωγή της ισχύος και της θερμότητας περιοχής, ενώ όλες οι βιομηχανικές μονάδες CHP διαμορφώνονται ως στρόβιλοι αντίθλιψης. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επομένως αυξάνεται στις μονάδες παραγωγής CHP θερμότητας ενώ η παραγωγή μειώνεται στις βιομηχανικές μονάδες, όπως μπορεί να φανεί και στο Σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.12. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ 2005 και 2025 συμπεριλαμβανομένων όλων των περιοχών του μοντέλου.

Το μερίδιο της συμβατικής παραγωγής ισχύος συμπύκνωσης στο σενάριο του άνθρακα φαίνεται να μειώνεται σαφώς κάτω από το επίπεδο του σεναρίου αναφοράς. Αυτό, εντούτοις, αν και είναι παραπλανητικό, γιατί το αποτέλεσμα προκαλείται κυρίως από την απουσία των Νορβηγικών εγκαταστάσεων παραγωγής ισχύος NGCC και από την επέκταση των Δανέζικων εγκαταστάσεων CHP, οι οποίες παράγουν

επίσης άφθονη ισχύ από συμπύκνωση. Στη Φινλανδική υπομονάδα, που έχει μοντελοποιηθεί με ακρίβεια, το μερίδιο παραγωγής ισχύος από συμπύκνωση αυξάνεται σημαντικά ενώ η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στις μονάδες CHP μειώνεται κατά 25% το 2025 έναντι του σεναρίου αναφοράς.

Μια σημαντική αλλαγή στο εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αξιοπρόσεκτη εξαγωγή από τη Δανία στη Νορβηγία, όπου η χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου γίνεται ασύμφορη. Λόγω της αυξανόμενης παραγωγής CHP με τη καύση σε παφλάζουσα ρευστοποιημένη κλίνη, επίσης η Σουηδία αρχίζει να εξάγει στη Νορβηγία. Η συνολική ηλεκτρική παραγωγή στη Φινλανδία παραμένει κατά προσέγγιση στο ίδιο επίπεδο όπως στο σενάριο αναφοράς, και έτσι το εμπόριο στη Σουηδία δεν επηρεάζεται κατά ένα μεγάλο μέρος.

Μια αβίαστη επέκταση της πυρηνικής ενέργειας επιτρέπεται στο πυρηνικό σενάριο για τη Φινλανδία και τη Σουηδία. Κατά συνέπεια, η Φινλανδική ικανότητα πυρηνικής ενέργειας αυξάνεται περίπου κατά 200% έως 7,800MW, και φθάνει σε μια ετήσια ηλεκτρική παραγωγή 59TWh το 2025. Αυτό είναι αρκετό να μετατρέψει τη Φινλανδία σε καθαρό εξαγωγέα ηλεκτρικής ενέργειας, αν και η ετήσια εξαγωγή παραμένει κάτω από 3TWh. Στη Σουηδία, η αύξηση της ικανότητας πυρηνικής ενέργειας ήταν περίπου 40%, που αντιστοιχεί σε μια αύξηση 4,000MW, το οποίο είναι ελαφρώς χαμηλότερο από την αύξηση στη Φινλανδική υπομονάδα. Επίσης οι Σουηδικές καθαρές εξαγωγές αυξάνονται έντονα, ενώ η Δανία και η Νορβηγία χωρίς ικανότητα πυρηνικής ενέργειας γίνονται καθαροί εισαγωγείς ηλεκτρικής ενέργειας.

Η επέκταση της πυρηνικής ενέργειας ασκεί ισχυρή επίδραση στη χρήση του άνθρακα στην τελευταία περίοδο. Η κατανάλωση άνθρακα έχει μειωθεί κατά 90% έναντι του σεναρίου αναφοράς. Λόγω της χαμηλότερης τιμής, η χρήση των βιοκαυσίμων και του φυσικού αερίου επηρεάζεται λιγότερο, οδηγώντας σε μια μείωση που είναι 10% και 20%, αντίστοιχα. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας NGCC στη Νορβηγία είναι οι μόνες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας με συμπύκνωση που παραμένουν κερδοφόρες με την πυρηνική ενέργεια, ως ένα ορισμένο βαθμό. Στην τελευταία περίοδο, η γενική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των βιομηχανικών εγκαταστάσεων CHP είναι 25% χαμηλότερη από ότι στην περίπτωση αναφοράς, ενώ για τη θερμότητα περιοχής που παράγεται από μονάδες CHP η μείωση είναι 32% (Σχήμα 6.12). Οι δομικές αλλαγές είναι οι πιο αξιοσημείωτες στη Φινλανδική υπομονάδα, όπου η παραγωγή της ηλεκτρικής

ενέργειας CHP στην τελευταία περίοδο είναι ακόμα χαμηλότερη (κατά 40%) από ότι στην περίπτωση αναφοράς.

Η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, για θερμότητα περιοχής και για διαδικασίες ατμού σε όλες τις περιοχές παραμένουν σταθερές στο επίπεδο του 1997 στο σενάριο LowDem (Χαμηλής ζήτησης). Κατά συνέπεια, η μικρή μείωση 4% στην κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, που μπορεί να φανεί στο Σχήμα 6.11, προέρχεται κατά απόλυτο τρόπο από τις βελτιώσεις αποδοτικότητας της νέας ικανότητας. Η χρησιμοποίηση του άνθρακα, που είναι ένας ακριβός ενεργειακός μεταφορέας λόγω της βαριάς φορολογίας του, αντικαθίσταται συνολικά προς το τέλος του ορίζοντα του μοντέλου από την αυξανόμενη χρήση των βιοκαυσίμων και του φυσικού αερίου. Σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, η κατανάλωση φυσικού αερίου είναι 40% χαμηλότερη ενώ η κατανάλωση βιοκαυσίμων είναι μόνο 10% χαμηλότερη στην τελευταία περίοδο. Η αιολική ενέργεια παραμένει οικονομικά ασύμφορη κατά τη διάρκεια όλων των περιόδων του μοντέλου.

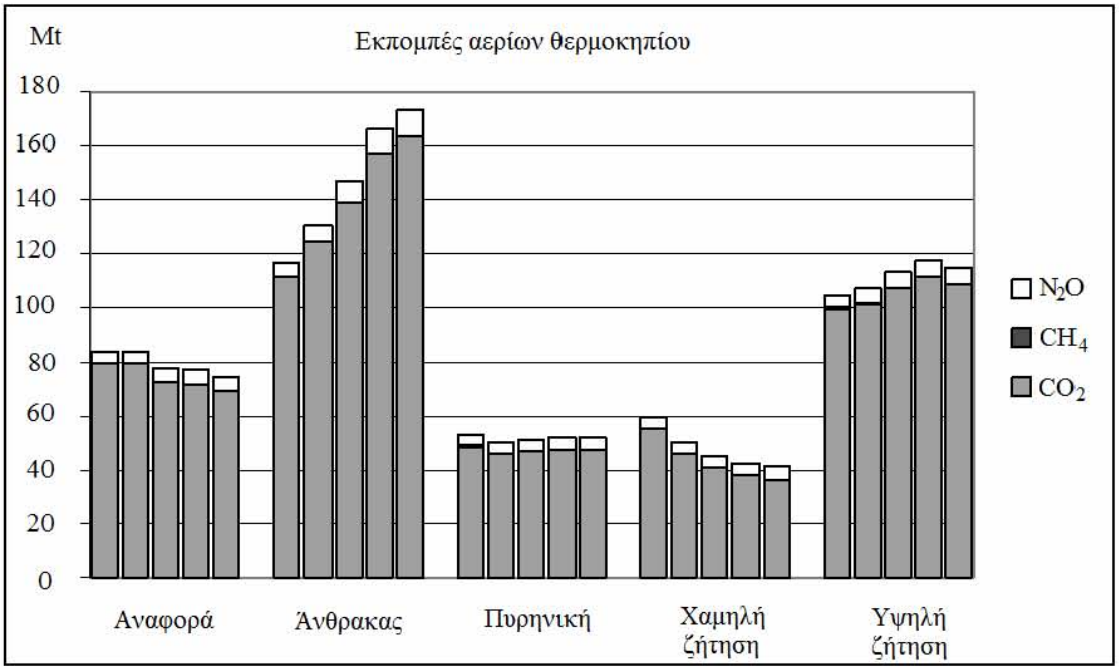
Χωρίς Νορβηγικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας NGCC, η συμβατική παραγωγή ισχύος από συμπύκνωση θα εξαφανιζόταν μετά από την περίοδο 2015 στο σενάριο Χαμηλής ζήτησης. Στη Φινλανδία, το μερίδιο των βιομηχανικών μονάδων CHP στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται ιδιαίτερα στην εισαγωγή της τεχνικής IGCC, όπως συμβαίνει επίσης και στο σενάριο αναφοράς. Η συμπαραγωγή της θερμότητας περιοχής με την ηλεκτρική ενέργεια παραμένει περίπου στο τρέχον επίπεδό της στη Φινλανδική υπομονάδα. Χωρίς έντονα αυξανόμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η Νορβηγία γίνεται εξαγωγέας ηλεκτρικής ενέργειας ήδη το 2005, ενώ η Φινλανδία συνεχίζει να εισάγει την ηλεκτρική ενέργειά της από τη Σουηδία σε όλες τις περιόδους του μοντέλου. Το μειωμένο CHP και η παραγωγή ισχύος με τη χρήση ψυχρής συμπύκνωσης καθώς επίσης και η έλλειψη της ικανότητας από την αιολική ενέργεια αντικαθίστανται από τις εισαγωγές της Δανίας.

Η προβαλλόμενη ζήτηση για την ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται δύο φορές γρηγορότερα στο σενάριο HighDem (σενάριο Υψηλή ζήτηση) από ότι στις περιπτώσεις βασικών γραμμών εντούτοις, η ζήτηση για θερμότητα περιοχής και διαδικασίες ατμού δεν αλλάζει. Ομοίως στην περίπτωση αναφοράς, τα βιοκαύσιμα και το φυσικό αέριο χρησιμοποιούνται στο ανώτερο όριο και η υπόλοιπη ενεργειακή απαίτηση καλύπτεται από τον άνθρακα. Η Δανέζικη επέκταση ικανότητας από την

αιολική ενέργεια είναι ελαφρώς ισχυρότερη, ενώ σε άλλες περιοχές η αιολική ενέργεια παραμένει ακόμα ασύμφορη.

Τα φορτία θερμότητας στο σενάριο Υψηλής ζήτησης υιοθετούνται σε μεγάλη έκταση για τη συμπαραγωγή. Παραδείγματος χάριν, στο σενάριο αναφοράς η χωριστή παραγωγή θερμότητας και ατμού στους Φινλανδικούς λέβητες ανήλθε σε περίπου 27TWh, το οποίο μειώνεται τώρα σε λιγότερο από 5TWh. Εκτός από την παραγωγή CHP, επίσης η συμβατική παραγωγή ισχύος από συμπύκνωση αυξάνεται έντονα, ιδιαίτερα στη Φινλανδία και τη Δανία. Προς το τέλος του ορίζοντα του μοντέλου, η Φινλανδία αρχίζει να εξάγει την ηλεκτρική ενέργειά της στη Σουηδία, και η Νορβηγία προσφεύγει σε αξιοπρόσεκτες εισαγωγές τόσο από τη Σουηδία όσο και από τη Δανία.

Οι γενικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου για τα σενάρια αναφοράς και τα σενάρια επικύρωσης παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.13.



Σχήμα 6.13. Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου μεταξύ 2005 και 2025 σε ισχοδύναμα Mt CO_2 για τα σενάρια αναφοράς και τα σενάρια επικύρωσης.

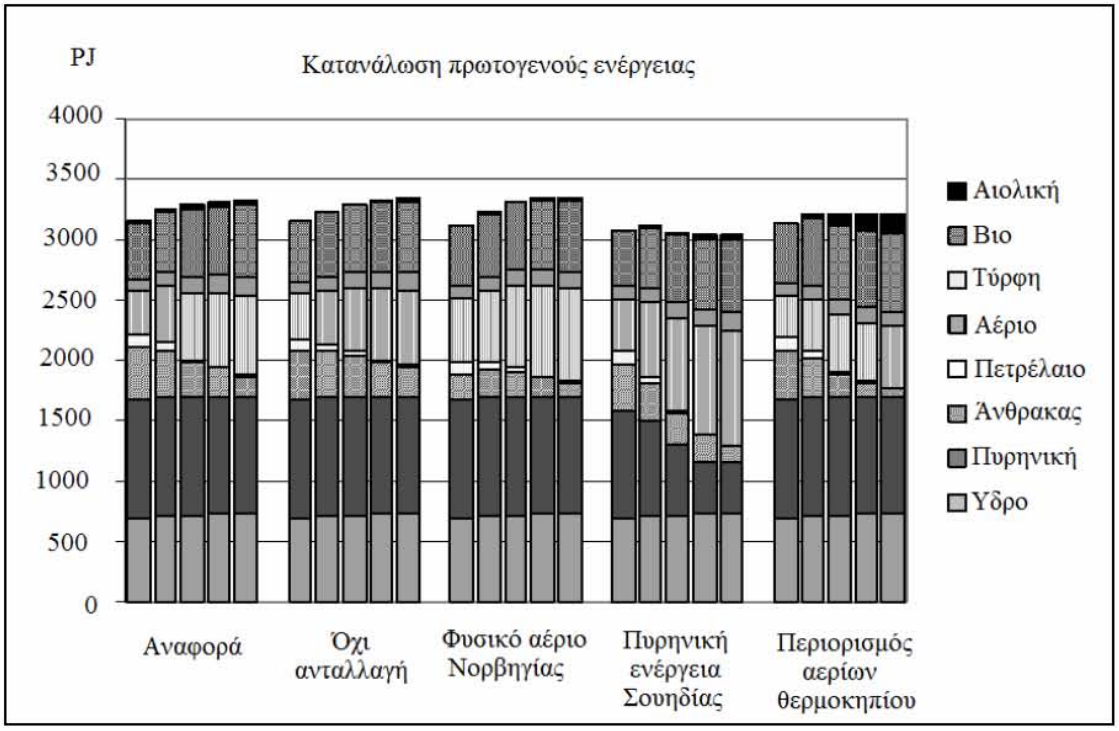
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η αντικατάσταση της χρήσης των βιοκαυσίμων και του φυσικού αερίου από τον άνθρακα στην παραγωγή θερμότητας και ισχύος αυξάνει τις ετήσιες εκπομπές περίπου κατά 130% το 2025, ενώ οι συσσωρευτικές εκπομπές μεταξύ 2005 και 2025 αυξάνουν κατά 85%. Πρόσθετη ικανότητα πυρηνικής

ενέργειας 11,800MW μειώνει τις συσσωρευτικές εκπομπές κατά 35%. Στο έτος 2025, οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου των Σκανδιναβικών χωρών θα ήταν 22Mt ισοδύναμου CO_2 χαμηλότερα εάν η ικανότητα πυρηνικής ενέργειας επεκταθεί.

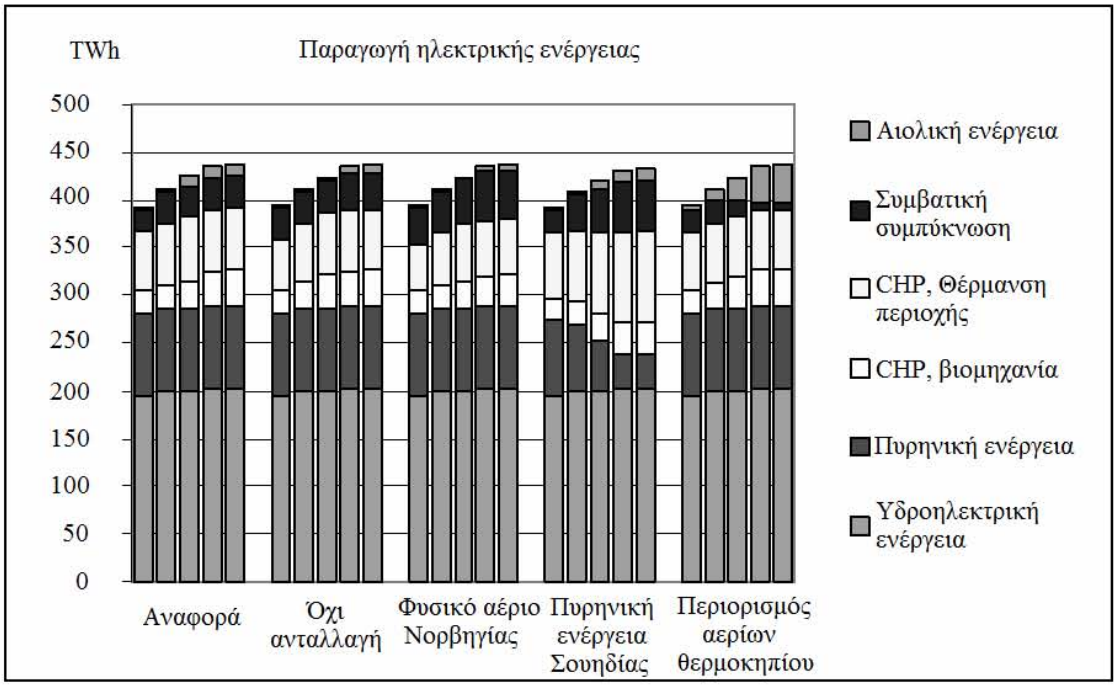
Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί η τεράστια επίδραση της απαίτησης ισχύος και θερμότητας στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου. Την περίοδο 2025, η ενεργειακή ζήτηση στο σενάριο HighDem είναι 35% υψηλότερη από ότι στο σενάριο LowDem, όμως οι εκπομπές έχουν αυξηθεί κατά 180%. Αυτό αντιστοιχεί σε μια ετήσια αύξηση 74Mt ισοδυνάμων CO_2 στην τελευταία περίοδο. Στο σενάριο HighDem, εντούτοις, ένα μεγαλύτερο μέρος της αυξανόμενης ενεργειακής ζήτησης καλύπτεται με την χρήση του άνθρακα, ο οποίος έχει έναν υψηλό παράγοντα εκπομπής του CO_2. Εάν η αυξανόμενη ζήτηση καλύπτονταν μέσω των βιοκαυσίμων και του φυσικού αερίου, οι εκπομπές θα ήταν εντυπωσιακά χαμηλότερες.

6.4 Σενάρια Ανάλυσης

Οι υποθέσεις στα σενάρια ανάλυσης δεν διαφέρουν ριζικά από την περίπτωση αναφοράς συνεπώς, οι παραλλαγές στα αποτελέσματα είναι λιγότερο δραστικές. Η εξάλειψη της ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των περιοχών του μοντέλου στο σενάριο Όχι ανταλλαγής (NoExchg) αυξάνει την κατανάλωση άνθρακα στη Φινλανδία και τη Σουηδία, χώρες που είναι σημαντικοί εισαγωγείς ηλεκτρικής ενέργειας στο σενάριο αναφοράς (reference scenario). Στη Σουηδία, η παραγωγή CHP υπολογίζεται μόνο για την αύξηση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στη Φινλανδία η πιο αξιοσημείωτη αύξηση πραγματοποιείται στην παραγωγή ισχύος από συμπύκνωση άνθρακα. Η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στα σενάρια ανάλυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.14, ενώ το Σχήμα 6.15 απεικονίζει τη δομή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 6.14. Κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας στα σενάρια αναφοράς και σενάρια ανάλυσης μεταξύ 2005 και 2025.



Σχήμα 6.15. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα σενάρια αναφοράς και σενάρια ανάλυσης μεταξύ 2005 και 2025.

Ελλείψει του εμπορίου ηλεκτρικής ενέργειας, οι Νορβηγικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας NGCC καθώς επίσης και οι Δανέζικες εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας δεν χρησιμοποιούνται στο επίπεδο του σεναρίου αναφοράς. Στη Δανία, σημαντικές αλλαγές πραγματοποιούνται στη δομή της ηλεκτρικής παραγωγής. Αφού η παραγωγή υδρενέργειας της Νορβηγίας και της Σουηδίας δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αντισταθμίσουν τη χρονική διαφορά στη διανομή των φορτίων θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας, η συμπαραγωγή γίνεται λιγότερο κερδοφόρα. Τελικά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των μονάδων CHP μειώνεται κατά 25% σε σύγκριση με την περίπτωση αναφοράς.

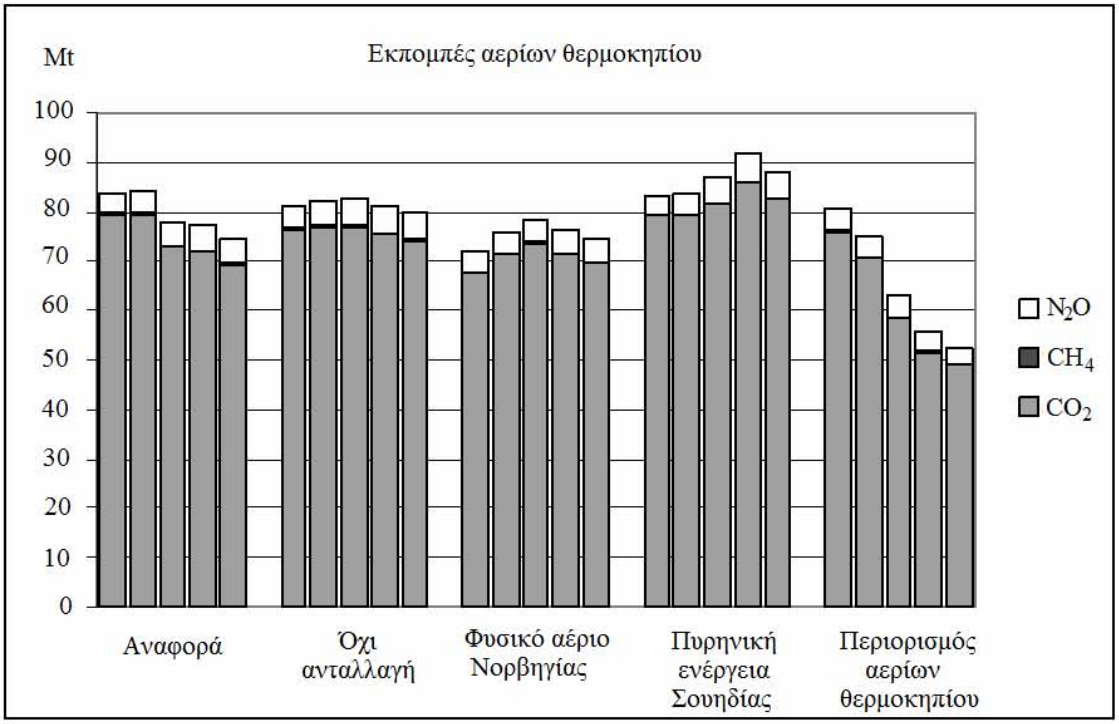
Οι περιορισμοί στη χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου στη Νορβηγία αίρονται στο σενάριο Φυσικό αέριο Νορβηγίας (NorGas scenario). Αυτό προκαλεί μια ισχυρή επέκταση ικανότητας των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας NGCC ήδη στην αρχή του ορίζοντα του μοντέλου, ο οποίος οδηγεί στη μέγιστη χρησιμοποίηση της ικανότητας εξαγωγής. Μέχρι την περίοδο 2025, οι εγκαταστάσεις NGCC παράγουν άνω των 42TWh ετησίως, ενώ στην περίπτωση αναφοράς η ετήσια παραγωγή φθάνει στα 24TWh. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε όλες τις άλλες περιοχές επηρεάζεται και ιδιαίτερα η χρήση του άνθρακα η οποία αντικαθίσταται με αυξανόμενες εισαγωγές. Στη Δανία επίσης η αύξηση της ικανότητας της αιολικής ενέργειας μειώνεται εντυπωσιακά.

Η Σουηδική πυρηνική ενέργεια, με μια ετήσια παραγωγή 67TWh, καταργείται στο σενάριο Πυρηνική ενέργεια Σουηδίας (SwePO scenario) βαθμιαία μεταξύ 2005 και 2015. Η ηλεκτρική παραγωγή της Σουηδίας αντικαθίσταται από μια ακραία αύξηση στη χρήση του φυσικού αερίου. Το 2025 οι εισαγωγές αερίου έχουν αυξηθεί σε 290PJ από το τρέχον επίπεδο που είναι περίπου 30PJ. Επιπλέον, το άνω όριο της κατανάλωσης φυσικού αερίου στη Νορβηγία έχει αυξηθεί κατά 35%, και η αύξηση των 18TWh διπλασιάζει σχεδόν την ετήσια παραγωγή πυρηνικής ενέργειας στη Φινλανδία μέχρι την περίοδο 2015. Όπως αναμένεται, ο ρόλος της παραγωγής CHP καθώς επίσης και οι εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται πολύ σημαντικοί παράγοντες στη Σουηδία. Η ηλεκτρική ενέργεια ακόμα εισάγεται κυρίως από τη Νορβηγία και τη Δανία, αν και μετά την ολοκλήρωση των νέων εγκαταστάσεων πυρηνικής ενέργειας οι εισαγωγές από Φινλανδία γίνονται και αυτές σημαντικές.

Στο σενάριο Περιορισμού αερίων θερμοκηπίου (GhgLim scenario), οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που προέρχονται από την παραγωγή ισχύος και θερμότητας στη Φινλανδία περιορίζονται για να μειωθούν κατά 22% μεταξύ 1997 και 2025, ενώ οι Σουηδικές εκπομπές είναι περιορισμένες στο επίπεδο του 1997, στη Νορβηγία επιτρέπονται να αυξήσουν τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στο ισοδύναμο 2.2Mt CO_2, η οποία αντιστοιχεί κατά προσέγγιση στην ηλεκτρική παραγωγή 6TWh στις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας NGCC. Οι εκπομπές στη Δανία είναι περιορισμένες στο επίπεδο σεναρίου αναφοράς για κάθε περίοδο, με μείωση που είναι 63% μεταξύ 1997 και 2025. Ο περιορισμός στη χρήση των ξύλινων καυσίμων αυξάνεται κατά 65PJ και στη Φινλανδία και στη Σουηδία. Συνεπώς, η τιμή των ξύλινων καυσίμων διπλασιάζεται στη Φινλανδία και αυξάνεται κατά 66% στη Σουηδία, όπου η αρχική τιμή ήταν ήδη υψηλότερη. Καμία αλλαγή δεν γίνεται στις Δανέζικες και Νορβηγικές υπομονάδες.

Η πιο προεξέχουσα αλλαγή σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς είναι η αντικατάσταση του άνθρακα με τα βιοκαύσιμα και με την αιολική ενέργεια. Εκτός από τη Δανία, η αιολική ενέργεια γίνεται κερδοφόρα επίσης σε όλες τις άλλες περιοχές του μοντέλου μετά το 2005. Επιπλέον, η παράκτια τεχνολογία αιολικής ενέργειας εισάγεται το 2020 με ιδιαίτερη επέκταση κατά τη διάρκεια των τελευταίων δύο περιόδων. Η αύξηση στην ικανότητα της αιολικής ενέργειας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.15. Παρά την αυξανόμενη δυνατότητα για ξύλινα καύσιμα, στη Φινλανδία οι περιορισμοί εκπομπής οδηγούν σε σημαντικά χαμηλότερη αύξηση στην ηλεκτρική παραγωγή από ότι στο σενάριο αναφοράς. Κατά συνέπεια, η Φινλανδία προσφεύγει στην ανάπτυξη των εισαγωγών από τη Σουηδία, όπου αναπτύσσεται η παραγωγή CHP. Όταν η χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου της Νορβηγίας περιοριστεί μέσω των περιορισμών εκπομπής, επίσης πρέπει να καλύψει ένα αυξανόμενο μερίδιο ανεφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας από τις εισαγωγές τόσο της Σουηδίας όσο και της Δανίας.

Η ανάπτυξη των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου ως σενάριο ανάλυσης παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.16.



Σχήμα 6.16. Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου μεταξύ 2005 και 2025 στο ισοδύναμο Mt CO_2 για τα σενάρια αναφοράς και τα σενάρια ανάλυσης.

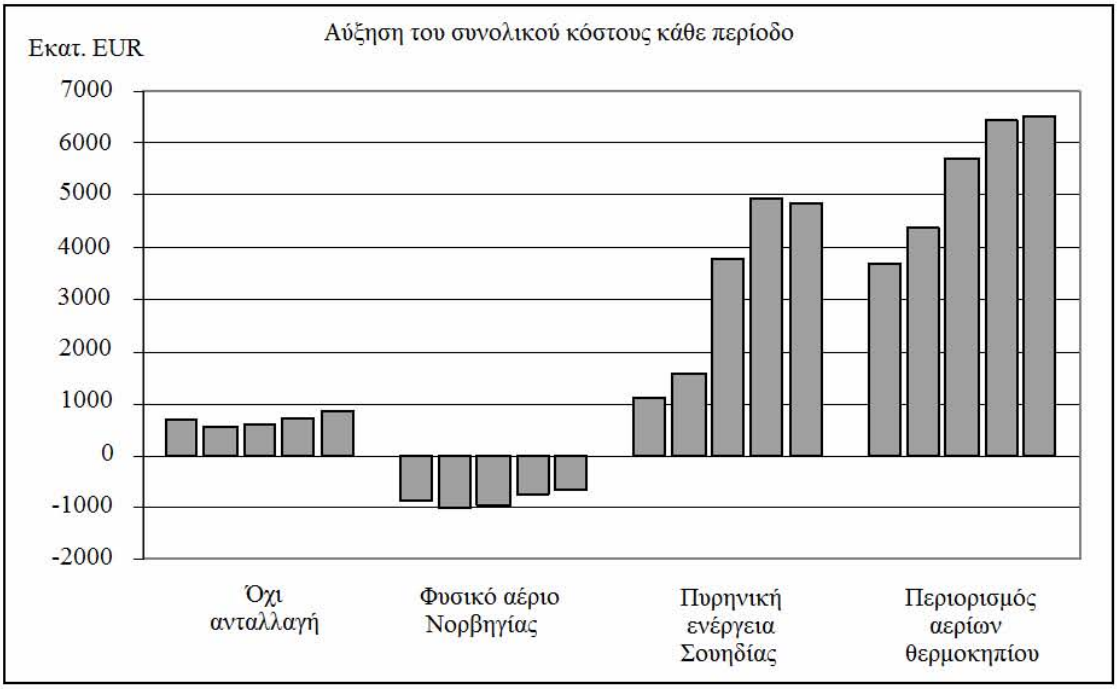
Χωρίς εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας, οι εκπομπές στην περίοδο 2025 θα ήταν 7% υψηλότερες έναντι της περίπτωσης αναφοράς, η οποία αντιστοιχεί σε μια αύξηση του ισοδύναμου Mt CO_2. Η αύξηση των εκπομπών προέρχεται από την αύξηση στην κατανάλωση άνθρακα στη Φινλανδία και τη Σουηδία, ενώ η χρήση του φυσικού αερίου στη Νορβηγία και η ανάπτυξη της ικανότητας της αιολικής ενέργειας στη Δανία μειώνεται. Μια εξαιρετικά ισχυρή επέκταση της Νορβηγικής ικανότητας NGCC φαίνεται να χαμηλώνει τις εκπομπές στην αρχή του ορίζοντα του μοντέλου εντούτοις, σε αντίθεση με την περίπτωση αναφοράς, τα μακροπρόθεσμα αποτελέσματα παραμένουν οριακά, δεδομένου ότι το μερίδιο της παραγωγής CHP μειώνεται. Επιπλέον, όχι μόνο ο άνθρακας αλλά και η αιολική ενέργεια αντικαθίστανται μέχρι ενός σημείου από το φυσικό αέριο.

Καταργώντας σταδιακά την πυρηνική ενέργεια στη Σουηδία και αναπτύσσοντάς την κατά 90% στη Φινλανδία, έχει μια συνολική επίδραση (ελάττωση) της ετήσιας παραγωγής πυρηνικής ενέργειας κατά 49TWh. Ο παροπλισμός λαμβάνει χώρα μετά από τις περιόδους 2010 και 2015, οι οποίες μπορούν να θεωρηθούν σαφώς ως περίοδοι οι οποίοι αυξάνουν τις εκπομπές στο σενάριο SwePO όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6.16. Στην περίοδο 2020, η χρήση του

άνθρακα αντικαθίσταται από το φυσικό αέριο σε μια μεγάλη έκταση, που οδηγεί σε μια μείωση των εκπομπών το 2025. Σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς, οι ετήσιες εκπομπές την τελευταία περίοδο είναι αυξημένες κατά 18% ισοδύναμο Mt CO_2 ή 13.5 ισοδύναμο Mt CO_2.

Η μείωση στις εκπομπές αερίου θερμοκηπίου που επιτυγχάνονται στο σενάριο GhgLim είναι αρκετά αξιοπρόσεκτη. Οι εκπομπές την τελευταία περίοδο είναι κατά 30% χαμηλότερες από εκείνες στο σενάριο αναφοράς, που αντιστοιχεί σε μια μείωση 22Mt ισοδύναμου CO_2. Οι συσωρευτικές εκπομπές κατά τη διάρκεια του μοντέλου μειώνονται κατά 18%. Ο σημαντικότερος παράγοντας που οδηγεί στις μειώσεις εκπομπής είναι η εκτενής ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας σε όλες τις περιοχές του μοντέλου, που φθάνουν σε συνολική ετήσια παραγωγή 40TWh την τελευταία περίοδο. Η μεγαλύτερη ικανότητα για τη χρήση των βιοκαυσίμων συμβάλλει επίσης στις μειωμένες εκπομπές, αν και η υπόθεση για την ικανότητα της αιολικής ενέργειας είναι ίσως κάπως αισιόδοξη ήδη στο σενάριο αναφοράς.

Η αύξηση του κόστους των σεναρίων ανάλυσης σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς παρουσιάζεται για κάθε περίοδο στο Σχήμα 6.17 και η διαφορά στις συνολικές συσσωρευτικές δαπάνες και τις μέσες ετήσιες δαπάνες δίνεται στον Πίνακα 2.



Σχήμα 6.17. Η πραγματική αύξηση του συνολικού κόστους σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Οι τιμές αντιπροσωπεύουν τις συνολικές δαπάνες των πενταετών περιόδων 2005, 2010, 2015, 2020 και 2025.

Εκατ. EUR	Όχι ανταλλαγή (NoExchg)*	Φυσικό αέριο Νορβηγίας (NorGas)*	Πυρηνική ενέργεια Σουηδίας (SwePO)*	Περιορισμός αερίων θερμοκηπίου (GhgLim)*
Συσωρευτική αύξηση κόστους	3400	-4200	16200	26800
Μέση αύξηση στα ετήσια κόστη	135	-169	650	1071
*: χρησιμοποιούνται και οι αγγλικοί όροι των σεναρίων ανάλυσης για την ευκολότερη παρουσίαση και κατανόηση των ευρημάτων και των αποτελεσμάτων στη συνέχεια.				

Πίνακας 6.2. Η συσσωρευτική και μέση ετήσια ανάπτυξη δαπανών σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Οι δαπάνες υπολογίζονται για τη χρονική έκταση από το 2003 έως το 2027.

Εξαιτίας των πολλών απλοποιήσεων που έγιναν στο μοντέλο, οι τιμές αναπαριστούν μια προσέγγιση της αύξησης του κόστους. Για παράδειγμα, οι δαπάνες για την επέκταση του δικτύου μεταφοράς φυσικού αερίου δεν έχουν περιλήφθουν, και έτσι οι τιμές για τα σενάρια NorGas και SwePO, όπου η χρήση του αερίου αυξάνεται έντονα, υποτιμώνται. Αφ' ετέρου, οι δαπάνες για την οικονομία υπερεκτιμώνται μέσω του συνυπολογισμού των φόρων καυσίμων στις τιμές άνθρακα και αερίου. Στα σενάρια NoExchg και NorGas, οι αποφάσεις επένδυσης που διαφέρουν από το σενάριο αναφοράς γίνονται πρώτιστα στην αρχή του ορίζοντα του μοντέλου. Δεδομένου ότι οι προεξοφλημένες δαπάνες είναι εξαπλωμένες στην οικονομική διάρκεια ζωής, οι αυξήσεις του κόστους πραγματοποιούνται μάλλον ομοιόμορφα κατά τη διάρκεια των περιόδων του μοντέλου. Στο σενάριο SwePO, οι νέες επενδύσεις αντικαθιστούν τη Σουηδική πυρηνική ικανότητα σταδιακά, κάτι που οδηγεί στην ανάπτυξη των προεξοφλημένων δαπανών επένδυσης προς το τέλος του ορίζοντα του μοντέλου, σε σύγκριση με το σενάριο αναφοράς. Ομοίως, λόγω του πολύ σφιχτού πλάνου σχετικά με τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου περιορίζεται η αυξανόμενη κατανάλωση ενέργειας καθιστώντας ακριβότερες τις επενδύσεις που είναι απαραίτητες κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου στο σενάριο GhgLim [100].

6.5 Επισκόπηση Κεφαλαίου

Στο Κεφάλαιο 6ο παρουσιάστηκαν τα ενεργειακά σενάρια των Σκανδιναβικών χωρών που θα απασχολήσουν τη Μεταπτυχιακή αυτή εργασία. Το πακέτο προγραμμάτων (ή το μοντέλο) λαμβάνει ως είσοδο για τα ενεργειακά σενάρια τα οποία αναπτύχθηκαν την αύξηση του κόστους για κάθε σενάριο σε σχέση με το σενάριο αναφοράς για να μπορέσει στη συνέχεια να εισάγει την αβεβαιότητα και να προχωρήσει σε εύρωστη λήψη απόφασης. Στο τελικό βήμα, απομένει στους υπεύθυνους λήψης της απόφασης του ενεργειακού συστήματος των Σκανδιναβικών χωρών εκτιμώντας και την ευρύτερη ενεργειακή κατάσταση που επικρατεί στις Σκανδιναβικές χώρες, στην Ευρωπαϊκή Ένωση, στις γειτονικές χώρες και γενικότερα στον κόσμο να καθορίσουν τις ενεργειακές τους αποφάσεις.

Στη συνέχεια, στο Κεφάλαιο 7ο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εφαρμογή του πακέτου προγραμμάτων (ή μοντέλου) στο

ενεργειακό σύστημα των Σκανδιναβικών χωρών. Χρήσιμα συμπεράσματα προκύπτουν τα οποία αποτελούν στη συνέχεια είσοδο βαρύνουσας σημασίας για την τελική λήψη απόφασης για το ενεργειακό σύστημα από τους υπεύθυνους.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

7.1 Εισαγωγή

Βάσει των θεωρητικών στοιχείων που αναπτύχθηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, υλοποιήθηκαν προγράμματα σε MATLAB στην έκδοση 7.0 (Παράρτημα Γ). Θέλοντας να ληφθεί απόφαση υπό καθεστώς έντονης αβεβαιότητας, το λογισμικό εφαρμογής προσπαθεί μέσω της φιλοσοφίας των εύρωστων αποφάσεων βασισμένο στα μοντέλα χάσματος πληροφορίας να ορίσει την ευρωστία του συστήματος σε ένα περιβάλλον όπου οι παράμετροι που μεταβάλλονται ποικίλουν. Στο Κεφάλαιο αυτό, επίσης παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την εκτέλεση του λογισμικού εφαρμογής για διαφορετικές ακολουθούμενες στρατηγικές για το Σκανδιναβικό μοντέλο όταν οι παράμετροι του περιβάλλοντος μπορούν και ποικίλλουν.

7.2 Περιληπτικά το Θεωρητικό Υπόβαθρο του Λογισμικού Εφαρμογής

7.2.1 Το Σενάριο του Λογισμικού Εφαρμογής

Όπως έχει ήδη παρουσιαστεί στα προηγούμενα Κεφάλαια, στο Σκανδιναβικό ενεργειακό σύστημα οι υπεύθυνοι αποφάσεων έχουν να επιλέξουν μεταξύ τεσσάρων βασικών στρατηγικών (σε σχέση με μια στρατηγική αναφοράς):

1. Σενάριο Όχι Ανταλλαγής (NoExchg scenario). Ελλείψει του εμπορίου ηλεκτρικής ενέργειας, οι Νορβηγικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας καθώς επίσης και οι Δανέζικες εγκαταστάσεις παραγωγής αιολικής ενέργειας δεν χρησιμοποιούνται.
2. Σενάριο Φυσικό Αέριο Νορβηγίας (NorGas scenario). Οι περιορισμοί στη χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου στη Νορβηγία αίρονται.
3. Σενάριο Πυρηνικής Ενέργειας Σουηδίας (SwePO scenario). Η Σουηδική πυρηνική ενέργεια, με μια ετήσια παραγωγή 67TWh, καταργείται βαθμιαία μεταξύ 2005 και 2015.
4. Σενάριο Περιορισμού Αερίων Θερμοκηπίου (GhgLim scenario). Στο σενάριο αυτό, οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου που προέρχονται από την παραγωγή ισχύος και θερμότητας επηρεάζουν όπως έχει παρουσιαστεί την παραγωγή των Σκανδιναβικών χωρών.

Κάθε σενάριο από τα παραπάνω τέσσερα, παρουσιάζει τις δικές του δαπάνες (σε σχέση με ένα σενάριο αναφοράς) ανά περίοδο, οι οποίες μπορούν να εκφραστούν σε ΚΠΑ στο παρόν χρησιμοποιώντας γνωστούς τύπους από τη χρηματοοικονομική ανάλυση. Αυτές οι δαπάνες ορίζονται ως συσωρευτική αύξηση κόστους. Οι υπεύθυνοι αποφάσεων για το Σκανδιναβικό ενεργειακό σύστημα, θα πρέπει να χαράξουν την πολιτική η οποία θα ακολουθηθεί. Η πολιτική η οποία θα ακολουθηθεί μπορεί είτε να είναι ένα σενάριο αναφοράς (δηλαδή η πολιτική η οποία θα ακολουθηθεί θα περιλαμβάνει τα μέτρα που περιγράφονται από ένα από τα παραπάνω τέσσερα σενάρια και μόνον) είτε ως ένας συνδυασμός ή χαρτοφυλάκιο (portfolio) σεναρίων (δηλαδή συνδυασμός μέτρων από δύο ή περισσότερα σενάρια που έχουν περιγραφεί).

Αν και αρχικά οι υπεύθυνοι για τη χάραξη της ενεργειακής πολιτικής μπορεί να αποφασίσουν την πολιτική που θέλουν να ακολουθήσουν, αυτή η πολιτική είναι μια εκτίμηση ή προσέγγιση της τελικής πολιτικής (σε ορίζοντα 20ετίας) που θα ακολουθηθεί. Οι λόγοι που δημιουργούν την απόκλιση της αρχικής από την τελικά πραγματοποιούμενη πολιτική είναι:

1. Το περιβάλλον είναι σε κίνδυνο και οι φυσικοί πόροι εξαντλούνται. Αυτό θα έχει ως αποτέλεσμα μέσω των διεθνών οργανισμών και των διεθνών σχέσεων μεταξύ των χωρών τη λήψη εντατικότερων και πιο αυστηρών μέτρων για το περιβάλλον και την εκμετάλλευση των πόρων. Στο παρόν, το σύνολο των μέτρων δεν είναι γνωστό με αποτέλεσμα να είναι αβέβαιη και η επίδραση αυτών των μέτρων στη χάραξη της πολιτικής.
2. Οι Σκανδιναβικές χώρες είναι τέσσερις (Σουηδία, Φινλανδία, Δανία και Νορβηγία). Η ενεργειακή πολιτική η οποία ακολουθεί μια χώρα ή ένας συνασπισμός κρατών είναι συνάρτηση και των ανθρώπων που ζούνε και εργάζονται σε αυτές τις χώρες. Δημοψηφίσματα για θέματα ενέργειας, νέες κυβερνήσεις, προϋπολογισμοί περισσότερο ή λιγότερο ενεργειακά φιλικοί, ανθρώπινες τάσεις, ενεργειακές μόδες είναι μόνο μερικές από τις ανθρώπινες ανησυχίες που μπορούν να καταστήσουν ένα ενεργειακό σύστημα αβέβαιο.
3. Οι μελλοντικές, ενεργειακές, τεχνολογικές εξελίξεις αυξάνουν την αβεβαιότητα σχετικά με την πολιτική που τελικά θα ακολουθηθεί (αν και όχι έντονη).
4. Οι διάδρομοι ενέργειας, οι σχέσεις των Σκανδιναβικών χωρών με την ΕΕ και τους γείτονες της ΕΕ, οι ενεργειακές επιχορηγήσεις από τα κράτη και την ΕΕ μπορούν να επηρεάσουν την αρχική επιλογή πολιτικής.

Οι παραπάνω αποτελούν μερικούς από τους παράγοντες που καθιστούν την απόφαση για την ακολουθούμενη ενεργειακή πολιτική ως απόφαση υπό όρους αβεβαιότητας με συνάρτηση ανταμοιβής το (σχετικό) κόστος (reward function).

7.2.2 Γενικά περί Μοντέλων Χάσματος Πληροφορίας

Η θεωρία απόφασης χάσματος πληροφορίας (info gap decision theory) είναι μια μη πιθανολογική θεωρία απόφασης που επιδιώκει να βελτιστοποιήσει την

ευρωστία στην αποτυχία (αυτό με το οποίο τα πραγματεύεται το λογισμικό εφαρμογής) ή την ευκαιρία για αναπάντεχο κέρδος υπό έντονη αβεβαιότητα [15], [101].

Σε περιπτώσεις ενεργειακών θεμάτων, κόστους επενδύσεων και κόστους λειτουργίας είναι κοινό να λαμβάνονται συχνά έντονα αβέβαιες αποφάσεις. Τι μπορεί να γίνει όμως για ληφθούν καλές (ή τουλάχιστον οι καλύτερες δυνατές) αποφάσεις υπό καθεστώς αβεβαιότητας; Η ανάλυση ευρωστίας πληροφορίας χάσματος αξιολογεί κάθε εφικτή απόφαση όσον αφορά το βαθμό απόκλισης από μια εκτίμηση μιας αξίας παραμέτρου, λειτουργίας, ή συνόλου ο οποίος είναι επιτρεπτός και παράλληλα εξασφαλίζει μια ελάχιστη εγγυημένη η αποδεκτή απόδοση. Με καθημερινούς όρους, η ευρωστία (robustness) μιας απόφασης προσδιορίζεται από το μέγεθος της απόκλισης από μια εκτίμηση οδηγώντας παρόλα αυτή σε μια απόδοση που βρίσκεται μέσα στο εύρος των απαιτήσεων. Είναι μερικές φορές δύσκολο να κριθεί πόση ευρωστία απαιτείται (needed) ή είναι ικανοποιητική (sufficient). Εντούτοις, σύμφωνα με τη θεωρία πληροφορίας χάσματος, η ταξινόμηση των εφικτών αποφάσεων από την άποψη του βαθμού ευρωστίας τους είναι ανεξάρτητη από αυτές τις κρίσεις.

Η θεωρία πληροφορίας χάσματος προτείνει επίσης μια συνάρτηση απόφασης ευκαιρίας αναπάντεχου κέρδους που αξιολογεί τη δυνατότητα για τις εκβάσεις αναπάντεχου κέρδους ως αποτέλεσμα της ευνοϊκής αβεβαιότητας κάτι το οποίο δε θα απασχολήσει την παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία.

Στα πλαίσια της κλασσικής απόφασης (decision theory), το μοντέλο της ευρωστίας χάσματος πληροφορίας είναι μια περίπτωση μοντέλου Wald Maximin [102] ενώ για την περίπτωση του μοντέλου ευκαιρίας αναπάντεχου κέρδους πρόκειται για μια περίπτωση κλασσικού μοντέλου Minimin [171]. Και τα δύο μοντέλα λειτουργούν στη γειτονιά μιας εκτίμησης (neighborhood of an estimate) της παραμέτρου ενδιαφέροντος της οποίας η πραγματική τιμή υπόκειται σε έντονη αβεβαιότητα.

Το μοντέλο πληροφορίας χάσματος σχεδιάστηκε ρητώς ως μεθοδολογία για την επίλυση προβλημάτων απόφασης που υπόκεινται σε έντονη αβεβαιότητα και ο στόχος του είναι να επιδιώξει λύσεις που είναι εύρωστες (robust).

Κατά συνέπεια, για να υπάρξει, για τη συνέχεια, μια σαφής εικόνα του modus operandi του μοντέλου πληροφορίας χάσματος και του ρόλου του στη θεωρία

απόφασης και την εύρωστη βελτιστοποίηση, είναι επιτακτικό να διευκρινιστούν δύο σημαντικά σημεία. Αυτά είναι:

- Η δριμύτητα της αβεβαιότητας. Η εξέταση της δριμύτητας (severity) της αβεβαιότητας που το μοντέλο χάσματος πληροφορίας έχει ως σκοπό να αντιμετωπίσει, δηλαδή η διευκρίνιση των δυσκολιών που τίθενται από την έντονη αβεβαιότητα.
- Η φύση της μεθόδου. Η μέθοδος πληροφορίας χάσματος είναι μια μη πιθανολογική μέθοδος που επιδιώκει να μεγιστοποιήσει την ευρωστία στην αβεβαιότητα.

7.2.3 Υποθέσεις Εργασίας

Η επιτυχία ενός λογισμικού εφαρμογής βασίζεται στην σωστή κατάστρωση του προβλήματος. Η σωστή άρθρωση του προβλήματος περιλαμβάνει κάποιες παραδοχές-υποθέσεις οι οποίες πρέπει να ληφθούν υπόψη. Οι παραδοχές οι οποίες πρέπει να γίνουν χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Στην πρώτη κατηγορία περιλαμβάνονται υποθέσεις σχετικές με την χάραξη της ενεργειακής πολιτικής των Σκανδιναβικών χωρών.
2. Στη δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνονται υποθέσεις σχετικές με τα μοντέλα χάσματος πληροφορίας.

7.2.3.1 Υποθέσεις Χάραξης Ενεργειακής Πολιτικής

Για την επιλογή της ενεργειακής πολιτικής υιοθετούνται τέσσερις απλές υποθέσεις για να ληφθεί υπόψη η αβεβαιότητα που συνδέεται με τα προβλήματα απόφασης που αντιμετωπίζει το μοντέλο χάραξης πολιτικής. Αυτές είναι

1. Τα τέσσερα σενάρια είναι τα μοναδικά. Δεν υπάρχουν άλλα εναλλακτικά σενάρια χάρη της απλότητας του λογισμικού εφαρμογής το οποίο υλοποιήθηκε.

2. Κάθε σενάριο αποτελεί μια συνιστώσα της επιλεγμένης πολιτικής. Στην ουσία δηλαδή η ακολουθούμενη πολιτική είναι το χαρτοφυλάκιο των παραπάνω τεσσάρων σεναρίων.
3. Κατόπιν της επιλογής του (πραγματικού) χαρτοφυλακίου στην πρώτη περίοδο, η σύνθεση του χαρτοφυλακίου δεν αλλάζει στις υπόλοιπες περιόδους. Όλη η αβεβαιότητα, συνεπώς, των περιόδων λειτουργεί ως 'παραλλάκτης' της αρχικής επιλεγμένης πολιτικής.
4. Μεταξύ της αρχικής (υποτιθέμενης) πολιτικής που επιλέγουν οι υπεύθυνοι της ενεργειακής πολιτικής των Σκανδιναβικών χωρών και της τελικής (πραγματικής) πολιτικής (που δεν γνωρίζουν πια τελικά είναι από την αρχή οι υπεύθυνοι απόφασης αλλά βρίσκεται στο εύρος της αβεβαιότητας που δημιουργείται γύρω από την αρχική πολιτική όπως παρουσιάζεται και στη συνέχεια στη μαθηματική μοντελοποίηση του λογισμικού εφαρμογής) μπορεί να προκύψουν και συνιστώσες από σενάρια τα οποία αρχικά είχαν αγνοηθεί.
5. Για λόγους χρηματοοικονομικής απλότητας, το σημείο έναρξης (έχει να κάνει με το σημείο όπου θα γίνεται η προεξόφληση) είναι το 2005 χωρίς να επηρεάζεται ουσιαστικό το τελικό προεξοφλημένο κόστος κάθε πολιτικής.
6. Εξαιτίας της δομής του λογισμικού εφαρμογής (παρουσιάζεται παρακάτω), ο παράγοντας της αβεβαιότητας είναι στην ουσία μια άνω φραγμένη παράμετρος (έστω και στη μονάδα). Το άνω όριο της αβεβαιότητας (αν και μαθηματικά στην περίπτωση προβλημάτων έντονης αβεβαιότητας δεν είναι απολύτως ορθό) είναι επιβεβλημένο για την εξασφάλιση της μη ομογενοποίησης του προβλήματος πολιτικής κάτι το οποίο είναι αποδεκτό σε προβλήματα όπου η αβεβαιότητα δεν είναι έντονη αλλά σχετικά ήπια (όπως στην περίπτωσή μας). Παρόλα αυτά θα ακολουθηθεί μια μέση οδός στην επιλογή του εύρους της αβεβαιότητας για κάθε περίπτωση προβλήματος.

7.2.3.2 Υποθέσεις Μοντέλου Χάσματος Πληροφορίας

Η θεωρία απόφασης πληροφορίας χάσματος υιοθετεί τρεις απλές υποθέσεις για να λάβει υπόψη την αβεβαιότητα που συνδέεται με τα προβλήματα απόφασης που αντιμετωπίζει το μοντέλο. Αυτές είναι

1. Η παράμετρος u της οποίας η πραγματική τιμή υπόκειται σε έντονη αβεβαιότητα. Στο λογισμικό εφαρμογής που υλοποιήθηκε η παράμετρος u είναι η τελική πολιτική που ακολουθείται από τους Σκανδιναβούς χαράκτες πολιτικής.
2. Μια περιοχή αβεβαιότητας U όπου βρίσκεται η πραγματική τιμή της u. Στο λογισμικό εφαρμογής που υλοποιήθηκε, η παράμετρος U είναι το σύνολο των πιθανών πολιτικών μεταξύ των οποίων βρίσκεται και η (τελική) πραγματική πολιτική.
3. Μια εκτίμηση $\tilde{u}$ της πραγματικής τιμής. Στο λογισμικό εφαρμογής που υλοποιήθηκε, η παράμετρος $\tilde{u}$ είναι μια εκτίμηση της τελικής πολιτικής.

Πρέπει να επισημανθεί, εν τούτοις, ότι υπό αυτήν τη μορφή αυτές οι υποθέσεις είναι γενικές (παρακάτω δίνεται ένα επιπρόσθετο σύνολο υποθέσεων πιο ειδικών για το λογισμικό εφαρμογής), σημαίνοντας ότι μπορούν να υιοθετηθούν για να διαμορφώσουν τις καταστάσεις όπου η αβεβαιότητα δεν είναι έντονη αλλά σχετικά ήπια. Έτσι είναι ζωτικής σημασίας να δοθεί σαφής έκφραση της δριμύτητας της αβεβαιότητας.

7.2.4 Η Μαθηματική Μοντελοποίηση των Μοντέλων Χάσματος Πληροφορίας στο Λογισμικό Εφαρμογής

Ένα μοντέλο χάσματος πληροφορίας είναι μια χωρίς όριο οικογένεια ενθέτων συνόλων. Παραδείγματος χάριν, ένα συχνά αντιμετωπίσιμο παράδειγμα είναι μια οικογένεια ένθετων ελλειψοειδών (nested ellipsoids) τα οποία έχουν την ίδια μορφή. Η δομή των συνόλων σε ένα μοντέλο χάσματος πληροφορίας προέρχεται από τις πληροφορίες για την αβεβαιότητα. Γενικά, η δομή ενός μοντέλου χάσματος πληροφορίας της αβεβαιότητας επιλέγεται να καθορίσει τη μικρότερη ή την ακριβέστερη οικογένεια των συνόλων των οποίων τα στοιχεία είναι σύμφωνα με τις προγενέστερες πληροφορίες. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει, συνήθως, καμία γνωστή χειρότερη περίπτωση, η οικογένεια των συνόλων μπορεί να είναι απεριόριστη.

Σε ένα οποιοδήποτε ορίζοντα αβεβαιότητας α, το σύνολο $U(\alpha,\tilde{u})$ περιέχει όλες τις λειτουργίες των οποίων η απόκλιση δεν είναι μεγαλύτερη από α. Εντούτοις, ο ορίζοντας της αβεβαιότητας είναι άγνωστος και έτσι το μοντέλο πληροφορίας

χάσματος είναι μια απεριόριστη οικογένεια συνόλων χωρίς να υπάρχει καμία χειρότερη περίπτωση ή μέγιστη απόκλιση.

Υπάρχουν πολλοί άλλοι τύποι μοντέλων πληροφοριών χάσματος της αβεβαιότητας. Όλα τα μοντέλα πληροφορίας χάσματος υπακούνε σε δύο βασικά αξιώματα τα οποία είναι:

- Το αξίωμα της Ενθυλάκωσης (nesting). Το μοντέλο πληροφορίας χάσματος $U(\alpha,\tilde{u})$ είναι ένθετο (nested) αν $\alpha < \alpha'$ τότε $U(\alpha,\tilde{u}) \subseteq U(\alpha',\tilde{u})$.
- Το αξίωμα της Συστολής (contraction). Το μοντέλο πληροφορίας χάσματος είναι ένα μονότιμο σύνολο (singleton set) που περιέχει το κεντρικό σημείο του $U(0,\tilde{u}) = \{\tilde{u}\}$.

Το αξίωμα της ενθυλάκωσης επιβάλλει ότι τα σύνολα αβεβαιότητας $U(\alpha,u)$ γίνονται πιο περιεκτικά καθώς το α αυξάνει, χαρακτηρίζοντας το α με την έννοιά του ορίζοντα της αβεβαιότητας. Το αξίωμα συστολής υπονοεί ότι, όταν ο ορίζοντας της αβεβαιότητας είναι μηδέν, η εκτίμηση $\tilde{u}$ είναι σωστή.

Ας γίνει η υπενθύμιση ότι το αβέβαιο στοιχείο u μπορεί να είναι μια παράμετρος, ένα διάνυσμα, μια λειτουργία ή ένα σύνολο. Το μοντέλο χάσματος πληροφορίας είναι έπειτα μια απεριόριστη οικογένεια ένθετων συνόλων από παραμέτρους, διανύσματα, λειτουργίες ή σύνολα.

Η αβεβαιότητα μπορεί να είναι είτε ολέθρια (pernicious) είτε ευνοϊκή (propitious). Δηλαδή οι αβέβαιες παραλλαγές μπορούν να είναι είτε δυσμενείς είτε ευνοϊκές. Η δυσμένεια (adversity) συνεπάγεται τη δυνατότητα της αποτυχίας, ενώ η ευμένεια (favorability) είναι η ευκαιρία για τη σαρωτική επιτυχία. Η θεωρία απόφασης πληροφορίας χάσματος είναι βασισμένη στην ποσοτικοποίηση αυτών των δύο πτυχών της αβεβαιότητας και την επιλογή μιας δράσης που εξετάζει την πρώτη πτυχή, τη δεύτερη ή και τις δύο ταυτόχρονα. Οι ολέθριες και ευνοϊκές πτυχές της αβεβαιότητας ποσοτικοποιούνται από δύο συναρτήσεις απόφασης:

1. τη συνάρτηση της ανοσίας (immunity functions) που είναι η συνάρτηση ευρωστίας (robustness function) και η οποία εκφράζει την ασυλία στην αποτυχία και
2. τη συνάρτηση της ευκαιρίας (opportunity function) η οποία εκφράζει την ασυλία στο αναπάντεχο κέρδος.

Η συνάρτηση ευρωστίας εκφράζει το μέγιστο επίπεδο αβεβαιότητας στο οποίο η αποτυχία δεν μπορεί να εμφανιστεί ενώ η συνάρτηση ευκαιρίας είναι το χαμηλότερο

επίπεδο αβεβαιότητας που συνεπάγεται τη δυνατότητα σαρωτικής νίκης. Οι συναρτήσεις ευρωστίας και ευκαιρίας εξετάζουν, αντίστοιχα, τις ολέθριες και ευνοϊκές όψεις της αβεβαιότητας.

Ας θεωρηθεί ότι το q είναι ένα διάνυσμα απόφασης των παραμέτρων, με άλλα λόγια όταν οι υπεύθυνοι για τη Σκανδιναβική ενεργειακή πολιτική αποφασίζουν καθορίζουν αυτό το διάνυσμα απόφασης (εκτίμηση της πραγματικής πολιτικής που θα ακολουθηθεί τελικά). Το διάνυσμα αυτό έχει τη μορφή

$$q = \begin{bmatrix} per_NoExchg \\ per_NorGas \\ per_SwePO \\ per_GhgLim \end{bmatrix} \quad (1)$$

όπου $per_NoExchg$, per_NorGas, per_SwePO και per_GhgLim είναι το ποσοστό του σεναρίου Όχι Ανταλλαγής, Φυσικού Αερίου Νορβηγίας, Πυρηνικής Ενέργειας Σουηδίας, Περιορισμού Αερίων Θερμοκηπίου αντίστοιχα που λαμβάνεται υπόψη από τους υπεύθυνους λήψης απόφασης. Στην παρούσα Μεταπτυχιακή Εργασία παρουσιάζεται μόνο η συνάρτηση της ευρωστίας η οποία ορίζεται ως το μέγιστο σύνολο τιμών της παραμέτρου αβεβαιότητας α ενός μοντέλου χάσματος πληροφορίας όπως φαίνεται από τη σχέση

$$\hat{\alpha}(q) = \max\{\alpha : \text{ικανοποιούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις}\} \text{ (ευρωστία)} \quad (2)$$

Από τη σχέση (2) μπορεί να διαπιστωθεί ότι η ευρωστία $\hat{\alpha}(q)$ του διανύσματος απόφασης q είναι η μέγιστη τιμή του ορίζοντα αβεβαιότητας α για τον οποίο ικανοποιούνται οι ελάχιστες απαιτήσεις. Η ευρωστία $\hat{\alpha}(q)$ εκφράζει ευρωστία ή βαθμό αντίστασης στην αβεβαιότητα ή την ασυλία. Όσο μεγαλύτερη η τιμή της ευρωστίας τόσο πιο επιθυμητή είναι.

Η συνάρτηση ευρωστίας περιλαμβάνει μεγιστοποίηση όχι όμως της απόδοσης ή της έκβασης της απόφασης. Η μέγιστη ανεκτή αβεβαιότητα βρίσκεται στην απόφαση q που ικανοποιεί την απόδοση πάνω από ένα κρίσιμο επίπεδο επιβίωσης. Κατά αυτόν τον τρόπο η συνάρτηση ευρωστίας προκύπτει από έναν αλγόριθμο απόφασης που μεγιστοποιεί την ασυλία στην ολέθρια αβεβαιότητα.

Στη συνέχεια, γίνεται η θεώρηση μιας κλιμακωτής συνάρτησης ανταμοιβής $R(q,u)$. Η κλιμακωτή συνάρτηση ανταμοιβής $R(q,u)$ που θα χρησιμοποιηθεί στο λογισμικό εφαρμογής είναι η συνάρτηση της συσωρευτικής αύξησης κόστους σε

σχέση με το σενάριο αναφοράς. Η συνάρτηση ανταμοιβής εξαρτάται από το διάνυσμα q και τη συνάρτηση αβεβαιότητας του χάσματος πληροφορίας u. Από τη (2) προκύπτει ότι η συνάρτηση ανταμοιβής $R(q,u)$, δηλαδή η συσωρευτική αύξηση κόστους, πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση από μια κρίσιμη τιμή r_c.

Η συνάρτηση ευρωστίας μπορεί τώρα να εκφραστεί από την εξίσωση:

$$\hat{\alpha}(q,r_c)=\max\left\{\alpha:\ \left(\max_{u\in U(\alpha,\tilde{u})} R(q,u)\right)\le r_c\right\} \qquad (3)$$

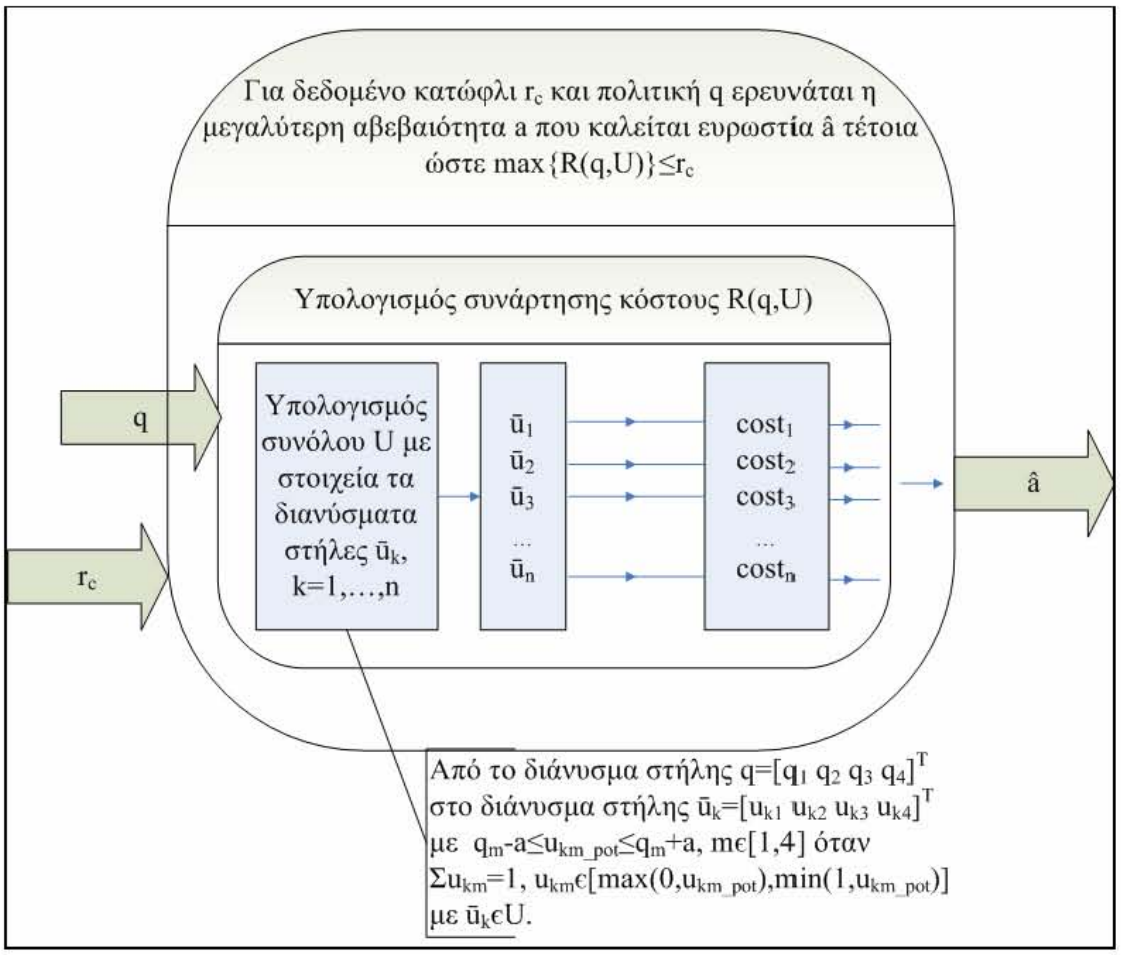
όπου το σύνολο $U(\alpha,\tilde{u})$ περιέχει όλες τις αποφάσεις για τη Σκανδιναβική ενεργειακή πολιτική των οποίων η απόκλιση από την (αρχική) πολιτική δεν είναι μεγαλύτερη από α, r_c είναι το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους της πολιτικής και u είναι η υποψήφια πολιτική που ανήκει στο σύνολο $U(\alpha,\tilde{u})$.

Παρατηρώντας τη σχέση (3), μπορεί είτε με δεδομένο r_c να προκύψει το $\hat{\alpha}(q,r_c)$ είτε, αντίστροφα, με δεδομένο $\hat{\alpha}(q,r_c)$ να προκύψει το r_c [103], [104], [105].

7.3 Αλγόριθμος Λογισμικού Εφαρμογής

7.3.1 Υπολογισμός της Συνάρτησης Ευρωστίας με Δεδομένο Κατώφλι Κόστους

Στα πλαίσια των προγραμμάτων που έχουν αναπτυχθεί και περιλαμβάνονται στο λογισμικό εφαρμογής, ένα από τα σημαντικότερα είναι αυτό που υπολογίζει τη συνάρτηση ευρωστίας με δεδομένο το κατώφλι (συσωρευτικής αύξησης) του κόστους της πολιτικής. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1 ενώ αναλυτικά το πρόγραμμα (η διεπαφή καθώς και οι συναρτήσεις που το ολοκληρώνουν) παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.

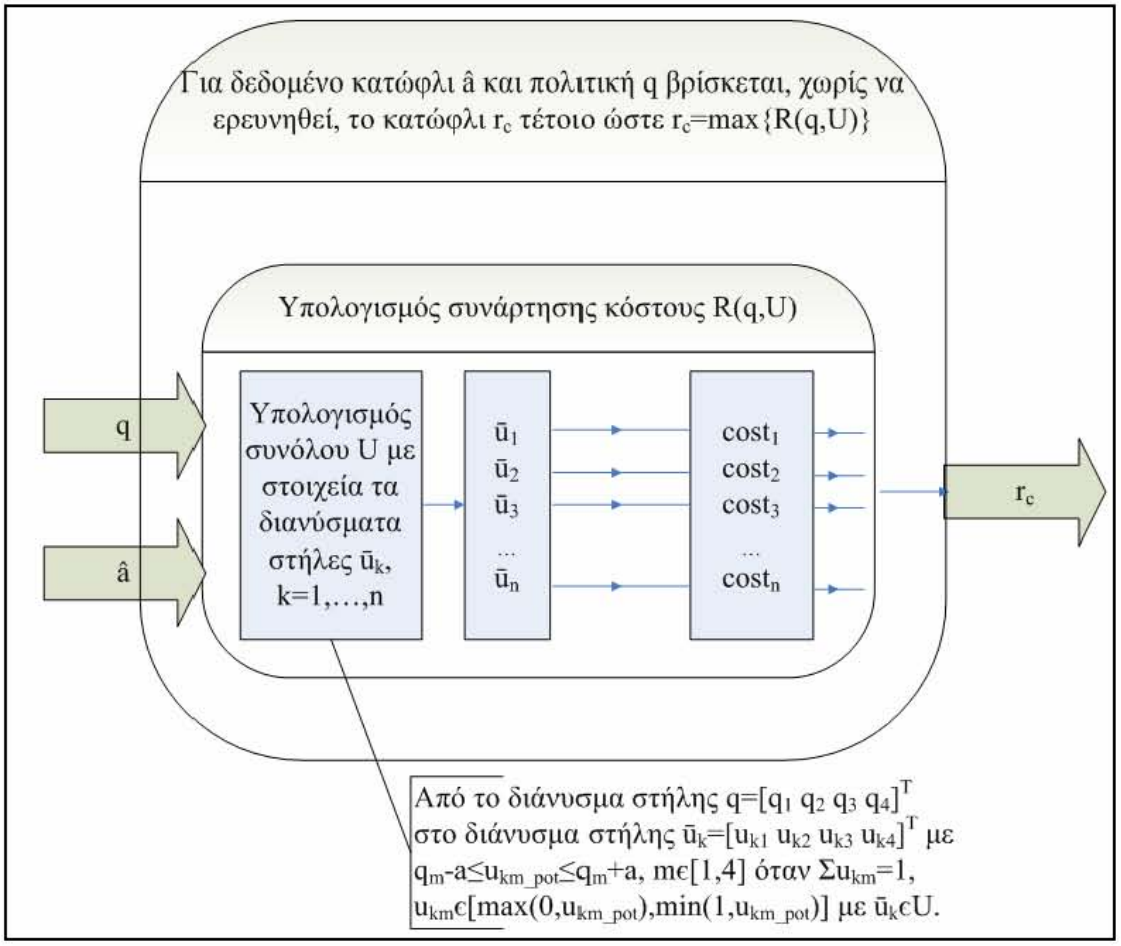


Σχήμα 7.1. Ο αλγόριθμος του προγράμματος για την εύρεση της ευρωστίας με δεδομένο κατώφλι κόστους.

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από το Σχήμα 7.1, έχοντας αρχικά την (αρχική) πολιτική για το ενεργειακό σύστημα των Σκανδιναβικών χωρών q και το δεδομένο κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους r_c παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιείται έτσι ώστε να προκύψει τελικά η ευρωστία $\hat{\alpha}(q, r_c)$. Ας σημειωθεί ότι για τη δημιουργία του διανύσματος στήλης $\overline{u}_k$ παρουσιάζεται η μέθοδος με την οποία εισάγεται η αβεβαιότητα στο μοντέλο. Η αβεβαιότητα η οποία εισάγεται είναι πολιτική αβεβαιότητα. Έτσι επηρεάζεται με αβέβαιο τρόπο η πολιτική τελικά που θα ακολουθηθεί στο ενεργειακό ζήτημα των Σκανδιναβικών χωρών.

7.3.2 Υπολογισμός της Συνάρτησης Κατωφλίου Κόστους με Δεδομένη Ευρωστία

Στα πλαίσια των προγραμμάτων που έχουν αναπτυχθεί και περιλαμβάνονται στο λογισμικό εφαρμογής, ένα από τα σημαντικότερα είναι και αυτό που υπολογίζει τη συνάρτηση κατωφλίου (συσωρευτικής αύξησης) κόστους της πολιτικής με δεδομένη την ευρωστία. Πρόκειται για το δυικό πρόβλημα του υπολογισμού της συνάρτησης ευρωστίας με δεδομένο κατώφλι κόστους. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.2 ενώ αναλυτικά το πρόγραμμα (η διεπαφή καθώς και οι συναρτήσεις που το ολοκληρώνουν) παρουσιάζονται στο Παράρτημα Γ.



Σχήμα 7.2. Ο αλγόριθμος του προγράμματος για την εύρεση του κατωφλίου κόστους με δεδομένη την ευρωστία.

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από το Σχήμα 7.2, έχοντας αρχικά την (αρχική) πολιτική για το ενεργειακό σύστημα των Σκανδιναβικών χωρών q και την ευρωστία

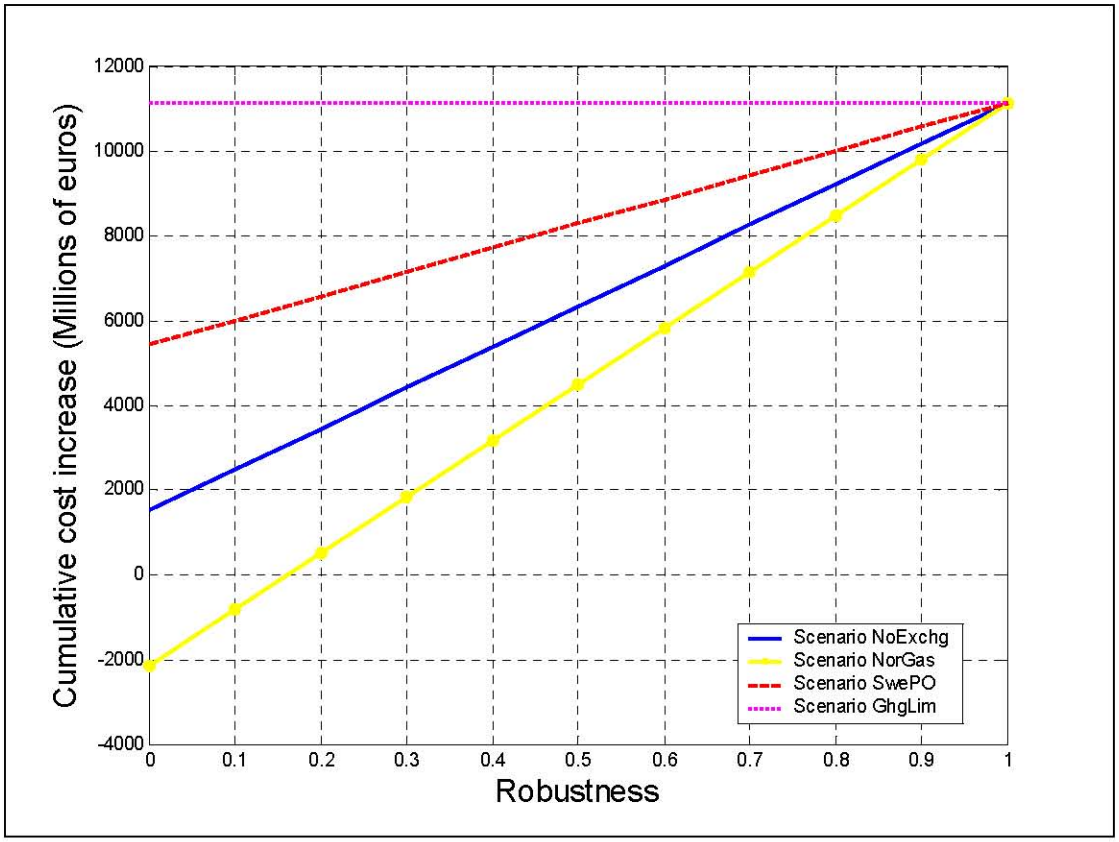
$\hat{\alpha}$ παρουσιάζεται ο αλγόριθμος ο οποίος χρησιμοποιείται έτσι ώστε να προκύψει τελικά το κατώφλι κόστους $r_c(q,\hat{\alpha})$. Συγκρίνοντας το Σχήμα 7.1 και το Σχήμα 7.2, η εύρεση του κατωφλίου κόστους σε αυτό το πρόγραμμα είναι ευκολότερη αφού δεν απαιτείται η αναζήτηση (loop mode) που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.1 για την εύρεση της μέγιστης αβεβαιότητας αλλά απευθείας γνωρίζοντας την ευρωστία προσδιορίζεται το κατώφλι κόστους. Η αβεβαιότητα η οποία εισάγεται είναι η πολιτική αβεβαιότητα της προηγούμενης περίπτωσης, δηλαδή επηρεάζεται με αβέβαιο τρόπο η πολιτική τελικά που θα ακολουθηθεί στο ενεργειακό ζήτημα των Σκανδιναβικών χωρών (αν και τώρα η αβεβαιότητα είναι γνωστή και ίση με την ευρωστία).

7.4 Αριθμητικά Αποτελέσματα και Συμπεράσματα

7.4.1 Συνάρτησης Κατωφλίου Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους με Δεδομένη Ευρωστία

7.4.1.1 Πολιτική-Σενάριο και Αβεβαιότητα

Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση επιλογής ενός σεναρίου μόνο. Δηλαδή, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής αποφασίζουν ότι η ενεργειακή πολιτική η οποία θα ακολουθηθεί από τις Σκανδιναβικές χώρες θα αντιπροσωπεύεται κατά 100% είτε από το σενάριο Όχι Ανταλλαγής (NoExchg), Φυσικού Αερίου Νορβηγίας (NorGas), Πυρηνικής Ενέργειας Σουηδίας (SwePO) και Περιορισμού Αερίων Θερμοκηπίου (GhgLim). Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για μεταβλητή ευρωστία (στην περίπτωση αυτή η αβεβαιότητα λαμβάνει όλο το εύρος της δηλαδή από μηδέν έως ένα) παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.3.



Σχήμα 7.3. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για πολιτική ταυτισμένη με ένα από τα σενάρια (πολιτική-σενάριο).

Από το Σχήμα 7.3, είναι αντιληπτό ότι για ευρωστία μηδέν (όχι αβεβαιότητα) οι τέσσερις πολιτικές έχουν διαφορετικό κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους. Αυξάνοντας η αβεβαιότητα, αυτό έχει ως αποτέλεσμα σύμφωνα με την κατάστρωση του προβλήματος να λαμβάνεται υπόψη ένα μεγαλύτερο σύνολο πιθανών δυνατών πολιτικών (συνδυασμός στρατηγικών). Γενικά, σύμφωνα με τη θεωρία των μοντέλων χάσματος πληροφορίας, με την αύξηση της αβεβαιότητας αυξάνεται και το κατώφλι συσωρευτικού κόστους. Ειδικότερα, το σενάριο GhgLim είναι αυτό το οποίο παρουσιάζει το μεγαλύτερο κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα καθώς αυξάνει η αβεβαιότητα κάθε πολιτικής ένα μέρος του σεναρίου με κάποιο συγκεκριμένο ειδικό κόστος να αντικαθίσταται από μέρος του σεναρίου GhgLim το οποίο παρουσιάζει το μεγαλύτερο ειδικό κόστος. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του συσωρευτικού κόστους κάθε πολιτικής με τελικό σημείο την ευρωστία ίση με μονάδα (απόλυτη αβεβαιότητα, απόλυτη ομογενοποίηση πολιτικών, ιδεατά χειρότερη περίπτωση). Επιβεβαίωση των παραπάνω είναι ότι το σενάριο GhgLim παρουσιάζει σταθερό συσωρευτικό κόστος σε όλο το εύρος της

ευρωστίας με αποτέλεσμα στην απόλυτη αβεβαιότητα όλες οι πολιτικές να εκφυλίζονται σε αυτήν την πολιτική-σενάριο (μονότονη τάση χωρίς ασυνέχειες, απλή περίπτωση).

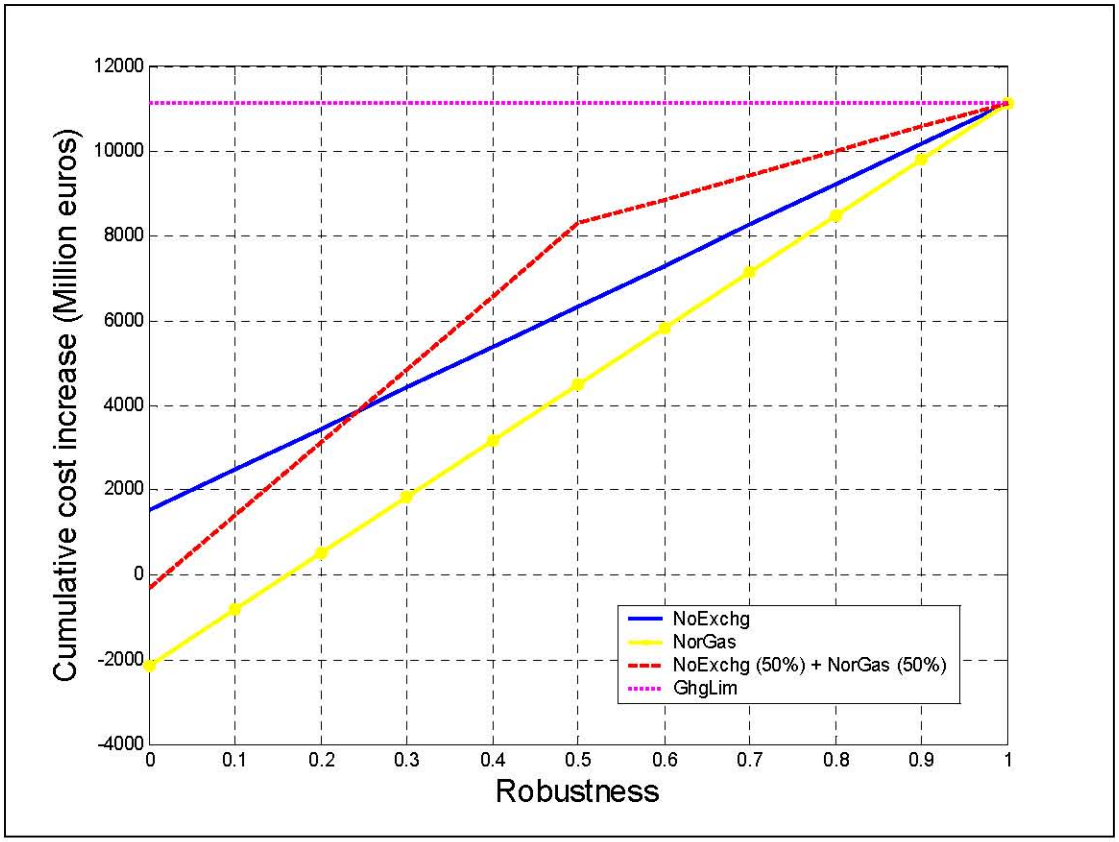
7.4.1.2 Πολιτική Δύο Σεναρίων και Αβεβαιότητα

Η πολιτική-σενάριο είναι μια ιδεατή περίπτωση όπου ένα σενάριο αποτελεί και μια πολιτική. Παρόλα αυτά τις περισσότερες φορές, η επιλογή μιας πολιτικής στηρίζεται σε μια επιλογή διαφόρων μέτρων με αποτέλεσμα οι πολιτικές που αποφασίζονται τόσο σε θέματα επιχειρήσεων όσο και ατομικά θέματα να είναι ένας συνδυασμός σεναρίων.

Στην περίπτωση πολιτικών οι οποίες, αρχικά, λαμβάνουν υπόψη δύο σενάρια (πολιτική δύο σεναρίων) μπορεί να γίνει η περαιτέρω ταξινόμησή τους σε δύο κατηγορίες όπως θα φανεί παρακάτω και από τις γραφικές αναπαραστάσεις τους:

- Στις πολιτικές δύο σεναρίων των οποίων και τα δύο σενάρια είναι διάφορα από το σενάριο GhgLim.
- Στις πολιτικές δύο σεναρίων των οποίων ένα εκ των δύο είναι το σενάριο GhgLim.

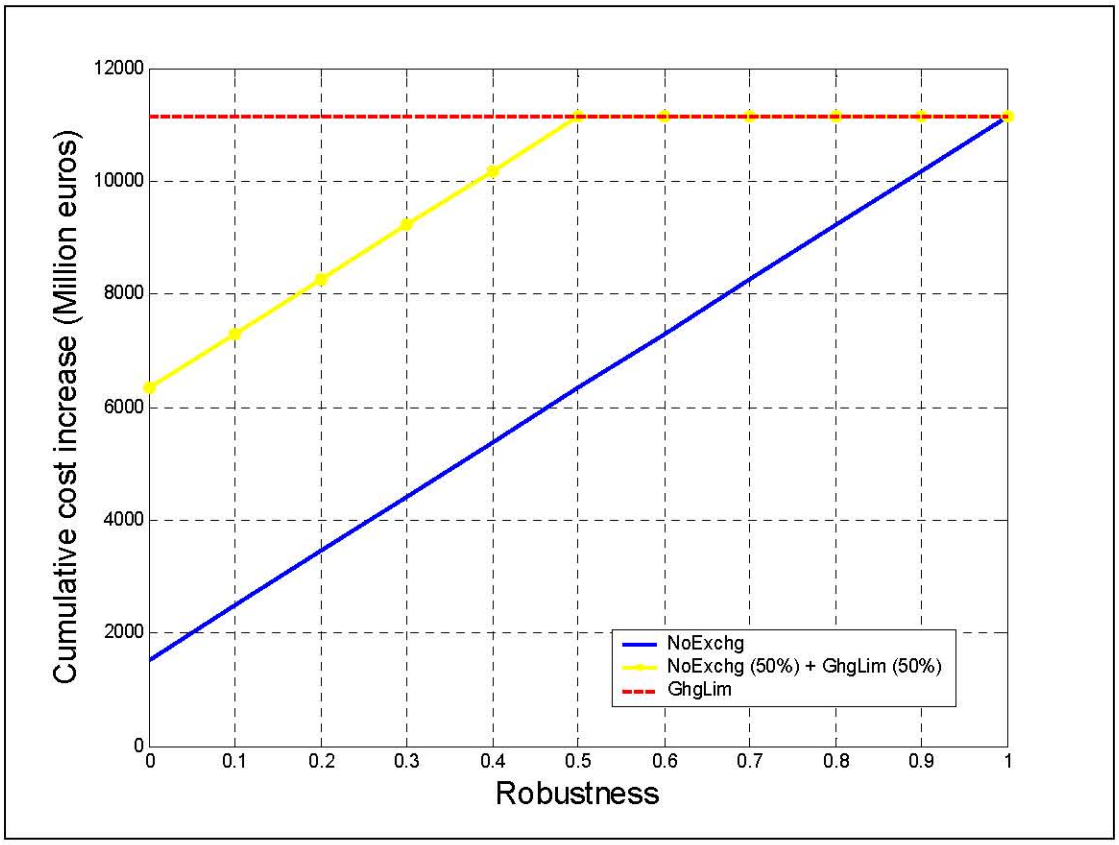
Για την πρώτη περίπτωση (κανένα από τα δύο σενάρια δεν είναι το σενάριο GhgLim) μια σχηματική αναπαράσταση παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για διάφορες πολιτικές με εστίαση στην πολιτική δύο σεναρίων (κανένα από τα δύο σενάρια της πολιτικής δεν είναι το GhgLim).

Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζονται συγκριτικά τέσσερις πολιτικές. Οι τρεις πολιτικές είναι πολιτικές-σενάρια (NoExchg, NorGas, GhgLim) ενώ η μια είναι πολιτική δύο σεναρίων (στο σενάριο αυτό λαμβάνεται κατά 50% το σενάριο NoExchg και κατά 50% το σενάριο NorGas). Παρατηρώντας το Σχήμα 7.4, διαπιστώνεται ότι αρχικά η πολιτική δύο σεναρίων ξεκινά για ευρωστία μηδέν από τη μέση τιμή των δύο σεναρίων από τις οποίες αποτελείται. Με την αύξηση της αβεβαιότητας (ευρωστίας) σταδιακά αντικαθίσταται το σενάριο με τις χαμηλότερες τιμές (στην περίπτωση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4 το σενάριο NorGas) από το σενάριο GhgLim έως το βαθμό όπου εξαντλείται το ποσοστό συμμετοχής του σεναρίου στην πολιτική (στην περίπτωση που παρουσιάζεται στο Σχήμα4 όταν εξαντληθεί το 50% της συμμετοχής της πολιτικής NorGas). Στη συνέχεια με την αύξηση της αβεβαιότητας αντικαθίσταται το άλλο σενάριο της πολιτικής μέχρι η ευρωστία να λάβει την τιμή μονάδα όποτε η πολιτική εκφυλίζεται σε πολιτική-σενάριο όπου μοναδική πολιτική είναι το σενάριο GhgLim.

Για τη δεύτερη περίπτωση όπου ένα από τα δύο σενάρια της πολιτικής είναι το σενάριο GhgLim παρουσιάζεται ενδεικτική περίπτωση στο Σχήμα 7.5.



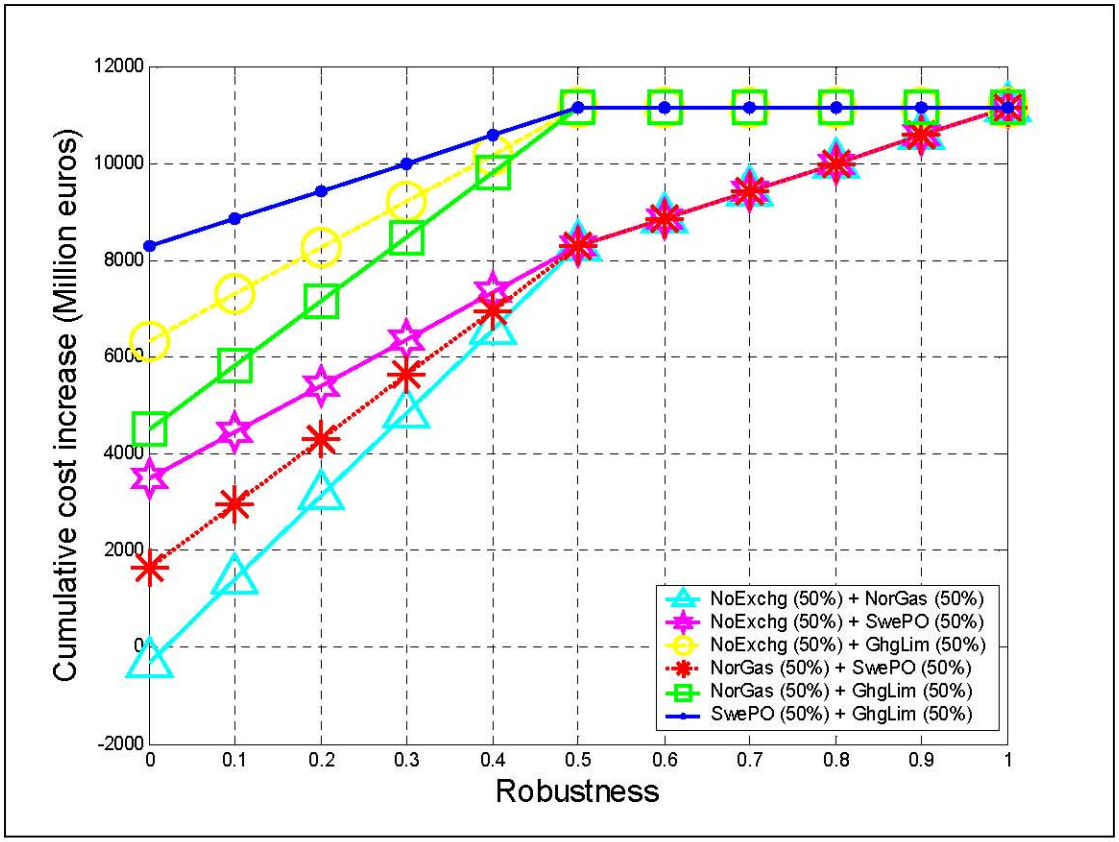
Σχήμα 7.5. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για διάφορες πολιτικές με εστίαση στην πολιτική δύο σεναρίων (ένα από τα δύο σενάρια είναι το GhgLim).

Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζονται συγκριτικά τρεις πολιτικές. Οι δύο πολιτικές είναι πολιτικές-σενάρια (NoExchg, GhgLim) ενώ η μια είναι πολιτική δύο σεναρίων (στο σενάριο αυτό λαμβάνεται κατά 50% το σενάριο NoExchg και κατά 50% το σενάριο NorGas). Παρατηρώντας το Σχήμα 7.5, διαπιστώνεται ότι αρχικά η πολιτική δύο σεναρίων ξεκινά για ευρωστία μηδέν από τη μέση τιμή των δύο σεναρίων από τις οποίες αποτελείται. Με την αύξηση της αβεβαιότητας (ευρωστίας) σταδιακά αντικαθίσταται το σενάριο με τις χαμηλότερες τιμές (στην περίπτωση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.5 το σενάριο NoExchg) από το σενάριο GhgLim έως το βαθμό όπου εξαντλείται το ποσοστό συμμετοχής του σεναρίου στην πολιτική (στην περίπτωση που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.5 όταν εξαντληθεί το 50% της συμμετοχής της πολιτικής NoExchg). Στη συνέχεια με την αύξηση της αβεβαιότητας

αντικαθίσταται το άλλο σενάριο της πολιτικής μέχρι η ευρωστία να λάβει την τιμή μονάδα όποτε η πολιτική εκφυλίζεται σε πολιτική-σενάριο όπου μοναδική πολιτική είναι το σενάριο GhgLim.

Συγκρίνοντας το Σχήμα 7.4 και το Σχήμα 7.5 μπορεί να διαπιστωθεί ότι πολιτικές δύο σεναρίων οι οποίες περιέχουν το σενάριο GhgLim μεταξύ των δύο σεναρίων εξελίσσονται εντός των ορίων των σεναρίων καθώς η αβεβαιότητα αυξάνει, τείνοντας τελικά στο σενάριο GhgLim σε αντίθεση με τις πολιτικές δύο σεναρίων οι οποίες δεν περιέχουν το σενάριο GhgLim. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η πολιτική δύο σεναρίων δε φράσσεται από τις συνιστώσες σεναρίων από τις οποίες αποτελείται. Σε αυτές τις περιπτώσεις (πολιτικές δύο σεναρίων που δεν περιέχουν το σενάριο GhgLim) καθώς αυξάνει η αβεβαιότητα το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους αυξάνει κατά τρόπο εκτός των ορίων των συνιστωσών σεναρίων επηρεαζόμενο ανοιχτά από το σενάριο GhgLim.

Τα παραπάνω επιβεβαιώνονται παρατηρώντας το Σχήμα 7.6 όπου παρουσιάζεται το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους σε σχέση με την αβεβαιότητα (ευρωστία).

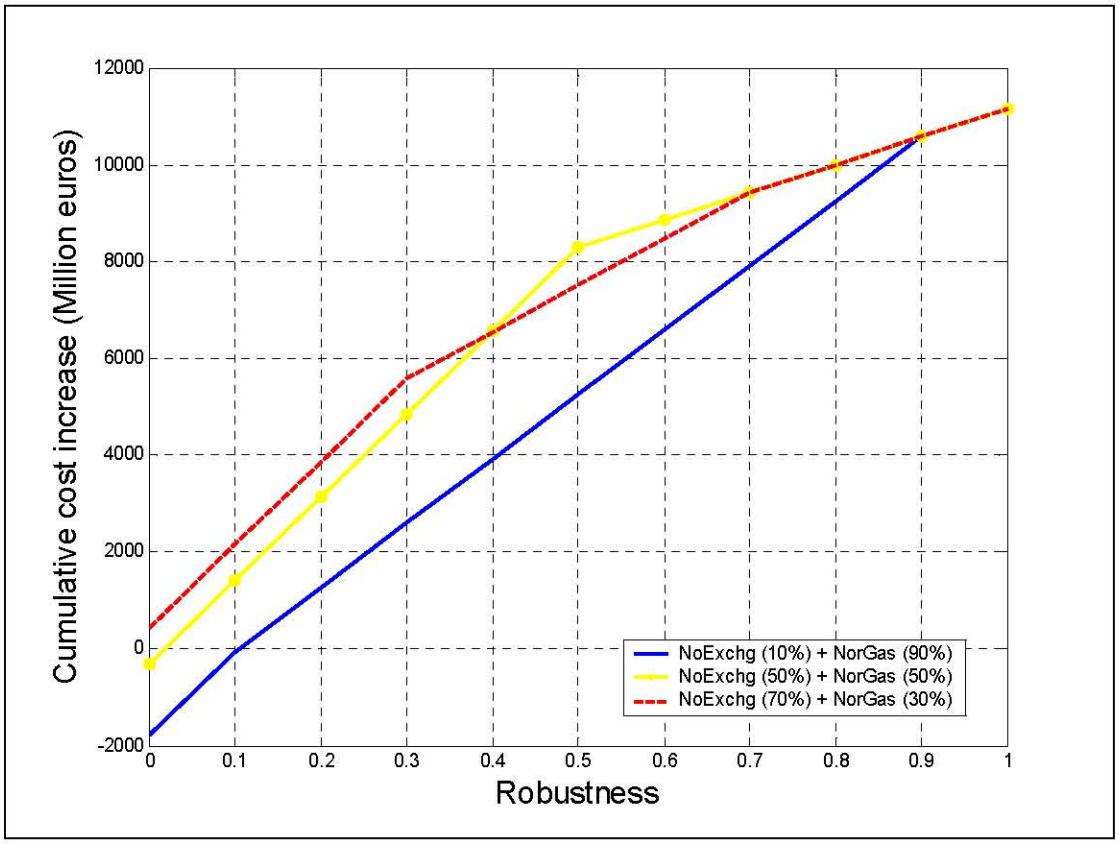


Σχήμα 7.6. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για όλες τις πιθανές δυνατές πολιτικές δύο σεναρίων με συμμετοχή 50%-50%.

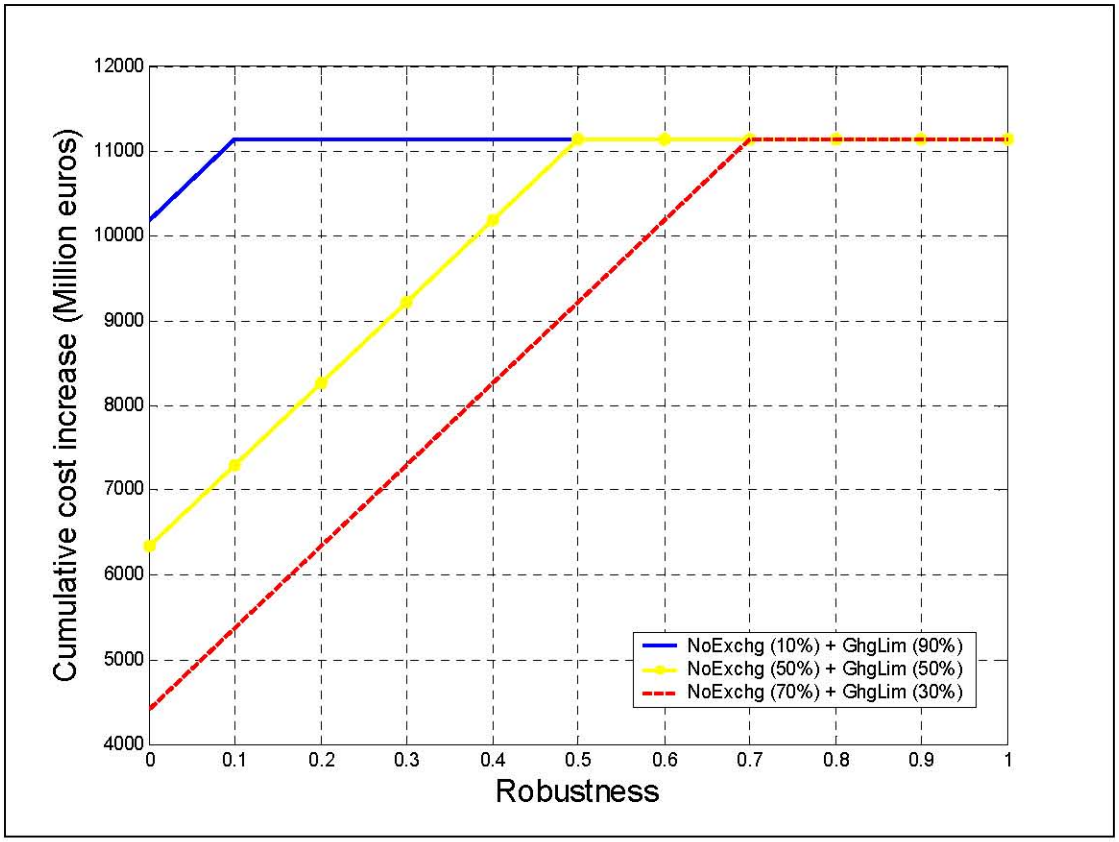
Στο Σχήμα 7.6 παρουσιάζονται όλες οι πιθανές πολιτικές δύο σεναρίων (με συμμετοχή 50% του ενός και 50% του άλλου) οι οποίες είναι δυνατές. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι οι πολιτικές δύο σεναρίων που περιλαμβάνουν το σενάριο GhgLim έχουν διαφορετικό ενδιάμεσο σημείο τομής από τις πολιτικές που δεν περιέχουν ως σενάριο μεταξύ των δύο το σενάριο GhgLim. Ανεξάρτητα όμως από τις συνιστώσες των πολιτικών, με την αύξηση της ευρωστίας στη μονάδα όλες οι πολιτικές συγκλίνουν, κάτι το οποίο είναι λογικό αφού στο σημείο αυτό που είναι και το σημείο μέγιστης αβεβαιότητας υπάρχει μια ομογενοποίηση των πολιτικών ως προς το πιθανό σύνολο πιθανών συνδυασμών σεναρίων που περιλαμβάνουν όπως έχει παρουσιαστεί και παραπάνω.

Ανεξάρτητα από τις συνιστώσες των πολιτικών, μέχρι τώρα εξετάστηκαν πολιτικές των οποίων οι συνιστώσες συμμετείχαν κατά το ήμισυ στο τελικό αποτέλεσμα. Παρατηρώντας το Σχήμα 7.4, Σχήμα 7.5 και Σχήμα 7.6, τα ενδιάμεσα σημεία τομής παρουσιάζονται για ευρωστία (αβεβαιότητα) 0.5. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στο 0.5 (50%), το σενάριο με τη χαμηλότερη συσωρευτική αύξηση

κόστους έχει πλήρως αντικατασταθεί από το σενάριο GhgLim με αποτέλεσμα να εμφανίζεται αυτό το σημείο τομής και κατά επέκταση αυτή η ασυνέχεια (από εδώ και πέρα θα καλείται σημείο ασυνέχειας). Αυτό το συμπέρασμα είναι γενικό και αφορά τόσο τις πολιτικές δύο σεναρίων οι οποίες δεν περιέχουν το σενάριο GhgLim (σε αυτές τις περιπτώσεις, το σημείο ασυνέχειας δε λαμβάνει την ίδια τιμή αύξησης συσωρευτικού κόστους με το σημείο όπου η ευρωστία λαμβάνει την τιμή μονάδα) αλλά και τις πολιτικές σεναρίων οι οποίες μεταξύ των δύο σεναρίων περιέχεται το σενάριο GhgLim (σε αυτές τις περιπτώσεις το σημείο ασυνέχειας αποτελεί και το πρώτο σημείο της οριζόντιας ευθείας που ενώνει το σημείο ασυνέχειας με την τιμή της αύξησης συσωρευτικού κόστους όταν η ευρωστία λαμβάνει την τιμή της μονάδας). Το παραπάνω συμπέρασμα επιβεβαιώνεται στο Σχήμα 7.7 και στο Σχήμα 7.8 όπου παρουσιάζονται δύο πολιτικές δύο σεναρίων (μια χωρίς να περιλαμβάνει το σενάριο GhgLim και η άλλη περιλαμβάνοντάς το αντίστοιχα) για διαφορετικά ποσοστά συμμετοχής των σεναρίων στη συνισταμένη πολιτική.



Σχήμα 7.7. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για ποσοστά συμμετοχής σεναρίων σε πολιτικές όταν δεν περιλαμβάνεται το σενάριο GhgLim.



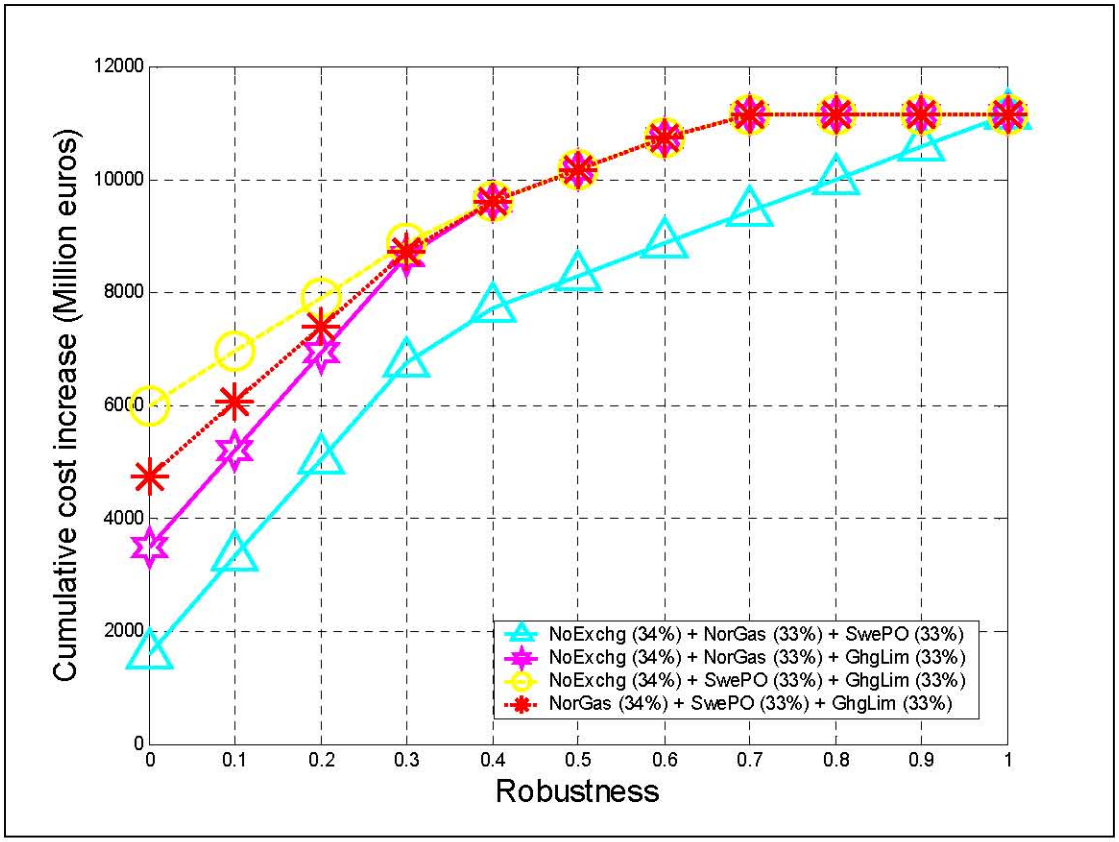
Σχήμα 7.8. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για ποσοστά συμμετοχής σεναρίων σε πολιτικές όταν περιλαμβάνεται το σενάριο GhgLim.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.7, εμφανίζεται το γενικότερο συμπέρασμα που αναφέρθηκε για τις περιπτώσεις πολιτικών οι οποίες δεν περιλαμβάνουν το σενάριο GhgLim. Οι πολιτικές αυτές ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής των σεναρίων τους εμφανίζουν δύο σημεία ασυνέχειας τα οποία ορίζονται από τα ποσοστά συμμετοχής των σεναρίων. Για την περίπτωση της συμμετοχής των σεναρίων με ποσοστά 50%-50% πρόκειται για την εκφυλισμένη περίπτωση όπου έχουμε ταύτιση δύο σημείων ασυνέχειας. Επίσης, ανεξάρτητα από τα ποσοστά συμμετοχής δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα από το ποσοστό του σεναρίου με την μεγαλύτερη συσωρευτική αύξηση κόστους σχετικά με τη συνολική αύξηση κόστους της πολιτικής. Με άλλα λόγια παρατηρώντας το Σχήμα 7.3 δε μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη σχέση αύξησης συσωρευτικού κόστους και ευρωστίας που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.7. Για παράδειγμα η πολιτική που περιλαμβάνει τα σενάρια NoExchg (50%) και NorGas (50%) δεν παρουσιάζει σαφή σχέση συσωρευτικής αύξησης κόστους σε σχέση με την πολιτική που περιλαμβάνει τα σενάρια NoExchg (70%) και NorGas (30%).

Σε αντίθεση με τις παραπάνω πολιτικές δύο σεναρίων που δεν περιέχουν το σενάριο GhgLim, με τις πολιτικές δύο σεναρίων οι οποίες περιέχουν ως ένα σενάριο το GhgLim μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα όσον αφορά το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους εξετάζοντας απλά το ποσοστό συμμετοχής του άλλου σεναρίου. Από το Σχήμα 7.8 μπορεί να διαπιστωθεί ότι όσο μεγαλύτερο το ποσοστό συμμετοχής του σεναρίου GhgLim στην πολιτική που έχει αποφασιστεί από τους υπεύθυνος της Σκανδιναβικής ενεργειακής πολιτικής τόσο πιο γρήγορα το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους φτάνει στο μέγιστό του. Μάλιστα, το ποσοστό συμμετοχής του άλλου σεναρίου αποτελεί ταυτόχρονα και το σημείο ασυνέχειας της οριζόντιας γραμμής, όπως αυτό αναλύθηκε παραπάνω.

7.4.1.3 Πολιτική Τριών Σεναρίων και Αβεβαιότητα

Μέχρι τώρα εξετάστηκε πως η αβεβαιότητα επηρεάζει τις πολιτικές οι οποίες αποτελούνται από δύο σενάρια και πως καθορίζει τα σημεία ασυνεχειών τους. Στην περίπτωση των πολιτικών τριών σεναρίων, η συμπεριφορά αυτών των πολιτικών ομοιάζει με τη συμπεριφορά των πολιτικών δύο σεναρίων στη γενικότερη μορφή της. Στο Σχήμα 7.9 παρουσιάζονται μερικές πιθανές δυνατές πολιτικές τριών σεναρίων.



Σχήμα 7.9. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για ποσοστά συμμετοχής σεναρίων σε πολιτικές τριών σεναρίων.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις πολιτικές δύο σεναρίων και τις πολιτικές τριών σεναρίων προκύπτει ο διαχωρισμός μεταξύ των πολιτικών οι οποίες περιέχουν το σενάριο GhgLim και στις πολιτικές οι οποίες δεν το περιέχουν. Το σενάριο GhgLim είναι αυτό το οποίο καθορίζει τελικά τη συμπεριφορά μιας πολιτικής αφού πρόκειται για το σενάριο με το μεγαλύτερο κατώφλι συσσωρευτικής αύξησης κόστους. Πολιτικές οι οποίες περιέχουν το σενάριο GhgLim φτάνουν στη μέγιστη δυνατή συσωρευτική αύξηση κόστους πριν η αβεβαιότητα λάβει τη μέγιστή της τιμής. Την τιμή αυτή τη λαμβάνει για τιμή ευρωστίας που υπολείπεται από τη μέγιστη τιμή ευρωστίας κατά το ποσοστό συμμετοχής του σεναρίου GhgLim στην πολιτική.

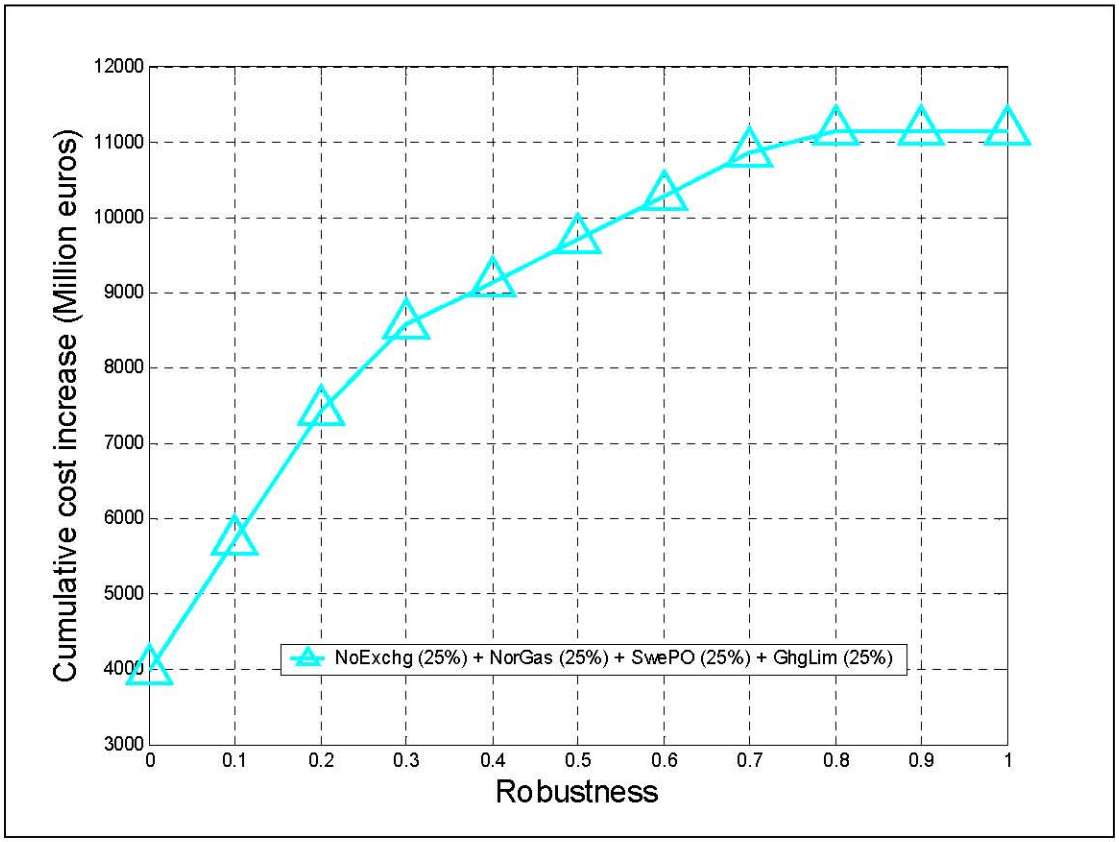
Όπως παρουσιάστηκε μέχρι τώρα, οι πολιτικές τριών σεναρίων παρουσιάζουν μια κυρτότητα και όχι μια γραμμική τάση εξαιτίας της εμφάνισης περισσότερων σημείων ασυνέχειας. Κάθε σημείο ασυνέχειας είναι το σημείο στο οποίο εξαντλείται η δυνατότητα αντικατάστασης ενός σεναρίου (το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την

αλλαγή της κλίσης). Στις περιπτώσεις λοιπόν πολιτικών τριών σεναρίων απαιτείται μεγαλύτερη προσοχή στη λήψη αποφάσεων.

7.4.1.4 Πολιτική Τεσσάρων Σεναρίων και Αβεβαιότητα

Η περίπτωση πολιτικών με τέσσερα σενάρια είναι το πιο περίπλοκο είδος πολιτικής το οποίο μπορεί να εξεταστεί σε αυτήν την Μεταπτυχιακή Εργασία (και το πιο ενδιαφέρον).

Η περίπτωση πολιτικών τεσσάρων σεναρίων είναι η πιο ρεαλιστική αφού ανταποκρίνεται και περισσότερο στην πραγματικότητα. Η χάραξη επιτυχημένων πολιτικών περιλαμβάνει ένα συγκερασμό σεναρίων και απόψεων. Έτσι λοιπόν η πολιτική που αποφασίζεται θα περιέχει μέτρα και αποφάσεις από όλα τα δυνατά σενάρια. Παράδειγμα της πιο απλής πολιτικής τεσσάρων σεναρίων είναι αυτό το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.10.

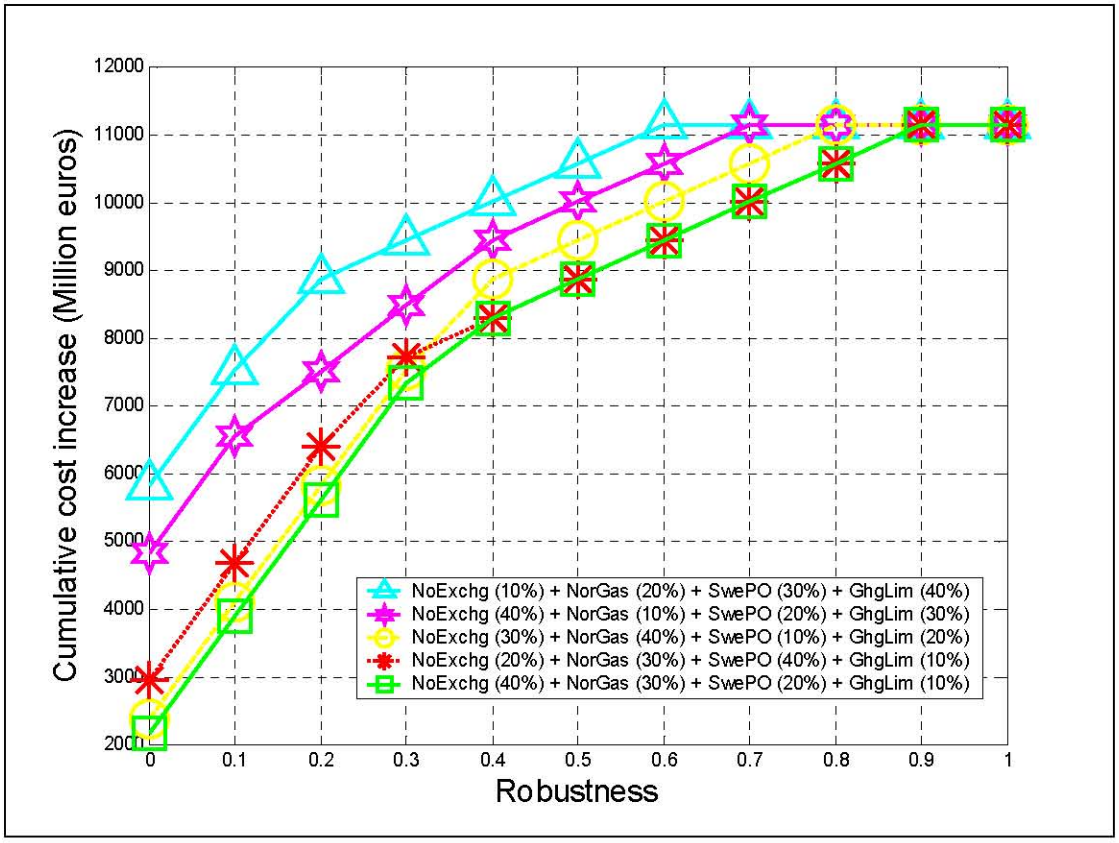


Σχήμα 7.10. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για την απλούστερη περίπτωση πολιτικής τεσσάρων σεναρίων.

Με τον όρο απλούστερη πολιτική τεσσάρων σεναρίων καλείται εκείνη η πολιτική τεσσάρων σεναρίων της οποίας τα σενάρια κατανέμονται και συμμετέχουν κατά τον ίδιο βαθμό στην αποφασισμένη πολιτική.

Σε σχέση με τις πολιτικές οι οποίες έχουν προαναφερθεί, η διαφορά των πολιτικών τεσσάρων σεναρίων είναι ότι πάντα περιέχεται το σενάριο GhgLim με αποτέλεσμα πάντα η αύξηση συσωρευτικού κόστους να λαμβάνει τη μέγιστή της τιμή πριν το μέγιστο της αβεβαιότητας. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω λαμβάνει η πολιτική για πρώτη φορά τη μέγιστή της τιμή για την τιμή της αβεβαιότητας που υπολείπεται κατά το ποσοστό συμμετοχής του σεναρίου GhgLim στην πολιτική από τη μέγιστη αβεβαιότητα.

Στο Σχήμα 7.11 παρουσιάζονται διάφορες πιθανές δυνατές περιπτώσεις πολιτικών τεσσάρων σεναρίων.



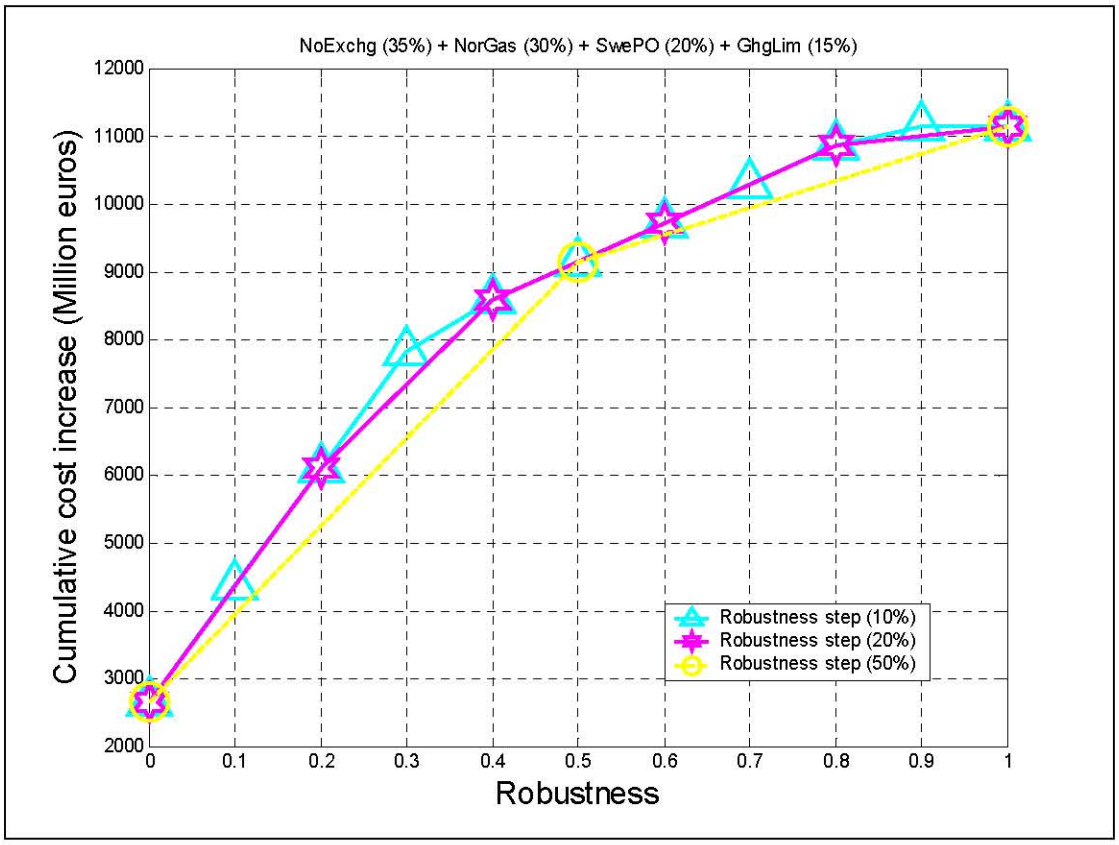
Σχήμα 7.11. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για δυνατές πιθανές περιπτώσεις πολιτικών τεσσάρων σεναρίων.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.10 και το Σχήμα 7.11 μπορούν να προκύψουν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα:

- Παρατηρώντας τις μορφές της συσωρευτικής αύξησης κόστους σε σχέση με την ευρωστία για διάφορες πιθανές πολιτικές τεσσάρων σεναρίων είναι δυνατό να παρατηρηθεί ότι η μορφή τους δεν είναι πια μια απλή γραμμική ευθεία αλλά μια καμπύλη η οποία με αύξηση της αβεβαιότητας τείνει προς τη μέγιστη τιμή της συσωρευτικής αύξησης κόστους. Εμφανίζει δηλαδή περισσότερα σημεία ασυνεχειών με αποτέλεσμα η ανάλυση τέτοιων καμπυλών να απαιτεί περισσότερο μελέτη από τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα.
- Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό συμμετοχής του σεναρίου GhgLim στην αποφασισμένη ενεργειακή πολιτική, τόσο μεγαλύτερο είναι το σημείο εκκίνησης της συσωρευτικής αύξησης κόστους (ευρωστία ίση με την τιμή μηδέν) και τόσο πιο γρήγορα λαμβάνεται η μέγιστη τιμή συσωρευτικής αύξησης κόστους ως προς την ευρωστία.
- Οι καμπύλες ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής του κάθε σεναρίου στην πολιτική παρουσιάζουν τη δική τους συμπεριφορά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα για άλλες τιμές αβεβαιότητας να επικρατεί μια πολιτική έναντι μιας άλλης και ανάποδα (περίπτωση $2^{ης}$ και $3^{ης}$ πολιτικής στο Σχήμα 7.7, περίπτωση $4^{ης}$ και $3^{ης}$ πολιτικής στο Σχήμα 7.11) γεγονός που κάνει την επιλογή μεταξύ αυτών των πολιτικών ιδιαίτερα δύσκολη. Στη συνέχεια αυτό το ενδιαφέρον θέμα ανταγωνιστικών καμπυλών σε σχέση με την αβεβαιότητα εξετάζεται εκτενέστερα με τη χρήση του μέτρου της σχετικής λύπης αφού πρόκειται για μια ιδιαίτερη περίπτωση με ρεαλιστικές προεκτάσεις (ανάλογα με την αβεβαιότητα υπερτερεί διαφορετική πολιτική) τόσο στο ενεργειακό ζήτημα όσο και σε άλλα προβλήματα αποφάσεων.

Όλα τα προγράμματα τα οποία έχουν εκτελεστεί είναι ιδιαίτερα χρονοβορά αφού το πλήθος των υπολογισμών και το πλήθος των πιθανών δυνατών πολιτικών του συνόλου αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της ζητούμενης ακρίβειας. Η ακρίβεια καθορίζει τόσο το πλήθος των πολιτικών που λαμβάνονται υπόψη στο σύνολο μέσω του επιτρεπτού βήματος από το αρχικό-σημείο πολιτικής μέχρι το πάνω και κάτω όριό του όσο και συνδυασμένη με την ακρίβεια-βήμα της αβεβαιότητας τον υπολογισμό της αύξησης συσωρευτικού κόστους. Στο Σχήμα 7.12 παρουσιάζεται η

συσωρευτική αύξηση κόστους σε σχέση με την αβεβαιότητα όταν το βήμα της αβεβαιότητας είναι 0.10, 0.20 και 0.50.



Σχήμα 7.12. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για διάφορες τιμές βήματος για την ευρωστία.

Όπως μπορεί να διαπιστωθεί από το Σχήμα 7.12, καθώς αυξάνει το βήμα της ευρωστίας η συσωρευτική αύξηση κόστους αποκλίνει. Παρόλα αυτά η ακρίβεια και η ταχύτητα πολλές φορές είναι ανταλλάξιμα μεγέθη (trade-off). Στην περίπτωση των ιδιαίτερα χρονοβόρων προγραμμάτων τα οποία εκτελούνται, αρκετές φορές για να επιταχυνθούν τα αποτελέσματα θα πρέπει να γίνουν ορισμένες μειώσεις στην ακρίβεια οι οποίες όποτε θα γίνονται θα αναφέρονται. Εντούτοις, οι αποκλίσεις του Σχήματος 12 είναι ανεκτές για τις διάφορες τιμές της ευρωστίας.

7.4.1.5 Πολιτική Περισσότερων Σεναρίων και Αβεβαιότητα

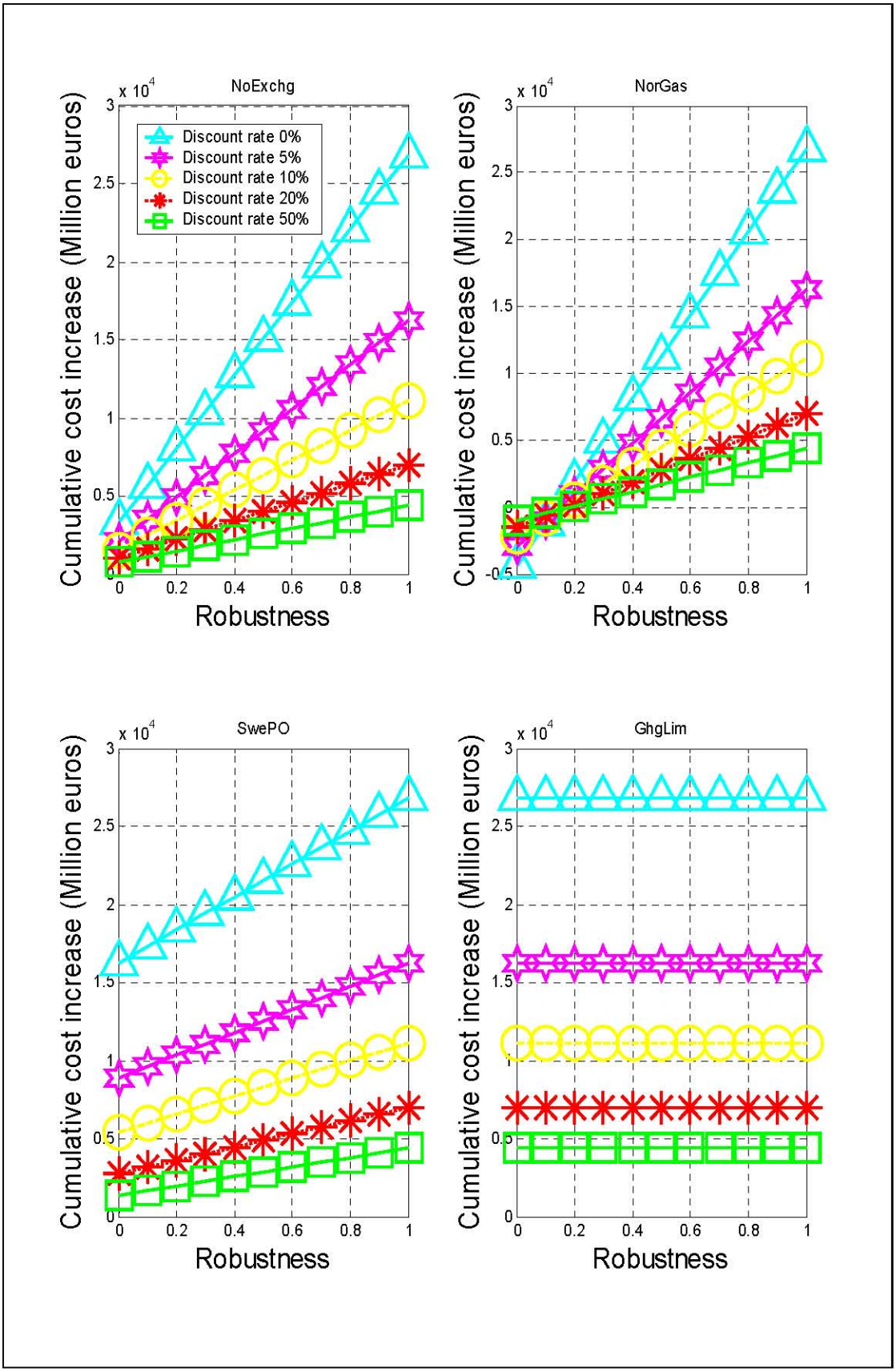
Στα πλαίσια επέκτασης αυτής της Μεταπτυχιακής Εργασίας θα προβλέπονταν μια επέκταση και των σεναρίων τα οποία θα πρέπει να ληφθούν υπόψη. Σε αυτήν την περίπτωση επεκτείνοντας και τα συμπεράσματα που προέκυψαν για τις παραπάνω πολιτικές θα μπορούσε να ειπωθεί ότι πολιτικές περισσότερων σεναρίων είναι πιο περίπλοκες στην ανάλυση τους, παρουσιάζουν περισσότερα σημεία ασυνεχειών ενώ οι συνδυασμοί των σεναρίων στις πολιτικές θα δημιουργούσαν περισσότερες ανταγωνιστικές καμπύλες. Ο συνδυασμός περισσότερων σεναρίων για τη χάραξη της πολιτικής αποτελεί καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας.

7.4.1.6 Πολιτική Σεναρίων, Αβεβαιότητα και Επιτόκιο Προεξόφλησης

Μέχρι τώρα παρουσιάστηκε η επίδραση της αβεβαιότητας σε πολιτικές-σεναρίου (δηλαδή πολιτικές ενός σεναρίου) και σε πολιτικές πολλών σεναρίων με επιτόκιο προεξόφλησης σταθερό (το επιτόκιο προεξόφλησης θεωρείται γενικά στις προσομοιώσεις ίσο με 10% πέραν των περιπτώσεων που αναφέρεται).

Με τον όρο επιτόκιο προεξόφλησης ορίζεται το ελάχιστο επιτόκιο απόδοσης, το οποίο για δεδομένο επίπεδο ασφάλειας ζητούν οι επενδυτές, προκείμενου να δεχθούν μια μελλοντική είσπραξη αντί μιας σημερινής, με όλους τους άλλους παράγοντες να διατηρούνται σταθεροί. Γενικά, λοιπόν για τον υπολογισμό της παρούσας αξίας μιας επένδυσης γίνεται η προεξόφληση της εκτιμώμενης μελλοντικής χρηματικής ροής, με το επιτόκιο που προσφέρεται σε συγκρίσιμες εναλλακτικές επενδύσεις. Το επιτόκιο προεξόφλησης επίσης καλείται και ως επιτόκιο αναγωγής και κόστος ευκαιρίας (opportunity cost). [106].

Στο Σχήμα 7.13 παρουσιάζει τη μεταβολή της συσωρευτικής αύξησης κόστους σε σχέση με την ευρωστία για διάφορες τιμές επιτοκίου προεξόφλησης για τις τέσσερις πολιτικές-σενάρια.

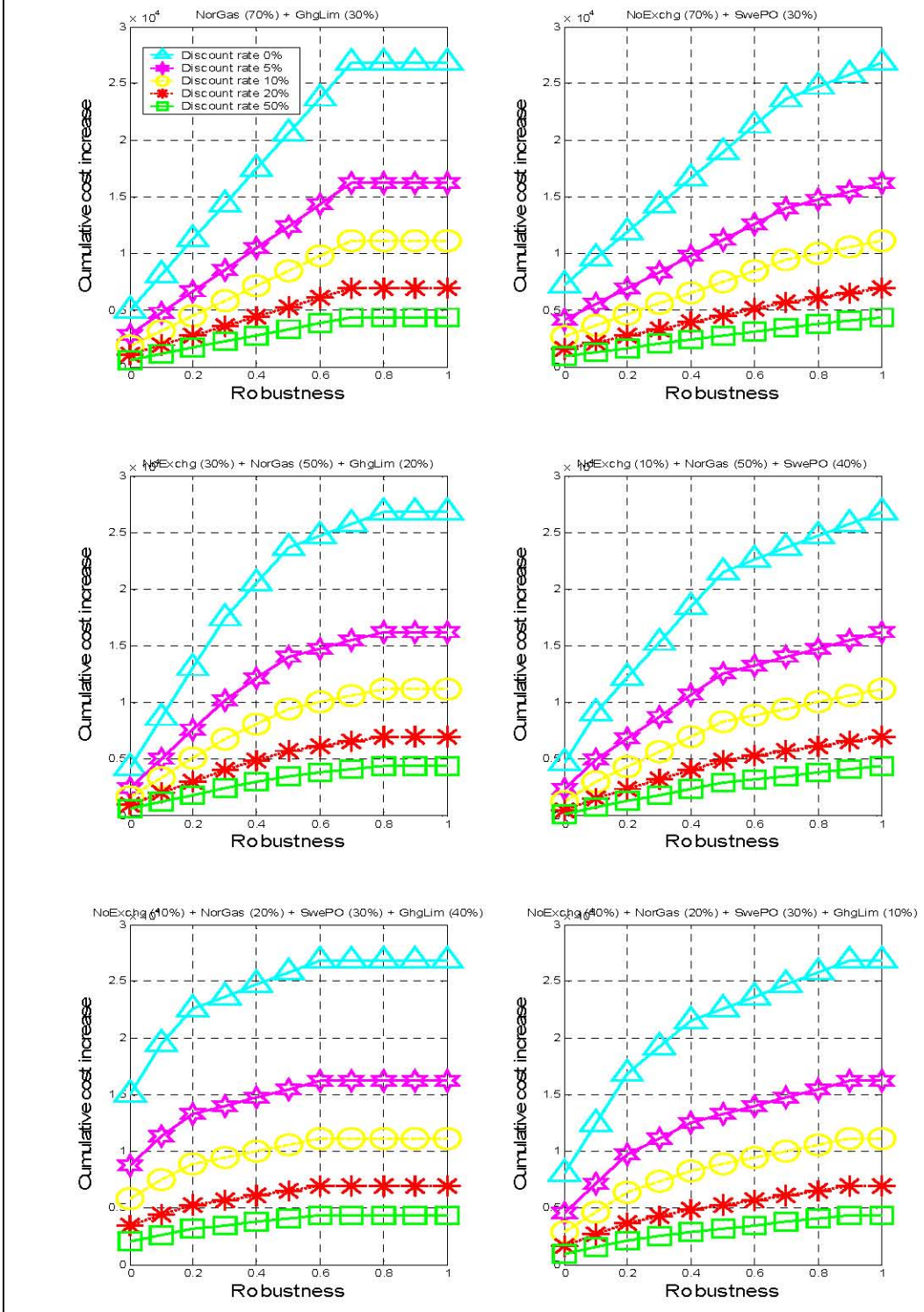


Σχήμα 7.13. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για διάφορες τιμές επιτοκίου προεξόφλησης.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.13 μπορούν να προκύψουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η πολιτική-σενάριο GhgLim, όπως έχει αναλυθεί και για την περίπτωση ενός επιτοκίου προεξόφλησης, ανεξάρτητα της ευρωστίας, δεν παρουσιάζει γραμμική κλίση. Το επιτόκιο προεξόφλησης απλά επηρεάζει την τιμή που η ευθεία λαμβάνει.
- Όλες οι πολιτικές-σενάρια για κάθε επιτόκιο προεξόφλησης παρουσιάζουν θετική κλίση στη γραμμική τους τάση η οποία λαμβάνει τη μέγιστη τιμή όταν και η ευρωστία λαμβάνει τη μέγιστή της τιμή.
- Αυξάνοντας το επιτόκιο προεξόφλησης γενικά στο πέρας του χρόνου οι μελλοντικές τιμές υποτιμούνται περισσότερο. Αυτό έχει και αποτέλεσμα στη συσωρευτική αύξηση κόστους. Καθώς το επιτόκιο προεξόφλησης αυξάνει μειώνεται η συσωρευτική αύξηση κόστους.

Αν και στο Σχήμα 7.13 παρουσιάστηκαν οι βασικές πολιτικές-σενάρια, τα παραπάνω συμπεράσματα μπορούν να γενικευτούν και στις περιπτώσεις όπου εμφανίζονται πολιτικές με περισσότερα σενάρια. Στο Σχήμα 7.14 παρουσιάζεται το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους σε σχέση με την ευρωστία για διάφορες τιμές του επιτοκίου προεξόφλησης για επιλεγμένες πολιτικές δύο, τριών και τεσσάρων σεναρίων.



Σχήμα 7.14. Κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία για διάφορες τιμές επιτοκίου προεξόφλησης για επιλεγμένες πολιτικές σεναρίων.

7.4.2 Συνάρτησης Λύπης, Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους και Ευρωστία

Όπως παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Α, η λύπη ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της απόδοσης μιας μελλοντικής στρατηγικής, λαμβάνοντας υπόψη κάποια συνάρτηση αξίας, και αυτής της απόδοσης που θα ήταν η καλύτερη εκτελώντας τη στρατηγική στο ίδιο μελλοντικό σενάριο. Μετά τον Savage [42], η λύπη της στρατηγικής j στο μέλλον f χρησιμοποιώντας τις τιμές m δίνεται από τη σχέση για την περίπτωση των προγραμμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν

$$\mathrm{Re}\,gret_m(j,f) = Performance_m(j,f) - \underset{j'}{Min}\left[Performance_m(j',f)\right] \qquad (1)$$

όπου η στρατηγική j' είναι η καλύτερη μεταξύ των στρατηγικών για το μέλλον f. Η μορφή της (1) (σε σχέση με την (1) του Παραρτήματος Α) δικαιολογείται από το γεγονός ότι η επίδοση $Performance_m(j,f)$ σχετίζεται με τη συσωρευτική αύξηση κόστους.

Η λύπη αποτελεί ένα μέτρο το οποίο απευθύνεται σε ανθρώπους και έχει να κάνει με τη διαφορά του αποτελέσματος της πολιτικής που έχει επιλεγεί από τους υπεύθυνους απόφασης σε σχέση με την πολιτική που θα είχε επιλεχτεί από τους προηγούμενους υπεύθυνους απόφασης εάν είχαν την τέλεια πρόβλεψη. Υποστηρίζει επίσης την επιθυμία των σημερινών υπεύθυνων απόφασης να επιλέξουν τις στρατηγικές που, στην αναδρομική εξέταση, δεν θα εμφανιστούν μη ικανοποιητικές έναντι των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων.

Είναι επίσης μερικές φορές χρήσιμο να εξεταστεί η σχετική λύπη όπου η σχετική λύπη δίνεται από την παρακάτω σχέση

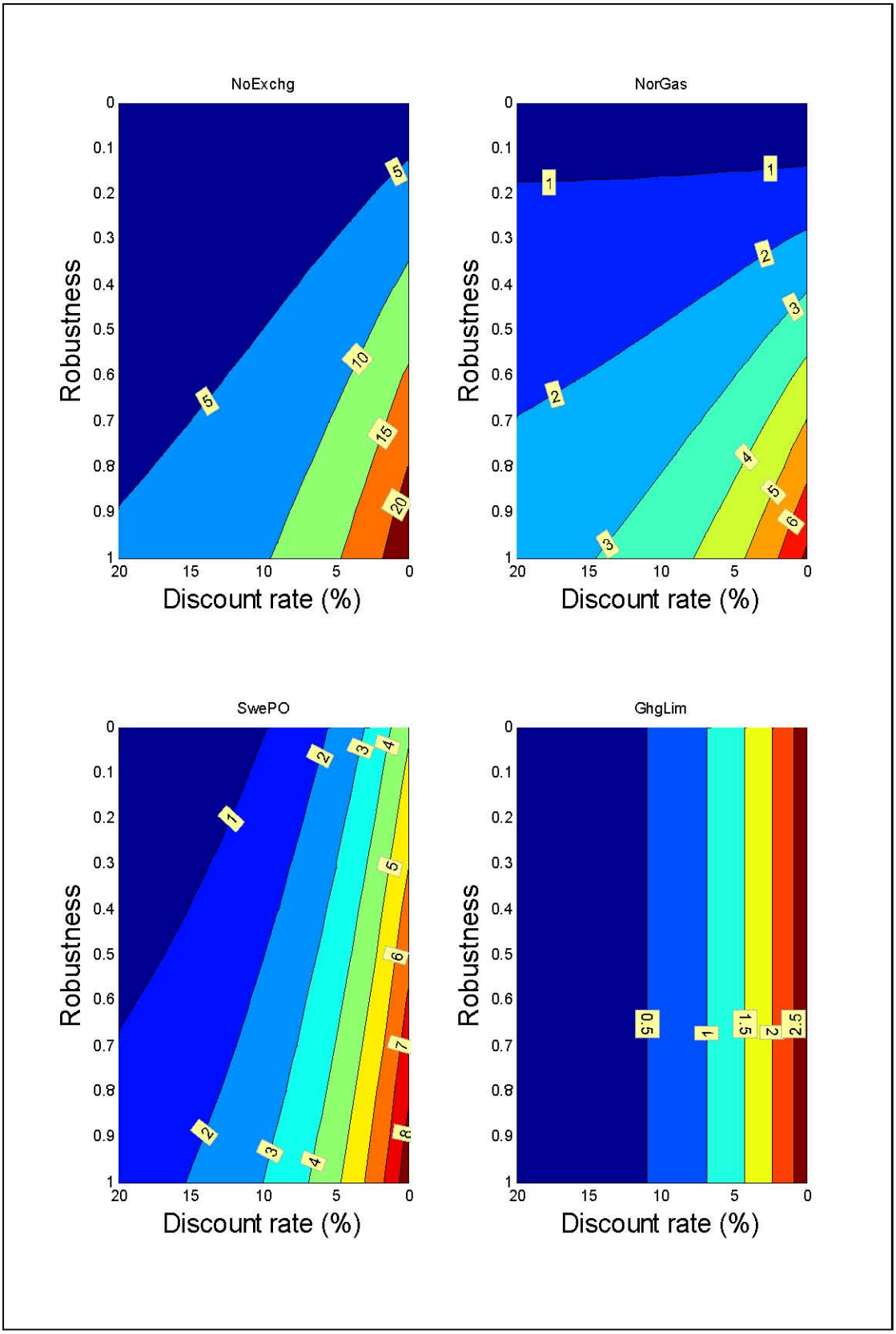
$$\mathrm{Re}\,lative_\mathrm{Re}\,gret_m(j,f) = \frac{Performance_m(j,f) - \underset{j'}{Min}\left[Performance_m(j',f)\right]}{\left|\underset{j'}{Min}\left[Performance_m(j',f)\right]\right|} \qquad (2)$$

και κλιμακώνεται από την καλύτερη απόδοση που είναι εφικτή μεταξύ των υποψηφίων στρατηγικών σε ένα δεδομένο σενάριο [107]. Η μορφή της (2) (σε σχέση με τη (2) του Παραρτήματος Α) δικαιολογείται από το γεγονός ότι η επίδοση $Performance_m(j,f)$ σχετίζεται με τη συσωρευτική αύξηση κόστους και όσο μικρότερη τιμή λαμβάνει τόσο καλύτερο είναι. Παρατηρώντας τη (2) στον παρονομαστή του κλάσματος παρουσιάζεται η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της

συσωρευτικής αύξησης κόστους. Γενικά, η σχετική λύπη σε αυτήν τη Μεταπτυχιακή Εργασία ως μαθηματική απεικόνιση προσδιορίζει το λόγο της διαφοράς από την καλύτερη τιμή σε σχέση με την απόλυτη απόσταση της καλύτερης τιμής. Η καλύτερη τιμή, γενικά, είναι μια θετική τιμή της συσωρευτικής αύξησης κόστους. Παρόλα αυτά (Σχήμα 7.3, πολιτική-σενάριο NorGas) ενδέχεται να λάβει αρνητική τιμή για δεδομένη τιμή αβεβαιότητας. Για να αποφευχθεί η μετατροπή του κλάσματος της (2) σε αρνητικό αριθμό χρησιμοποιείται η απόλυτη τιμή χωρίς όμως να αλλοιώνεται η μορφή των εξόδων που χρειάζονται να μελετηθούν (η αρνητική τιμή συσωρευτικής αύξησης κόστους επιφέρει αλλαγή κατεύθυνσης στα διαγράμματα λύπης όπως θα παρουσιαστεί στη συνέχεια).

7.4.2.1 Πολιτική-Σεναρίου και Λύπη Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

Αρχικά, θα ήταν κατατοπιστικό να παρουσιαστεί η σχετική λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους των βασικών πολιτικών. Η μορφή των διαγραμμάτων σχετικής λύπης βασίζεται στα διαγράμματα που παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α. Οι βασικές πολιτικές είναι οι πολιτικές-σεναρίου που παρουσιάζονται στο Σχήμα 7.15 και παρουσιάζουν τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης.



Σχήμα 7.15. Σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης για τις πολιτικές-σεναρίου.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.15 μπορούν να προκύψουν αρχικά συμπεράσματα για τα διαγράμματα σχετικής λύπης συσωρευτικής αύξησης κόστους τα οποία μπορούν να συνοψιστούν παρακάτω:

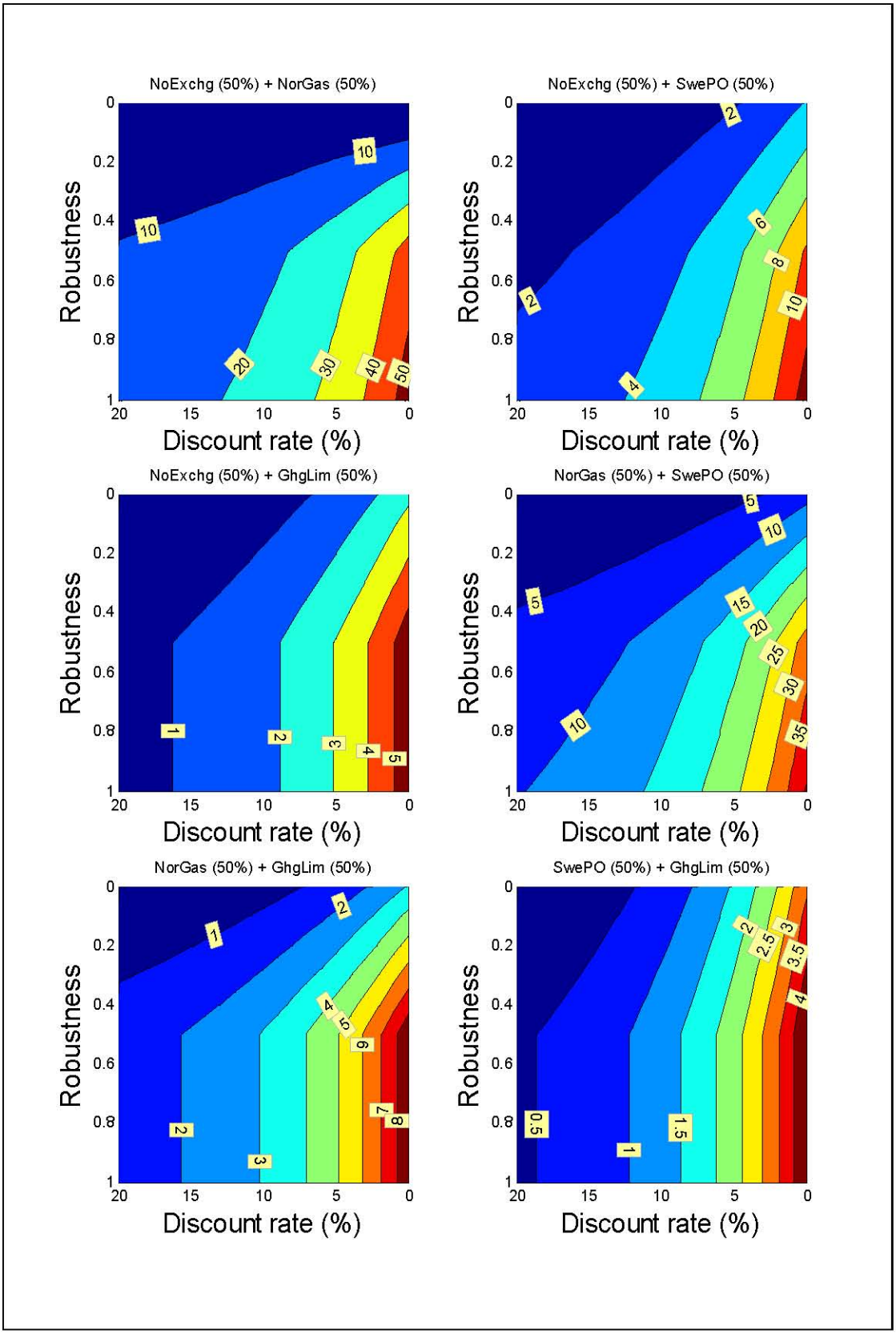
- Στις γενικές περιπτώσεις (θετική τιμή συσωρευτικής αύξησης κόστους), η πάνω αριστερή περιοχή είναι η καλύτερη θέση (χαμηλή σχετική λύπη) ενώ η περιοχή κάτω δεξιά είναι η χειρότερη θέση. Αυτό φαίνεται και στο Σχήμα 7.15, όπου στην περιοχή πάνω αριστερά εμφανίζεται το μπλε χρώμα (χαμηλές τιμές σχετικής λύπης) ενώ στην κάτω δεξιά περιοχή εμφανίζεται το κόκκινο χρώμα (υψηλές τιμές σχετικής λύπης).
- Υψηλές τιμές σχετικής λύπης χαρακτηρίζουν μεγάλες (σχετικές) διακυμάνσεις της συσωρευτικής αύξησης κόστους (χαμηλή κλίση γραμμικής καμπύλης στο Σχήμα 7.3) ενώ χαμηλές τιμές σχετικής λύπης χαρακτηρίζουν χαμηλές (σχετικές) διακυμάνσεις της συσωρευτικής αύξησης κόστους.
- Η κλίση των επιφανειών των καμπυλών της σχετικής λύπης συσωρευτικής αύξησης κόστους παρουσιάζουν τη σχέση της αβεβαιότητας και του επιτοκίου προεξόφλησης. Για την ακραία περίπτωση κάθετων περιοχών (πολιτική-σενάριο GhgLim) η ευρωστία δεν επηρεάζει την πολιτική-σεναρίου ενώ για την ακραία περίπτωση οριζόντιων περιοχών (πολιτική-σενάριο NorGas, άνω περιοχή διαγράμματος) το επιτόκιο προεξόφλησης δεν επηρεάζει την πολιτική-σενάριο.
- Ειδικές περιπτώσεις διαγραμμάτων λύπης αποτελούν οι πολιτικές-σεναρίου NorGas και GhgLim.
    - Για την περίπτωση της πολιτικής-σεναρίου NorGas παρατηρείται η αντίθετη φορά του διαγράμματος (οριζόντια και όχι κάθετη) στην άνω περιοχή του. Αυτό οφείλεται στις αρνητικές τιμές συσωρευτικής αύξησης κόστους που λαμβάνει η πολιτική. Για την περίπτωση οριζόντιων περιοχών στο άνω μέρος του διαγράμματος (όπως αναφέρθηκε και παραπάνω) τη σχετική λύπη της συσωρευτικής αύξησης κόστους δεν την επηρεάζει το επιτόκιο προεξόφλησης γεγονός που οφείλεται στις τιμές κοντά στο μηδέν που λαμβάνει η σχετική λύπη σε αυτήν την περιοχή (είτε αρνητικές τιμές συσωρευτικής αύξησης κόστους είτε θετικές τιμές πολύ κοντά όμως

στο μηδέν). Χειρότερη θέση της πολιτικής-σεναρίου παραμένει η περιοχή κάτω δεξιά του διαγράμματος.

- Για την περίπτωση της πολιτικής-σεναρίου GhgLim παρατηρείται η απόλυτα κάθετη κατεύθυνση του διαγράμματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ανεξάρτητα του επιτοκίου προεξόφλησης το οποίο χρησιμοποιείται, η πολιτική-σεναρίου παραμένει η χειρότερη πολιτική από πλευράς συσωρευτικής αύξησης κόστους σε σχέση με τις άλλες πολιτικές. Συνδυάζοντας με τα παραπάνω και τη μορφή στο Σχήμα 7.3 είναι λογική η μορφή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.15. Στην περίπτωση της πολιτικής GhgLim, η χειρότερη θέση εκφυλίζεται στη δεξιά περιοχή του διαγράμματος γεγονός που είναι λογικό αφού για χαμηλές τιμές επιτοκίου προεξόφλησης το κόστος είναι υψηλό ενώ μειώνεται όσο αυξάνεται το επιτόκιο προεξόφλησης.

7.4.2.2 Πολιτική Δύο Σεναρίων και Λύπη Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η σχετική λύπη της συσωρευτικής αύξησης κόστους για τις περιπτώσεις πολιτικών δύο σεναρίων. Στην υποπαράγραφο αυτή, θα εξεταστούν οι αντίστοιχες πολιτικές δύο σεναρίων που εξετάστηκαν στο Σχήμα 7.6. Πρόκειται για όλες τις δυνατές πολιτικές δύο σεναρίων όπου τα σενάρια συμμετέχουν κατά το ήμισυ. Στο Σχήμα 7.16 παρουσιάζονται αυτά τα διαγράμματα.



Σχήμα 7.16. Σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης για επιλεγμένες πολιτικές δύο σεναρίων.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.16, λαμβάνοντας υπόψη τις γενικές επισημάνσεις που έγιναν για τις πολιτικές-σεναρίου θα μπορούσε να ειπωθεί ότι η σχετική λύπη των σεναρίων δύο πολιτικών, όπως άλλωστε είναι λογικό, δεν μπορεί να προκύψει από την απλή παρατήρηση των σεναρίων από τα οποία αποτελείται. Η σχετική λύπη της πολιτικής δύο σεναρίων όπου τα σενάρια συμμετέχουν με το ίδιο ποσοστό μπορεί να προκύψει χονδρικά μόνο όταν τα σενάρια παρουσιάζουν και σχετική ισορροπία ως προς τις τιμές συσωρευτικής αύξησης κόστους. Ακόμη παρατηρώντας τα διαγράμματα στο Σχήμα 7.16 προκύπτουν τα παρακάτω ενδιαφέροντα συμπεράσματα:

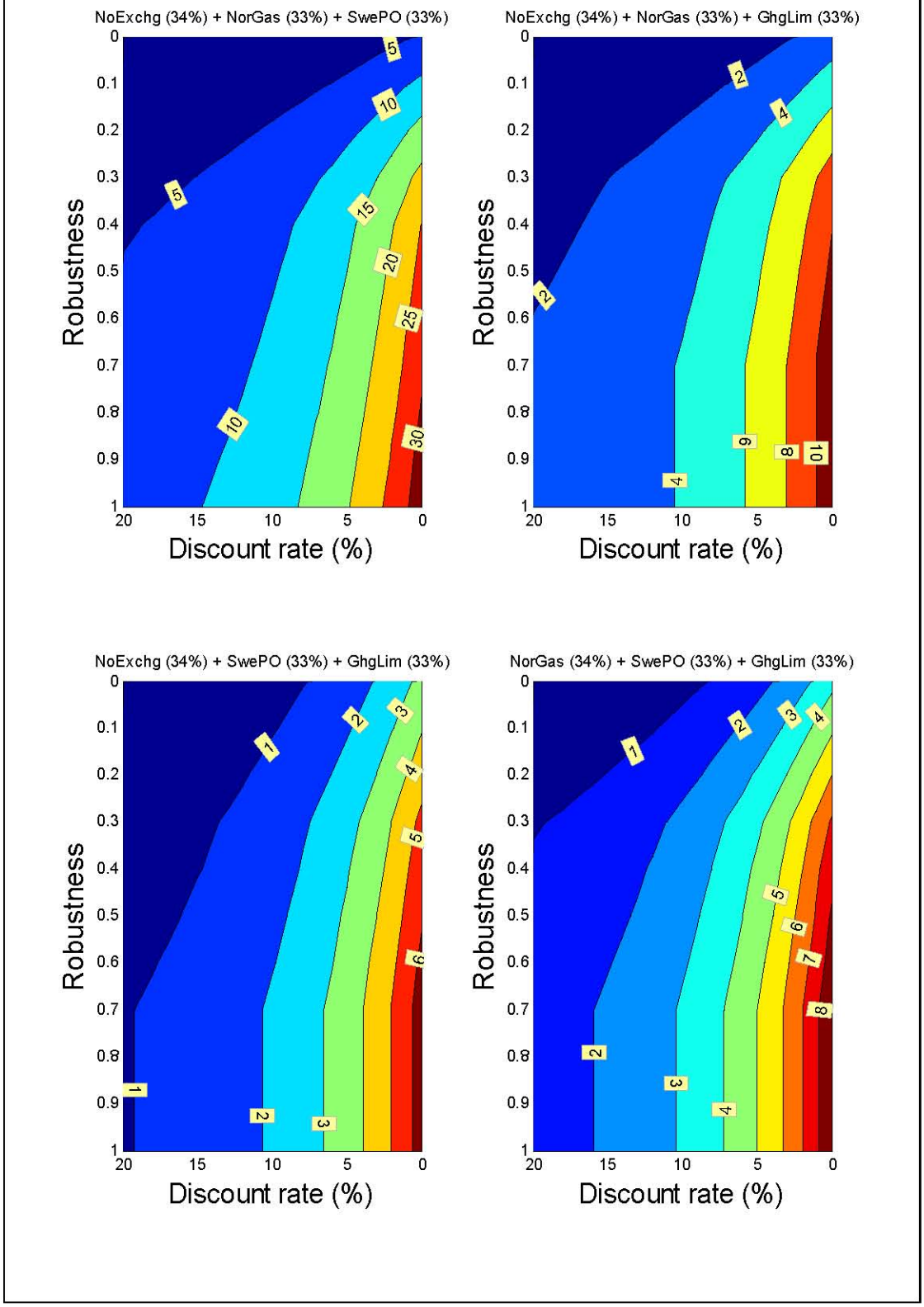
- Οι πολιτικές (δύο) σεναρίων ανάλογα με την κλίση και τις δημιουργημένες περιοχές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε τρεις κατηγορίες που είναι:
    1. Ευαίσθητες στο επιτόκιο προεξόφλησης (discount rate sensitive policies). Πρόκειται, όπως παρουσιάστηκε και παραπάνω, για πολιτικές που είναι αναίσθητες σε μεταβολές τις ευρωστίας και επηρεάζονται μόνο από τις μεταβολές του επιτοκίου προεξόφλησης όπως είναι το σενάριο GhgLim στο Σχήμα 7.15.
    2. Ευαίσθητες στην ευρωστία (robustness sensitive policies). Πρόκειται, όπως παρουσιάστηκε και παραπάνω, για πολιτικές που είναι αναίσθητες σε μεταβολές του επιτοκίου προεξόφλησης και επηρεάζονται μόνο από τις μεταβολές της ευρωστίας όπως είναι η άνω περιοχή του σεναρίου NorGas στο Σχήμα 7.15 και είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα πολιτικών οι οποίες παρουσιάζουν σε κάποια περιοχή αβεβαιότητας-επιτοκίου προεξόφλησης αρνητική τιμή συσωρευτικής αύξησης κόστους παρουσιάζουν με άλλα λόγια συσωρευτική αύξηση κέρδους.
    3. Κανονικές πολιτικές. Πρόκειται για όλες τις υπόλοιπες πολιτικές οι οποίες δεν ανήκουν ρητά στις παραπάνω δύο κατηγορίες. Οι πολιτικές αυτές παρουσιάζουν κάποια κλίση χωρίς όμως να μπορούν να χαρακτηριστούν απόλυτα ως πολιτικές ευαίσθητες στην ευρωστία ή πολιτικές ευαίσθητες στο επιτόκιο προεξόφλησης.
- Οι πολιτικές (δύο) σεναρίων θα μπορούσαν να ταξινομηθούν ανάλογα με τις εμφανιζόμενες μέγιστες τιμές στο διάγραμμα σχετικής λύπης σε δύο κατηγορίες:

1. Πολιτικές έντονης λύπης. Πρόκειται για πολιτικές σεναρίων οι οποίες εμφανίζουν μεγάλες σχετικές διακυμάνσεις όπως είναι για παράδειγμα η πολιτική δύο σεναρίων NoExchg (50%) + NorGas (50%) στο Σχήμα 7.16.
2. Πολιτικές σταθερής λύπης. Πρόκειται για πολιτικές σεναρίων οι οποίες εμφανίζουν μικρές σχετικές διακυμάνσεις όπως για παράδειγμα η πολιτική δύο σεναρίων SwePO (50%) + GhgLim (50%) στο Σχήμα 7.16.

- Χαρακτηριστικό γνώρισμα των πολιτικών με αρνητικές τιμές στη συσωρευτική αύξηση κόστους είναι ότι η περιοχή άνω δεξιά ανήκει στην μπλε περιοχή.

7.4.2.3 Πολιτική Τριών Σεναρίων και Λύπη Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

Τα παραπάνω συμπεράσματα που αρχικά προέκυψαν από την παρατήρηση της συμπεριφοράς των πολιτικών-σεναρίου και έπειτα γενικεύτηκαν με την παρατήρηση των πολιτικών δύο σεναρίων μπορούν περαιτέρω να επισημανθούν στο Σχήμα 7.17 όπου παρουσιάζεται η σχετική λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους ως προς την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης. Σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιούνται οι πολιτικές τριών σεναρίων που έχουν παρουσιαστεί και αναλυθεί στο Σχήμα 7.9.



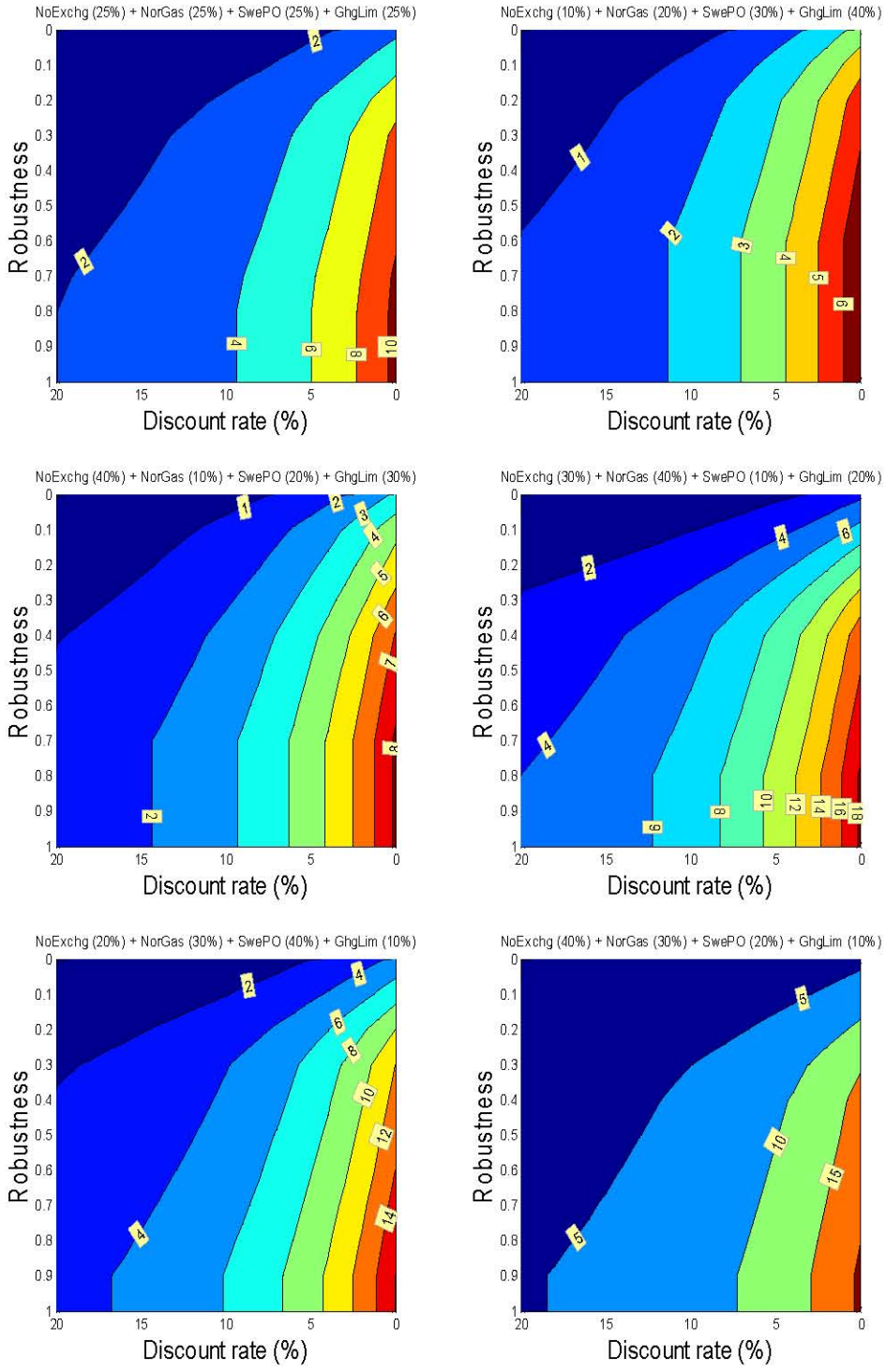
Σχήμα 7.17. Σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης για επιλεγμένες πολιτικές τριών σεναρίων.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.17, διαπιστώνονται τα παρακάτω:

- Οι πολιτικές τριών σεναρίων δεν είναι τόσο έντονης λύπης όσο τα συστατικά αυτών που είναι τα σενάρια που τις αποτελούν και που ορισμένα εκ των οποίων μπορούν να χαρακτηριστούν ως πολύ έντονης λύπης.
- Καμία από τις εξεταζόμενες πολιτικές τριών σεναρίων δεν παρουσιάζει τη συμπεριφορά αρνητικών τιμών συσωρευτικής αύξησης κόστους ακόμη και αυτές οι οποίες περιλαμβάνουν το σενάριο NorGas.
- Η μορφή των δημιουργουμένων ζωνών των πολιτικών τριών σεναρίων εμφανίζει περισσότερες ομοιότητες σε σχέση με τη μεταξύ τους μορφή για τις πολιτικές σεναρίου και δύο σεναρίων. Αυτό οφείλεται στη συμπερίληψη περισσότερων σεναρίων. Όπως στην περίπτωση των γραφικών παραστάσεων της συσωρευτικής αύξησης κόστους και της αβεβαιότητας η συμπερίληψη περισσότερων σεναρίων οδηγούσε σε μια μορφή καμπύλης με περισσότερα σημεία ασυνέχειας, τα σημεία ασυνέχειας αυτά στο επίπεδο τιμών αβεβαιότητας και επιτοκίου προεξόφλησης γενικεύονται σε περισσότερες ομαλά κατανεμημένες περιοχές.

7.4.2.4 Πολιτική Τεσσάρων Σεναρίων και Λύπη Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

Στο Σχήμα 7.18 παρουσιάζεται η σχετική λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης για επιλεγμένες πολιτικές τεσσάρων σεναρίων. Οι πολιτικές τεσσάρων σεναρίων οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν είναι αυτές οι οποίες αναλύθηκαν στο Σχήμα 7.10 και το Σχήμα 7.11. Τα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν παρατηρώντας τη συμπεριφορά της σχετικής λύπης των πολιτικών στο Σχήμα 7.18 χαρακτηρίζονται σε γενικές γραμμές από τα συμπεράσματα τα οποία έχουν προκύψει και παρουσιαστεί παραπάνω.



Σχήμα 7.18. Σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης για επιλεγμένες πολιτικές τεσσάρων σεναρίων.

Γενικεύοντας, όσο οι πολιτικές συμπεριλαμβάνουν περισσότερα σενάρια τόσο τείνουν στη πραγματικότητα. Για αυτό το λόγο η μελέτη και η αξιολόγηση πρέπει να είναι πιο προσεκτική. Αυτό είναι εξάλλου εμφανές και από την παρατήρηση των διαγραμμάτων λύπης των οποίων η πολυπλοκότητα αυξάνει όσο οι πολιτικές γίνονται περισσότερο περιεκτικές σε σενάρια. Όσο οι πολιτικές γίνονται περισσότερο περιεκτικές σε σενάρια η ανάλυση των διαγραμμάτων της σχετικής λύπης (θα μπορούσαν να χαρακτηριστούν και ως διαγράμματα για την εξέταση τις ευστάθειας των αποφασισμένων πολιτικών) πρέπει να είναι πιο λεπτομερής και προσεκτική.

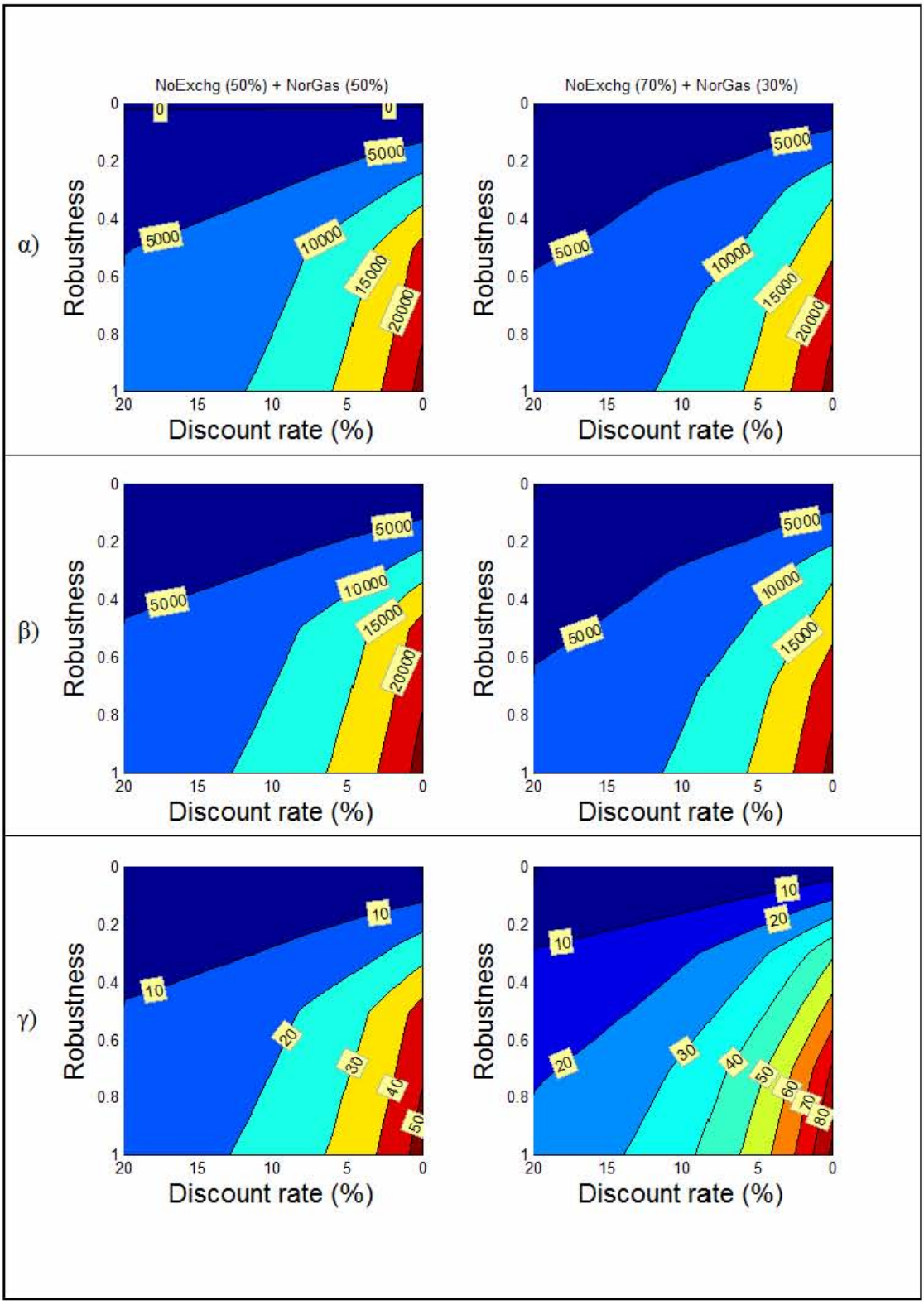
7.4.3 Μελέτη Ανταγωνιστικών Πολιτικών με τη Χρήση της Συνάρτησης Λύπης Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν παραπάνω, ορισμένες καμπύλες ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής του κάθε σεναρίου στην πολιτική παρουσιάζουν τη δική τους συμπεριφορά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα για τις τιμές αβεβαιότητας να επικρατεί μια πολιτική έναντι μιας άλλης και ανάποδα (περίπτωση $2^{ης}$ και $3^{ης}$ πολιτικής στο Σχήμα 7.7, περίπτωση $4^{ης}$ και $3^{ης}$ πολιτικής στο Σχήμα 7.11) γεγονός που κάνει την επιλογή μεταξύ αυτών των πολιτικών ιδιαίτερα δύσκολη. Στη συνέχεια αυτό το ενδιαφέρον θέμα ανταγωνιστικών καμπυλών σε σχέση με την αβεβαιότητα εξετάζεται εκτενέστερα με τη χρήση του μέτρου τις σχετικής λύπης συσωρευτικής αύξησης κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης αφού πρόκειται για μια ιδιαίτερη περίπτωση με ρεαλιστικές προεκτάσεις (ανάλογα με την αβεβαιότητα ή την απόδοση μιας επένδυσης υπερτερεί διαφορετική πολιτική) τόσο στο ενεργειακό ζήτημα όσο και σε άλλα προβλήματα αποφάσεων.

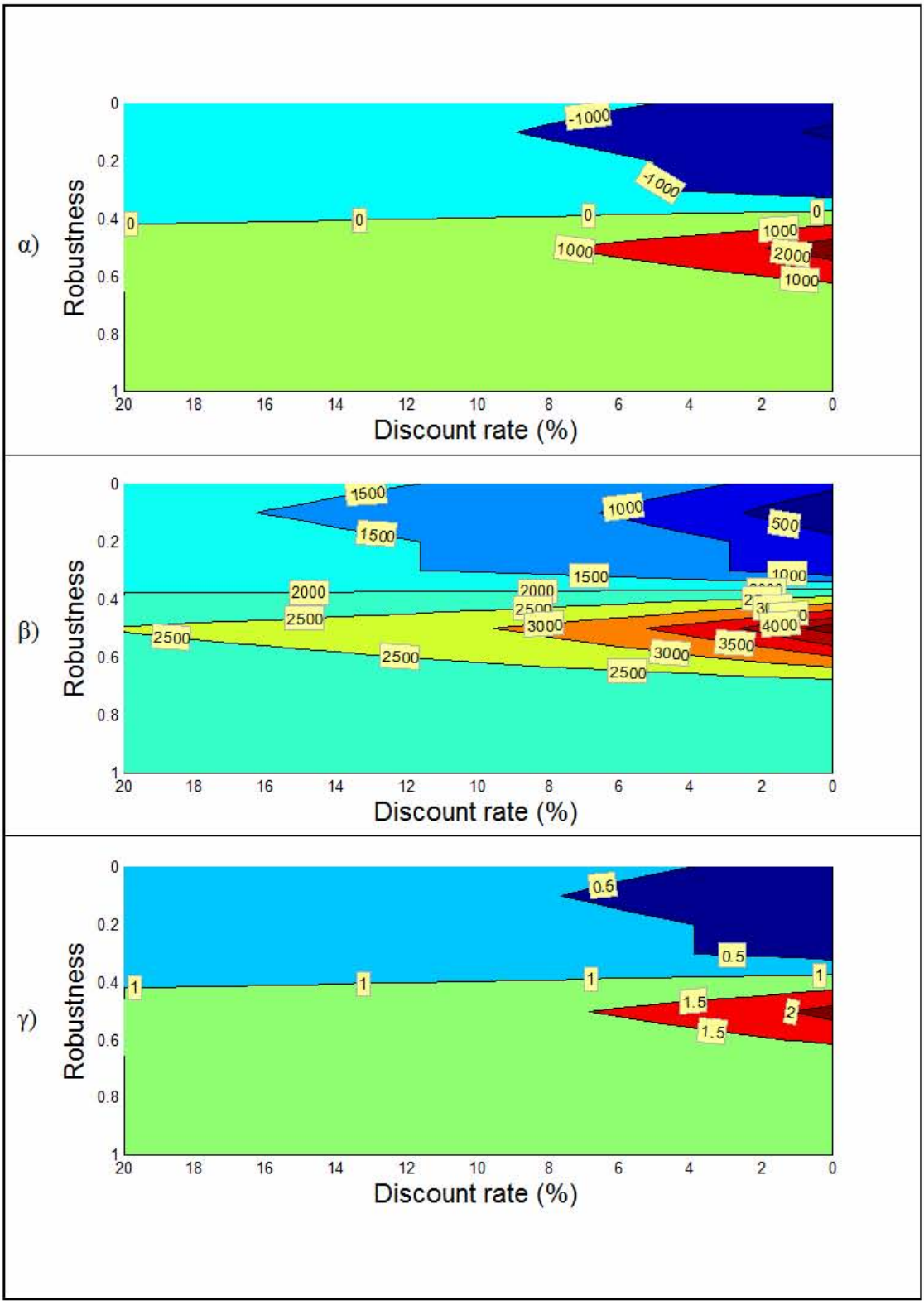
Στη συνέχεια αναλύονται οι δύο περιπτώσεις ανταγωνιστικών πολιτικών οι οποίες εμφανίστηκαν στην παραπάνω ανάλυση των πολιτικών.

Αρχικά, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που έχουν να κάνουν με τις ανταγωνιστικές πολιτικές δύο σεναρίων. Στο Σχήμα 7.19α παρουσιάζονται ξεχωριστά η πολιτική NoExchg (50%) + NorGas (50%) και η πολιτική NoExchg (70%) + NorGas (30%). Στην πρώτη γραμμή του Σχήματος 19α (περίπτωση α) παρουσιάζεται η συσωρευτική αύξηση κόστους για τις δύο πολιτικές, στη δεύτερη γραμμή

(περίπτωση β) παρουσιάζεται η λύπη των δύο πολιτικών ενώ στην τρίτη γραμμή (περίπτωση γ) παρουσιάζεται η σχετική λύπη των πολιτικών αυτών. Στο Σχήμα 7.19β παρουσιάζεται η διαφορά της δεύτερης πολιτικής από την πρώτη στο θέμα τις συσωρευτικής αύξησης κόστους για κάθε επιτόκιο προεξόφλησης και ευρωστίας χωριστά. Στην πρώτη γραμμή του Σχήματος 19β (περίπτωση α) παρουσιάζεται η συσωρευτική αύξηση κόστους της διαφοράς των δύο πολιτικών, στη δεύτερη γραμμή (περίπτωση β) παρουσιάζεται η λύπη της διαφοράς των δύο πολιτικών ενώ στην τρίτη γραμμή (περίπτωση γ) παρουσιάζεται η σχετική λύπη της διαφοράς των πολιτικών αυτών για διάφορες τιμές της ευρωστίας και του επιτοκίου προεξόφλησης.

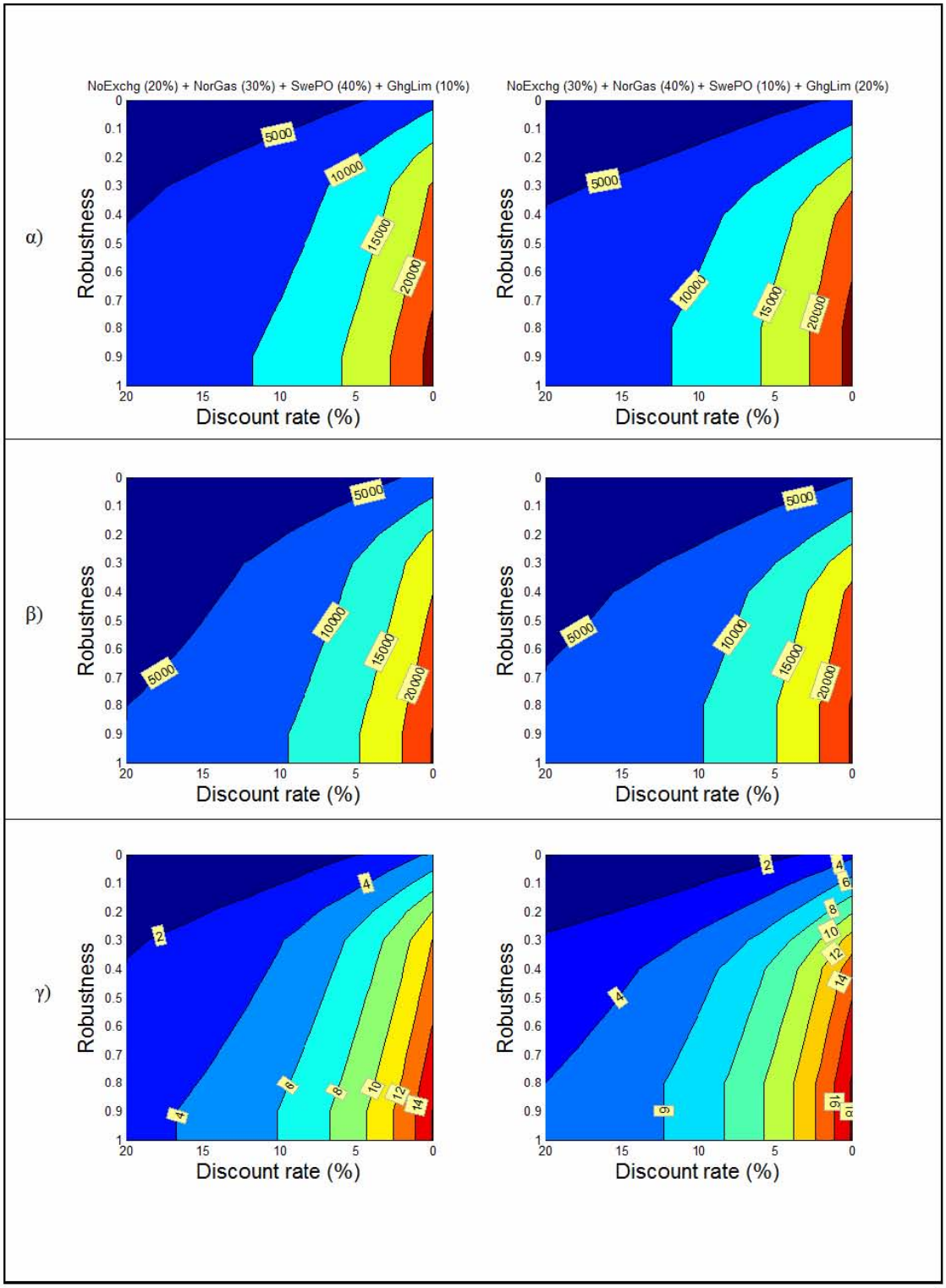


Σχήμα 7.19α. Ανάλυση πολιτικής NoExhg (50%) + NorGas (50%) και πολιτικής NoExhg (70%) + NorGas (30%) (ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης.

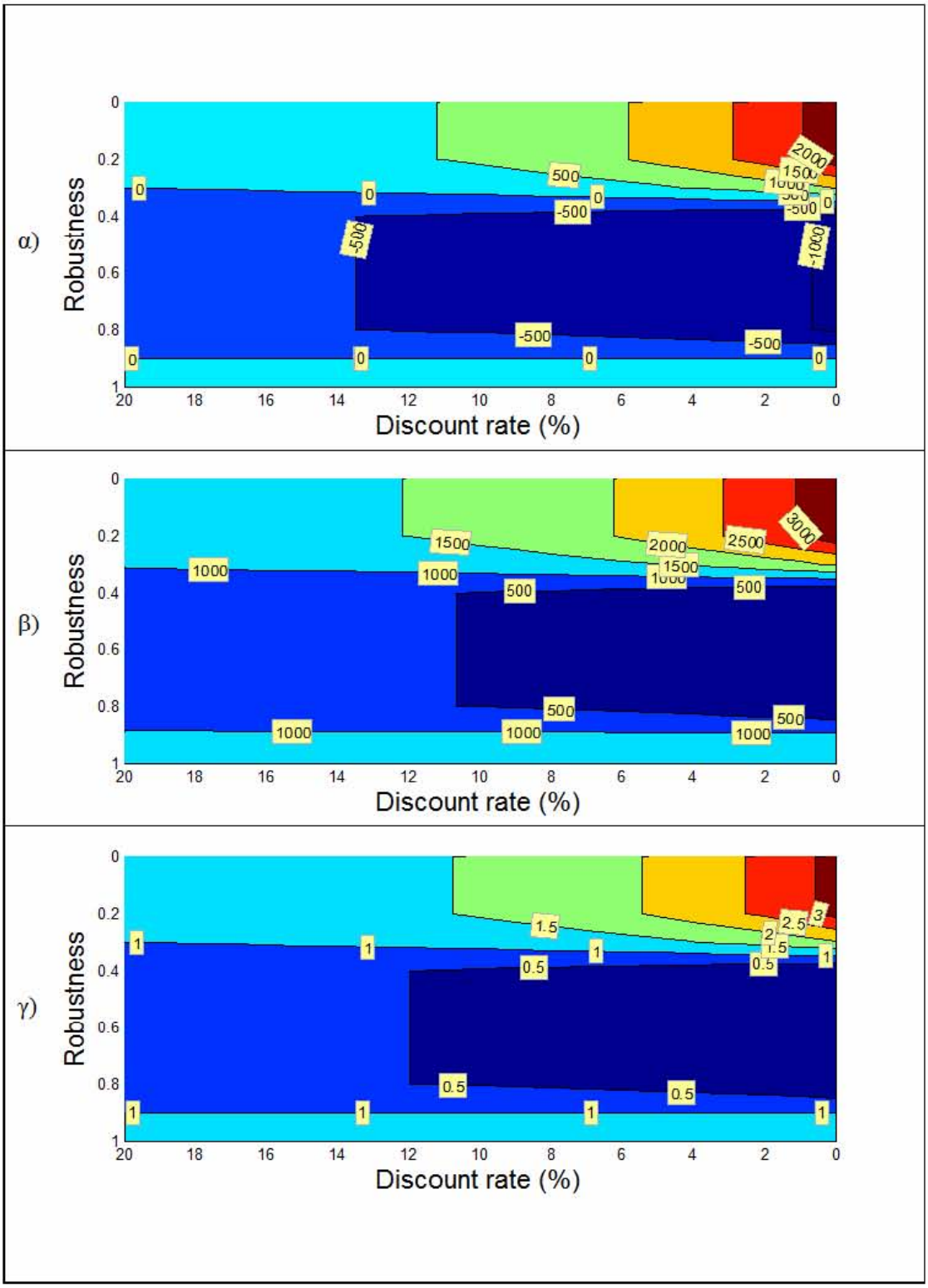


Σχήμα 7.19β. Ανάλυση της διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους τις πολιτικής NoExhg (70%) + NorGas (30%) από την πολιτική NoExhg (50%) + NorGas (50%) (ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που έχουν να κάνουν με τις ανταγωνιστικές πολιτικές τεσσάρων σεναρίων. Στο Σχήμα 7.20α παρουσιάζονται ξεχωριστά η πολιτική NoExhg (20%) + NorGas (50%) + SwePO (40%) + GhgLim (10%) και η πολιτική NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%). Στην πρώτη γραμμή του Σχήματος 20α (περίπτωση α) παρουσιάζεται η συσωρευτική αύξηση κόστους για τις δύο πολιτικές, στη δεύτερη γραμμή (περίπτωση β) παρουσιάζεται η λύπη των δύο πολιτικών ενώ στην τρίτη γραμμή (περίπτωση γ) παρουσιάζεται η σχετική λύπη των πολιτικών αυτών. Στο Σχήμα 7.20β παρουσιάζεται η διαφορά της δεύτερης πολιτικής από την πρώτη στο θέμα τις συσωρευτικής αύξησης κόστους για κάθε επιτόκιο προεξόφλησης και ευρωστία χωριστά. Στην πρώτη γραμμή του Σχήματος 20β (περίπτωση α) παρουσιάζεται η συσωρευτική αύξηση κόστους τις διαφοράς των δύο πολιτικών, στη δεύτερη γραμμή (περίπτωση β) παρουσιάζεται η λύπη της διαφοράς των δύο πολιτικών ενώ στην τρίτη γραμμή (περίπτωση γ) παρουσιάζεται η σχετική λύπη της διαφοράς των πολιτικών αυτών για διάφορες τιμές της ευρωστίας και του επιτοκίου προεξόφλησης.



Σχήμα 7.20α. Ανάλυση πολιτικής NoExhg (20%) + NorGas (50%) + SwePO (40%) + GhgLim (10%) και πολιτικής NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%) (ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης.



Σχήμα 7.20β. Ανάλυση της διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους της πολιτικής NoExhg (20%) + NorGas (50%) + SwePO (40%) + GhgLim (10%) από την πολιτική NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%) (ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.19α, το Σχήμα 7.19β, το Σχήμα 7.20α και το Σχήμα 7.20β προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα όσον αφορά τις ανταγωνιστικές πολιτικές:

1. Από το Σχήμα 7.19α και το Σχήμα 7.20α είναι εμφανές ότι η μορφή της καμπύλης συσωρευτικής αύξησης κόστους και λύπης δε διαφέρουν. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σχέση μεταξύ λύπης και συσωρευτικής αύξησης κόστους είναι γραμμική (η λύπη προκύπτει απλά προσθέτοντας στη συσωρευτική αύξηση κόστους την ελάχιστη τιμή της συσωρευτικής αύξησης κόστους).
2. Η μορφή των καμπυλών της σχετικής λύπης στο Σχήμα 7.19α και στο Σχήμα 7.20α ομοιάζει με τις καμπύλες λύπης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η σχετική λύπη προέρχεται από τις καμπύλες λύπης απλά διαιρώντας τη λύπη με την απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής συσωρευτικής αύξησης κόστους.
3. Στην πρώτη γραμμή στο Σχήμα 7.19α διαπιστώνεται τόσο για την πολιτική NoExhg (70%) + NorGas (30%) όσο και για την πολιτική NoExhg (50%) + NorGas (50%) η συμπεριφορά των οριζοντίων ζωνών. Με τον όρο συμπεριφορά οριζοντίων ζωνών, όπως έχει αναλυθεί εκτενέστερα και παραπάνω, καλούμε τη συμπεριφορά πολιτικής η οποία ως ελάχιστη τιμή συσωρευτικής αύξησης κόστους λαμβάνει αρνητική τιμή ή θετική τιμή κοντά στο μηδέν με αποτέλεσμα η άνω περιοχή του διαγράμματος να εμφανίζει μορφή οριζόντιας ζώνης (δηλαδή στο διάγραμμα σχετικής λύπης το πάνω αριστερά άκρο και το άκρο πάνω δεξιά ανήκουν στην ίδια ζώνη).
4. Από το Σχήμα 7.19α και Σχήμα 7.20α η πολιτική με την εντονότερη λύπη είναι η NoExhg (70%) + NorGas (30%) και η πολιτική με τη μικρότερη λύπη είναι η NoExhg (20%) + NorGas (50%) + SwePO (40%) + GhgLim (10%).
5. Στο Σχήμα 7.19β και στο Σχήμα 7.20β στην πρώτη γραμμή δίνεται το αποτέλεσμα της διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους της πολιτικής NoExhg (70%) + NorGas (30%) από την πολιτική NoExhg (50%) + NorGas (50%) και της πολιτικής NoExhg (20%) + NorGas (50%) + SwePO (40%) + GhgLim (10%) από την πολιτική NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%) με κριτήριο τη συσωρευτική αύξηση κόστους. Παρατηρώντας το Σχήμα 7.19β και το Σχήμα 7.20β διαπιστώνεται η μορφή παρουσίας ζωνών (νησίδες) με αρνητικές τιμές, σημείο μηδενισμών και

θετικές τιμές. Αυτό είναι το χαρακτηριστικό γνώρισμα των ανταγωνιστικών καμπυλών.

6. Εξετάζοντας αυτές τις νησίδες, είναι δυνατή η χάραξη και η επιλογή μεταξύ δύο ανταγωνιστικών περιοχών. Αυτό μπορεί να γίνει με προσεκτική μελέτη των στοιχείων που έχουμε και στον εντοπισμό του σημείου αβεβαιότητας-επιτοκίου προεξόφλησης στο οποίο κινούμαστε στο διάγραμμα.
7. Η άνω γραμμή στο Σχήμα 7.19β και στο Σχήμα 7.20β αποτελεί την περίπτωση ευστάθειας μεταξύ δύο ανταγωνιστικών πολιτικών. Δηλαδή μελετώντας τη μορφή του Σχήματος και εκτιμώντας τη θέση στο διάγραμμα μπορεί να εκτιμηθεί η διακύμανση της απόφασης (διάγραμμα ευστάθειας με ονομαστικές τιμές).
8. Η δεύτερη γραμμή στο Σχήμα 7.19β και στο Σχήμα 7.20β αποτελεί την περίπτωση της διαφοράς των ανταγωνιστικών πολιτικών η οποία κανονικοποιείται.
9. Η τρίτη γραμμή στο Σχήμα 7.19β και στο Σχήμα 7.20β είναι η πιο ενδιαφέρουσα από πλευράς ανάλυσης και συμπερασμάτων. Πρόκειται για τη σχετική λύπη της διαφοράς των δύο ανταγωνιστικών πολιτικών. Παρατηρώντας το γράφημα, εμφανίζονται και εδώ οι νησίδες (θετικών τιμών αφού το διάγραμμα σχετικής λύπης προέρχεται από το διάγραμμα λύπης προς απόλυτη τιμή) οι οποίες οριοθετούν περιοχές. Οι νησίδες αυτές λαμβάνουν τιμές μικρότερες της μονάδας, μονάδα και τιμές μεγαλύτερες της μονάδας.
10. Στην περίπτωση ανταγωνιστικών πολιτικών η μικρότερη τιμή της διαφοράς της συσωρευτικής αύξησης κόστους λαμβάνει αρνητική τιμή (ειδάλλως δε θα υπήρχε και θέμα ανταγωνιστικών πολιτικών όταν η διαφορά τους είναι σε όλες τις περιοχές του διαγράμματος θετική ή αρνητική). Για τις περιοχές με θετική τιμή σχετικής λύπης της διαφοράς μεταξύ των πολιτικών από (2) ισχύει:

$$\text{Re}\,lative_\text{Re}\,gret_m(j,f) > 1 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{Performance_m(j,f) - \underset{j'}{Min}[Performance_m(j',f)]}{\left|\underset{j'}{Min}[Performance_m(j',f)]\right|} > 1 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Performance_m(j,f) - \underset{j'}{Min}[Performance_m(j',f)] > \left|\underset{j'}{Min}[Performance_m(j',f)]\right| \Leftrightarrow$$

$$\left|\min_{j'}[Performance_m(j',f)]\right| = -\min_{j'}[Performance_m(j',f)]$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Performance_m(j,f) - \min_{j'}[Performance_m(j',f)] > -\min_{j'}[Performance_m(j',f)] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Performance_m(j,f) > 0 \quad (3)$$

Από την (3) διαπιστώνεται ότι για τις περιοχές όπου η τιμή της σχετικής λύπης λαμβάνει τιμές μεγαλύτερες της μονάδας η διαφορά της συσωρευτικής αύξησης κόστους είναι θετική. Αυτό σημαίνει ότι η πρώτη πολιτική εμφανίζει μεγαλύτερο κόστος από τη δεύτερη. Σε αυτές τις περιπτώσεις προτιμάται η δεύτερη πολιτική η οποία παρουσιάζει μικρότερη συσωρευτική αύξηση κόστους. Αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί για το Σχήμα 7.19β και το Σχήμα 7.20β από το Σχήμα 7.7 και το Σχήμα 7.11 αντίστοιχα τα οποία παρουσιάζουν ένα στιγμιότυπο σύγκρισης μεταξύ των δύο ζευγαριών ανταγωνιστικών πολιτικών τα οποία παρουσιάζονται.

Ομοίως όταν η σχετική λύπη της διαφοράς της συσωρευτικής αύξησης κόστους λαμβάνει την τιμή μονάδα τότε αντιμετωπίζονται δύο ισοδύναμες από πλευράς συσωρευτικής αύξησης κόστους πολιτικές.

Τέλος, στην περίπτωση όπου η σχετική λύπη της διαφοράς της συσωρευτικής αύξησης κόστους παρουσιάζει τιμές μικρότερες της μονάδας τότε ισχύει:

$$\text{Re}\,lative_\text{Re}\,gret_m(j,f) < 1 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \frac{Performance_m(j,f) - \min_{j'}[Performance_m(j',f)]}{\left|\min_{j'}[Performance_m(j',f)]\right|} < 1 \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Performance_m(j,f) - \min_{j'}[Performance_m(j',f)] < \left|\min_{j'}[Performance_m(j',f)]\right| \Leftrightarrow$$

$$\left|\min_{j'}[Performance_m(j',f)]\right| = -\min_{j'}[Performance_m(j',f)]$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Performance_m(j,f) - \min_{j'}[Performance_m(j',f)] < -\min_{j'}[Performance_m(j',f)] \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow Performance_m(j,f) < 0 \quad (4)$$

Από την (4) διαπιστώνεται ότι για τις περιοχές όπου η τιμή της σχετικής λύπης λαμβάνει τιμές μικρότερες της μονάδας η διαφορά της συσωρευτικής αύξησης κόστους είναι αρνητική. Αυτό σημαίνει ότι η δεύτερη πολιτική εμφανίζει μεγαλύτερο κόστος από την πρώτη. Σε αυτές τις περιπτώσεις

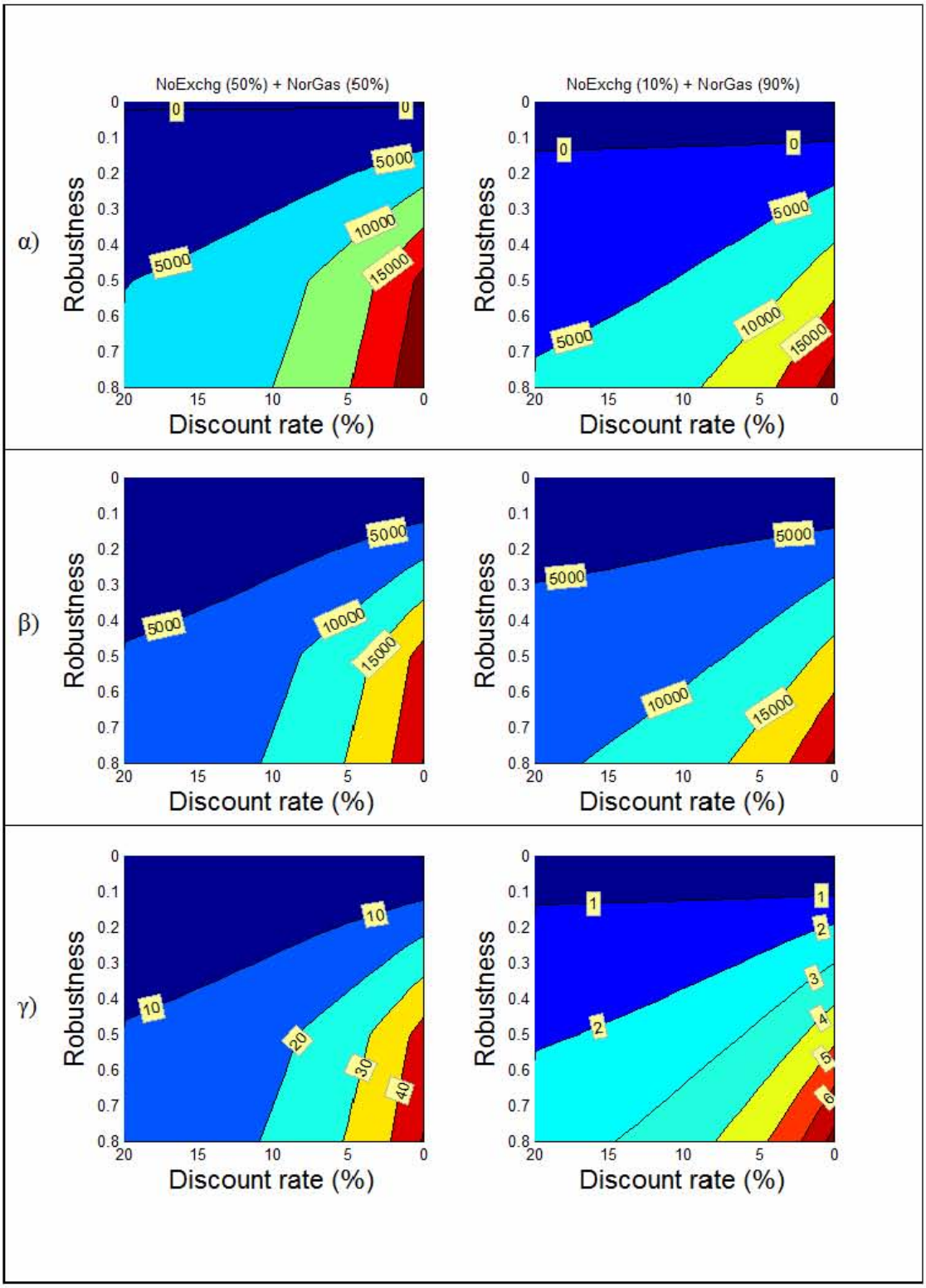
προτιμάται η πρώτη πολιτική η οποία παρουσιάζει μικρότερη συσωρευτική αύξηση κόστους. Αυτό μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί για το Σχήμα 7.19β και το Σχήμα 7.20β από το Σχήμα 7.7 και το Σχήμα 7.11 αντίστοιχα τα οποία παρουσιάζουν ένα στιγμιότυπο σύγκρισης μεταξύ των δύο ζευγαριών ανταγωνιστικών πολιτικών τα οποία παρουσιάζονται.

11. Η μελέτη ανταγωνιστικών πολιτικών με τη μελέτη της σχετικής λύπης της διαφοράς μεταξύ των ανταγωνιστικών πολιτικών προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα αφού καθορίζει περιοχές λήψης εύρωστων αποφάσεων μεταξύ πολιτικών προσφέροντας ταυτόχρονα και μια συνοπτική μελέτη ευστάθειας.
12. Από την κάτω γραμμή στο Σχήμα 7.19β και Σχήμα 7.20β προκύπτει το διάγραμμα της σχετικής ευστάθειας της διαφοράς μεταξύ ανταγωνιστικών πολιτικών. Ειδικά για το Σχήμα 7.19β στην κάτω περιοχή του διαγράμματος σχετικής λύπης φαίνεται η υπεροχή της δεύτερης πολιτικής, δηλαδή της πολιτικής NoExhg (50%) + NorGas (50%) (όχι έντονη) ενώ στην άνω περιοχή υπερισχύει η πρώτη πολιτική. Στην περίπτωση που εξετάζεται στο Σχήμα 7.20β φαίνεται να υπερισχύει η δεύτερη πολιτική, δηλαδή η NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%), με έντονη λύπη εκτός της μεσαίας περιοχής όπου υπερτερεί η πολιτική NoExhg (20%) + NorGas (50%) + SwePO (40%) + GhgLim (10%). Το διάγραμμα σχετικής λύπης στο Σχήμα 7.20β σε σχέση με το Σχήμα 7.19β είναι πιο έντονης λύπης. Αυτό προκύπτει από τις υψηλότερες σε τιμές και πυκνότητα νησίδες στο Σχήμα 7.20β.
13. Για την πληρότητα της ανάλυσης των ανταγωνιστικών πολιτικών και για να φανεί περισσότερο το ζήτημα της αρνητικής διαφοράς μεταξύ των πολιτικών, των νησίδων και της σχετικής ευστάθειας στη λήψη αποφάσεων μεταξύ ανταγωνιστικών πολιτικών στο Σχήμα 7.21 και στο Σχήμα 7.22 που ακολουθούν παρουσιάζονται πολιτικές μη ανταγωνιστικές και πως διαμορφώνονται σε αυτές τις απλές περιπτώσεις τα διαγράμματα σχετικής λύπης.

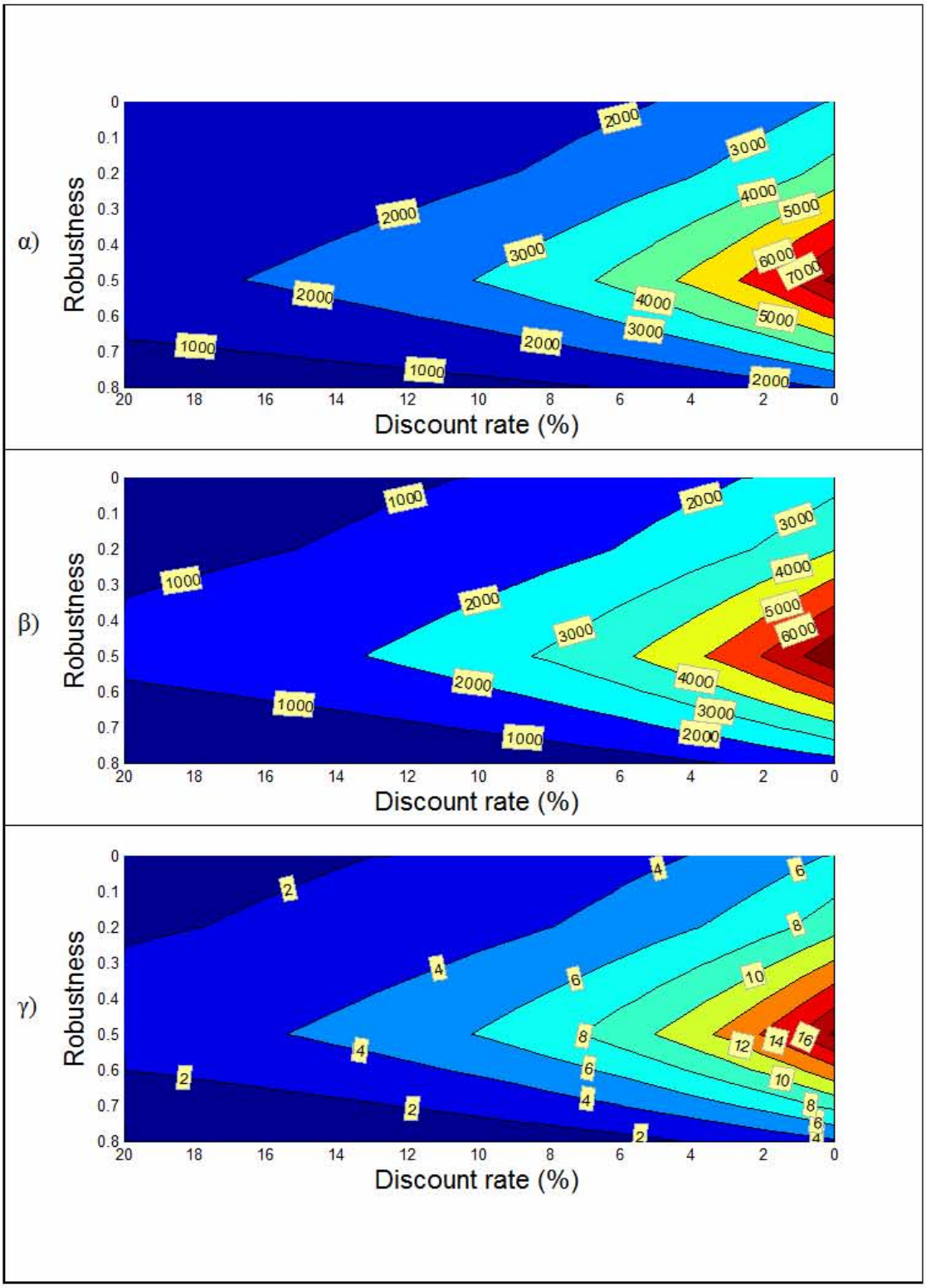
7.4.4 Μελέτη Μη Ανταγωνιστικών Πολιτικών με τη Χρήση της Συνάρτησης Λύπης Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

Μέχρι τώρα παρουσιάστηκε η ανάλυση των ανταγωνιστικών πολιτικών με τη χρήση τη σχετική λύπη ως μέτρο σύγκρισης. Για την πληρότητα όμως της Μεταπτυχιακής Εργασίας παρουσιάζεται και η τετριμμένη περίπτωση της σύγκρισης δύο μη ανταγωνιστικών πολιτικών. Με τον όρο μη ανταγωνιστικές πολιτικές ορίζονται οι πολιτικές στις οποίες η μια υπερτερεί σε όλες τις περιπτώσεις όπως αυτές ορίζονται από την αβεβαιότητα και το επιτόκιο προεξόφλησης από την άλλη πολιτική.

Για την περίπτωση μη ανταγωνιστικών πολιτικών δύο σεναρίων, στο Σχήμα 7.21α παρουσιάζονται ξεχωριστά η πολιτική NoExchg (50%) + NorGas (50%) και η πολιτική NoExchg (10%) + NorGas (90%). Στην περίπτωση αυτών των πολιτικών η πρώτη πολιτική υπερέχει σε συσωρευτική αύξηση κόστους σε όλες τις περιοχές σε σχέση με τη δεύτερη πολιτική κάτι το οποίο καθιστά το πρόβλημα ως μια μελέτη μεταξύ δύο μη ανταγωνιστικών πολιτικών (στιγμιότυπο αυτής της υπεροχής στο Σχήμα 7.7). Στην πρώτη γραμμή του Σχήματος 21α (περίπτωση α) παρουσιάζεται η συσωρευτική αύξηση κόστους για τις δύο πολιτικές, στη δεύτερη γραμμή (περίπτωση β) παρουσιάζεται η λύπη των δύο πολιτικών ενώ στην τρίτη γραμμή (περίπτωση γ) παρουσιάζεται η σχετική λύπη των πολιτικών αυτών. Στο Σχήμα 7.21β παρουσιάζεται η διαφορά τις δεύτερης πολιτικής από την πρώτη στο θέμα της συσωρευτικής αύξησης κόστους για κάθε επιτόκιο προεξόφλησης και ευρωστία χωριστά. Στην πρώτη γραμμή του Σχήματος 21β (περίπτωση α) παρουσιάζεται η συσωρευτική αύξηση κόστους της διαφοράς των δύο πολιτικών, στη δεύτερη γραμμή (περίπτωση β) παρουσιάζεται η λύπη της διαφοράς των δύο πολιτικών ενώ στην τρίτη γραμμή (περίπτωση γ) παρουσιάζεται η σχετική λύπη της διαφοράς των πολιτικών αυτών για διάφορες τιμές της ευρωστίας και του επιτοκίου προεξόφλησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις μη ανταγωνιστικών πολιτικών, η μελέτη όσον αφορά την αβεβαιότητα θα πρέπει να οριοθετηθεί μέχρι μια τιμή μικρότερη από την ομογενοποίηση των πολιτικών γιατί αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα η ελάχιστη τιμή της διαφοράς μεταξύ των πολιτικών να είναι μηδέν και να απειρίζεται το μέτρο της σχετικής λύπης της διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους (στην περίπτωση που μελετάται στο Σχήμα 7.21β η αβεβαιότητα μελετάται έως την τιμή 0.80).

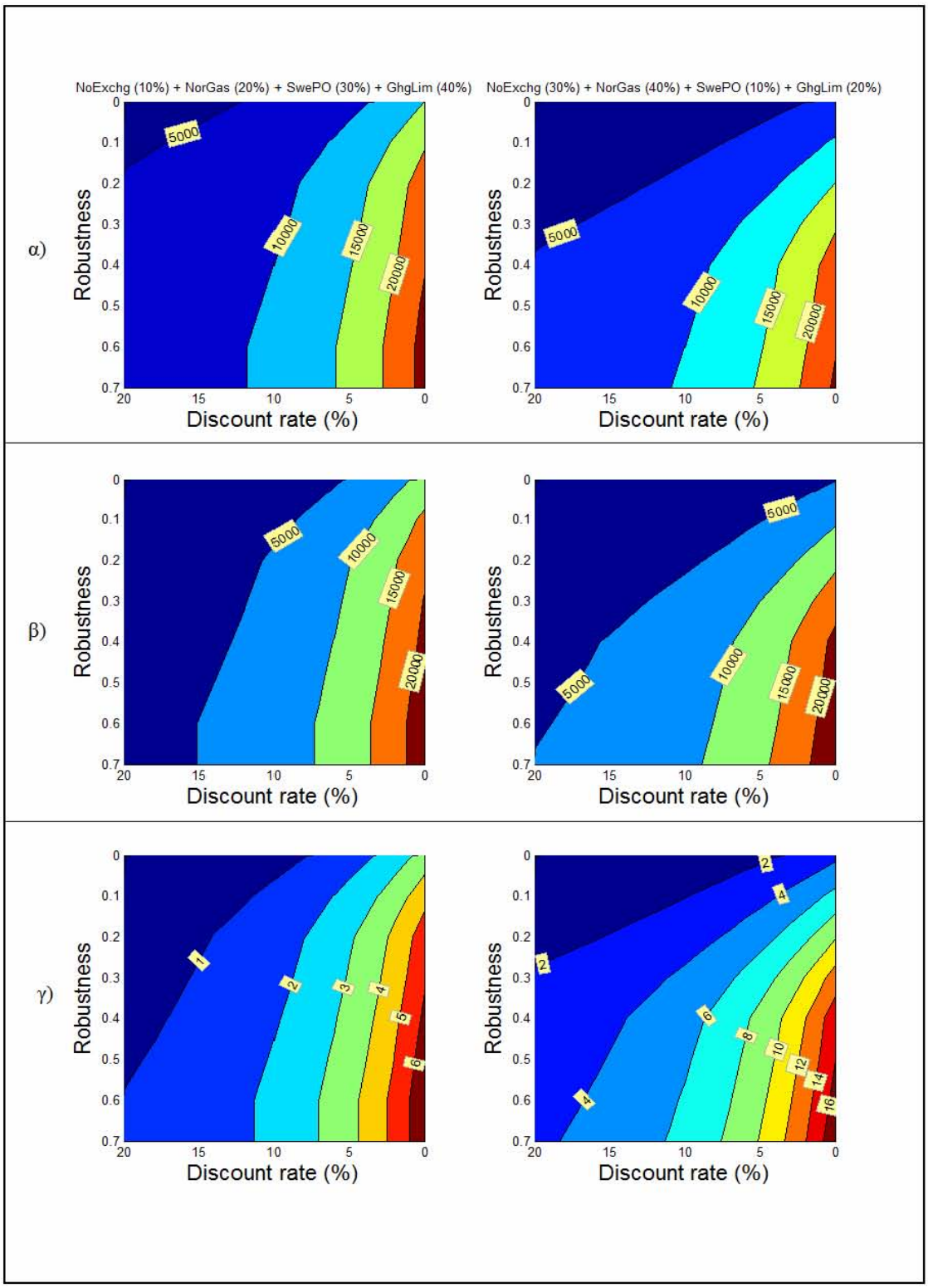


Σχήμα 7.21α. Ανάλυση πολιτικής NoExhg (50%) + NorGas (50%) και πολιτικής NoExhg (10%) + NorGas (90%) (μη ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης.

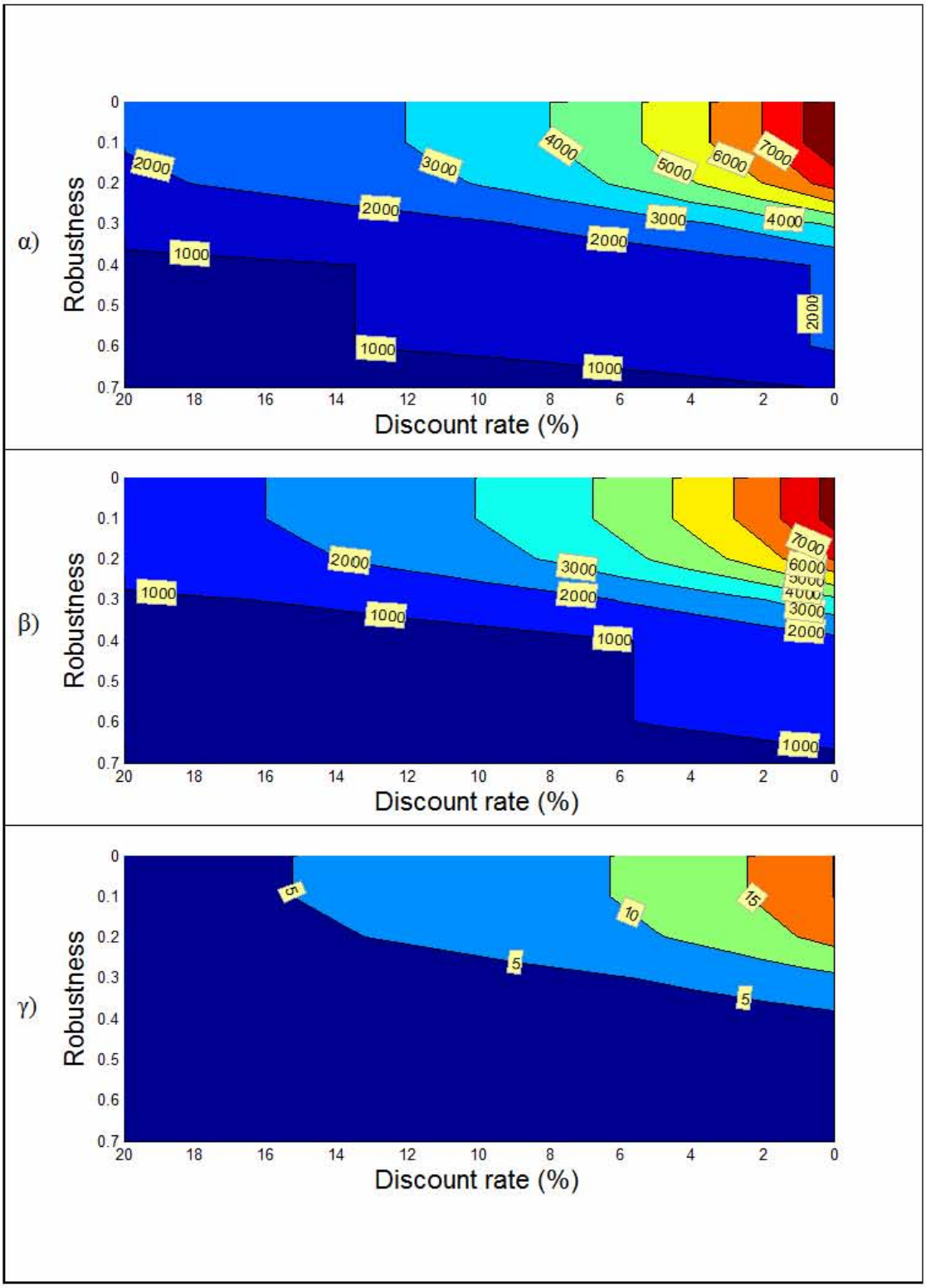


Σχήμα 7.21β. Ανάλυση της διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους τις πολιτικής NoExhg (50%) + NorGas (50%) από την πολιτική NoExhg (10%) + NorGas (90%) (μη ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης.

Για την περίπτωση μη ανταγωνιστικών πολιτικών δύο σεναρίων, στο Σχήμα 7.22α παρουσιάζονται ξεχωριστά η πολιτική NoExhg (10%) + NorGas (20%) + SwePO (30%) + GhgLim (40%) και η πολιτική NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%). Στην περίπτωση αυτών των πολιτικών η πρώτη πολιτική υπερέχει σε συσωρευτική αύξηση κόστους σε όλες τις περιοχές σε σχέση με τη δεύτερη πολιτική κάτι το οποίο καθιστά το πρόβλημα ως μια μελέτη μεταξύ δύο μη ανταγωνιστικών πολιτικών (στιγμιότυπο αυτής της υπεροχής στο Σχήμα 7.11). Στην πρώτη γραμμή του Σχήματος 22α (περίπτωση α) παρουσιάζεται η συσωρευτική αύξηση κόστους για τις δύο πολιτικές, στη δεύτερη γραμμή (περίπτωση β) παρουσιάζεται η λύπη των δύο πολιτικών ενώ στην τρίτη γραμμή (περίπτωση γ) παρουσιάζεται η σχετική λύπη των πολιτικών αυτών. Στο Σχήμα 7.22β παρουσιάζεται η διαφορά της δεύτερης πολιτικής από την πρώτη στο θέμα τις συσωρευτικής αύξησης κόστους για κάθε επιτόκιο προεξόφλησης και ευρωστία χωριστά. Στην πρώτη γραμμή του Σχήματος 22β (περίπτωση α) παρουσιάζεται η συσωρευτική αύξηση κόστους της διαφοράς των δύο πολιτικών, στη δεύτερη γραμμή (περίπτωση β) παρουσιάζεται η λύπη της διαφοράς των δύο πολιτικών ενώ στην τρίτη γραμμή (περίπτωση γ) παρουσιάζεται η σχετική λύπη της διαφοράς των πολιτικών αυτών για διάφορες τιμές τις ευρωστίας και του επιτοκίου προεξόφλησης. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις περιπτώσεις μη ανταγωνιστικών πολιτικών, η μελέτη όσον αφορά την αβεβαιότητα θα πρέπει να οριοθετηθεί μέχρι μια τιμή μικρότερη από την ομογενοποίηση των πολιτικών γιατί αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα η ελάχιστη τιμή της διαφοράς μεταξύ των πολιτικών να είναι μηδέν και να απειρίζεται το μέτρο της σχετικής λύπης της διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους (στην περίπτωση που μελετάται στο Σχήμα 7.22β η αβεβαιότητα μελετάται έως την τιμή 0.70).



Σχήμα 7.22α. Ανάλυση πολιτικής NoExhg (10%) + NorGas (20%) + SwePO (30%) + GhgLim (40%) και πολιτικής NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%) (μη ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης.



Σχήμα 7.22β. Ανάλυση της διαφοράς συσωρευτικής αύξησης κόστους τις πολιτικής NoExhg (10%) + NorGas (20%) + SwePO (30%) + GhgLim (40%) και πολιτικής NoExhg (30%) + NorGas (40%) + SwePO (10%) + GhgLim (20%) (μη ανταγωνιστικές πολιτικές) με κριτήριο α) τη συσωρευτική αύξηση κόστους, β) τη λύπη συσωρευτικής αύξησης κόστους και γ) τη σχετική λύπη συσωρευτικής αύξηση κόστους σε σχέση με την ευρωστία και το επιτόκιο προεξόφλησης.

Συγκρίνοντας την πρώτη ομάδα σχημάτων που περιγράφει τη σύγκριση μεταξύ ανταγωνιστικών πολιτικών (Σχήμα 7.19 και Σχήμα 7.20) με τη δεύτερη ομάδα σχημάτων που περιγράφει τη σύγκριση μεταξύ μη ανταγωνιστικών πολιτικών (Σχήμα 7.21 και Σχήμα 7.22) προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Το Σχήμα 7.21β και το Σχήμα 7.22β σε σύγκριση με το Σχήμα 7.19β και Σχήμα 7.20β (τρίτη περίπτωση) παρουσιάζει τη βασική διαφορά της έλλειψης των (οριζόντιων) νησίδων.
- Οι νησίδες οι οποίες εμφανίζονται λαμβάνουν όλες τιμές μεγαλύτερες της μονάδας γεγονός το οποίο τονίζει την υπεροχή του κόστους της πρώτης πολιτικής έναντι της δεύτερης (έλλειψη ανταγωνιστικών πολιτικών).
- Από την ανάλυση της σχετικής ευαισθησίας που διενεργείται από την τρίτη περίπτωση στο Σχήμα 7.21β και στο Σχήμα 7.22β, φαίνεται ότι η διαφορά της συσωρευτικής αύξησης κόστους στην περίπτωση των μη ανταγωνιστικών πολιτικών δύο και τεσσάρων σεναρίων είναι πιο έντονης σχετικής λύπης σε σχέση με τη διαφορά των ανταγωνιστικών πολιτικών δύο και τεσσάρων σεναρίων αντίστοιχα όπως αυτές παρουσιάστηκαν. Παρόλα αυτά οι νησίδες στο Σχήμα 7.21β και στο Σχήμα 7.22β είναι πιο συμπαγείς.
- Όπως και στις περιπτώσεις στο Σχήμα 7.19β και στο Σχήμα 7.20β έτσι και στο Σχήμα 7.21β και στο Σχήμα 7.22β, η μέγιστη τιμή της σχετικής λύπης παρουσιάζεται για προεξοφλητικό επιτόκιο ίσο με το μηδέν γεγονός το οποίο δικαιολογείται από το ότι η διαφορά κόστους με μεγαλύτερα επιτόκιο προεξόφλησης μειώνεται όσο το προεξοφλητικό επιτόκιο μειώνεται.

7.4.5 Συνάρτησης Ευρωστίας με Δεδομένο Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

7.4.5.1 Γενικά

Μέχρι τώρα εξετάστηκε χονδρικά πως επηρεάζεται η συσωρευτική αύξηση κόστους όταν μεταβάλλεται η ευρωστία μιας πολιτικής. Δηλαδή πρακτικά η ανάλυση που έχει προηγηθεί απαντά στο ερώτημα "Με δεδομένη την ευρωστία (τη μέγιστή

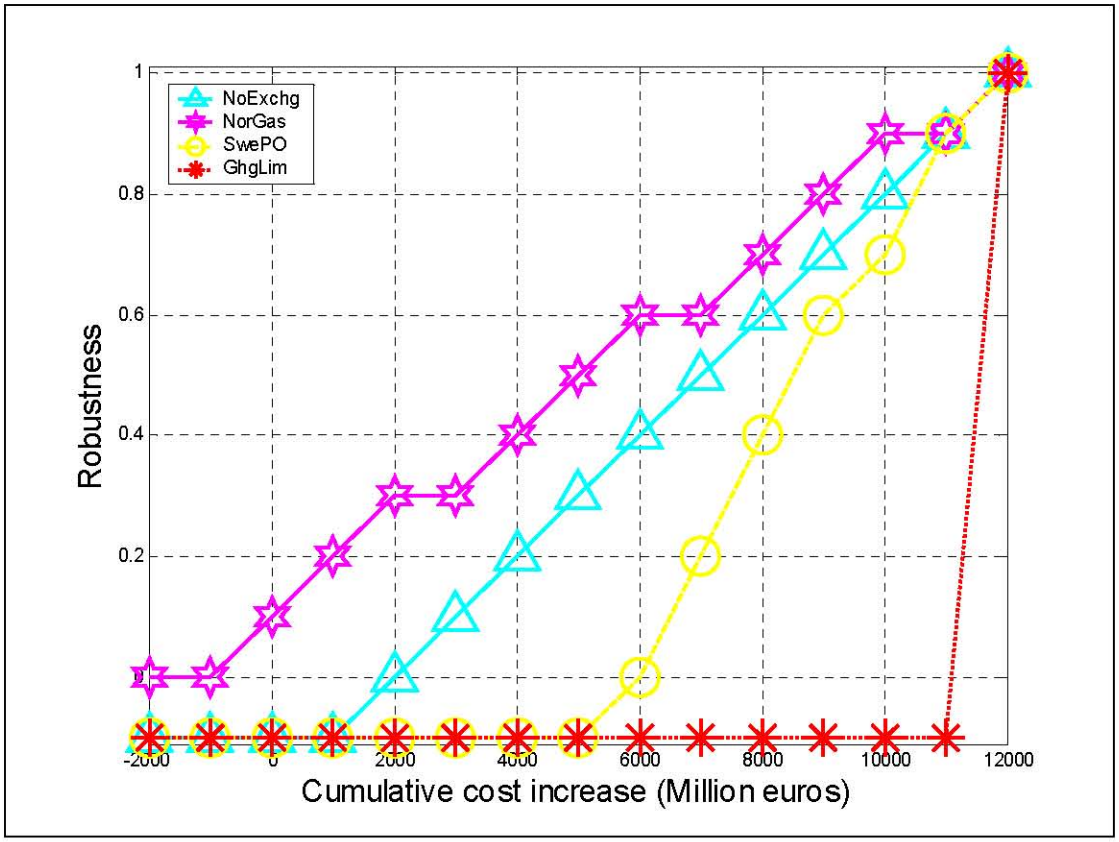
μου αβεβαιότητα δηλαδή) που έχω, ποια είναι η χειρότερη (η μέγιστη δηλαδή) συσωρευτική αύξηση κόστους που μπορεί να μου συμβεί (κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους);".

Στην καθημερινή μας ζωή, τις περισσότερες φορές μας απασχολεί το αντίστροφο πρόβλημα το οποίο πρακτικά διατυπώνεται από την ερώτηση "Θέλω η χειρότερη (η μέγιστη δηλαδή) συσωρευτική αύξηση κόστους να μην υπερβαίνει μια δεδομένη τιμή (κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους). Ποια είναι η μέγιστη ευρωστία (η περισσότερη αβεβαιότητα δηλαδή που επιτρέπεται) που μπορώ να έχω;". Σε αυτό το ερώτημα καλούμαστε να απαντήσουμε στη συνέχεια του Κεφαλαίου.

Στην περίπτωση όπου δεν είναι δυνατή η εύρεση αβεβαιότητας που δίνει κόστος μικρότερο από την τιμή κατωφλίου τότε δίνεται καταχρηστικά η τιμή -0.1 στην ευρωστία.

7.4.5.2 Πολιτική-Σενάριο και Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

Αρχικά, εξετάζεται η περίπτωση επιλογής ενός σεναρίου μόνο. Δηλαδή, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής αποφασίζουν ότι η ενεργειακή πολιτική η οποία θα ακολουθηθεί από τις Σκανδιναβικές χώρες θα αντιπροσωπεύεται κατά 100% από τα σενάρια Όχι Ανταλλαγής (NoExchg), Φυσικού Αερίου Νορβηγίας (NorGas), Πυρηνικής Ενέργειας Σουηδίας (SwePO) και Περιορισμού Αερίων Θερμοκηπίου (GhgLim). Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης για μεταβλητό κατώφλι κόστους ευρωστία το οποίο καλύπτει όλο το εύρος του κατωφλίου συσωρευτικής αύξησης κόστους που έχει παρουσιαστεί μέχρι τώρα σε αυτό το Κεφάλαιο (δηλαδή από $-2\cdot10^9$ € έως $12\cdot10^9$ € με βήμα 10^9 €) παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.23.



Σχήμα 7.23. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για πολιτική ταυτισμένη με ένα από τα σενάρια (πολιτική-σενάριο).

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.23 μπορούν να προκύψουν κάποια πρώτα συμπεράσματα όσον αφορά τα διαγράμματα αυτής της μορφής:

- Από το Σχήμα 7.23, είναι αντιληπτό ότι για τιμές κατωφλίου συσωρευτικής αύξησης κόστους κάτω του μηδενός είναι αδύνατο να βρεθεί ευρωστία (για όλες τις πολιτικές εκτός από την NorGas). Αυξάνοντας το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους, αυτό έχει ως αποτέλεσμα σύμφωνα με την κατάστρωση του προβλήματος να επιτρέπεται να αυξάνει και η μέγιστη αβεβαιότητα.
- Η καμπύλη ευρωστίας σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους είναι μια μονότονη καμπύλη με μέγιστο τη μονάδα και ελάχιστο είτε το μηδέν όταν πρόκειται για εκκίνηση από υπαρκτό σημείο συσωρευτικής αύξησης κατωφλίου για την πολιτική είτε από το -0.1 όταν πρόκειται για μη ρεαλιστική περίπτωση συσωρευτικής αύξησης κόστους.
- Μια μορφή επιβεβαίωσης της ορθότητας των υπολογισμών είναι η σύγκριση των καμπυλών για τις τιμές που λαμβάνουν όταν η ευρωστία λαμβάνει την

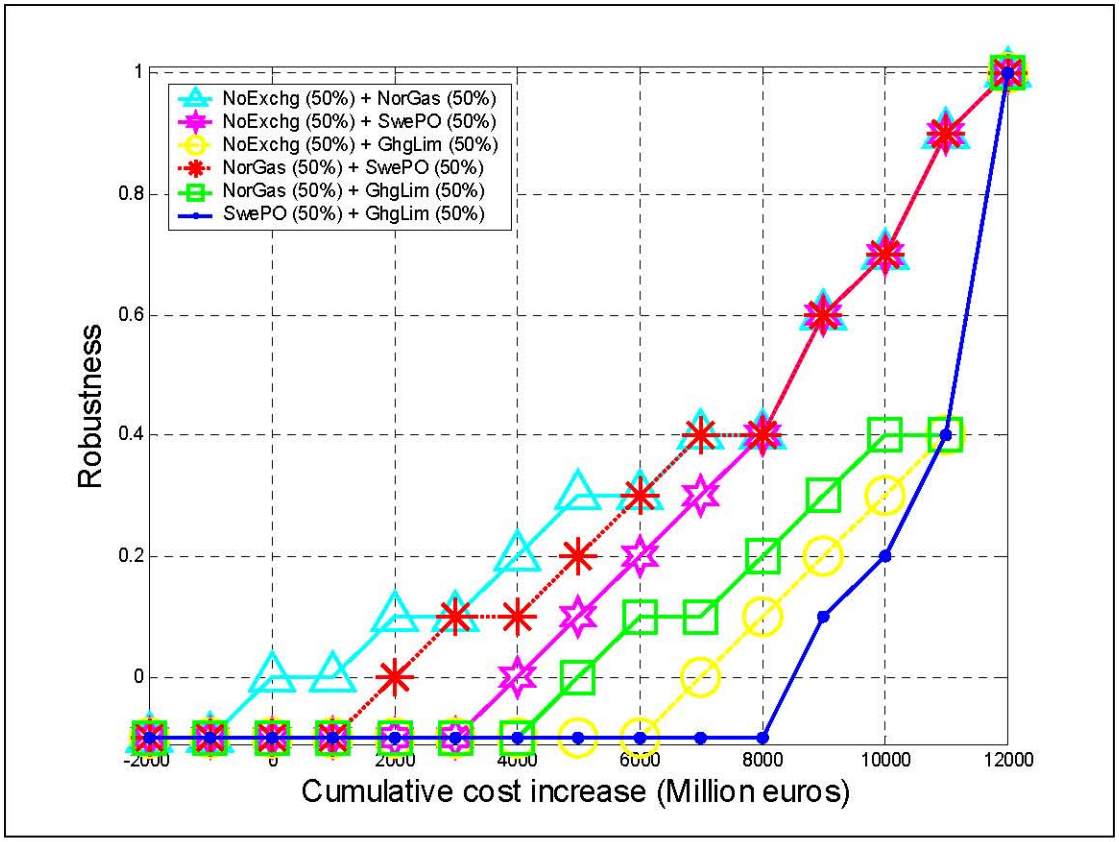
τιμή μηδέν για κάθε καμπύλη. Οι τιμές οι οποίες προκύπτουν είναι οι ίδιες με αυτές που προκύπτουν από το Σχήμα 7.3 όπου παρουσιάζεται το δυικό πρόβλημα.

- Για τη μέγιστη τιμή του κατωφλίου συσωρευτικής αύξησης κόστους το οποίο επιτυγχάνεται στη χειρότερη περίπτωση που είναι η πολιτική-σενάριο GhgLim όλες οι πολιτικές εκφυλίζονται στην πολιτική αυτή (δηλαδή σε ευρωστία μονάδα, απόλυτη ομογενοποίηση πολιτικών, ιδεατή περίπτωση).
- Εξαιτίας της συμπεριφοράς της πολιτικής-σεναρίου της GhgLim (ευθεία γραμμή παράλληλη στον άξονα της ευρωστίας στο Σχήμα 7.3) οι μοναδικές τιμές οι οποίες μπορεί να πάρει είναι είτε ένα για την περίπτωση που λαμβάνεται η τιμή της συσωρευτικής αύξησης κατωφλίου είτε -0.1 σε όλες τις άλλες περιπτώσεις (όπως εμφανίζεται και στο Σχήμα 7.23).
- Συγκρίνοντας το Σχήμα 7.3 και το Σχήμα 7.23 προκύπτει το ίδιο συμπέρασμα αλλά με διαφορετική πορεία δηλαδή η πολιτική-σενάριο η οποία παρουσιάζει το μικρότερο κόστος είναι το σενάριο NorGas (για δεδομένο κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους επιτρέπει χαμηλότερη ευρωστία) ενώ η πολιτική-σενάριο με το μεγαλύτερο κόστος είναι το σενάριο GhgLim.

7.4.5.3 Πολιτική Δύο Σεναρίων και Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

Η πολιτική σενάριο είναι μια ιδεατή περίπτωση όπου ένα σενάριο αποτελεί και μια πολιτική. Παρόλα αυτά, τις περισσότερες φορές η επιλογή μιας πολιτικής στηρίζεται σε μια επιλογή διαφόρων μέτρων με αποτέλεσμα οι πολιτικές που αποφασίζονται τόσο σε θέματα επιχειρήσεων όσο και ατομικά θέματα να είναι ένας συνδυασμός σεναρίων.

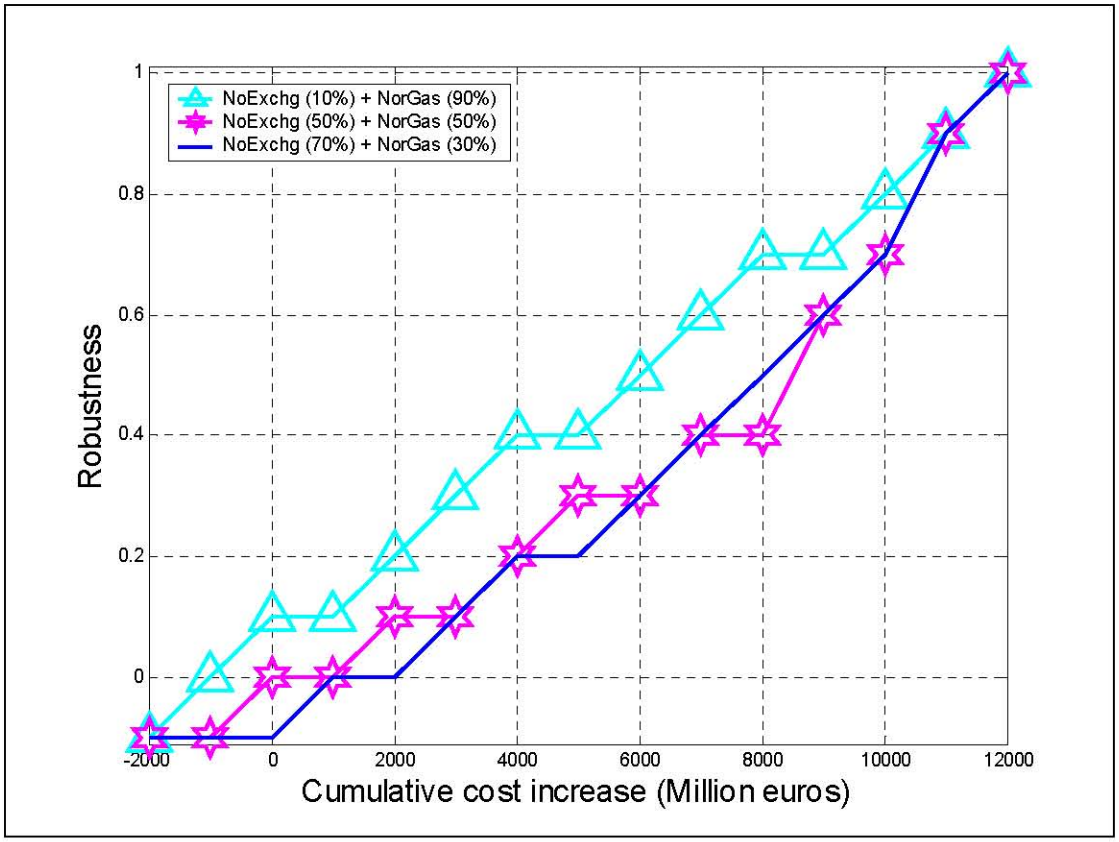
Στην περίπτωση αυτή εξετάζονται πολιτικές οι οποίες λαμβάνουν υπόψη δύο σενάρια (πολιτική δύο σεναρίων). Στο Σχήμα 7.24 παρουσιάζονται όλες οι πιθανές πολιτικές δύο σεναρίων (με συμμετοχή 50% του ενός και 50% του άλλου) οι οποίες είναι δυνατές.



Σχήμα 7.24. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για πολιτικές δύο σεναρίων με συμμετοχή 50%-50%.

Από το Σχήμα 7.24 μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι οι πολιτικές δύο σεναρίων που περιλαμβάνουν το σενάριο GhgLim έχουν διαφορετικό ενδιάμεσο σημείο τομείς από τις πολιτικές που δεν περιέχουν ως σενάριο μεταξύ των δύο το σενάριο GhgLim (περίπτωση διαχωρισμού που έχει παρουσιαστεί παραπάνω). Ανεξάρτητα όμως από τις συνιστώσες των πολιτικών με την αύξηση του κατωφλίου της συσωρευτικής αύξησης κόστους προς τη μέγιστη τιμή όλες οι πολιτικές συγκλίνουν κάτι το οποίο είναι λογικό αφού στο σημείο αυτό που είναι και το σημείο μέγιστης αβεβαιότητας υπάρχει μια ομογενοποίηση των πολιτικών ως προς το πιθανό σύνολο πιθανών συνδυασμών σεναρίων που περιλαμβάνουν.

Ενδιαφέρον στην περίπτωση των πολιτικών δύο σεναρίων έχει η παρουσίαση των διαγραμμάτων όταν μεταβάλλονται τα ποσοστά συμμετοχής των σεναρίων. Για τις πολιτικές στο Σχήμα 7.7, στο Σχήμα 7.25 παρουσιάζεται το διάγραμμα της ευρωστίας.



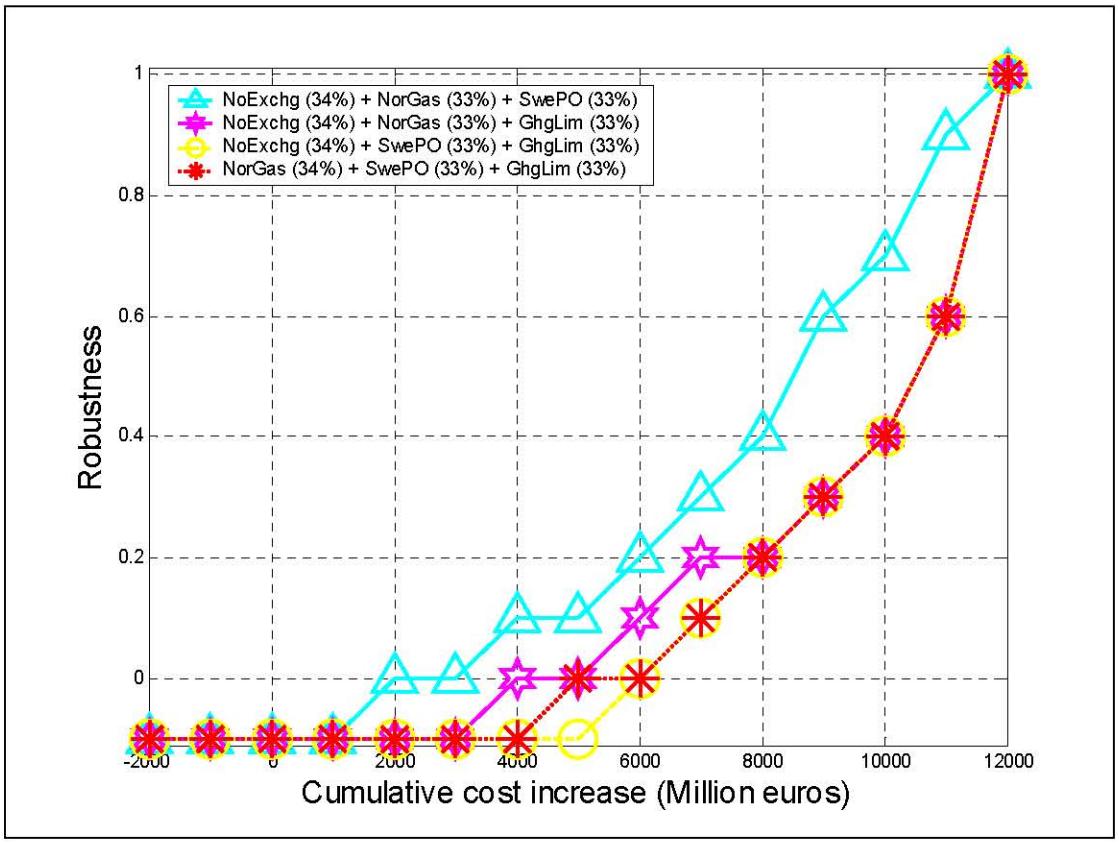
Σχήμα 7.25. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για πολιτικές δύο σεναρίων όπου μεταβάλλεται το ποσοστό συμμετοχής τους.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.25 παρουσιάζεται η μεταβολή της ευρωστίας ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής της κάθε πολιτικής. Επίσης και σε αυτά τα διαγράμματα ευρωστίας είναι εμφανής η παρουσία των ανταγωνιστικών καμπυλών. Πρόκειται για τις πολιτικές NoExchg (70%) + NorGas (30%) και NoExchg (50%) + NorGas (50%). Για περιοχές του κατωφλίου συσωρευτικής αύξησης κόστους υπερτερεί η μια έναντι της άλλης ως προς την ευρωστία και αντίστροφα. Η μελέτη αυτού του είδους των διαγραμμάτων είναι απαραίτητη πριν από τη λήψη οποιασδήποτε απόφασης σχετικά με τις ανταγωνιστικές πολιτικές.

7.4.5.4 Πολιτική Τριών Σεναρίων και Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

Μέχρι τώρα εξετάστηκε πως το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους επηρεάζει τις πολιτικές οι οποίες αποτελούνται από δύο σενάρια. Στην περίπτωση

των πολιτικών τριών σεναρίων, η συμπεριφορά αυτών των πολιτικών ομοιάζει με τη συμπεριφορά των πολιτικών δύο σεναρίων στη γενικότερη μορφή της. Στο Σχήμα 7.25 παρουσιάζονται μερικές πιθανές δυνατές πολιτικές τριών σεναρίων (αυτές οι οποίες παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 7.9 για ευκολότερη σύγκριση αποτελεσμάτων και εξαγωγή συμπερασμάτων).

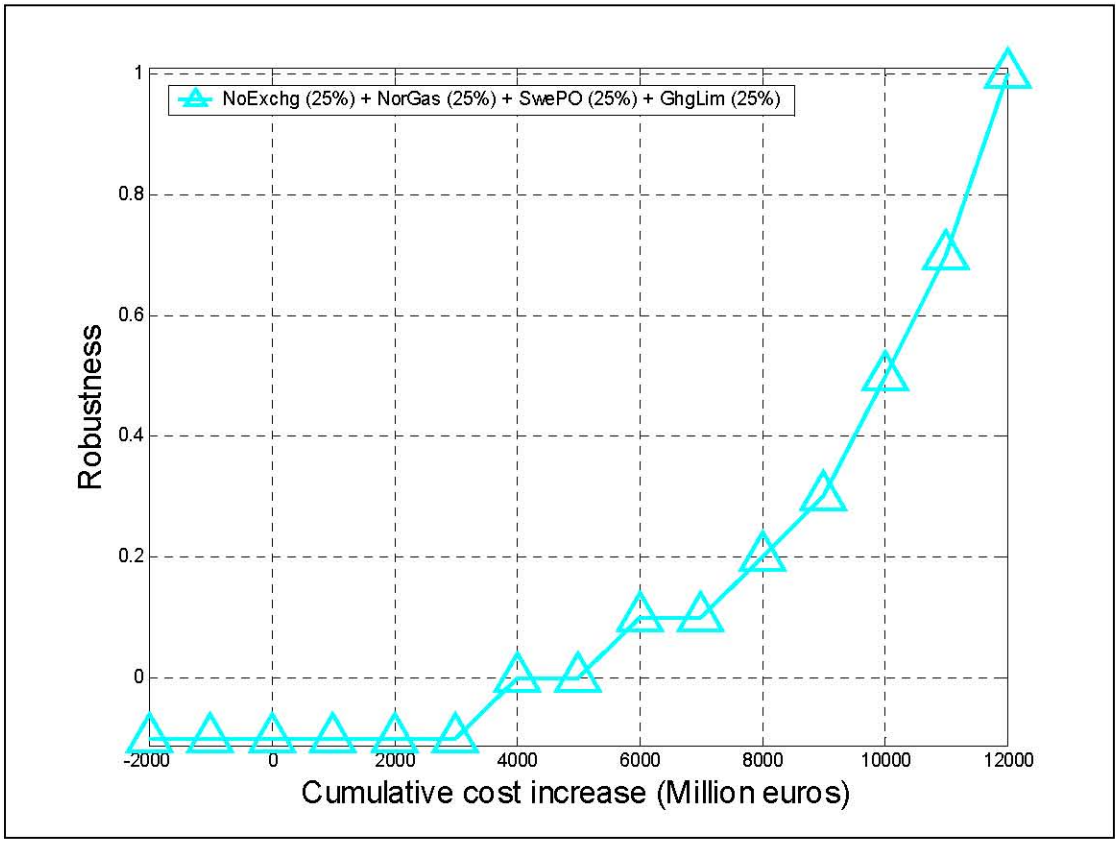


Σχήμα 7.26. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για ποσοστά συμμετοχής σεναρίων σε πολιτικές τριών σεναρίων.

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τις πολιτικές δύο σεναρίων και τις πολιτικές τριών σεναρίων προκύπτει ο διαχωρισμός μεταξύ των πολιτικών οι οποίες περιέχουν το σενάριο GhgLim και στις πολιτικές οι οποίες δεν το περιέχουν. Το σενάριο GhgLim είναι αυτό το οποίο καθορίζει τελικά τη συμπεριφορά μιας πολιτικής αφού πρόκειται για το σενάριο με το μεγαλύτερο κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους. Πολιτικές οι οποίες περιέχουν το σενάριο GhgLim λαμβάνουν μικρότερες τιμές ευρωστίες για δεδομένο κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους (πιο απαιτητικές ως προς τη γνώση).

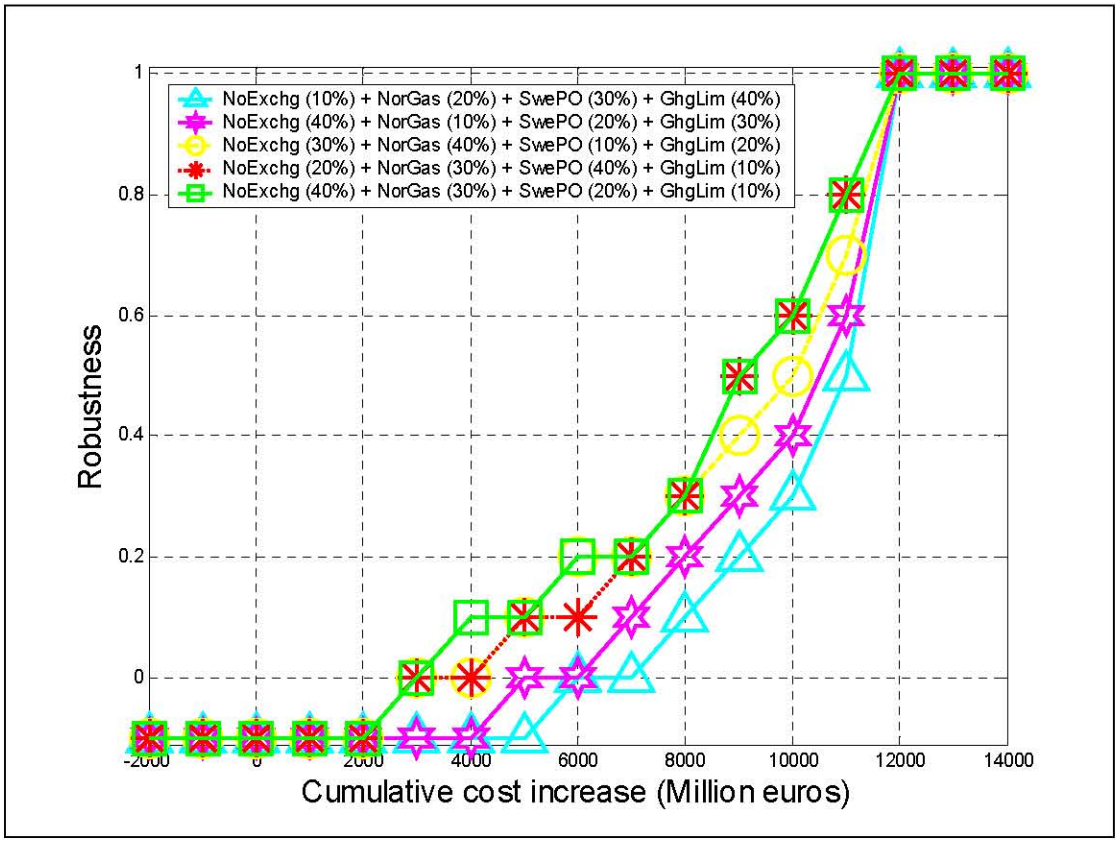
7.4.5.5 Πολιτική Τεσσάρων Σεναρίων και Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

Η περίπτωση πολιτικών τεσσάρων σεναρίων είναι η πιο ρεαλιστική αφού ανταποκρίνεται και περισσότερο στην πραγματικότητα. Η χάραξη επιτυχημένων πολιτικών περιλαμβάνει ένα συγκερασμό σεναρίων και απόψεων. Έτσι λοιπόν η πολιτική που αποφασίζεται θα περιέχει μέτρα και αποφάσεις από όλα τα δυνατά σενάρια. Παράδειγμα της πιο απλής πολιτικής τεσσάρων σεναρίων είναι αυτό το οποίο παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.27 (η σύνθεση των σεναρίων που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 7.10). Με τον όρο απλούστερη πολιτική τεσσάρων σεναρίων καλείται εκείνη η πολιτική τεσσάρων σεναρίων της οποίας τα σενάρια κατανέμονται και συμμετέχουν κατά τον ίδιο βαθμό στην αποφασισμένη πολιτική.



Σχήμα 7.27. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για την απλούστερη περίπτωση πολιτικής τεσσάρων σεναρίων.

Σε σχέση με τις πολιτικές οι οποίες έχουν προαναφερθεί, η διαφορά των πολιτικών τεσσάρων σεναρίων είναι ότι πάντα περιέχεται το σενάριο GhgLim. Στο Σχήμα 7.28 παρουσιάζονται διάφορες πιθανές δυνατές περιπτώσεις πολιτικών τεσσάρων (αυτές οι οποίες παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 7.11). Ειδικά για την περίπτωση στο Σχήμα 7.28 το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους λαμβάνει τιμές έως $14 \cdot 10^9$ € για την εξαγωγή συμπερασμάτων (τιμή η οποία δε λαμβάνεται από καμία πολιτική σεναρίων).



Σχήμα 7.28. Ευρωστία σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξηση κόστους για δυνατές πιθανές περιπτώσεις πολιτικών τεσσάρων σεναρίων.

Παρατηρώντας το Σχήμα 7.27 και το Σχήμα 7.28 μπορούν να προκύψουν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα:

1. Παρατηρώντας τις μορφές της ευρωστίας σε σχέση με το κατώφλι συσωρευτικής αύξησης κόστους για διάφορες πιθανές πολιτικές τεσσάρων σεναρίων είναι να δυνατό να παρατηρηθεί ότι η μορφή τους είναι μια καμπύλη η οποία με αύξηση του κατωφλίου συσωρευτικής αύξησης κόστους τείνει προς τη μέγιστη τιμή ευρωστίας. Εμφανίζει δηλαδή περισσότερα

σημεία ασυνεχειών με αποτέλεσμα η ανάλυση τέτοιων καμπυλών να απαιτεί περισσότερο μελέτη από τις περιπτώσεις που παρουσιάστηκαν μέχρι τώρα.

2. Για τιμές μεγαλύτερες από το δυνατό εύρος τιμών κατωφλίου συσωρευτικής αύξησης κόστους η τιμή που λαμβάνει η ευρωστία είναι μονάδα. Αυτό οφείλεται στην εξήγηση ότι η χειρότερη (η μέγιστη δηλαδή) συσωρευτική αύξηση κόστους και στη χειρότερη περίπτωση ευρωστίας (ίση με μονάδα) δεν υπερβαίνει τη δεδομένη τιμή κατωφλίου συσωρευτικής αύξησης κόστους.
3. Όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό συμμετοχής του σεναρίου GhgLim στην αποφασισμένη ενεργειακή πολιτική, τόσο μικρότερο είναι το απαιτούμενο σημείο ευρωστίας.
4. Οι καμπύλες ανάλογα με το ποσοστό συμμετοχής του κάθε σεναρίου στην πολιτική παρουσιάζουν τη δική τους συμπεριφορά. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα για άλλες τιμές αβεβαιότητας να επικρατεί μια πολιτική έναντι μιας άλλης και ανάποδα (περίπτωση $2^{ης}$ και $3^{ης}$ πολιτικής στο Σχήμα 25, περίπτωση $4^{ης}$ και $3^{ης}$ πολιτικής στο Σχήμα 7. 28) γεγονός που κάνει την επιλογή μεταξύ αυτών των πολιτικών ιδιαίτερα δύσκολη (ανταγωνιστικές πολιτικές).

Όλα τα προγράμματα τα οποία έχουν εκτελεστεί είναι ιδιαίτερα χρονοβορά αφού το πλήθος των υπολογισμών και το πλήθος των πιθανών δυνατών πολιτικών του συνόλου αυξάνει εκθετικά με την αύξηση της ζητούμενης ακρίβειας.

7.5 Συμπεράσματα, Επισκόπηση Κεφαλαίου και Μελλοντική Επέκταση

Από την παραπάνω ανάλυση, προκύπτει ότι κατά την επιλογή πολιτικών οι οποίες αποτελούνται από σύνθεση σεναρίων (στην καθημερινή μας ζωή οι αποφάσεις που καλούμαστε να πάρουμε σε ένα σύνολο ζητημάτων που μας απασχολούν αλλά και αποφάσεις για σημαντικά ζητήματα πολιτικής, οικονομίας και κοινωνικών προβλημάτων απαιτούν το συγκερασμό απόψεων-σεναρίων) απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην αξιολόγηση και στην τελική απόφαση αφού τις περισσότερες περιπτώσεις καλούμαστε να λάβουμε αποφάσεις υπό έντονη αβεβαιότητα.

Αρωγός σε μια τέτοια επιτυχημένη προσπάθεια είναι η χρήση των εργαλείων που παρουσιάστηκαν παραπάνω και αποτελούν το προϊόν-έξοδο αυτής της

Μεταπτυχιακής Εργασίας (λογισμικό εφαρμογής). Δηλαδή με τη χρήση, που έχει προταθεί και παρουσιαστεί εκτενώς παραπάνω,

1. της Συνάρτησης Κατωφλίου Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους με Δεδομένη Ευρωστία,
2. της Συνάρτησης Λύπης Κατωφλίου Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους με Δεδομένη Ευρωστία,
3. της Μελέτης Ανταγωνιστικών Πολιτικών με τη Χρήση της Συνάρτησης Λύπης Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους,
4. της Μελέτης Μη Ανταγωνιστικών Πολιτικών με τη Χρήση της Συνάρτησης Λύπης Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους
5. και της Συνάρτησης Ευρωστίας με Δεδομένο Κατώφλι Συσωρευτικής Αύξησης Κόστους

η απόφαση μεταξύ διαφορετικών πολιτικών υπό καθεστώς έντονης αβεβαιότητας διευκολύνεται (επιλογή πολιτικής, ευστάθεια πολιτικής, σύγκριση πολιτικών, ευστάθεια διαφοράς πολιτικών, ανάλυση ανταγωνιστικών και μη ανταγωνιστικών περιοχών, ανάλυση νησίδων, ανάλυση οριζοντίων ζωνών κτλ).

Όπως παρουσιάστηκε σε αυτό το Κεφάλαιο, το λογισμικό εφαρμογής το οποίο αναπτύχθηκε είναι ικανό να παρουσιάσει μια σειρά αποτελεσμάτων για περιβάλλοντα και ζητήματα έντονης αβεβαιότητας όταν τροφοδοτηθεί με τις κατάλληλες εισόδους. Οι έξοδοι του λογισμικού εφαρμογής, έπειτα, λαμβάνονται από τους υπεύθυνους της λήψης των αποφάσεων οι οποίο σταθμίζοντας τα αποτελέσματα τα οποία προέκυψαν σε συνδυασμό με τις εξωτερικές συνθήκες (οι οποίες δεν μπορούν να απεικονιστούν μαθηματικά ή να συμπεριληφθούν στο μοντέλο) λαμβάνουν την τελική απόφασης για την ακολουθούμενη πολιτική. Ως μελλοντική επέκταση μπορεί να θεωρηθεί η μελλοντική ανάπτυξη του μοντέλου έτσι ώστε να μπορεί να αξιολογεί γενικότερα τον εμφανιζόμενο ενεργειακό κίνδυνο. Ζητήματα στα οποία μπορεί επιτυχώς να ανταποκριθεί είναι τα ζητήματα διασφάλισης ενεργειακού εφοδιασμού τόσο της Ευρωπαϊκής Ένωσης όσο και άλλων κρατών (γενικεύοντας με αυτόν τον τρόπο την πιλοτική εφαρμογή του μοντέλου για την περίπτωση του ενεργειακού ανεφοδιασμού των Σκανδιναβικών χωρών που παρουσιάστηκε σε αυτήν την Μεταπτυχιακή εργασία).

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

ΕΦΑΡΜΟΖΟΝΤΑΣ ΤΗΝ ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΕΥΡΩΣΤΗΣ ΛΗΨΗΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ

Α.1 Στρατηγική Εύρωστης Λήψης Απόφασης

Συχνά στην ιστορία της επιστήμης, τα νέα εργαλεία έχουν προωθήσει νέους τρόπους αντίληψης του κόσμου στον οποίο ζούμε. Σήμερα, ο υπολογιστής έχει γίνει ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται παντού και συνέχεια αναδιαμορφώνοντας τη σκέψη μας σε πολλούς τομείς. Ειδικότερα, η τεχνολογία μπορεί να αλλάξει εντελώς τον τρόπο με τον οποίο προγραμματίζουμε το μέλλον μας. Ο υπολογιστής δε θα λύσει τα δυσεπίλυτα προβλήματα της πρόβλεψης (αν και σε μερικές περιοχές μπορεί να βελτιώσει τη δυνατότητά μας να προβλέπουμε), αλλά αντ' αυτού μπορεί να επιτρέψει στους ιθύνοντες να προβληματιστούν σε μια πλήρως διαφορετική και λογικότερη βάση. Από το να προβλέψουν αρχικά το μέλλον προκειμένου να ενεργήσουν σε αυτό, οι ιθύνοντες μπορούν τώρα να κερδίσουν μια συστηματική κατανόηση των καλύτερων βραχυπρόθεσμων επιλογών τους για το μακροπρόθεσμο μέλλον ελλείψει οποιωνδήποτε αξιόπιστων προβλέψεων. Σε αυτό το παράρτημα εισάγεται μια νέα προσέγγιση στην ανάλυση μακροπρόθεσμης πολιτικής (Long-Term Policy Analysis ή LTPA) βασισμένη σε μεθόδους εύρωστης λήψης απόφασης οι οποίες υποστηρίζονται από υπολογιστές [108]. Σε αυτήν την μελέτη περιγράφονται οι γενικές μέθοδοι και η τεχνολογία που χρησιμοποιείται. Στη συνέχεια, καταδεικνύεται ένα παράδειγμα εφαρμογής εύρωστης λήψης απόφασης στο πρόβλημα της παγκόσμιας ικανότητας υποστήριξης αποφάσεων (global sustainability).

Α.1.1 Λήψη Απόφασης υπό Καθεστώς Έντονης Αβεβαιότητας

Η ισχύς του σύγχρονου υπολογιστή τον καθιστά ικανό να αναπτύξει πλήθος μεθόδων LTPA που έχουν αναλυθεί τα τελευταία χρόνια επιτρέποντας έτσι την κατασκευή εύρωστων μεθόδων απόφασης. Αυτές οι μέθοδοι μπορούν να υπερνικήσουν τους προηγούμενους περιορισμούς σε LTPA με την παροχή αναλυτικής υποστήριξης στη συστηματική ανθρώπινη αξιολόγηση των επιλογών που έχουν να κάνουν με την πολλαπλότητα των πιθανών μελλοντικών γεγονότων. Εν συντομία, μια εύρωστη προσέγγιση απόφασης επιτρέπει στους αναλυτές να χρησιμοποιήσουν τον υπολογιστή για να σχεδιάσουν ένα ευρύ φάσμα πιθανών πορειών στο μακροπρόθεσμο μέλλον. Ψάχνουν έπειτα τις εύρωστες βραχυπρόθεσμες πολιτικές επιλογές δηλαδή εκείνες που όταν συγκρίνονται με τις εναλλακτικές λύσεις αποδίδουν αποδοτικά σε ένα ευρύ φάσμα μελλοντικών γεγονότων χρησιμοποιώντας πολλές διαφορετικές τιμές για την αξιολόγηση της απόδοσης. Συχνά, οι στρατηγικές είναι εύρωστες επειδή είναι προσαρμοστικές δηλαδή παρουσιάζουν την εξέλιξη σε σχέση με τη ροή νέων πληροφοριών.

Α.1.2 Συμπληρωματικές Ικανότητες Ανθρώπων και Υπολογιστών

Η εύρωστη λήψη αποφάσεων με την υποστήριξη υπολογιστών συνδυάζει τις καλύτερες ικανότητες των ανθρώπων και των μηχανών. Οι άνθρωποι έχουν την ασύγκριτη δυνατότητα να αναγνωρίζουν πιθανά σενάρια, να αποκομίζουν συμπεράσματα, να διατυπώνουν νέες υποθέσεις και να διαισθάνονται πιθανές λύσεις σε φαινομενικά δυσεπίλυτα προβλήματα. Οι άνθρωποι κατέχουν επίσης διάφορες πηγές γνώσης που είναι υπονοούμενες (tacit), ποιοτικές (qualitative), εμπειρικές (experiential) και πραγματικές (pragmatic) οι οποίες δεν μπορούν εύκολα να περιγράφουν με τους παραδοσιακούς ποσοτικούς φορμαλισμούς. Εργαζόμενοι χωρίς υπολογιστές, οι άνθρωποι μπορούν συχνά επιτυχώς να διαλογιστούν σε προβλήματα έντονης ή βαθιάς αβεβαιότητας, υπό τον όρο ότι η διαίσθησή τους λειτουργεί ανεκτά καλά. Μπορούν να υιοθετήσουν αφηγηματικές διανοητικές προσομοιώσεις για να εξετάσουν πως οι στρατηγικές θα αποδώσουν σε σύνθετες καταστάσεις [109], [110]. Οι ειδικοί ιθύνοντες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αναλογίες από το παρελθόν

(προϊστορία) για να προτείνουν ποιες στρατηγικές μπορούν να λειτουργήσουν αποτελεσματικότερα στο μέλλον [111]. Οι επαναληπτικές διαδικασίες ομάδας (iterative group processes) μπορούν να επιλύσουν πολλά προβλήματα παρόμοιων πληροφοριών. Χρησιμοποιώντας τη δυνατότητά τους για δημιουργία πιθανών σεναρίων (facility for storytelling), οι άνθρωποι μπορούν να προκαλέσουν ο ένας τον άλλον με σενάρια τύπου "τι θα γίνει εάν" ("what if" scenarios) ελέγχοντας έτσι πιθανές αδυναμίες στα προτεινόμενα σχέδια. Αυτές οι διαδικασίες πετυχαίνουν επειδή η καλύτερη απάντηση στην έντονη αβεβαιότητα είναι συχνά μια στρατηγική που, παρά τη βελτιστοποίηση για το συγκεκριμένο προβλεφθέν μελλοντικό γεγονός, προστατεύεται καλά ενάντια σε ποικιλία διαφορετικών μελλοντικών γεγονότων και εξελίσσεται κατά τη διάρκεια του χρόνου καθώς διατίθενται νέες πληροφορίες. Οι άνθρωποι σχεδιάζουν τις επιτυχείς προσαρμοστικές στρατηγικές με τη χρησιμοποίηση διαθέσιμων πληροφοριών για να υποβάλουν επανειλημμένα τις υποψήφιες στρατηγικές στην εξέταση με τη χρήση μιας σειράς μελλοντικών απρόβλεπτων εξόδων.

Αυτές οι χρονοδοκιμασμένες διαδικασίες (time-tested processes) μπορούν να αποτύχουν, εντούτοις, όταν οι άνθρωποι βρίσκονται αντιμέτωποι με σύνθετα μελλοντικά γεγονότα τα οποία η προηγούμενη εμπειρία και διαίσθηση δεν παρέχουν έναν αξιόπιστο οδηγό. Υπό τους όρους της πολυπλοκότητας, οι άνθρωποι χάνουν γρήγορα τη δυνατότητα να ακολουθήσουν μακροχρόνιες αιτιώδεις συνάφειες (causal links) και ανταγωνιστικές δυνάμεις που μπορούν να οδηγήσουν το μέλλον κατά μήκος της μιας ή της άλλης πορείας. Ο Klein αναφέρει ότι οι διανοητικές προσομοιώσεις των ανθρώπων είναι γενικά αρκετά απλές. Περιέχουν συνήθως λιγότερες από τρεις βασικές μεταβλητές και λιγότερες από έξι μεταβάσεις από μια κατάσταση στην επόμενη [111]. Η δυνατότητά τους να επισημάνουν τις επιπτώσεις των σεναρίων "τι θα γίνει εάν" πολλές φορές αποτυγχάνουν. Κατά την ανάπτυξη δραστηριοτήτων στις επιχειρήσεις όπου η μεμονωμένη διαίσθηση δεν μπορεί να υιοθετηθεί εύκολα ή να μοιραστεί, οι άνθρωποι μπορούν να βρούν ακόμα δυσκολότερη την έρευνα με διανοητικές προσομοιώσεις όταν απαιτείται προσπάθεια ομάδας, ακόμη και στις σπάνιες περιπτώσεις όπου τα άτομα μοιράζονται τις ίδιες αξίες και προσδοκίες για το μέλλον. Κατά συνέπεια, μεταξύ των επιχειρήσεων με τις ποικίλες ημερήσιες διατάξεις ή εντός των κοινοτήτων που έχουν εκτεταμένα

ενδιαφέροντα, γίνεται σχεδόν αδύνατη η συμμετοχή σε ένα επίσημο εμπόριο ιδεών (formal commerce of ideas) χρησιμοποιώντας τα μέσα που προαναφέρθηκαν.

Λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι οι άνθρωποι έχουν περιορίσει την ικανότητα να επεξεργάζονται και να διατηρούν πληροφορίες, οι υπολογιστές υπερέχουν στο χειρισμό μεγάλων ποσοτήτων δεδομένων. Μπορούν να επεξεργάζονται χωρίς λάθη, να χειρίζονται τις επιπτώσεις υποθέσεων ανεξάρτητα από το πόσο μακροχρόνιες ή σύνθετες είναι οι αιτιώδεις αλυσίδες και να αναζητούν παραδείγματα εξαιρέσεων στις υποθέσεις που έχουν επιλεγεί. Η διαδικασία της προσομοίωσης σε υπολογιστές διαμορφώνει συχνά σαφή ερμηνεία δυνάμεων πολλών ελλοχευουσών υποθέσεων. Οι παραδοσιακές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στους υπολογιστές για να υποστηρίξουν την επιλογή πολιτικής απαιτούν από τους αναλυτές να κάνουν ορισμένες βασικές υποθέσεις, ειδικότερα ότι έχει να κάνει με προσυμφωνηθέντα μοντέλα (widely agreed on models), τιμές και πιθανότητες για εναλλακτικά μελλοντικά γεγονότα. Κατά συνέπεια, οι αναλυτές αντιμετώπισαν το δίλλημα του αν θα μπορούσαν να διαλογιστούν με τους υπολογιστές και να απορρίψουν τις βασικές αρχές της επιτυχούς χρήσης ανθρώπινων προσεγγίσεων για να εξετάσουν τα προβλήματα της έντονης αβεβαιότητας ή του αν θα μπορούσαν να εμείνουν σε αυτές τις προσεγγίσεις με τη χρήση μόνο του ανθρώπινου συλλογισμού και να χάσουν τη δυνατότητα των υπολογιστών.

Α.1.3 Κατασκευάζοντας μια Νέα Προσέγγιση

Τα τελευταία χρόνια, οι ικανότητες των σύγχρονων υπολογιστών έχουν κάνει εφικτές πολλές νέες ποσοτικές προσεγγίσεις στα πανταχού παρόντα προηγουμένως δυσεπίλυτα προβλήματα της λήψης αποφάσεων υπό έντονη αβεβαιότητα. Η πολιτική ανάλυση και τα ενσωματωμένα μοντέλα αξιολόγησης της βιβλιογραφίας υπογραμμίζουν όλο και περισσότερο την ανάγκη ανάπτυξης υπολογιστικών προσεγγίσεων για πολυσεναριακές προσομοιώσεις στις οποίες οι αναλυτές χρησιμοποιούν μοντέλα για να κατασκευάσουν διαφορετικά σενάρια [112], [51], [108], [113], [114]. Από το να αθροιστούν τα αποτελέσματα που χρησιμοποιούν τις πιθανολογικές σταθμίσεις, εδώ χρησιμοποιείται η πολλαπλότητα των σεναρίων για να προβάλει τα επιχειρήματα από τις συγκρίσεις των πλήρως διαφορετικών,

εναλλακτικών περιπτώσεων. Απάντηση στη λήψη αποφάσεων με τη λήψη πολλαπλών σεναρίων δίνουν οι στατιστικοί και οι μαθηματικοί που έχουν αρχίσει να μελετούν ερευνητικά στα πλαίσια της παγκόσμιας βιβλιογραφία τις ανακριβείς και διφορούμενες πιθανότητες (imprecise and ambiguous probabilities) [115] που επιτρέπουν στους αναλυτές να εξετάσουν τους περιορισμούς της θεωρίας πιθανότητας χωρίς να υποθέτουν μεγαλύτερη ακρίβεια πληροφοριών για πραγματικές τιμές πιθανότητας από ότι είναι εξασφαλισμένη. Η εφαρμοσμένη μηχανική και η έρευνα διαδικασιών έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούν το κριτήριο της ευρωστίας, σε αντιδιαστολή με τη βελτιστοποίηση (optimality), για να εξετάσουν τέτοιες καταστάσεις ασάφειας [116], [107], [15]. Οι πρόοδοι στην τεχνολογία πληροφοριών έχουν οδηγήσει επίσης στην έκρηξη των νέων προσεγγίσεων στην προσομοίωση υπολογιστών, όπως η μοντελοποίηση βασισμένη σε πράκτορες (agent-based modeling) [117].

Η προσέγγιση η οποία προτείνεται σε αυτό το Παράρτημα σχετικά με την εύρωστη λήψη αποφάσεων γίνεται εφικτή μέσω της μίξης των πολυσεναριακών προσεγγίσεων προσομοίωσης (multiscenario simulation approaches) με την έννοια της διερευνητικής μοντελοποίησης (exploratory modeling) [59], [118], [60], [119], [120], [121], [150]. Η διερευνητική μοντελοποίηση υπογραμμίζει ένα εννοιολογικό πλαίσιο για τα πειράματα υπολογιστών που στόχο έχουν τη μάθηση από τον κόσμο, ιδιαίτερα με την εκμετάλλευση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραγόμενων από υπολογιστή απεικονίσεων, όπου οι άνθρωποι βοηθούν στη διαμόρφωση των υποθέσεων, για τις ιδιότητες ενός συνόλου υπολογιστικών πειραμάτων και των αναζητήσεων υπολογιστικής συμπεριφοράς στο σύνολο των υποθέσεων που εξετάζονται συστηματικά. Όταν εφαρμόζεται η εύρωστη ανάλυση απόφασης, η διερευνητική μοντελοποίηση χρησιμοποιεί τον υπολογιστή για να δημιουργήσει ένα μεγάλο σύνολο πιθανών μελλοντικών σεναρίων. Εδώ, ο όρος "σενάριο" χρησιμοποιείται για να περιγράψει την εικασία του πως οι παγκόσμιες εργασίες που συνδυάστηκαν με μια επιλογή μεταξύ πολλών εναλλακτικών ανθρωπίνων στρατηγικών υιοθετούνται για να επηρεάσουν τις εκβάσεις. Η προσέγγιση χρησιμοποιεί έπειτα τεχνικές απεικόνισης και αναζήτησης των υπολογιστών για να εξαχθούν οι πληροφορίες από αυτό το σύνολο σεναρίων που είναι χρήσιμο στη διάκριση μεταξύ των εναλλακτικών επιλογών απόφασης.

Οι εύρωστες μέθοδοι απόφασης είναι κατάλληλες για πολλά προβλήματα που περιλαμβάνουν τη λήψη αποφάσεων υπό όρους έντονης αβεβαιότητας αλλά είναι ιδιαίτερα ισχυρά εργαλεία για LTPA. Όταν εφαρμόζεται στην παγκόσμια, μακροπρόθεσμη πολιτική ανάλυση, μια εύρωστη προσέγγιση απόφασης στοχεύει να παράγει συναίνεση μεταξύ της βραχυπρόθεσμης δράσης πολλών διαφορετικών συμβαλλόμενων μερών σε μια απόφαση. Αυτό απαιτεί αναγνώριση των πολιτικών επιλογών των σύμφωνων με τις διαφορετικές προσδοκίες των συμβαλλόμενων μερών για το μέλλον και τη σειρά των τιμών που λαμβάνουν.

Η παραδοσιακή πρόβλεψη βασίζεται στην ανάλυση πολιτικής με τη χρήση πλαισίων "εάν-τότε" (if-then framework). Εάν η διαμόρφωση του προβλήματος ως συνάρτηση αξίας και το μοντέλο είναι σωστά, κατόπιν οι σχεδιαστές πολιτικής πρέπει να λάβουν κάποια μέτρα. Αντίθετα, οι εύρωστες μέθοδοι απόφασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις βραχυπρόθεσμες πολιτικές ενέργειες που ισχύουν για την πλήρη σειρά των πιθανών μελλοντικών γεγονότων που αναγνωρίζονται ως χρήσιμες και έγκυρες από όλα τα ενδιαφερόμενα συμβαλλόμενα μέρη. Παραδείγματος χάριν, οι αναλυτές μπορούν να υποστηρίξουν ότι μια ορισμένη βραχυπρόθεσμη στρατηγική αποδίδει πάντα καλά ανεξάρτητα των μελλοντικών γεγονότων που μπορούν να συμβούν. Μια ανάλυση που επιδιώκει μια εύρωστη απόφαση θα χρησιμοποιούσε τον υπολογιστή σε μία προσπάθεια να μιμηθεί τέτοιες υποθέσεις με την έρευνα για τα πιθανά μελλοντικά γεγονότα στα οποία η στρατηγική θα αποτύγχανε. Το επιχείρημα για τη στρατηγική ενισχύεται εάν ο υπολογιστής δεν βρίσκει κανένα μελλοντικό γεγονός όπου η στρατηγική αποδίδει κακώς. Η αντίστροφη περίπτωση αποδυναμώνει το επιχείρημα για τη στρατηγική.

Α.1.4 Τέσσερα Βασικά Στοιχεία για μια Εύρωστη Προσέγγιση Απόφασης

Μέχρι τώρα είδαμε τις δυσκολίες που αποτρέπουν τις παραδοσιακές τεχνικές από το να μπορέσουν πλήρως να περιγράψουν τις ανάγκες LTPA. Μια εύρωστη προσέγγιση μεθόδου απόφασης θα εξέταζε αυτές τις ανεπάρκειες ενεργώντας με πολλαπλές επαναλήψεις έτσι ώστε να προκύψουν συμπεράσματα για τα μελλοντικά γεγονότα και τις στρατηγικές. Τέσσερα βασικά στοιχεία ή αρχές πρέπει να διέπουν τη

μορφή και το σχέδιο αυτών των αλληλεπιδράσεων. Αυτά τα βασικά στοιχεία συνοψίζονται κατωτέρω και περιγράφονται στη συνέχεια λεπτομερώς:

- Γίνεται η θεώρηση συνόλων μεγάλων αριθμών σεναρίων. Τέτοια σύνολα πρέπει να περιέχουν ένα σύνολο πιθανών μελλοντικών εκβάσεων όσο το δυνατόν πιο διαφορετικών έτσι ώστε να μπορούν να εξεταστούν εναλλακτικές βραχυπρόθεσμες πολιτικές. Τα σύνολα σεναρίων μπορούν να αντιπροσωπεύσουν ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών τύπων πληροφοριών για το μακροπρόθεσμο μέλλον. Μπορούν επίσης να διευκολύνουν τις διαδικασίες ομάδας με σκοπό να αποσπάσουν πληροφορίες και να επιτύχουν ανάλυση από τους συμμετόχους με διαφορετικές τιμές και προσδοκίες για το μέλλον.
- Πρέπει η στρατηγική που επιδιώκεται να είναι εύρωστη παρά βέλτιστη. Για να επιλεχτούν εύρωστες στρατηγικές πρέπει αυτές να αποδίδουν ικανοποιητικά, γεγονός το οποίο επιτυγχάνεται με την ικανοποίηση ή την υπέρβαση των επιλεγμένων κριτηρίων σε μια ευρεία σειρά πιθανών μελλοντικών εκβάσεων και των εναλλακτικών τρόπων κατηγοριοποίησης των εναλλακτικών σεναρίων. Η ευρωστία παρέχει ένα χρήσιμο κριτήριο για LTPA επειδή απεικονίζει την προσέγγιση που πολλοί ιθύνοντες χρησιμοποιούν πραγματικά υπό τους όρους της έντονης αβεβαιότητας.
- Υιοθέτηση προσαρμοστικών στρατηγικών για να επιτευχθεί ευρωστία. Οι προσαρμοστικές στρατηγικές εξελίσσονται κατά τη διάρκεια του χρόνου σε απάντηση στις νέες πληροφορίες. Οι βραχυπρόθεσμες προσαρμοστικές στρατηγικές επιδιώκουν να επηρεάσουν το μακροπρόθεσμο μέλλον με τη διαμόρφωση των διαθέσιμων επιλογών στους μελλοντικούς ιθύνοντες. Οι βραχυπρόθεσμες στρατηγικές σχεδιάζονται ρητά με την προσδοκία ότι θα ξαναεξετασθούν στο μέλλον.
- Σχεδιασμός της ανάλυσης για τη διαλογική εξερεύνηση της πολλαπλότητας των πιθανών μελλοντικών εκβάσεων. Οι άνθρωποι δεν μπορούν να ακολουθήσουν όλες τις σχετικές λεπτομέρειες του μακροπρόθεσμου μέλλοντος. Λειτουργώντας αμφίδρομα με τους υπολογιστές, μπορούν, εντούτοις, να ανακαλύψουν και να εξετάσουν τις υποθέσεις που αποδεικνύονται αληθινές από μια απέραντη σειρά δυνατοτήτων. Κατά συνέπεια, η καθοδηγούμενη από υπολογιστή εξερεύνηση σεναρίων και τα διαστήματα απόφασης μπορούν να βοηθήσουν τους ανθρώπους, που

εργάζονται χωριστά ή σε ομάδες, στην ανακάλυψη προσαρμοστικών βραχυπρόθεσμων στρατηγικών που είναι εύρωστες σε μεγάλα σύνολα πιθανών μελλοντικών εκβάσεων.

A.1.4.1 Θεώρηση Συνόλων Σεναρίων

Για να εορταστεί η παγκόσμια κολομβιανή έκθεση στο Σικάγο το 1893, η αμερικανική ένωση Τύπου ζήτησε από 74 εξέχοντες σχολιαστές να προβλέψουν για πολλούς τομείς της αμερικάνικης ζωής πως θα ήταν η κατάσταση τη δεκαετία του '90 [122]. Ενώ μερικοί συγγραφείς παρήγαγαν επιτυχώς οράματα που ήταν ακριβή στη γενική έννοια αν και όχι τόσο λεπτομερώς αναλυμένα, άλλοι παρεξέτειναν εντελώς των τάσεων που έχουν επικρατήσει. Παραδείγματος χάριν, ένας δοκιμιογράφος προέβλεψε ότι μέχρι τη δεκαετία του '90 οι περισσότερες επιχειρήσεις θα επικοινωνούσαν με τη βοήθεια των ηλεκτρικών μεταδόσεων, ενώ ένας άλλος πρότεινε ότι η αυξανόμενη παραγωγικότητα θα έδινε τη δυνατότητα να δουλεύει ο κόσμος τρεις ώρες. Ενώ αυτή η ομάδα περιέλαβε μερικές προβλέψεις που ήταν "λογικές προφητείες", το 1893 δεν ήταν δυνατό να είναι γνωστό ποιες από τις προφητείες αυτές θα μπορούν να αποδειχθούν αληθινές.

Αυτό το σύνολο δοκιμίων εξηγεί την κεντρική πρόκληση και τις ευκαιρίες LTPA. Οποιαδήποτε απλή περιγραφή ή μοντέλο για το μέλλον είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα αποδειχθεί λανθασμένο. Εντούτοις, ένα διαφορετικό σύνολο μελλοντικών οραμάτων μπορεί να συλλάβει κάτι σημαντικό για το μέλλον αν και κανένας δεν μπορεί να προσδιορίσει τα ακριβή σενάρια εκ των προτέρων.

Αντίθετα από τη συλλογή δοκιμίων το 1893 των οποίων ο μόνος σκοπός ήταν η διασκέδαση, οι ανάγκες LTPA απαιτούν τη συνειδητή εκτίμηση των μελλοντικών εκβάσεων που απαιτούνται για να εξυπηρετήσουν έναν συγκεκριμένο σκοπό πολιτικής. Κατά συνέπεια, αν και η λέξη "σενάριο" και η φράση "εναλλακτικό μέλλον" λαμβάνονται γενικά ως συνώνυμα, για τους σκοπούς LTPA είναι χρήσιμο να γίνει μια διάκριση. Σε αυτήν την περίπτωση χρήσης, ένα "σενάριο" είναι ένας συνδυασμός εναλλακτικών μοντελοποιήσεων μελλοντικών εξωγενών περιστάσεων, στρατηγικών δράσεων ή ενεργειών που έχουν εξεταστεί. Η εύρωστη προσέγγιση απόφασης συγκεντρώνει τις μελλοντικές εκβάσεις ως πρόκληση καθορισμένη ενάντια

στην οποία πρέπει να εξεταστεί η ευρωστία των εναλλακτικών στρατηγικών. Καλούμε οποιοδήποτε τέτοιο σκόπιμα συγκεντρωμένο σύνολο ως σύνολο σεναρίων [59].

Η προσέγγιση εύρωστης απόφασης αποφέρει κέρδη από την παραγωγή των συνόλων σεναρίων που παρέχουν τη μέγιστη πιθανή ποικιλομορφία των πιθανών μελλοντικών εκβάσεων συμφώνων με τις διαθέσιμες πληροφορίες. Οι αναλυτές μπορούν έπειτα να αξιολογήσουν τις πολιτικές με τη δοκιμή και με την επιβεβαίωση των υποθέσεων (επιχειρήματα) που ισχύουν για το σύνολο. Εάν το σύνολο είναι αρκετά διαφορετικό, πιθανότατα περιέχει μια χρήσιμη προσέγγιση του μέλλοντος που θα εμφανιστεί πραγματικά. Κατά συνέπεια, ένα επιχείρημα αληθινό για κάθε μέλος ενός συνόλου ισχύει και για το πραγματικό μέλλον επίσης.

Τα σύνολα σεναρίων μπορούν ωφέλιμα να υποστηρίξουν τέτοια επιχειρήματα επειδή οι άνθρωποι κατέχουν πολλές πληροφορίες, ακόμη και για απρόβλεπτα μακροπρόθεσμα μέλλοντα, οι οποίες περιορίζουν τα πιθανά μέλη του συνόλου. Χωρίς τέτοιους περιορισμούς, ένα απολύτως διαφορετικό σύνολο σεναρίου θα περιελάμβανε κάθε μελλοντική έκβαση που θα μπορούσε ενδεχομένως να αντιπροσωπευθεί και έτσι δε θα υποστήριζε κανένα χρήσιμο επιχείρημα για τις επιλογές πολιτικής. Οι πληροφορίες για το μέλλον μπορεί να είναι υπό μορφή ποσοτικών προσδιορίσιμων φυσικών ή οικονομικών νόμων (η ύλη διατηρείται, οι τρέχοντες ισολογισμοί πρέπει να ισορροπήσουν) ή διαισθητικών κρίσεων εκ μέρους των ιθυνόντων (το μέσο ετήσιο ποσοστό οικονομικής ανάπτυξης κατά τη διάρκεια ολόκληρου του εικοστού πρώτου αιώνα είναι απίθανο να υπερβεί το 25%). Συχνά, οι πληροφορίες για το μέλλον περιγράφουν συσχετισμούς μεταξύ των γεγονότων. Παραδείγματος χάριν, οι αναλυτές μπορεί να μην είναι σε θέση να προβλέψουν ποια νέα τεχνολογία θα γίνει κυρίαρχη στις επόμενες δεκαετίες, αλλά μπορούν να περιγράψουν τα γνωστά σχέδια διάδοσης (well-known patterns of diffusion) που οποιαδήποτε επιτυχής τεχνολογία θα ακολουθήσει [123], [124]. Το πιθανό μέλλον ή πιθανή μελλοντική έκβαση (plausible future) είναι σύμφωνο με τους γνωστούς περιορισμούς δηλαδή μια μελλοντική έκβαση που δεν μπορεί να αντικρουστεί από οποιεσδήποτε διαθέσιμες σημερινές πληροφορίες.

Οι πιθανολογικές πληροφορίες (probabilistic information) μπορούν να ενσωματωθούν με τη χρήση των συνόλων με διάφορους τρόπους. Μια κατανομή πιθανότητας μπορεί να βεβαιωθεί σε ένα σύνολο σεναρίων που θα επέτρεπε τον

υπολογισμό των υπονοούμενων πιθανοτήτων των εκβάσεων. Αυτή η τεχνική είναι μόνο χρήσιμη όταν η κατανομή πιθανότητας περιγράφει τις συγκεντρωμένες πληροφορίες. Στις εφαρμογές εφαρμοσμένης μηχανικής, οι πιθανότητες οι βασισμένες στις μετρημένες συχνότητες μπορούν να χρησιμοποιηθούν, οπότε σ'αυτή την περίπτωση αυτή η τεχνική είναι αυστηρή (rigorous). Τέτοια δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα για LTPA εξ ορισμού. Σε γενικές γραμμές, οι κατανομές πιθανότητας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν την ανθρώπινη γνώση μέσω των υποκειμενικών πιθανοτήτων. Στην πράξη, οι υποκειμενικές πιθανότητες (subjective probabilities) δεν παρέχουν μια φυσική απεικόνιση μιας τέτοιας γνώσης, ειδικά κατά την εξέταση ενός μεγάλου αριθμού αμοιβαία εξαρτώμενων αβεβαιοτήτων, όπως συμβαίνει με LTPA. Οι κατανομές πιθανότητας μπορούν να είναι ένα χρήσιμο τέχνασμα σε μια ανάλυση, όταν μειωθεί ο αριθμός εμφανών αβεβαιοτήτων σε έναν μικρό αριθμό.

Εάν κάποιος χρησιμοποιεί μια κατανομή πιθανότητας ως τμήμα ενός LTPA, είναι σημαντικό να αναρωτηθεί εάν τα συμπεράσματα της ανάλυσης είναι εύρωστα στην προδιαγραφή εκείνης της κατανομής δηλαδή πόσο διαφορετικές οι υποτιθέμενες πιθανότητες θα πρέπει να είναι για να οδηγήσουν σε ένα διαφορετικό συμπέρασμα. Αυτή η ιδέα μπορεί να γενικευτεί με την εξέταση του συνόλου των πιθανών κατανομών πιθανότητας που μπορούν να εξερευνηθούν χρησιμοποιώντας τις ίδιες τεχνικές που περιγράφονται εδώ για τα σύνολα σεναρίων. Αυτό είναι το υπολογιστικό αντίτιμο στις μεθόδους ανακριβών πιθανοτήτων (imprecise probabilities) που αναπτύσσονται τώρα από στατιστικολόγους και θεωρητικούς της απόφασης.

Α.1.4.2 Λογισμικό Συνόλων Σεναρίων

Μόνο πρόσφατα οι υπολογιστές έγιναν αρκετά ισχυροί για να εκμεταλλευτούν αυτήν την έννοια των συνόλων σεναρίων. Όπως υποδεικνύεται ανωτέρω, ένα απολύτως διαφορετικό σύνολο πιθανών μακροπρόθεσμων μελλοντικών εκβάσεων θα είχε έναν μεγάλο αριθμό μελών. Οι σύγχρονοι υπολογιστές μπορούν να παρέχουν μια χρήσιμη προσέγγιση υπό μορφή εικονικής αντιπροσώπευσης του συνόλου όλων των πιθανών μελλοντικών εκβάσεων που οι αναλυτές μπορούν αποτελεσματικά να χρησιμοποιήσουν για να ενημερώσουν τις επιλογές πολιτικής. Αυτή η απεικόνιση

απαιτεί δύο ευδιάκριτους τύπους λογισμικών που είναι μια γεννήτρια σεναρίων που μπορεί να δημιουργήσει οποιοδήποτε μέλος του συνόλου κατόπιν απαίτησης και το διερευνητικό λογισμικό μοντελοποίησης που επιτρέπει την παραγωγή και τη διαχείριση των εκτελέσεων των απαραίτητων σεναρίων που προέρχονται από τη γεννήτρια σεναρίων και να εξετάσουν τις αυθαίρετα σύνθετες ερωτήσεις για ένα διαφορετικό σύνολο πιθανών μελλοντικών εκβάσεων [59].

A.1.4.2.1 Λογισμικό Διερευνητικής Διαμόρφωσης και το Πρόβλημα των Πολλαπλών Μελλοντικών Εκβάσεων

Το λογισμικό διερευνητικής διαμόρφωσης (exploratory-modeling software) περιγράφει ένα ενδεχομένως "άπειρο" σύνολο σεναρίων με τη δημιουργία μιας δομής δεδομένων που συντάσσει ευρετήριο κάθε πιθανού μέλους εκείνου του συνόλου. Οποιοδήποτε μέλος του συνόλου μπορεί να δημιουργηθεί μετά από την απαίτηση με την αποστολή του διανύσματος των παραμέτρων εισαγωγής που διευκρινίζονται από το επιθυμητό στοιχείο στη δομή δεδομένων στη γεννήτρια σεναρίων. Η γεννήτρια σεναρίων εκτελεί έπειτα μια εκτέλεση και επιστρέφει το επιθυμητό διάνυσμα των αποτελεσμάτων, το οποίο ολοκληρώνει έπειτα το επιθυμητό στοιχείο στη δομή δεδομένων. Κάθε τέτοια ερώτηση μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα υπολογιστικό πείραμα που παράγει τις πληροφορίες για τις ιδιότητες του συνόλου συνολικά.

Τα συγκεκριμένα επιχειρήματα πολιτικής σε κάθε ανάλυση καθορίζουν τα υπολογιστικά πειράματα που πρέπει να πραγματοποιηθούν και, ως εκ τούτου, τη στρατηγική δειγματοληψίας στο σύνολο. Παραδείγματος χάριν, αν οι αναλυτές επιθυμήσουν να εξετάσουν την αξίωση μιας ιδιαίτερης στρατηγικής για το αν είναι μια καλή επιλογή αυτό μπορεί να γίνει με την εύρεση και το χαρακτηρισμό των μελλοντικών εκβάσεων όπου η στρατηγική δεν αποδίδει ικανοποιητικά. Αυτή η προσπάθεια υιοθέτησης κάποιου συνδυασμού αλγορίθμων αναζήτησης και η ανάλυση ευαισθησίας με τα αποτελέσματα της είναι αυτά που παρουσιάζονται στους αναλυτές ως διαλογικές απεικονίσεις (interactive visualizations). Κατά συνέπεια, το λογισμικό διερευνητικής μοντελοποίησης πρέπει να επιτρέψει στους αναλυτές να εκτελέσουν αυθαίρετες ακολουθίες μεγάλων αριθμών υπολογιστικών πειραμάτων,

συχνά με σύνθετες σχέσεις το ένα με το άλλο, στην υπηρεσία της προώθησης ή της αντίκρουσης μιας συγκεκριμένης γραμμής πολιτικού επιχειρήματος.

Α.1.4.2.2 Λογισμικό Γέννησης Σεναρίων και Δημιουργία Συνόλου Πληθυσμού

Μια γεννήτρια σεναρίων είναι ένας υπολογιστικός μηχανισμός που μπορεί να δώσει οποιοδήποτε σενάριο από ένα σύνολο σεναρίων κατόπιν απαίτησης. Γενικά, γεννήτριες σεναρίων θα μπορούσαν να ενσωματωθούν σε μια ευρεία ποικιλία εργαλείων λογισμικού όπως είναι τα μοντέλα προσομοίωσης υπολογιστών, τα στατιστικά μοντέλα, τα νευρωνικά δίκτυα, οι κανόνες σύλληψης ειδικής γνώσης (rules capturing expert knowledge) ή ακόμα και ένας πίνακα που περιλαμβάνει περιγραφές και εκβάσεις σεναρίων.

Ενώ οι προσομοιώσεις υπολογιστών παρέχουν πολύ συχνά το λογισμικό για την παραγωγή σεναρίων, είναι σημαντικό να υπογραμμιστεί ο όρος "γεννήτρια σεναρίου" παρά η λέξη "μοντέλο". Οι γεννήτριες και τα μοντέλα σεναρίου μπορούν να φανούν όμοια, αλλά τα δύο αυτά προϊόντα λογισμικού χρησιμοποιούνται για πολύ διαφορετικούς λόγους.

Τα μοντέλα προσομοίωσης υπολογιστών χρησιμοποιούνται γενικά για την πρόβλεψη. Η ίδια η λέξη "μοντέλο" υποδηλώνει μια προσπάθεια να παρασχεθεί μια ακριβής απεικόνιση κάποιου συστήματος. Τα καθιερωμένα μοντέλα και τα στατιστικά εργαλεία υπάρχουν για την επικύρωση τέτοιων μοντέλων υπολογιστών όπως εκείνα που χρησιμοποιούνται από τους μηχανικούς για να μιμηθούν την απόδοση των αεροσκαφών που σχεδιάζουν. Αντίθετα, για να δημιουργηθεί κατάλληλη πρόκληση για τη δοκιμή εναλλακτικών αποφάσεων, μια γεννήτρια σεναρίων πρέπει να παράγει ένα σύνολο όσο το δυνατόν πιο διαφορετικών πιθανών εναλλακτικών λύσεων. Κανένα ευρέως αποδεκτό μοντέλο ακρίβειας για την αξιολόγηση της ποιότητας τέτοιων γεννητριών σεναρίων δεν υπάρχει αυτήν την περίοδο. Εντούτοις, είναι σαφές ότι τέτοια μοντέλα πρέπει να είναι πολύ διαφορετικά από εκείνα που χρησιμοποιούνται στα προβλεπτικά μοντέλα. Η ιδανική γεννήτρια σεναρίων παρήγαγε μόνο πιθανά σενάρια, αλλά στην κατασκευή του λογισμικού, οι αναλυτές πρέπει να σφάλουν στην πλευρά της συμπερίληψης των ενδεχομένως αδικαιολόγητων μελλοντικών εκβάσεων. Η, επίσης, πρόωρη απόρριψη πιθανών

μελλοντικών εκβάσεων θα μπορούσε να οδηγήσει στη λήψη αποφάσεων που αποδεικνύονται εύθραυστες στην πραγματικότητα που θα λάβει χώρα στο μέλλον επειδή ένας φαινομενικά λανθασμένος ή αρχικά ασήμαντος παράγοντας μπορεί να αποδειχθεί εύλογος και αποφασιστικός στην ύστερη ανάλυση. Η παραδοσιακή ανάλυση απόφασης θα παράγει λανθασμένα αποτελέσματα εάν στηριχθεί σε προβλεπτικά μοντέλα που παράγουν λανθασμένες προβλέψεις. Αντίθετα, μια εύρωστη εφαρμογή μεθόδου απόφασης είναι η πιο τρωτή σε λάθη σε σχέση με τη χρησιμοποίηση συνόλων σεναρίων που δεν είναι αρκετά διαφορετικά. Κατά συνέπεια, η συμπερίληψη μερικών αδύνατων σεναρίων παρουσιάζει ως μια λιγότερο προβληματική κατάσταση από τη μη συμπερίληψη σεναρίων που θα μπορούσαν να αποδειχθούν σημαντικά.

Α.1.4.2.3 Σύνολα Σεναρίων και Πληροφορία για Μακροπρόθεσμες Μελλοντικές Εκβάσεις

Η έμφυτη ευελιξία στη χρήση των συνόλων σεναρίων επιτρέπει τη συγχώνευση διαφορετικών πηγών γνώσης με έναν τρόπο που δεν είναι εύκολος και συχνά αδύνατος με τα μοντέλα που σχεδιάζονται για πρόβλεψη. Εάν οι προσομοιώσεις υπολογιστών προτείνουν σενάρια που παραβιάζουν τη γνώση που κατέχεται από τους ανθρώπους, τέτοια σενάρια μπορούν να αποκλειστούν ως αδικαιολόγητα. Εάν οι άνθρωποι προτείνουν μελλοντικές εκβάσεις οι οποίες απαιτούν ηρωικές υποθέσεις ή παραβιάσεις βασικών επιστημονικών, οικονομικών ή άλλων αρχών, αυτές οι υποθέσεις θα αποκαλυφθούν στην προσπάθεια να δημιουργηθεί η μελλοντική έκβαση σε μια προσομοίωση. Εάν οι άνθρωποι διαφωνούν για την ευλογοφάνεια των σεναρίων, αυτές οι πληροφορίες μπορούν να συλληφθούν με στρατηγικές δειγματοληψίας στο σύνολο. Οι κρίσεις για την ευλογοφάνεια των μελλοντικών εκβάσεων ενσωματώνονται γενικά και ως περιορισμοί μέσα στις γεννήτριες σεναρίων.

Τα σύνολα σεναρίων είναι ισχυρά τεχνουργήματα για την απόσπαση πληροφοριών από ομάδες και για τη μεταβίβαση πληροφοριών για τον κίνδυνο σε ακροατήρια. Όπως οι πολλές αφηγήσεις (multiple narratives) χρησιμοποιούνται στον προγραμματισμό σεναρίων, τα σύνολα σεναρίων προσφέρουν στους συμμετόχους

μελλοντικές εκβάσεις που θα τους διευκολύνουν στη λήψη της απόφασης. Τα σύνολα προσφέρουν επίσης τις εναλλακτικές μελλοντικές εκβάσεις που μπορούν να αναγκάσουν τους συμμετόχους να εξετάσουν τις υποθέσεις τους και να παρέχουν ένα πλαίσιο απόψεων που μπορεί να προσφέρουν διαφορετικές προσδοκίες για το μέλλον. Εκτός από το ρόλο τους στην παροχή μιας κατάλληλης πρόκλησης καθορισμένης για την ανάλυση, η απαίτηση ποικιλομορφίας που καθοδηγεί την κατασκευή των συνόλων σεναρίων είναι κρίσιμη για την οικοδόμηση της αξιοπιστίας μεταξύ των συμμετεχόντων σε μια απόφαση.

Α.1.4.3 Αναζήτηση Εύρωστων Στρατηγικών

Ποιο κριτήριο θα έπρεπε οι ιθύνοντες να χρησιμοποιήσουν για να συγκρίνουν τις εναλλακτικές λύσεις για τις μακροπρόθεσμες πολιτικές προκλήσεις; Η παραδοσιακή ανάλυση απόφασης επιδιώκει τη βέλτιστη στρατηγική, δηλαδή αυτή που αποδίδει καλύτερα για ένα σταθερό σύνολο υποθέσεων για το μέλλον. Αντίθετα, η LTPA απαιτεί μοντέλα που επιτρέπουν στους αναλυτές να καταστήσουν τα πολιτικά επιχειρήματά τους αληθινά σε μια πολλαπλότητα απρόβλεπτων μελλοντικών εκβάσεων.

Η ανάλυση σε αυτήν τη Μεταπτυχιακή Εργασία υιοθετεί την ευρωστία ως κατάλληλο κριτήριο για την αξιολόγηση των εναλλακτικών στρατηγικών LTPA. Μια στρατηγική που είναι αναίσθητη στη σημαντική παραλλαγή των ελλοχευουσών υποθέσεων καλείται εύρωστη. Από αυτή την άποψη, μια στρατηγική πρέπει να θεωρηθεί εύρωστη εάν αποδίδει εύλογα "καλά" έναντι των εναλλακτικών λύσεων σε ένα ευρύ φάσμα πιθανών μελλοντικών εκβάσεων. Η χρήση της κανονιστικής έννοιας της εκτέλεσης "καλά" επομένως προτείνει επίσης ότι η ευρωστία πρέπει να αξιολογηθεί όσον αφορά τα πολλά διαφορετικά συστήματα αξίας για την απόδοση των στρατηγικών. Όταν εφαρμόζεται σε LTPA, η έννοια της ευρωστίας έχει διάφορες αρετές. Παρέχει μια υπολογιστικά κατάλληλη βάση για τα επιχειρήματα πολιτικής που είναι αληθινά σε ένα σύνολο πιθανών μελλοντικών εκβάσεων. Προσφέρει μια κανονιστική περιγραφή των καλών επιλογών υπό τους όρους της έντονης αβεβαιότητας και των πολλαπλών συμμετόχων που χαρακτηρίζουν την LTPA. Τέλος,

ταιριάζει με τη χρήση των κριτηρίων από τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων όταν αυτοί βρίσκονται αντιμέτωποι με τέτοιου είδους προβλήματα.

A.1.4.3.1 Πλεονεκτήματα Εύρωστων Κριτηρίων

Για πολλούς υπεύθυνους λήψης αποφάσεων, η ευρωστία αντιπροσωπεύει το κανονιστικό κριτήριο που κάποιος οφείλει να χρησιμοποιήσει για την αντιμετώπιση της έντονης αβεβαιότητας. Όταν πολλά σχετικά με το μέλλον παραμένουν μη αναγνωρίσιμα και πολλά συμβαλλόμενα μέρη πρέπει να συμπέσουν σε μια πορεία προς τα εμπρός, εκείνοι που διατυπώνουν την πολιτική πρέπει να επιδιώξουν στρατηγικές που, ιδανικά, θα επιτύχουν να ελαχιστοποιήσουν τις αντιληπτές δαπάνες ή να παράγουν απτά οφέλη ανεξάρτητα από τα μελλοντικά γεγονότα που θα συμβούν. Αυτή η έννοια της ευρωστίας ομοιάζει αλλά δεν είναι ίδια με το κριτήριο Savage περί ελαχιστοποίησης της μέγιστης λύπης. Ο Savage περιγράφει τον κανόνα mini-max ως πρακτική εμπειροτεχνική μέθοδο για τις περιπτώσεις όπου τα άτομα ή οι ομάδες είναι αδαή για τις πιθανότητες που συνδέονται με ορισμένα γεγονότα και που όλοι οι συμμετέχοντες στην απόφαση είναι σίγουροι ότι, για μερικές στρατηγικές, ο μεγαλύτερος βαθμός απώλειας θα φανεί σχετικά μικρού κόστους κατά αποδεκτό τρόπο [42].

Επίσης, πολλοί υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων χρησιμοποιούν το κριτήριο ευρωστίας υπό όρους έντονης αβεβαιότητας [125], [126]. Οι επιχειρήσεις που διευθύνουν βασιζόμενες σε σεναριοβασισμένο προγραμματισμό (scenario-based planning) ψάχνουν συχνά τις στρατηγικές που αποδίδουν καλά στα σενάριά τους [127]. Ο προγραμματισμός βασισμένος σε υποθέσεις (Assumption-Based Planning) [128], [71] έχει βοηθήσει τον αμερικανικό στρατό και άλλες επιχειρήσεις που συμμετέχουν στο μακροπρόθεσμο προγραμματισμό στο να τροποποιήσουν τις στρατηγικές τους για να μειώσουν τις ευπάθειές τους σε ένα ευρύ φάσμα πιθανών σεναρίων. Ένα κριτήριο ευρωστίας είναι υπονοούμενο στη συμπεριφορά επένδυσης κεφαλαίων των αμερικανικών εταιριών (capital investment behavior of U.S. firms) [129]. Η έννοια του Simon περί ικανοποίησης (satisficing) παρουσιάζει ομοιότητες με το κριτήριο της ευρωστίας [70]. Οι υπεύθυνοι αποφάσεων συμμετέχουν επιδιώκοντας στρατηγικές που θα αποδώσουν πάνω από μια διευκρινισμένη συγκριτική μέτρηση

επιδόσεων απόδοσης ενώ εκείνοι οι υπεύθυνοι αποφάσεων που χρησιμοποιούν την ευρωστία επιδιώκουν στρατηγικές που έχουν κάποιο ελάχιστο κατώτατο όριο απόδοσης σε μια ποικιλία απρόβλεπτων εκβάσεων. Οι πολιτικοί μηχανικοί χρησιμοποιούν σιωπηρά ένα εύρωστο κριτήριο όταν σχεδιάζουν κτήρια και γέφυρες για να μπορούν τα κτίσματα αυτά να ανταποκριθούν σε ένα ευρύ φάσμα περιπτώσεων καιρού και σεισμού. Οι οικολόγοι έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούν την ανθεκτικότητα (resilience), μια έννοια σχετική με την ευρωστία, ως μέτρο για το πως ένα κοινωνικό και οικονομικό σύστημα μπορεί επιτυχώς να ανταποκριθεί και να προσαρμοστεί στους κλονισμούς και σε άλλες εξωτερικές αλλαγές [130].

Η ευρωστία δεν είναι το μόνο πιθανό κριτήριο για την αξιολόγηση των στρατηγικών υπό έντονη αβεβαιότητα. Παραδείγματος χάριν, οι ιθύνοντες που είναι δυσαρεστημένοι με την παρούσα κατάσταση, όπως για παράδειγμα επιχειρηματίες πρόθυμοι να διακινδυνεύσουν πολλά στην αναζήτηση μεγάλου πλούτου ή ηγετών που θεωρούν τα έθνη ή τις ομάδες τους ως αιτούντες επανόρθωσης για προηγούμενη διαμαρτυρία, μπορούν να καθορίσουν την αποτυχία ως απώλεια μιας εφήμερης πιθανότητας να ανατρέψουν την καθιερωμένη κατάσταση. Επομένως, μπορούν να ενδιαφερθούν πολύ για την αξιολόγηση των στρατηγικών που ταιριάζουν για εκείνα τα λίγα σενάρια όπου τα τεράστια κέρδη είναι δυνατά απ'ότι σε εκείνα τα πολλά σενάρια όπου το καλύτερο μπορεί να είναι να διατηρηθεί η υπάρχουσα κατάσταση. Για να εξεταστούν τέτοιες περιπτώσεις, ο Ben-Haim προτείνει μια συνάρτηση ευκαιρίας (opportunity function) με την οποία οι υπεύθυνοι αποφάσεων μπορούν να βρούν και να εκμεταλλευτούν τις ευνοϊκές ευκαιρίες που είναι έμφυτες στην αβεβαιότητα [15]. Αλλά το ακροατήριο για τις πιο μακροπρόθεσμες, παγκόσμιες πολιτικές αναλύσεις θα είναι εκείνοι που τείνουν να ισορροπήσουν την επιθυμία της εκμετάλλευσης των εμφανιζόμενων ευκαιριών με την ιδιαίτερη ανησυχία για την αποφυγή των κινδύνων. Για τέτοιους υπεύθυνους αποφάσεων, η ευρωστία είναι ένα ισχυρό κριτήριο για την αξιολόγηση των επιλογών.

A.1.4.3.2 Υλοποιώντας το Κριτήριο Ευρωστίας

Αναγνωρισμένη ως σημαντικός στόχος η ευρωστία δεν έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως στις ποσοτικές μελέτες επειδή είναι υπολογιστικά πιο δύσκολο να εφαρμοστεί

αυτή η βελτιστοποίηση. Τα τελευταία χρόνια, εντούτοις, οι νέες προσεγγίσεις έχουν αρχίσει να ξεπερνούν τους προηγούμενους περιορισμούς. Οι ερευνητές στο Διεθνές Κέντρο Περιεκτικών Μελετών (International Centre for Integrative Studies ή ICIS) έχουν αναπτύξει μεθόδους που χρησιμοποιούν ενσωματωμένα πρότυπα αξιολόγησης για να συγκρίνουν τις εναλλακτικές διοικητικές μορφές (που αντιπροσωπεύονται από διαφορετικές επιλογές των στρατηγικών) για διαφορετικές κοσμοθεωρίες (που αντιπροσωπεύονται από διαφορετικές υποθέσεις για τις πρότυπες παραμέτρους). Αξιολογούν το πως η προηγούμενη τιμή συμπεριφέρεται όταν χρειάζεται να αντιμετωπιστεί ένας κόσμος διαφορετικός από αυτόν που υποτέθηκε [114]. Οι Kouvelis και Yu έχουν αναπτύξει μεθόδους για εύρωστη διακριτή βελτιστοποίηση που παρέχουν αναλυτικές mini-max λύσεις σε διαφόρους τύπους προβλήματος χωρίς οποιαδήποτε ανάγκη καταχώρησης αρχικών τιμών στις μεταβλητές των εναλλακτικών σεναρίων [107]. Η εργασία τους επισύρει την προσοχή επίσης στη βιβλιογραφία που βασίζεται στο σεναριοπρογραμματισμό για τις μεθόδους για να βοηθήσει να επιλέξει τα σενάρια που είναι εισαγωγές στην ανάλυσή τους. Οι ερευνητές έχουν αναπτύξει επίσης μεθόδους για να βρίσκουν τις στρατηγικές τις πιο εύρωστες σε σχέση με τις πολλαπλές αναθέσεις τιμών, χρησιμοποιώντας επεξεργασίες βασισμένες στην Μπεϋζιανή ανάλυση [131] και την εύρωστη θεωρία ελέγχου [116]. Το κριτήριο ευρωστίας ταιριάζει αξιοθαύμαστα στην ανακάλυψη των χρήσιμων πολιτικών επιχειρημάτων που είναι αληθινά σε μια πολλαπλότητα πιθανών μελλοντικών εκβάσεων. Σε αντίθεση με τέτοιες τεχνικές όπως την εύρωστη θεωρία ελέγχου ή την εύρωστη βελτιστοποίηση, που τοποθετούν αναλυτικούς περιορισμούς στα μαθηματικά που υιοθετούνται, οι επαναληπτικές εύρωστες μέθοδοι λήψης αποφάσεων επιτρέπουν στους αναλυτές ένα πολύ ευρύ φάσμα επιλογών στις μαθηματικές απεικονίσεις που χρησιμοποιούν στις γεννήτριες σεναρίου που απαιτούνται για να δημιουργηθούν τα σύνολα σεναρίων. Αυτή η εύκαμπτη ποσοτική προσέγγιση προέρχεται από τον υπολογισμό της λύπης των εναλλακτικών στρατηγικών.

Η λύπη ορίζεται ως η διαφορά μεταξύ της απόδοσης μιας μελλοντικής στρατηγικής, λαμβάνοντας υπόψη κάποια συνάρτηση αξίας, και αυτής της απόδοσης που θα ήταν η καλύτερη εκτελώντας τη στρατηγική στο ίδιο μελλοντικό σενάριο. Μετά τον Savage [42], η λύπη της στρατηγικής j στο μέλλον f χρησιμοποιώντας τις τιμές m δίνεται από τη σχέση

$$\mathrm{Re}\,gret_m(j,f) = \underset{j'}{Max}\left[Performance_m(j',f)\right] - Performance_m(j,f) \quad (1)$$

όπου η στρατηγική j' δείχνει τη στρατηγική μεταξύ όλων των στρατηγικών σε μια αναζήτηση της καταλληλότερης που παρουσιάζονται στο μέλλον f.

Ένα μέτρο λύπης προβλέπει για τους ανθρώπους στο μέλλον το αποτέλεσμα μιας στρατηγικής σε σχέση με αυτήν που θα είχε επιλεχτεί από τους προηγούμενους υπεύθυνους απόφασης εάν είχαν την τέλεια πρόβλεψη. Υποστηρίζει επίσης την επιθυμία των σημερινών υπεύθυνων απόφασης να επιλέξουν τις στρατηγικές που, στην αναδρομική εξέταση, δεν θα εμφανιστούν μη ικανοποιητικές έναντι των διαθέσιμων εναλλακτικών λύσεων.

Είναι επίσης μερικές φορές χρήσιμο να εξεταστεί η σχετική λύπη όπου η σχετική λύπη δίνεται από την παρακάτω σχέση

$$\mathrm{Re}\,lative_\mathrm{Re}\,gret_m(j,f) = \frac{\underset{j'}{Max}\left[Performance_m(j',f)\right] - Performance_m(j,f)}{\underset{j'}{Max}\left[Performance_m(j',f)\right]} \quad (2)$$

και κλιμακώνεται από την καλύτερη απόδοση που είναι εφικτή μεταξύ των υποψηφίων στρατηγικών σε ένα δεδομένο σενάριο [107].

Με τη χρησιμοποίηση της λύπης ως μέτρου, μια εύρωστη στρατηγική ορίζεται ποσοτικά ως μια στρατηγική με μικρή λύπη σε ένα ευρύ φάσμα πιθανών μελλοντικών εκβάσεων f που χρησιμοποιεί διαφορετικά μέτρα αξίας M. Αυτός ο καθορισμός παρέχει μια φυσική βάση για τις αξιολογήσεις σε ένα σύνολο πιθανών μελλοντικών εκβάσεων. Οι αναζητήσεις υπολογιστών στο σύνολο μπορούν να βοηθήσουν να προσδιορίσουν οι εύρωστες στρατηγικές δηλαδή αυτές που παρουσιάζουν μικρή λύπη σε ένα σύνολο μελλοντικών εκβάσεων f χρησιμοποιώντας πολλά μέτρα αξίας M. Το ιδανικό σύνολο θα περιλαμβάνει κάθε πιθανό μέλλον στο οποίο τουλάχιστον μια από τις υποψήφιες στρατηγικές αποτυγχάνει, σύμφωνα με κάποιο σύστημα αξίας. Κατά συνέπεια, τα πιο ενδιαφέροντα μέλλοντα για να εξερευνηθούν και να προστεθούν στο σύνολο είναι συχνά εκείνα για τα οποία κάποια υποψήφια στρατηγική πρέπει να εμφανίζει μεγάλη λύπη.

Φυσικά, είναι πολύ σπάνιο ένα LTPA να οδηγήσει σε μια ιδανική στρατηγική με ιδιότητες καλής εκτέλεσης σε όλα τα πιθανά μέλλοντα που κρίνονται από όλα τα σχετικά συστήματα αξίας. Στην πράξη, με τη μακροπρόθεσμη λήψη αποφάσεων γίνεται μια προσπάθεια για εξισορρόπηση όπου απαιτείται η λήψη αποφάσεων σε δύσκολες ανταλλαγές και στην κρίση του ποιες τιμές και σενάρια πρέπει να κρίνονται

σημαντικότερα. Στο τέλος μιας άσκησης LTPA, πρέπει να προκύψουν μια εύρωστη στρατηγική και μια σαφής κατανόηση των τιμών και των μελλοντικών εκβάσεων στις οποίες η στρατηγική αποδίδει επαρκώς. Πρέπει επίσης να είναι ρητά γνωστές οι μελλοντικές εκβάσεις και οι τιμές που, δυνάμει της επιλογής των υποψηφίων στρατηγικών, έχουν ταξινομηθεί σιωπηρά ως ασήμαντες.

Α.1.4.4 Υιοθέτηση Προσαρμοστικών Στρατηγικών

Ως γνωστόν, οι άνθρωποι συνεχώς μαθαίνουν. Κατά τη διάρκεια του χρόνου, συνεχώς αποκτούν νέες πληροφορίες. Μερικές φορές, εντούτοις, η αντιληπτή αβεβαιότητά μας αυξάνεται κατά τη διάρκεια του χρόνου εάν, παραδείγματος χάριν, οι νέες πληροφορίες μας αναγκάζουν να επανεξετάσουμε προηγούμενες βεβαιότητες. Επιπλέον, πολλές φορές οι οργανώσεις και οι άνθρωποι ξεχνούν [132]. Συνεπώς, οι προσαρμοστικές στρατηγικές απόφασης είναι τα μέσα που χρησιμοποιούνται συνηθέστερα για να επιτύχουν την ευρωστία επειδή έχουν ως σκοπό να εξελίσσονται αντιδρώντας στις νέες πληροφορίες που εισάγονται. Ο Rosenhead ρητά συνδέει τις ιδέες της ευρωστίας και της προσαρμοστικότητας με την περιγραφή τους ως εργαλεία για να αξιολογήσουν την ευελιξία που επιτυγχάνεται ή που αμφισβητείται από τις ιδιαίτερες επιλογές των βραχυπρόθεσμων ενεργειών [52], [126]. Αντιμετωπίζοντας με μια πολλαπλότητα πιθανών μελλοντικών εκβάσεων, ένας υπεύθυνος απόφασης μπορεί να στοχεύει στη λήψη βραχυπρόθεσμων ενεργειών αλλά προγραμματίζει τη ρύθμιση αυτών των βραχυπρόθεσμων αποφάσεων με συγκεκριμένους τρόπους δεδομένου ότι οι νέες πληροφορίες καθιστούν μερικά μέλλοντα μη πιθανά και άλλα πιθανότερα. Παραδείγματος χάριν, μια εταιρία που προωθεί ένα νέο προϊόν σε μια αγορά δοκιμής ακολουθεί μια προσαρμοστική στρατηγική. Εάν το προϊόν πωλείται, η εταιρία επεκτείνει τη διανομή. Αν όχι, η εταιρία μπορεί να ακυρώσει ή να αναθεωρήσει την προσφορά. Τα τελευταία χρόνια, οι αναλυτές ενδιαφερόμενοι για τη λήψη αποφάσεων υπό έντονη αβεβαιότητα έχουν αγκαλιάσει την έννοια των προσαρμοστικών στρατηγικών απόφασης [133]. Οι επιχειρησιακές δημοσιεύσεις υπογραμμίζουν τη σημασία της προσαρμοστικότητας και της ευελιξίας [134]. Τέτοια ποσοτικά εργαλεία όπως η πραγματική ανάλυση επιλογών, που μετρά την αξία των επενδύσεων στις εγκαταστάσεις κατασκευής, στην έρευνα και στην ανάπτυξη

χρησιμοποιώντας τα εργαλεία που αναπτύσσονται πρώτα για να εκτιμήσει το απόθεμα και άλλες οικονομικές επιλογές, έχει επιτρέψει στις εταιρίες να αρχίσουν να ορίζουν μια αξία στην ευελιξία με τρόπο που δεν ήταν προηγουμένως δυνατή [135]. Ο προγραμματισμός ο βασισμένος σε παραδοχές κατά Dewar [136], [71], [72], [137], [128] παρέχει ένα πλαίσιο για τις προσαρμοστικές στρατηγικές. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει τη διαμόρφωση των ενεργειών (shaping actions) που προορίζονται να επηρεάσουν το μέλλον που έρχεται, προστατευτικές ενέργειες ή ενέργειες φραγής (hedging actions) που προορίζονται να μειώσουν την ευπάθεια εάν πρόκειται να συμβούν δυσμενείς μελλοντικές εκβάσεις και παρατηρήσεις προειδοποίησης (signposts) για την ανάγκη να αλλαχτεί το μίγμα των ενεργειών. Όλο και περισσότερο, οι ερευνητές διαμορφώνουν τις επιπτώσεις των εναλλακτικών αποφάσεων για τις οργανωτικές δομές τόσο για τους σχεδιαστές του ιδιωτικού τομέα [138] όσο και για τους σχεδιαστές πολιτικής δημόσιου τομέα [139], [140]. Η περιβαλλοντική κοινότητα έχει δει ένα κύμα ενδιαφέροντος για την προσαρμοστική διαχείριση που τυποποιεί επίσης την έννοια των στρατηγικών προσαρμοστικής απόφασης σε περιβάλλοντα αβεβαιότητας [141].

Η έννοια των προσαρμοστικών στρατηγικών απόφασης κρύβεται πίσω από μερικά από τα πιο βασικά ιδρύματα της κοινωνίας μας. Οι οικονομίες της αγοράς και οι δημοκρατικές κυβερνήσεις στηρίζονται στην ιδέα ότι το μέλλον είναι απρόβλεπτο, ότι οποιαδήποτε ανθρώπινη απόφαση είναι επιρρεπής σε λάθος και ότι το κοινωνικό αγαθό εξυπηρετείται καλύτερα με τη δημιουργία και την υπεράσπιση των μηχανισμών που βοηθούν να προσδιοριστούν και να διορθωθούν αυτά τα λάθη κατά τη διάρκεια του χρόνου. Κατά συνέπεια, οι οικονομίες της αγοράς ενθαρρύνουν το συνεχή πειραματισμό με νέα προϊόντα και υπηρεσίες, ανταμείβουν εκείνους που αφουγκράζονται τις ανάγκες των καιρών και διώχνουν τους πόρους μακριά από εκείνους τους παραγωγούς και προμηθευτές που υιοθετούν λάθος παραδοχές. Ο McMillan υποστηρίζει ότι ο θεσμός της ιδιοκτησίας είναι ένας τρόπος μεγάλης ευελιξίας στα απρόβλεπτα μέλλοντα. Παραδείγματος χάριν ένας επιχειρηματίας βιοτεχνολογίας επιλέγει αρχικά να είναι κύριος της εφεύρεσής του επειδή καμία σύμβαση με μια μεγάλη εταιρία δεν μπόρεσε ενδεχομένως να προβλέψει όλες τις πορείες που η εφεύρεση θα μπορούσε να πάρει [142]. Πολλές από τις πιό θεμελιώδεις ελευθερίες μας, όπως η ελευθερία της ομιλίας και της συνέλευσης, έχουν αξία ως προσαρμοστική διόρθωση στο συνολικό σύστημα. Αυτές οι ελευθερίες εξασφαλίζουν

ότι οι κυβερνήσεις υπόκεινται σε ένα σταθερό φράγμα κριτικής και έλεγχο και όταν συνδυάζονται με περιοδικές εκλογές, οι βοήθειες εκθέτουν και διορθώνουν τα κρατικά λάθη. Ο συνταγματικός μελετητής Holmes συλλαμβάνει αυτόν τον χαρακτήρα επεξεργασίας της πληροφορίας (information-processing) και προσαρμοστικής απόφασης (adaptive-decision character) ακριβώς με τη φράση "η ίδια αντιπροσωπευτική κυβέρνηση ως γνωστική διαδικασία, διαμορφώνεται για να μεγιστοποιήσει την παραγωγή, τη συσσώρευση και την εφαρμογή των πολιτικά σχετικών αληθειών" [143].

Οι προσαρμοστικές στρατηγικές είναι όχι πάντα κατάλληλες, εντούτοις. Σε μερικές περιπτώσεις, οι υπεύθυνοι απόφασης μπορούν να υποκριθούν προσαρμοστικότητα ώστε να καθυστερήσουν δύσκολες και σημαντικές επιλογές με την ελπίδα ότι ο χρόνος θα λύσει το πρόβλημα ή θα περάσει η ευθύνη σε κάποιον άλλον. Στην περίπτωση αυτή, μπορούν επίσης να διαπιστώσουν ότι μια αύρα ακαμψίας μπορεί να αναγκάσει σε παραχωρήσεις τους άλλους. Ο Schelling παρέχει το κλασικό παράδειγμα των οφελών της άκαμπτης λήψης αποφάσεων στην περιγραφή του παιχνιδιού "κοτόπουλου" (the game of “chicken”) όπου δύο αυτοκίνητα επιταχύνουν σε μετωπική αντιπαράθεση το ένα προς το άλλο σε έναν στενό δρόμο και ο νικητής είναι ο οδηγός που παρεκκλίνει δεύτερος. Η ανάλυση πρέπει να βοηθήσει στον καθορισμό αυτών των άκαμπτων στρατηγικών που είναι πιο εύρωστες από αυτές που συμβαδίζουν με την ευελιξία [144].

Η έννοια του προσαρμοστικότητας είναι τόσο κεντρική στο LTPA που την περιλαμβάνουμε στον πυρήνα καθορισμού. Ο προσδιορισμός, η αξιολόγηση και η επιλογή μεταξύ των βραχυπρόθεσμων ενεργειών που διαμορφώνουν τις διαθέσιμες επιλογές σε μελλοντικές γενεές είναι ο πυρήνας καθορισμού. Στο LTPA, ο χρονικός ορίζοντας προέρχεται από την έννοια της προσαρμοστικότητας. Στην πολιτική ανάλυση που βασίζεται στην πρόβλεψη, ο μακρινός ορίζοντας καθορίζεται συχνά από πόσο μακριά μπορεί να γίνουν με ακρίβεια οι προβλέψεις. Σε LTPA, ο ορίζοντας καθορίζεται από το πόσο μπορεί να μετατοπιστεί στο μέλλον έτσι ώστε οι σημερινές ενέργειες να μπορούν να επηρεάσουν τα γεγονότα. Σε μερικές περιοχές, όπως πολλές οικονομικές επενδύσεις σε μια οικονομία, η χρονική αξία των χρημάτων (καθώς επίσης και το προεξοφλητικό επιτόκιο) σαφώς ισχύει και η επιρροή των σημερινών ενεργειών παύει να ισχύει σε μερικά έτη. Σε άλλες περιοχές όπως για τις αποφάσεις για τους δρόμους, τα κτήρια και άλλη κύρια υποδομή, τη δημιουργία της νέας

τεχνολογίας, τις αποφάσεις που έχουν επιπτώσεις στο περιβάλλον, τις αποφάσεις που διαμορφώνουν τα πολιτικά ιδρύματα μέσα και μεταξύ των εθνών, οι σημερινές ενέργειες μπορούν να έχουν αποτελέσματα που να απηχούν για δεκαετίες ή αιώνες.

Γενικά, οι επιτυχέστερες βραχυπρόθεσμες στρατηγικές θα αποκλείσουν μερικές μελλοντικές επιλογές ενώ θα αφήσουν άλλες επιλογές ανοικτές. Παραδείγματος χάριν, στον πολιτικό χώρο, η επίτευξη συναίνεσης σε μια προσαρμοστική στρατηγική απαιτεί συχνά τη δυνατότητα να αποκλειστεί ορισμένα μελλοντικά ενδεχόμενα επιλογών σε μελλοντικά γεγονότα ή πληροφορίες που διατίθενται. Γενικά, οι οικονομίες λειτουργούν με έναν τρόπο που αναγκάζει τους πόρους να ρεύσουν σε εκείνους των οποίων η διακύβευση (risk-taking) είναι επιτυχής και μακριά από εκείνους των οποίων η διακύβευση δεν είναι επιτυχής.

Οι επιτυχέστεροι μακροπρόθεσμοι σχεδιαστές πολιτικής δεν εργάζονται μόνο για να επεκτείνουν τις ικανότητες του διαδόχου τους. Με τον επηρεασμό των μελλοντικών τιμών, των προσδοκιών, των επιχειρήσεων και ιδρυμάτων, των φυσικών χρηματοδοτήσεων και της εμπειρίας, οι σημερινοί ιθύνοντες στοχεύουν επίσης να περιορίσουν τις επιλογές των μελλοντικών ιθυνόντων. Οι προηγούμενες αναλυτικές προσεγγίσεις σε LTPA δεν έχουν υποστηρίξει την επεξεργασία των προσαρμοστικών στρατηγικών, παρά την προφανή σημασία τους. Οι προσεγγίσεις που στρέφονται στην προσαρμοστικότητα της πρόβλεψης δεν ανταμείβουν. Σε έναν προβλέψιμο κόσμο, οποιαδήποτε πορεία εκτός από την "καλύτερη" στρατηγική είναι, εξ ορισμού, υποβέλτιστη. Το LTPA που διευθετείται με τις παραδοσιακές αναλύσεις απόφασης θα εξετάσει τους πολύ απλούς τύπους προσαρμοστικών στρατηγικών [145], [146], [147]. Γενικά, η απεικόνιση των προσαρμοστικών στρατηγικών στα μοντέλα προσομοίωσης τις καθιστά υπολογιστικά δυσκολότερες, να χρησιμοποιηθούν από τις τυποποιημένες προσεγγίσεις βελτιστοποίησης για να ανακαλύψουν τις καλές πολιτικές.

Σε αυτήν την εργασία, οι βραχυπρόθεσμες στρατηγικές παρουσιάζονται ρητά ως αλγόριθμοι που ορίζουν αρχικά ένα ιδιαίτερο σύνολο ενεργειών. Κατά τη διάρκεια του χρόνου, εντούτοις, οι αλγόριθμοι ενσωματώνουν τις νέες πληροφορίες με τον έλεγχο μιας ή περισσότερων βασικών τάσεων στο εσωτερικό ή εξωτερικό περιβάλλον. Μπορούν έπειτα να διευκρινίσουν το νέο ενδεχόμενο ενεργειών σε αυτές τις παρατηρήσεις. Συχνά οι έννοιες και οι τεχνικές βασισμένες σε πράκτορες χρησιμοποιούνται για να απεικονίσουν αυτούς τους αλγορίθμους. Τα προηγούμενα

υπάρχουν στην ψυχολογική και οργανωτική βιβλιογραφία για να υποστηρίξουν την αντιπροσώπευση της λήψης αποφάσεων υπό μορφή αλγορίθμων. Ο άνθρωπος γενικά είναι ικανός για λύση έχοντας την κρίση να καθορίσει ποιες πληροφορίες πρέπει να ακολουθήσει μεταξύ μιας άπειρης θάλασσας δυνατοτήτων [148].

Ο σχεδιασμός επιτυχών προσαρμοστικών στρατηγικών απόφασης είναι δύσκολος. Οι σχεδιαστές πολιτικής συχνά χρησιμοποιούν διανοητικές προσομοιώσεις για να παρατηρήσουν τις επιπτώσεις των αλγορίθμων απόφασης και για να εντοπίσουν ακριβώς τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να ψάξουν έτσι ώστε να καθορίσουν τη σωστότερη λήψη απόφασης. Αυτός ο γενικός κανόνας προσέγγισης λειτουργεί καλά εφόσον το μέλλον είναι παρόμοιο με το παρελθόν. Δεδομένου ότι το μακροπρόθεσμο μέλλον παρεκκλίνει από την έως τώρα γνωστή εμπειρία, τα αποτελέσματα των έως τώρα αξιόπιστων εμπειρικών τεχνικών μεθόδων μπορούν να αποκλίνουν. Για να ξεπεράσουν αυτό το εμπόδιο, οι εύρωστες μέθοδοι απόφασης συγκρίνουν την απόδοση των εναλλακτικών προσαρμοστικών στρατηγικών απόφασης ψάχνοντας εκείνες που είναι πιο εύρωστες σε ένα μεγάλο σύνολο πιθανών μελλοντικών εκβάσεων.

A.1.4.5 Αμφίδρομος Συνδυασμός των Ικανοτήτων των Μηχανών και των Ανθρώπων

Οι παραδοσιακές προσεγγίσεις στην υποστήριξη αποφάσεων χρησιμοποιούν τον υπολογιστή ως επιστημονικό κομπιουτεράκι. Οι αναλυτές πραγματοποιούν αρχικά λεπτομερείς ασκήσεις στο συλλογισμό για να συντάξουν στη συνέχεια το καλύτερο μοντέλο και να εξετάσουν όλες τις υποθέσεις τις σχετικές με μια ιδιαίτερη απόφαση πριν τροφοδοτήσουν τα αποτελέσματα αυτά στον υπολογιστή. Ο υπολογιστής παράγει μια ταξινόμηση του εναλλακτικών ενδεχομένων στρατηγικών σε αυτές τις υποθέσεις και, ειδικότερα, προσδιορίζει το βέλτιστο. Οι περισσότερο περίπλοκες προσπάθειες μπορούν επίσης να περιλάβουν ανάλυση για το πόσο ευαίσθητη είναι η βέλτιστη στρατηγική στις διάφορες υποθέσεις που γίνονται στην έναρξη της ανάλυσης [149]. Κατόπιν, αφήνοντας τον υπολογιστή κατά μέρους, οι αναλυτές παρέχουν μια σύνοψη των αποτελεσμάτων στους ιθύνοντες σε μια επόμενη και χωριστή διαδικασία για να ενσωματώσουν τα αποτελέσματα —μαζί με πολλές

πληροφορίες που δεν περιλαμβάνονται στους υπολογισμούς του υπολογιστή —στο θεσμικό και πολιτικό πλαίσιο της λήψης αποφάσεων.

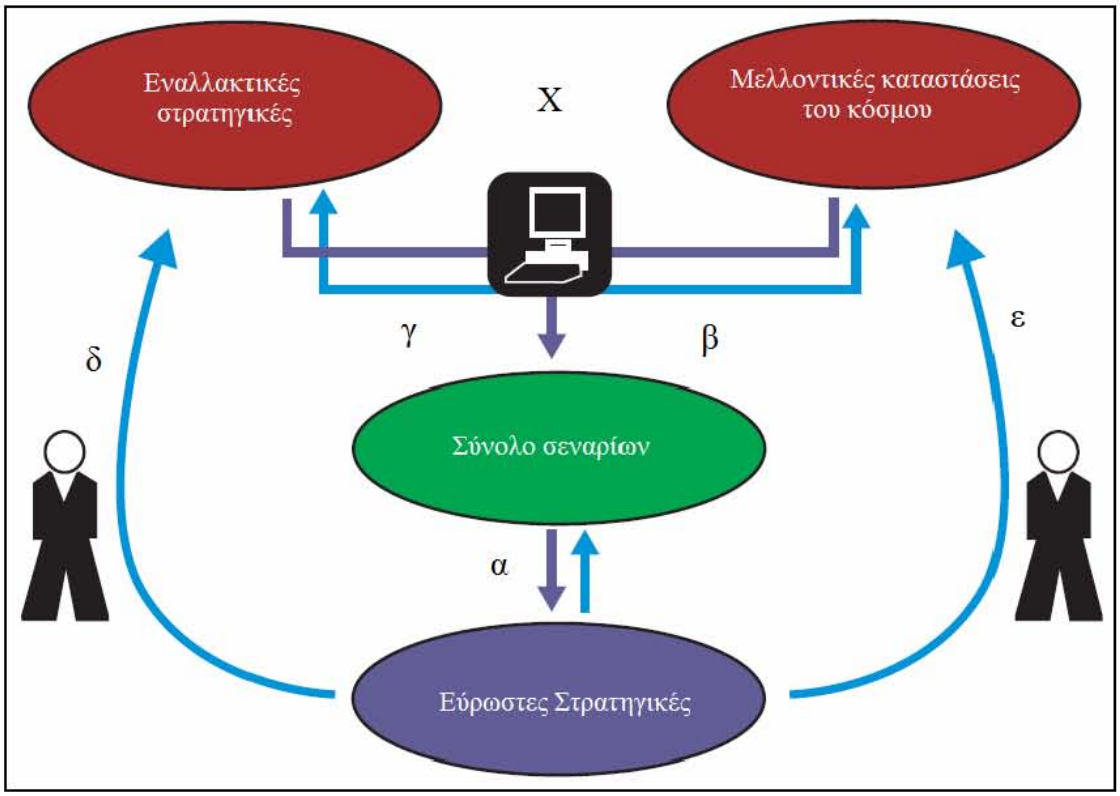
Η σύγχρονη τεχνολογία πληροφοριών καθιστά πιθανή μια νέα και ισχυρότερη μορφή συνεργασίας μεταξύ ανθρώπων και μηχανών, τέτοια που να ταιριάζει καλύτερα στην εύρεση των προσαρμοστικών στρατηγικών που είναι εύρωστες κατά τη διάρκεια του χρόνου. Από το να περιοριστεί η περιοχή δράσης του υπολογιστή σε ρόλο καθαρά βοηθητικό όπως είναι αυτός από ένα επιστημονικό κομπιουτεράκι, στην εύρωστη λήψη αποφάσεων οι ικανότητες ενός υπολογιστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να χειριστούν, να επιδείξουν και να συνοψίσουν τις απέραντες ποσότητες πληροφοριών. Ο υπολογιστής γίνεται έτσι μια συσκευή που, εξαρχής της αναλυτικής διαδικασίας, βοηθά τους ανθρώπους να διαμορφώσουν και να δοκιμάσουν τις πιο εύρωστες βραχυπρόθεσμες ενέργειες λαμβάνοντας υπόψη τις πολλαπλές μακροπρόθεσμες μελλοντικές εκβάσεις. Τέτοιες πληροφορίες είναι συχνά πολύ ωφέλιμες γιατί παρουσιάζονται υπό μορφή διαλογικών παραγόμενων απεικονίσεων από υπολογιστή που μπορούν να θεωρηθούν μεταφορικά ως χάρτες των πολλών πιθανών πορειών στο μακροπρόθεσμο μέλλον. Ο υπολογιστής βοηθά τους ανθρώπους να προσδιορίσουν, να δημιουργήσουν και να εξερευνήσουν τους πιο χρήσιμους χάρτες και στη συνέχεια να σχεδιάσουν τα επόμενα βήματα του ταξιδιού. Αυτά τα παραγόμενα αντικείμενα μπορούν να γίνουν μια κρίσιμη δομή για μια συνομιλία μεταξύ των συμβαλλόμενων μερών σε μια απόφαση.

A.1.4.5.1 Συλλογή Πληροφοριών

Τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται σε αυτήν την μελέτη επιτρέπουν στους ανθρώπους να διευθύνουν μια συστηματική, διαλογική, με τη βοήθεια υπολογιστή εξερεύνηση σε μια πολλαπλότητα πιθανών μελλοντικών εκβάσεων με το στόχο τη συναίνεση στις βραχυπρόθεσμες ενέργειες ώστε να διαμορφωθεί το μακροπρόθεσμο μέλλον ευνοϊκά. Οι αναλυτές ενσωματώνουν τις διαθέσιμες πληροφορίες στις γεννήτριες σεναρίων δηλαδή, στον κώδικα του υπολογιστή με σκοπό να επισημάνει τις συνέπειες κάθε εναλλακτικού συνόλου υποθέσεων.

Όπως απεικονίζεται στο Σχήμα Α.1, για τους σκοπούς LTPA τα αρχικά στοιχεία της ανάλυσης διαιρούνται πρώτα σε εναλλακτικές στρατηγικές που

αντιπροσωπεύουν διαφορετικές επιλογές βραχυπρόθεσμων ενεργειών που το ακροατήριο για το LTPA επιλέγει να συμπεριλάβει (το στοιχείο πολιτικής) και επίσης μελλοντικές καταστάσεις του κόσμου (future states of the world) που είναι τα βασικά και ενδεχομένως άγνωστα χαρακτηριστικά του κόσμου που μπορεί να αποδειχθούν σημαντικά στον καθορισμό της επιτυχίας των εναλλακτικών στρατηγικών. Αυτά τα τελευταία περιγράφουν τα στοιχεία της τρέχουσας κατάστασης γνώσης μας, συμπεριλαμβανομένων των ρητών δηλώσεων όπου οι αβεβαιότητες μπορούν να βρεθούν. Ας σημειωθεί ότι στο Σχήμα Α.1, οι κεντρικές γραμμές (α, β και γ) αντιπροσωπεύουν τους υπολογισμούς των υπολογιστών (computer calculations) ενώ οι γραμμές στο αριστερό και στο δεξιό μέρος του Σχήματος 1 (δ και ε) αντιπροσωπεύουν τις νέες πληροφορίες που προστίθενται από τους ανθρώπους.



Σχήμα Α.1. Ολοκλήρωση υπολογιστών και ανθρώπων σε LTPA.

Α.1.4.5.2 Δημιουργία Υποθέσεων για τις Εύρωστες Στρατηγικές

Μετά τη συγκέντρωση των αρχικών πληροφοριών, οι χρήστες χρησιμοποιούν τον υπολογιστή και τη γεννήτρια σεναρίων για να δημιουργήσουν ένα σύνολο πιθανών σεναρίων. Κάθε σενάριο αποτελείται από μια συγκεκριμένη επιλογή της στρατηγικής, συχνά προσαρμοστική, και μια ιδιαίτερη εκδήλωση μιας μελλοντικής κατάστασης του κόσμου. Σε αυτό το σημείο, οι χρήστες μπορούν να ερευνήσουν αυτά τα σενάρια με τη δημιουργία διαλογικών απεικονίσεων υπολογιστών (interactive computer visualizations) οι οποίες αποκαλούνται και ως τοπία πιθανών μελλοντικών εκβάσεων ή συνόλου μελλόντων (landscapes of plausible futures). Αυτές οι δυσδιάστατες ή τρισδιάστατες γραφικές απεικονίσεις εφαρμόζουν μια ή περισσότερες τιμές για να γίνει η σύγκριση της απόδοσης μεταξύ των εναλλακτικών στρατηγικών σε μια σειρά μελλοντικών εκβάσεων. Στο Παράρτημα αυτό, θα χρησιμοποιηθεί και θα παρουσιαστεί μια ευρεία ποικιλία τέτοιων απεικονίσεων [121]. Στη συνέχεια παρουσιάζονται πολλές δυσδιάστατες γραφικές παραστάσεις που αντιπροσωπεύουν γραφικές φέτες (slices) μέσω του πολυδιάστατου διαστήματος εισόδου και εξόδου.

Καθοδηγημένοι από τον υπολογιστή, οι χρήστες επιλέγουν τα τοπία που εμφανίζονται χρήσιμα για την εξέταση του θέματος πολιτικής του ενδιαφέροντός τους. Τα εύρη παραμέτρων που καθορίζουν ένα συγκεκριμένο τοπίο πιθανών μελλοντικών εκβάσεων μπορούν να προέλθουν από τη συζήτηση του ζητήματος καθώς επίσης και από τις διαισθήσεις των αναλυτών για τις πιθανές λύσεις. Επιπλέον, η επιλογή των παραμέτρων στην επίδειξη στους άξονες των απεικονίσεων και οι τιμές εκείνων των παραμέτρων που θα λάβουν τιμές σταθερές είναι αυτές που προτείνονται συχνά από την αναζήτηση των υπολογιστών και την ανάλυση ευαισθησίας. Παρακάτω καταδεικνύεται ότι με την εξέταση τέτοιων τοπίων, οι χρήστες μπορούν συστηματικά να ερευνήσουν την πολλαπλότητα των πιθανών μελλοντικών εκβάσεων, την έκταση της ποικιλομορφίας του συνόλου, την ανίχνευση των σημαντικών σχεδίων και την απόκτηση της γνώσης σχετικά με τους βασικούς οδηγούς συστημάτων. Με την εξέταση αυτών των συνόλων σεναρίων, η κοινή αυτή ομάδα μεταξύ ανθρώπου και υπολογιστή προσδιορίζει τις στρατηγικές που είναι αρκετά εύρωστες στη σειρά των πιθανών μελλόντων (πορεία "α" στο Σχήμα Α.1)

A.1.4.5.3 Αξιολόγηση Υποθέσεων

Μόλις διαμορφωθούν οι αρχικές αξιώσεις για τις εύρωστες στρατηγικές, οι χρήστες μπορούν να εξετάσουν και να αναθεωρήσουν αυτές τις υποθέσεις μέσω της αναζήτησης με τη βοήθεια των υπολογιστών άλλων μελλοντικών εκβάσεων που θα ακύρωναν αυτήν την αξίωση (πορεία "β"), και έπειτα με τη βοήθεια του υπολογιστή προσδιορίζονται οι πιο ελπιδοφόρες εναλλακτικές στρατηγικές (πορεία "γ"). Οι αλγόριθμοι αναζήτησης με τη χρήση υπολογιστών μπορούν να προτείνουν τις μελλοντικές εκβάσεις που θα μπορούσαν να αναγκάσουν τις υποψήφιες εύρωστες στρατηγικές να αποτύχουν και να βρουν τις εναλλακτικές λύσεις έτσι ώστε αυτές οι υποψήφιες μελλοντικές εκβάσεις να μπορέσουν να αποδώσουν καλά υπό τους πρόσφατα διευκρινισμένους όρους. Πάλι, η διαλογική απεικόνιση είναι ένας ισχυρός τρόπος για να κριθεί αν οι μελλοντικές εκβάσεις θέτουν επαρκείς κινδύνους για μια αναθεώρηση στρατηγικής. Τα τοπία που επιδεικνύουν τέτοιες συγκρίσεις καλούνται και εύρωστες περιοχές (robust regions) σε αρμονία με την ανάλυση των περιοχών πολιτικής του Watson και Buede [151].

Αυτές οι αναζητήσεις για σενάρια σπασίματος (breaking scenarios) μπορούν να εμφανιστούν εξ ολοκλήρου μέσα στο διάστημα των μελλοντικών εκβάσεων και των στρατηγικών που περιλαμβάνονται στο αρχικό σύνολο δηλαδή μέσα στις ικανότητες των τρεχουσών γεννητριών σεναρίου. Καθώς η ανάλυση προχωρά, οι ανθρώπινοι συμμετέχοντες στην ανάλυση ενθαρρύνονται να υποθέσουν για στρατηγικές επιλογές (strategic options) που να μπορούν να αποδειχθούν πιο εύρωστες από τις τρέχουσες εναλλακτικές λύσεις (πορεία "δ") ή να προτείνουν " εκπλήξεις" που να εμφανιστούν στο μέλλον και να αναγκάσουν μια προφανώς εύρωστη στρατηγική να αποτύχουν (πορεία "ε"). Αυτοί οι νέοι υποψήφιοι μπορούν να προστεθούν στη γεννήτρια σεναρίων και να διερευνηθούν οι επιπτώσεις από τον υπολογιστή.

Η συλλογή πληροφοριών εμφανίζεται σε όλη την ανάλυση. Λαμβάνοντας υπόψη τη μη προβλεψιμότητα του μέλλοντος, κανένας δε μπορεί να καθορίσει a priori όλους τους παράγοντες που μπορούν τελικά να αποδειχθούν σχετικοί με την απόφαση. Κατά συνέπεια, οι χρήστες θα συγκεντρώνουν νέες πληροφορίες που μπορούν να βοηθήσουν στον υπολογισμό στον καθορισμό των νέων μελλοντικών εκβάσεων των σχετικών με την επιλογή μεταξύ των στρατηγικών. Με αυτόν τον

τρόπο μπορούν μερικές μελλοντικές εκβάσεις να αποδειχθούν αδικαιολόγητες και στη συνέχεια να αφαιρεθούν από το σύνολο ή να προκύψουν και να πρέπει να συμπεριληφθούν νέες, ενδεχομένως ελπιδοφόρες στρατηγικές [56], [152], [153].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΠΡΟΣΦΟΡΑ ΣΤΙΣ ΣΚΑΝΔΙΝΑΒΙΚΕΣ ΧΩΡΕΣ

Β.1 Εισαγωγή

Η ηλεκτρική παραγωγή στις Σκανδιναβικές χώρες (Φινλανδία, Σουηδία, Νορβηγία και Δανία) προέρχεται κατά το μεγαλύτερό της μέρος από την υδροηλεκτρική ενέργεια ή υδρενέργεια (hydropower). Η Νορβηγία παράγει σχεδόν όλη την ηλεκτρική της ενέργεια με υδροηλεκτρική παραγωγή ενώ η Σουηδία παράγει σχεδόν τη μισή της ενέργεια με αυτόν τον τρόπο. Το άλλο μισό της Σουηδικής ηλεκτρικής παραγωγής καλύπτεται από την πυρηνική ενέργεια. Η Φινλανδία έχει λίγους πόρους που μπορούν να συνεισφέρουν στην παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας έναντι της Νορβηγίας και της Σουηδίας ενώ η Δανία δεν έχει σχεδόν καθόλου παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές οι δύο χώρες έχουν αναγκαστεί να επιδιώξουν άλλα αποδοτικά μέσα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά συνέπεια, η συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας και η χρήση της θερμοηλεκτρικής ενέργειας έχουν αναπτυχθεί σε ένα υψηλό επίπεδο. Η συνολική ηλεκτρική παραγωγή στις Σκανδιναβικές χώρες ήταν 384TWh το 1998.

Το Σκανδιναβικό κλίμα, η έντονα ενεργοβόρα βιομηχανία και οι μεγάλες αποστάσεις είναι μερικές από τις κύριες αιτίες για την υψηλή κατά κεφαλήν ενεργειακή κατανάλωση στις Σκανδιναβικές χώρες. Το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας σε τελική ενεργειακή χρήση είναι εξαιρετικά υψηλό έναντι των άλλων χωρών του ΟΟΣΑ. Λόγω των μεγάλων πόρων υδρενέργειας, η ηλεκτρική ενέργεια είναι διαθέσιμη με χαμηλό κόστος τόσο για τη βιομηχανία όσο και για τους

καταναλωτές. Αυτό έχει δημιουργήσει έντονα ευνοϊκή συγκυρία για την ανάπτυξη της ενεργοβόρας βιομηχανίας, όπως η βιομηχανία χαρτιού και πολτού και η βιομηχανία μετάλλων. Στις αγορές θερμότητας χώρου, οι χαμηλές τιμές ηλεκτρικής ενέργειας των μικρών καταναλωτών έχουν κάνει τα κεντρικά ηλεκτρικά συστήματα θέρμανσης (central electric heating systems) πολύ δημοφιλή.

Το Σκανδιναβικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει περάσει από σημαντικές αλλαγές στην τελευταία δεκαετία. Η κύρια αιτία για αυτές τις αλλαγές είναι η διαδικασία απελευθέρωσης, η οποία άρχισε από τη Νορβηγία στην αρχή της δεκαετίας του '90. Η Φινλανδία και η Σουηδία προχώρησε στην απελευθέρωση στα μέσα της δεκαετίας του '90 ενώ η Δανία λίγα έτη αργότερα. Ο έντονος ανταγωνισμός μεταξύ των μικρών πελατών και οι πολλές δομικές μεταρρυθμίσεις στην ιδιοκτησία των επιχειρήσεων ηλεκτρικής ισχύος είναι ίσως τα πιο ορατά αποτελέσματα της άρσης των ελέγχων της αγοράς. Οι σημαντικότεροι παραγωγοί ισχύος έχουν αρχίσει να επεκτείνουν τις δραστηριότητές τους και σε γειτονικές χώρες.

Σε αυτό το Παράρτημα παρουσιάζονται τα συστήματα ανεφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάπτυξή τους σε κάθε μια από τις Σκανδιναβικές χώρες. Το Παράρτημα επικεντρώνεται στην περιγραφή της δομής του συστήματος ηλεκτρικής παραγωγής. Στο τελευταίο τμήμα, δίνεται μια επισκόπηση των εθνικών υποχρεώσεων μείωσης εκπομπών αερίων θερμοκηπίου καθώς επίσης και των εκπομπών από το πρωτόκολλο του Κιότο [154], [155], [156], [157], [158], [159], [160].

B.1.1 Σουηδία

Οι πόροι υδρενέργειας αναπτύχθηκαν για την ηλεκτρική παραγωγή στη Σουηδία στην αρχή του 20ού αιώνα. Μέχρι τη δεκαετία του '30, χρησιμοποιήθηκαν οι μεγαλύτεροι ποταμοί στη νότια και κεντρική Σουηδία ενώ η επέκταση της υδρενέργειας συνεχίστηκε στη βόρεια Σουηδία. Δεδομένου ότι ο πληθυσμός και η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συγκεντρώθηκαν στο νότο, αυξήθηκε η ανάγκη για τη μεταφορά ενέργειας. Το 1946, δόθηκε στην κρατική επιχείρηση ηλεκτρισμού η ευθύνη (Vattenfall) να χτίσει και να ενεργοποιήσει όλες τις νέες γραμμές μεταφοράς στο εθνικό πλέγμα. Η επιχείρηση αναπτύχθηκε για να είναι ο κύριος φορέας στη

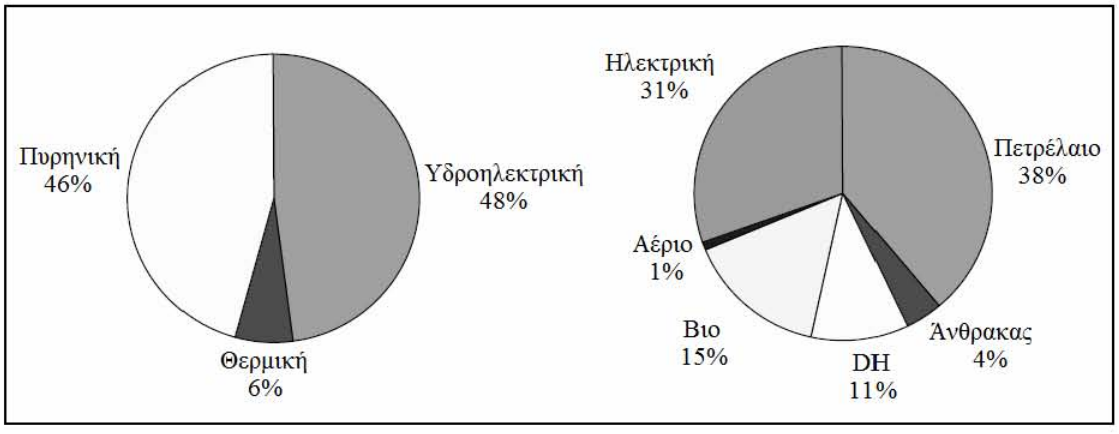
Σουηδική αγορά ενέργειας, αρμόδια για το συντονισμό του εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας για ολόκληρο το κράτος. Το 1992, κατά την προετοιμασία του ανοίγματος της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η Vattenfall αναδιοργανώθηκε σε μια εταιρεία περιορισμένης ευθύνης. Η ευθύνη για το εθνικό πλέγμα μεταβιβάστηκε στον κρατικό χειριστή του δικτύου (Svenska Kraftnät).

Μετά από το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο υπήρξε μια περίοδος οικονομικής άνθισης (booming economy) στη Σουηδία καθώς επίσης και στις άλλες Σκανδιναβικές χώρες. Αυτό προκάλεσε μια γρήγορα αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας, η οποία δεν θα μπορούσε να καλυφθεί μόνο με την επέκταση της υδρενέργειας. Έτσι άρχισε η κατασκευή εγκαταστάσεων θερμικής παραγωγής ενέργειας με τη χρήση άνθρακα και πετρελαίου. Η ανάπτυξη της υδρενέργειας τερματίστηκε ουσιαστικά στη δεκαετία του '60, όταν λήφθηκε η απόφαση ότι οι τέσσερις μεγάλοι ποταμοί στη βόρεια Σουηδία θα προστατεύονταν. Στην αρχή της δεκαετίας του '70, περίπου το 70% της ηλεκτρικής ενέργειας παρήχθηκε από την υδρενέργεια και το 20% της παραγωγής βασίστηκε στο πετρέλαιο [155]. Αν και η ηλεκτρική ενέργεια παρήχθηκε κυρίως από την υδρενέργεια, το 75% του συνολικού ενεργειακού ανεφοδιασμού στηρίχθηκε στο εισαγόμενο πετρέλαιο. Μετά από τις κρίσεις του πετρελαίου, ένας από τους κύριους στόχους της Σουηδικής ενεργειακής πολιτικής ήταν να μειωθεί η εξάρτηση του έθνους από το πετρέλαιο. Αυτό οδήγησε σε μια ουσιαστική αύξηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και λήφθηκε απόφαση για ένα εκτενές πρόγραμμα πυρηνικής ενέργειας.

Ο πρώτος πυρηνικός αντιδραστήρας στη Σουηδία καταστάθηκε λειτουργικός το 1972 και ακολουθήθηκε σύντομα από άλλους αντιδραστήρες. Η επέκταση της πυρηνικής ενέργειας συνεχίστηκε μέχρι το ατύχημα Mile Island στις ΗΠΑ. Μετά από το ατύχημα, πραγματοποιήθηκε ένα δημοψήφισμα για την πυρηνική ενέργεια το 1980 και βασισμένο στο δημοψήφισμα, το Σουηδικό Κοινοβούλιο αποφάσισε ότι οι εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας που βρίσκονταν εκείνη την περίοδο υπό κατασκευή θα ήταν οι τελευταίες μονάδες πυρηνικής ενέργειας που θα εισέρχονταν σε λειτουργία. Το Κοινοβούλιο επίσης αποφάσισε ότι η πυρηνική ενέργεια θα καταργηθεί σταδιακά μέχρι το έτος 2010. Το 1986, μετά από το ατύχημα στο Τσέρνομπιλ, το Σουηδικό Κοινοβούλιο αποφάσισε ότι η σταδιακή κατάργηση πυρηνικής ενέργειας θα άρχιζε με τον αφοπλισμό δύο αντιδραστήρων στα μέσα της δεκαετίας του '90.

Στη δεκαετία του '90, η Σουηδική ενεργειακή πολιτική που ακολουθήθηκε οδήγησε στη δημιουργία των κατάλληλων όρων για την σταδιακή πυρηνική κατάργηση. Το 1991 λήφθηκε μια σημαντική απόφαση ενεργειακής πολιτικής που προέβλεπε ότι ο ρυθμός του αφοπλισμού των εγκαταστάσεων πυρηνικής ενέργειας θα εξαρτώταν από τα αποτελέσματα των μέτρων συντήρησης ηλεκτρικής ενέργειας και την πρόοδο της αύξησης της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ένας νέος όρος για την πυρηνική σταδιακή κατάργηση ήταν η συντήρηση των διεθνώς ανταγωνιστικών τιμών ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενεργειακή Επιτροπή δήλωσε αργότερα ότι οι στόχοι της ενέργειας και της πολιτικής για το περιβάλλον ήταν σε σύγκρουση και προς εύνοια της εθνικής οικονομίας έναντι των περιβαλλοντικών εκτιμήσεων, σύμφωνα με την Επιτροπή, η πυρηνική σταδιακή κατάργηση επρόκειτο να πραγματοποιηθεί κατά τη διάρκεια μιας μακριάς χρονικής περιόδου. Τον Φεβρουάριο του 1998, η Σουηδική κυβέρνηση αποφάσισε ότι ο αντιδραστήρας Barsebäck 1 θα αφοπλιζόταν μέχρι το τέλος του Ιουνίου του 1998. Η απόφαση οδηγήθηκε με έφεση στο δικαστήριο και ο αφοπλισμός αναβλήθηκε. Τέλος, το Νοέμβριο του 1999 ο Barsebäck 1 αφοπλίστηκε μετά από συμφωνία με οικονομική αποζημίωση.

Σήμερα, η υδρενέργεια και η πυρηνική ενέργεια κυριαρχούν στην ηλεκτρική παραγωγή της Σουηδία. Μαζί συνιστούν περισσότερο από το 90% της παραγωγής ενέργειας, ενώ το υπόλοιπο του ανεφοδιασμού παράγεται κυρίως από θερμοηλεκτρική παραγωγή πετρελαίου (Σχήμα Β.1α).



Σχήμα Β.1. α) Ηλεκτρική παραγωγή της Σουηδίας το 1998 (συνολικά 154TWh). β) Τελική χρήση ενέργειας στη Σουηδία το 1998.

Η εγκατεστημένη ικανότητα υδρενέργειας στη Σουηδία προσθέτει μέχρι 16.2GW και με την ικανότητα δεξαμενών για τη ρύθμιση της υδρενέργειας σε 33.5TWh. Η ετήσια παραγωγή υδρενέργειας μπορεί να ποικίλει μεταξύ 50TWh και 75TWh, ανάλογα με τη βροχή και τις χιονοπτώσεις. Η Σουηδία έχει δώδεκα πυρηνικούς αντιδραστήρες με εγκατεστημένη ικανότητα 10GW. Ο Barsebäck 1, που βγήκε εκτός λειτουργίας τον Νοέμβριο του 1999, είχε ικανότητα 600MW. Η συνολική εγκατεστημένη ικανότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Σουηδίας ανέρχεται σε 32GW και η συνολική ετήσια παραγωγική ικανότητα ποικίλλει, ανάλογα με την παραγωγή υδρενέργειας, μεταξύ 155TWh και 180TWh. Το μεγαλύτερο μέρος της ικανότητας υδρενέργειας είναι τοποθετημένη στο βόρειο μέρος της Σουηδίας, ενώ οι εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας βρίσκονται πιο κοντά στην κατανάλωση ισχύος, δηλαδή στα μέσα και τα νότια μέρη της Σουηδίας.

Δεδομένου ότι η υδρενέργεια είναι η κύρια πηγή ηλεκτρικής ενέργειας στη Σκανδιναβική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, ολόκληρη η αγορά, και ειδικά η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, επηρεάζονται έντονα από τις ετήσιες καιρικές συνθήκες. Κανονικά, η Σουηδία θεωρείται εξαγωγέας ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά η χαμηλή εισροή δεξαμενών (low reservoir inflow), δεδομένου ότι συνέβη το 1996, οδηγεί σε καθαρές εισαγωγές. Σε ετήσια βάση, η Σουηδία εξάγει την ηλεκτρική ενέργεια στη Φινλανδία, τη Νορβηγία και τη Γερμανία. Η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας στη Σουηδία έχει οδηγήσει σε αυξανόμενες εισαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας από τη Δανία στη δεκαετία του '90. Το 1998, η εισαγωγή ήταν αρκετά παραπάνω από το μέσο όρο (παραγωγή 74TWh υδρενέργειας και συνολική ηλεκτρική παραγωγή 154TWh) και η Σουηδία ήταν καθαρός εξαγωγέας της ηλεκτρικής ενέργειας [88]. Οι στατιστικές που εξετάζουν την εγκατεστημένη ικανότητα, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, την κατανάλωση και το εμπόριο στο έτος 1998 παρουσιάζονται στον Πίνακα 1, Πίνακα 2, Πίνακα 3 και Πίνακα 4 τόσο για τη Σουηδία όσο και για τις υπόλοιπες Σκανδιναβικές χώρες.

(MW)	Σουηδία	Νορβηγία	Φινλανδία	Δανία	Συνολικό
Υδρενέργεια	16204	27388	2937	11	46540
Πυρηνική	10052	-	2640	-	12692
Άλλες θερμικές μορφές ενέργειες	5564	293	10864	10962	27683
Υγροποιημένες	846	73	3903	3273	8095
CHP (γενική θέρμανση)	2246	-	3606	7061	12913
CHP (βιομηχανία)	841	185	2477	322	3825
Αέριο	1631	35	878	306	2850
Αιολική	174	9	17	1450	1650
Συνολικό	31994	27690	16458	12423	88565

Πίνακας Β.1. Εγκατεστημένη ικανότητα στις Σκανδιναβικές χώρες τις 31 Δεκεμβρίου 1998.

(GWh)	Σουηδία	Νορβηγία	Φινλανδία	Δανία	Συνολικό
Υδρενέργεια	154340	116277	14602	27	204633
Πυρηνική	73727	-	20985	-	91449
Άλλες θερμικές μορφές ενέργειες	9849	668	31572	36360	78449
Υγροποιημένες	272	109	6473	35003	41857
CHP (γενική θέρμανση)	5083	-	13076	(*)	18159
CHP (βιομηχανία)	4487	345	12009	1357	18198
Αέριο	7	214	14	-	235
Αιολική	300	8	24	2653	2985
Συνολικό	154340	116953	67183	39040	377516

Πίνακας Β.2. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις Σκανδιναβικές χώρες το 1998, όπου * συμπεριλαμβάνεται στις υγροποιημένες μορφές.

	Εισαγωγή στη χώρα:					
(GWh)	Σουηδία	Νορβηγία	Φινλανδία	Δανία	Άλλοι	Συνολικό
Εξαγωγή από τη χώρα:						
Σουηδία	-	7379	5347	1901	2276	16903
Νορβηγία	3004	-	72	1327	-	4403
Φινλανδία	839	91	-	-	-	930
Δανία	2162	418	-	-	5186	7766
Άλλοι	88	193	4818	245	-	5344
Συνολικό	6093	8081	10237	3473	7462	35346

Πίνακας Β.3. Εμπόριο ηλεκτρικής ενέργειας στις Σκανδιναβικές χώρες το 1998. Άλλες χώρες είναι η Γερμανία που θεωρείται ότι κάνει εμπόριο με τη Δανία, τη Σουηδία και τη Νορβηγία και η Ρωσία που θεωρείται ότι κάνει εμπόριο με τη Φινλανδία.

(GWh)	Σουηδία	Νορβηγία	Φινλανδία	Δανία	Συνολικό
Συνολική κατανάλωση	143530	120631	76490	34747	375398
Περιστασιακή ενέργεια σε ηλεκτρικούς λέβητες	1900	4916	138	-	6954
Μικτή κατανάλωση	141630	115715	76352	34747	368444
Απώλειες, σύστημα ικανότητας φρακτών	10672	10003	2840	1997	25512
Καθαρή κατανάλωση	130958	105712	73512	32750	342932
Κατοικίες	40500	36788	17950	9810	105048
Βιομηχανία (συμπεριλαμβανομένου του ενεργειακού τομέα)	58600	46408	43388	9770	158166
Εμπόριο και υπηρεσίες (συμπεριλαμβανομένου των μεταφορών)	28358	20916	11574	9690	70538
Άλλοι (συμπεριλαμβανομένων της γεωργίας)	3500	1600	600	3480	9180
Πληθυσμός (σε εκατομμύρια)	8.9	4.4	5.1	5.3	23.7
Μικτή κατανάλωση κατά κεφαλήν, kWh.	15996	26115	14814	6556	15546

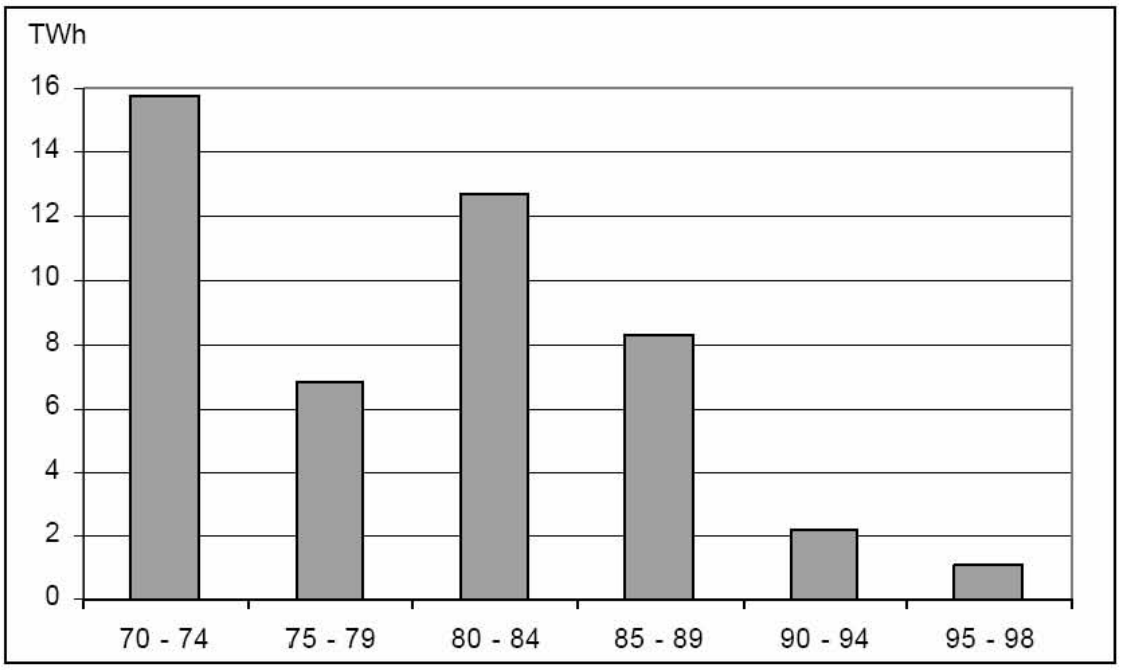
Πίνακας Β.4. Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στις Σκανδιναβικές χώρες το 1998.

Το 1998, η συνολική τελική ενεργειακή χρήση στη Σουηδία ήταν 410TWh. Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ήταν 144TWh, συμπεριλαμβανομένης της τελικής ενεργειακής χρήσης 126TWh και των απωλειών διανομής 11TWh. Τα υπόλοιπα 7TWh χρησιμοποιήθηκαν στις εγκαταστάσεις καθαρισμού ή για την παραγωγή θερμότητας περιοχής στους ηλεκτρικούς λέβητες και τις αντλίες θερμότητας [91]. Η Nordel υπολογίζει μια αύξηση 6TWh στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας της Σουηδίας. Στο Σχήμα Β.1β αναπαρίσταται οι φέτες των διαφορετικών ενεργειακών μεταφορέων σε τελική ενεργειακή χρήση.

Μια ανάλυση στα αποτελέσματα της Σουηδικής πυρηνικής σταδιακής κατάργησης έχει ήδη γίνει [161]. Χρησιμοποιήθηκε μια πρότυπη δυναμική εστίαση μερικής ισορροπίας στη Σουηδική αγορά ενέργειας. Η αλληλοεξάρτηση μεταξύ της θερμότητας και της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας διαμορφώθηκε ρητά. Οι σταθεροποιημένες εκπομπές CO_2 στο επίπεδο του 1990 μέχρι το 2010, οι δαπάνες για μια σταδιακή κατάργηση υπολογίστηκαν για να είναι 30% του ΑΕΠ, το οποίο το 1998 ανήλθε σε 1890 δισεκατομμύρια SEK (περίπου 240 δισεκατομμύρια δολάρια το χρόνο). Δεδομένου ότι το πρότυπο υπέθεσε λεία οικονομία (frictionless economy), το αποτέλεσμα είναι πιθανό να είναι υποτιμημένο. Επιπλέον, οι δαπάνες λόγω της ανάπτυξης του εθνικού χρέους δε λήφθηκαν υπόψη στην εκτίμηση του κόστους. Οι συντάκτες καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η σταδιακή κατάργηση της πυρηνικής ενέργειας και ο περιορισμός των εκπομπών του CO_2 στα επίπεδα του 1990 είναι αμοιβαία αποκλειστικοί να εκπληρωθούν. Αργότερα, σύμφωνα με την εσωτερική διακοπή της συμφωνίας του Κιότο από την ΕΕ, η Σουηδία είχε την άδεια να αυξήσει τις εκπομπές της κατά 4% μέχρι το 2010 αντί της σταθεροποίησης τους, όπως υποτέθηκαν στο πρότυπο.

B.1.2 Νορβηγία

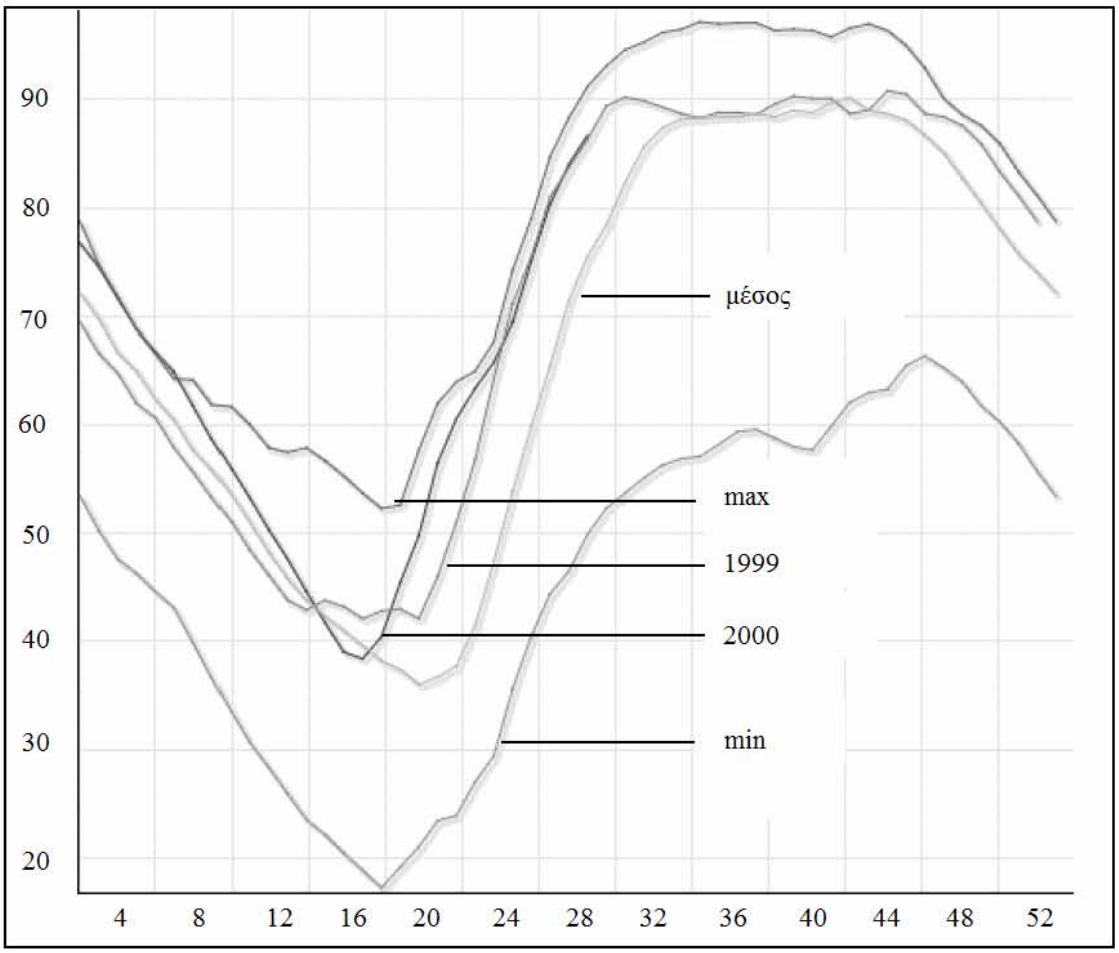
Η δομή του Νορβηγικού συστήματος ανεφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας έχει παραμείνει αμετάβλητο από την αρχή του. Η αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και οι εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας έχουν καλυφθεί από την επέκταση της υδρενέργειας, η οποία αποτελεί το 99% της ηλεκτρικής παραγωγής. Μετά από το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, η ετήσια παραγωγική ικανότητα υδρενέργειας κυμάνθηκε μεταξύ 10TWh και 12TWh ενώ η επέκταση συνεχίστηκε εντατικά κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '50 και της δεκαετίας του '60. Μέχρι το έτος 1970, η ετήσια παραγωγή υδρενέργειας με μέσες καιρικές συνθήκες είχε αυξηθεί σε 67TWh. Το μεγαλύτερο μέρος του υπόλοιπου υδροδυναμικού εισήλθε σε λειτουργία στη δεκαετία του '70 και τη δεκαετία του '80. Στη δεκαετία του '80 η αύξηση στη νέα ικανότητα υδρενέργειας ήταν πάνω από 20TWh, ενώ στη δεκαετία του '90 έπεσε κάτω από 5TWh, όπως μπορεί να φανεί και στο Σχήμα Β.2.



Σχήμα Β.2. Η αύξηση στην ετήσια παραγωγική ικανότητα υδρενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες (TWh).

Η υπόλοιπη ικανότητα για να αυξήσει την παραγωγή υδρενέργειας έχει υπολογιστεί σε 19TWh της ετήσιας παραγωγής, 40% των οποίων είναι βασισμένο στην ανανέωση και την επέκταση της παλαιάς ικανότητας [160].

Η μέση ετήσια παραγωγή υδρενέργειας στη Νορβηγία στο τέλος της δεκαετίας του '90 ήταν 113TWh, αλλά η παραγωγή μπορεί να ποικίλει ±20TWh ανάλογα με τις ετήσιες καιρικές συνθήκες. Η ικανότητα δεξαμενών στη Νορβηγία είναι 81.5TWh. Η αναλογία μεταξύ της ικανότητας δεξαμενών και της μέσης ετήσιας παραγωγής υδρενέργειας είναι 0.72. Για τη Σουηδία ο ίδιος αριθμός είναι 0.52, το οποίο δείχνει ότι η Νορβηγία έχει μεγαλύτερη διαεποχιακή ικανότητα δεξαμενών και, συνεπώς, καλύτερες δυνατότητες ρύθμισης της παραγωγής υδρενέργειας. Στο Σχήμα Β.3 παριστάνεται η κατάσταση των δεξαμενών στη Νορβηγία κατά τη διάρκεια του 1999 και του πρώτου εξάμηνου του 2000.

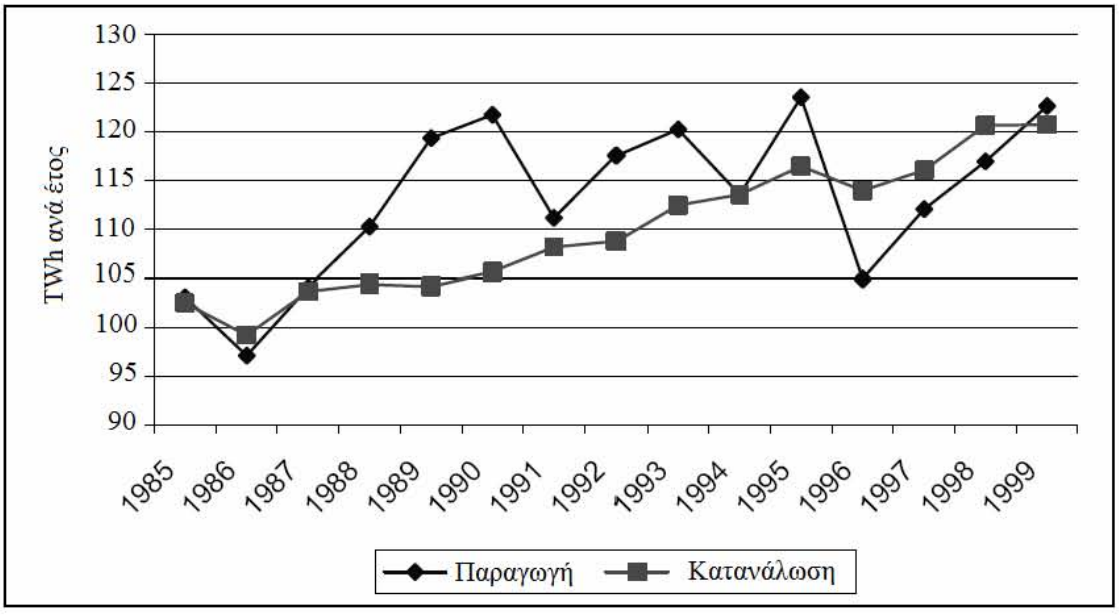


Σχήμα Β.3. Το περιεχόμενο των δεξαμενών στη Νορβηγία όπου ο y άξονας παρουσιάζει το ποσοστό της μέγιστης ικανότητας (81.7TWh), ο x άξονας παρουσιάζει τις εβδομάδες ενός έτους ελάχιστου, min, max και μέσος είναι οι τιμές για την περίοδο 1991-1999.

Εκτός από την υδρενέργεια, η Νορβηγία έχει μόνο δευτερεύοντα ποσά θερμικής ενέργειας. Η ικανότητα ενέργειας από την αιολική ενέργεια είναι ακόμα αμελητέα, αλλά τα προγράμματα έχουν αρχίσει να προωθούν την ανάπτυξή της.

Το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας σε τελική ενεργειακή χρήση είναι πολύ υψηλό στη Νορβηγία. Το 1998 το 53% της τελικής ενέργειας καλύφθηκαν από την ηλεκτρική ενέργεια και το 35% από τα προϊόντα πετρελαίου. Το φυσικό αέριο, με ένα μερίδιο κάτω από 5%, δεν διαδραμάτισε κανέναν σημαντικό ρόλο. Η Νορβηγία έχει τη μεγαλύτερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά κεφαλήν στον κόσμο, περίπου 26000kWh ανά έτος. Η μεγάλη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας προκαλείται και από την ενεργοβόρα βιομηχανία αλλά και από τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας για τη θέρμανση χώρου. Πάνω από το 60% των Νορβηγικών οικογενειών έχουν ηλεκτρικό σύστημα θέρμανσης, ενώ η χρήση της θερμότητας

περιοχής (district heating) περνάει σε δεύτερο πλάνο. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας έχει αυξηθεί σταθερά στις τελευταίες δεκαετίες και στα μέσα της δεκαετίας του '90 η κατανάλωση αυξήθηκε πέρα από την ηλεκτρική παραγωγή ενός κανονικού έτους. Η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας το 1998 ήταν 120.6TWh, το οποίο είναι σαφώς επάνω από τη μέση ηλεκτρική παραγωγή ανά έτος. Στο Σχήμα Β.4 παρουσιάζεται η εξέλιξη της ηλεκτρικής παραγωγής και της κατανάλωσης στη Νορβηγία από το 1985.



Σχήμα Β.4. Η ηλεκτρική παραγωγή και κατανάλωση στη Νορβηγία από το 1985 έως το 1999.

Αν και η Νορβηγία πρέπει να εισαγάγει ηλεκτρική ενέργεια σε ετήσια κλίμακα, εξάγει κανονικά την ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διάρκεια των μέγιστων ωρών κατανάλωσης. Η απαίτηση υψηλότερης ισχύος το 1998 ήταν 20,639MW, ενώ η συνολική ικανότητα ισχύος της υδρενέργειας ήταν 27,690MW. Προς το παρόν η Νορβηγία ανταλλάσσει ηλεκτρική ενέργεια κυρίως με τη Σουηδία και τη Δανία, αλλά οι νέες διασυνδέσεις (Κάτω Χώρες και Γερμανία) και το άνοιγμα της Ευρωπαϊκής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας θα αυξήσουν το εμπόριο ενέργειας με άλλες Ευρωπαϊκές χώρες.

Το κύριο μέρος της Νορβηγικής ικανότητας ηλεκτρικής παραγωγής είναι τοποθετημένο στο νότιο και νοτιοδυτικό μέρος της χώρας. Η κατανάλωση είναι αρκετά παραπάνω από την παραγωγή στην κεντρική Νορβηγία, η οποία προκαλεί μια

ισχυρή ανάγκη μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ αυτών των δύο περιοχών. Εντούτοις, λόγω του έντονου ανάγλυφου, η μεταφορά είναι ένα πρόβλημα στη Νορβηγία και οι δυσχέρειες στην ικανότητα μεταφοράς δημιουργούν παραλλαγές στις τιμές μεταξύ των διαφορετικών περιοχών μέσα στη χώρα. Ηλεκτρική ενέργεια στην κεντρική Νορβηγία μεταφέρεται μέσω της Σουηδίας όπου η ικανότητα μεταφοράς είναι μεγαλύτερη.

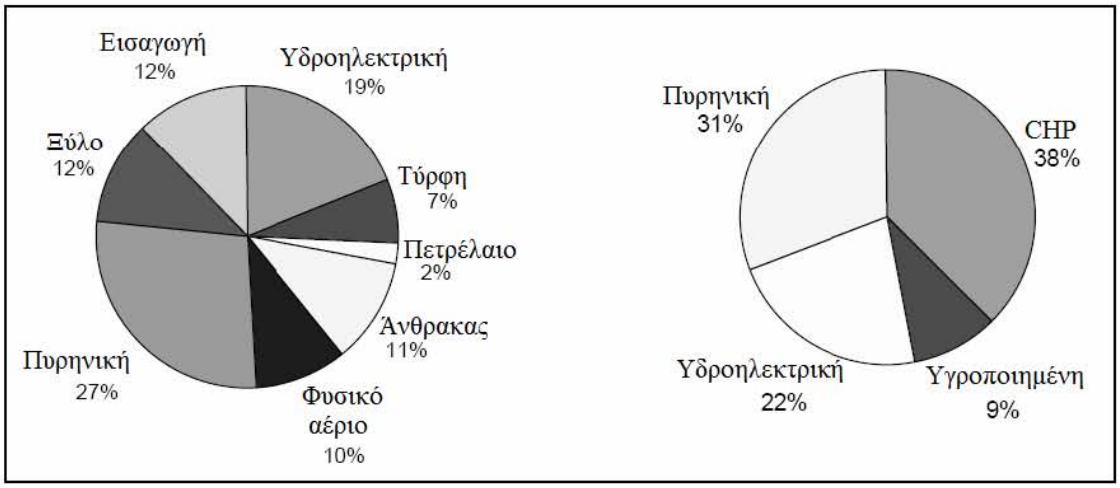
Η Νορβηγία έχει μεγάλους πόρους πετρελαίου και φυσικού αερίου στη Βόρεια Θάλασσα. Δεδομένου ότι η παραγωγή υδρενέργειας είναι επαρκής για να καλύψει τη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μέχρι τώρα, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο έχουν εξαχθεί προς άλλες χώρες. Σήμερα, υπάρχει έντονη συζήτηση στη Νορβηγία σχετικά με τις εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας μέσω φυσικού αερίου. Τα συμβαλλόμενα μέρη που αντιτάσσονται στη χρήση του φυσικού αερίου στην ενεργειακή παραγωγή θεωρούν το αέριο περιβαλλοντικά μη αποδεκτό λόγω των αυξανόμενων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Αφ' ετέρου, χωρίς νέα παραγωγική ικανότητα, η Νορβηγία πρέπει να εισαγάγει την ηλεκτρική ενέργεια από τη Σουηδία και τη Δανία. Αυτό σημαίνει ότι ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να παράγεται από πυρηνική ενέργεια και από άνθρακα.

Δεδομένου ότι το σύστημα παραγωγής στη Νορβηγία είναι βασισμένο στην υδρενέργεια, η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται έντονα από τις καιρικές συνθήκες, που οδηγούν σε ισχυρές διακυμάνσεις τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα από τα κύρια κίνητρα για το άνοιγμα της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στη Νορβηγία ήταν να μειωθούν οι διακυμάνσεις των τιμών. Στις μεγαλύτερες αγορές με τις ποικίλες μεθόδους παραγωγής, η χρήση της υδρενέργειας μπορεί να βελτιστοποιηθεί πολύ καλύτερα από ότι σε ένα καθαρώς σύστημα βασισμένο στην υδρενέργεια. Αντίστοιχα, η Νορβηγία ήταν η πρώτη χώρα που άνοιξε την αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των Σκανδιναβικών χωρών. Το άνοιγμα της αγοράς έχει μετριάσει πράγματι τη διακύμανση τιμών και έχει χαμηλώσει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ενεργοβόρα βιομηχανία, που ήταν πρώτα φοβισμένη στις ευνοϊκές μακροπρόθεσμες συμβάσεις εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειάς της, αξιοποιεί τώρα τις μειωμένες τιμές σε ηλεκτρική ενέργεια.

Β.1.3 Φινλανδία

Σε αντίθεση με τη Νορβηγία και τη Σουηδία, η Φινλανδία είναι κυρίως επίπεδη χώρα με μέτριους σε ποσότητα πόρους υδρενέργειας. Οι ενεργειακές εντατικές βιομηχανίες (ή ενεργοβόρες βιομηχανίες), όπως η βιομηχανία πολτού και χαρτιού και η βιομηχανία μετάλλων, παίζουν σημαντικό ρόλο στη Φινλανδική οικονομία. Επομένως, οι ανταγωνιστικές τιμές και ο αξιόπιστος εφοδιασμός ηλεκτρικής ενέργειας είναι από τους κύριους στόχους στην κυβερνητική ενεργειακή πολιτική για δεκαετίες. Αυτό περιλαμβάνει μέτρα για τη χρήση των εσωτερικών πηγών ενέργειας καθώς επίσης και την αποδοτικότητα παραγωγής ενέργειας από συμπαραγωγή.

Το μίγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Φινλανδίας έχει τη μέγιστη ποικιλία μεταξύ των Σκανδιναβικών χωρών (Σχήμα Β.2.5α και Σχήμα Β.2.5β). Η βιοενέργεια, δηλαδή το ξύλο και η τύρφη, και η υδρενέργεια είναι οι εσωτερικές πηγές αρχικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που αποτελεί το 38% της παραγωγής. Η αξιοπρόσεκτη χρήση της βιοενέργειας οφείλεται κυρίως στη βιομηχανία πολτού και χαρτιού, όπου τα απόβλητα καίγονται για να παραγάγουν την ηλεκτρική ενέργεια πρώτιστα για τη χρήση.



Σχήμα Β.5. α) Το μερίδιο των ενεργειακών μεταφορέων και της εισαγωγής στο Φινλανδικό εφοδιασμό ηλεκτρικής ενέργειας το 1998 (σύνολο 77TWh). β) Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το 1998.

Προκειμένου να αυξηθεί το μερίδιο των εσωτερικών ενεργειακών μεταφορέων, η χρήση της τύρφης στη θερμότητα και η ηλεκτρική παραγωγή έχουν

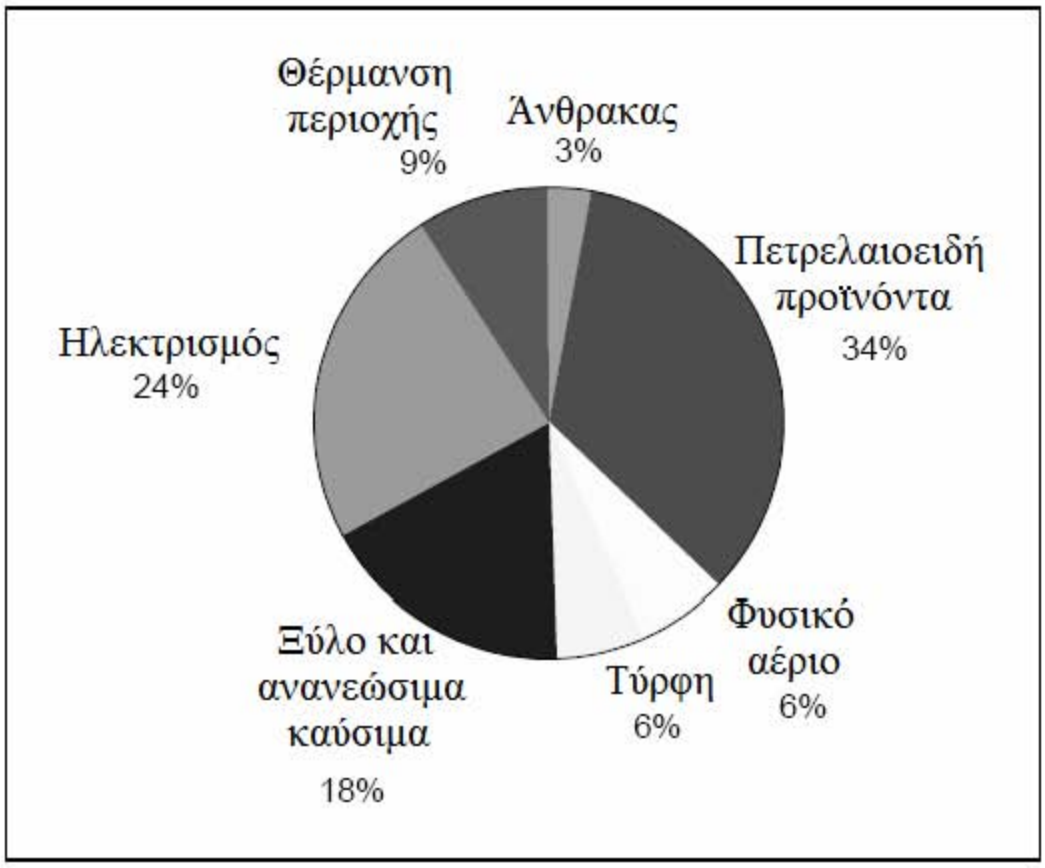
αναπτυχθεί με την υποστήριξη της κυβέρνησης κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '90. Σήμερα, το 7% της ηλεκτρικής ενέργειας παράγεται με την τύρφη. Έχει αναπτυχθεί έντονη συζήτηση για το εάν η τύρφη πρέπει να ταξινομηθεί ως ορυκτό καύσιμο ή ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ο κύκλος άνθρακα της τύρφης διαρκεί μερικές χιλιάδες έτη, το οποίο είναι πολύ περισσότερο από τον κύκλο της κανονικής βιομάζας αλλά πολύ λιγότερο από τον κύκλο των απολιθωμένων καυσίμων.

Η χρήση του ξύλου στην ηλεκτρική παραγωγή και τη θέρμανση πέραν από τη βιομηχανία χαρτιού και πολτού περνά τώρα από μια παρόμοια φάση έρευνας και ανάπτυξης όπως δηλαδή συνέβη με την τύρφη δέκα έτη πριν. Η οικονομική δυνατότητα της αυξανόμενης χρήσης του ξύλου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας έχει υπολογιστεί ότι είναι περίπου 7-10TWh, το οποίο είναι του μεγέθους των ετήσιων εισαγωγών ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικά οι εσωτερικές εγκαταστάσεις συμπαραγωγής έχουν αρχίσει να χρησιμοποιούν την τύρφη, και πρόσφατα επίσης αυξανόμενες ποσότητες ξύλου με άλλα καύσιμα. Οι δαπάνες μεταφορών για τον άνθρακα αυξάνονται προς το εσωτερικό της χώρας, που κάνει τις τιμές των εσωτερικών πηγών ενέργειας ανταγωνιστικότερες σε αυτές τις περιοχές.

Οι πρώτες εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας τέθηκαν σε λειτουργία το 1977. Τα επόμενα έτη, τρεις πρόσθετες μονάδες ολοκληρώθηκαν και μαζί αποτελούν το 31% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Σχήμα Β.5β). Στη δεκαετία του '90, διάφορα προγράμματα εκτελέσθηκαν για να αυξήσουν την ικανότητα ισχύος και τη διάρκεια ζωής των αντιδραστήρων. Σχετικά με τη συζήτηση της σταδιακής πυρηνικής κατάργησης, όπως στη Σουηδία ή τη Γερμανία, το θέμα στη Φινλανδία αφορά την πιθανή επέκταση της ικανότητας πυρηνικής ενέργειας. Το πέμπτο πυρηνικό εργοστάσιο θα μείωνε το ποσό εισαγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ένα ξεχωριστό μερίδιο της οποίας παράγεται στους ρωσικούς πυρηνικούς αντιδραστήρες.

Η μέση ετήσια παραγωγή υδρενέργειας που είναι 13TWh είναι μικρή έναντι εκείνων της Σουηδίας και της Νορβηγίας (65TWh και 113TWh αντίστοιχα). Η μέγιστη ικανότητα δεξαμενών ανέρχεται σε 4.9TWh. Όπως στη Σουηδία και τη Νορβηγία, έτσι και στη Φινλανδία η ανάπτυξη υδρενέργειας ήταν εντατικότερη από τη δεκαετία του '40 μέχρι τη δεκαετία του '70. Οι ποταμοί στη νότια Φινλανδία καλύφθηκαν μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '40 και η επέκταση συνεχίστηκε στο Lapland όπου οι κύριες εγκαταστάσεις είχαν ολοκληρωθεί μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '60.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας έχει αυξηθεί ελαφρώς, λιγότερο δηλαδή από 5% ετησίως. Η αύξηση ήταν μεγαλύτερη τη δεκαετία του '70 και τη δεκαετία του '80, αλλά η οικονομική υποχώρηση και η μετατόπιση προς τη λιγότερο ενεργοβόρα βιομηχανία έχει επιβραδύνει την αύξηση στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας τη δεκαετία του '90. Η ηλεκτρική κατανάλωση ποικίλλει ετησίως μέχρι ενός ορισμένου βαθμού με τις καιρικές συνθήκες. Το 1998, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ήταν 76.5TWh. Η Φινλανδία εισάγει ηλεκτρική ενέργεια από τη Σουηδία και τη Ρωσία. Οι εισαγωγές το 1998 ήταν 5,350GWh και 4,800GWh, αντίστοιχα. Η τελική ενεργειακή χρήση στη Φινλανδία παρουσιάζεται στο Σχήμα Β.6.



Σχήμα Β.6. Η συνολική τελική ενεργειακή χρήση στη Φινλανδία (σύνολο 295TWh).

Η θέρμανση περιοχής έχει ένα μερίδιο 50% της συνολικής αγοράς θέρμανσης χώρου. Η επέκταση της θέρμανσης περιοχής ήταν εντονότερη στη δεκαετία του '70 και τη δεκαετία του '80. Στη δεκαετία του '90, οι περισσότεροι από τους πιθανούς καταναλωτές θερμότητας περιοχής συνδέθηκαν ήδη με το δίκτυο και η επέκταση

επιβραδύνθηκε [154]. Εντούτοις, μια τρέχουσα μετανάστευση από την επαρχεία στις πόλεις αυξάνει τη ζήτηση για θέρμανση στις πυκνά εποικημένες περιοχές, οι οποίες προσφέρουν τη νέα δυνατότητα για τη θέρμανση περιοχής. Βελτιωμένες μέθοδοι οικοδόμησης, αφ' ετέρου, χαμηλώνουν την κατανάλωση θερμότητας μιας μέσης οικογένειας, η οποία είναι σήμερα ήδη κατά 35% χαμηλότερη από ότι στην αρχή της δεκαετίας του '70. Η παραγωγή θερμότητας περιοχής στη Φινλανδία είναι έντονα βασισμένη στην παραγωγή CHP. Το 1998, οι εγκαταστάσεις CHP παρήγαγαν το 77% της θερμότητας περιοχής και το 38% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Η Φινλανδία άρχισε να εισάγει φυσικό αέριο το 1974, και το 1998 το 10% της ηλεκτρικής ενέργειας παρήχθη με αέριο. Η χρήση του φυσικού αερίου αυξάνεται, αλλά προς το παρόν η Φινλανδία συνδέεται μόνο με το Ρωσικό σύστημα αερίου. Μια σύνδεση στο Ευρωπαϊκό σύστημα αερίου θα απαιτούταν για να εξασφαλίσει συνεχή εφοδιασμό και για να δώσει τη δυνατότητα στην επιλογή μεταξύ των διάφορων προμηθευτών προτού να μπορέσει να επεκταθεί έντονα η χρήση του φυσικού αερίου. Αυτή η σύνδεση θα μπορούσε να είναι οικονομική εάν μπορούσε να δημιουργηθεί ταυτόχρονα με τις απαιτούμενες υποδομές και της Σουηδίας. Εντούτοις, το Σουηδικό Κοινοβούλιο απέρριψε το όλο εγχείρημα, μερικώς λόγω των αυξανόμενων εκπομπών του CO_2 και της αυξανόμενης εξάρτησης από τα εισαγόμενα καύσιμα. Έχουν ολοκληρωθεί μελέτες σκοπιμότητας για άλλες επιλογές, συμπεριλαμβανομένης μιας υποβρύχιας σωλήνωσης μέσω της θάλασσας της Βαλτικής. [162].

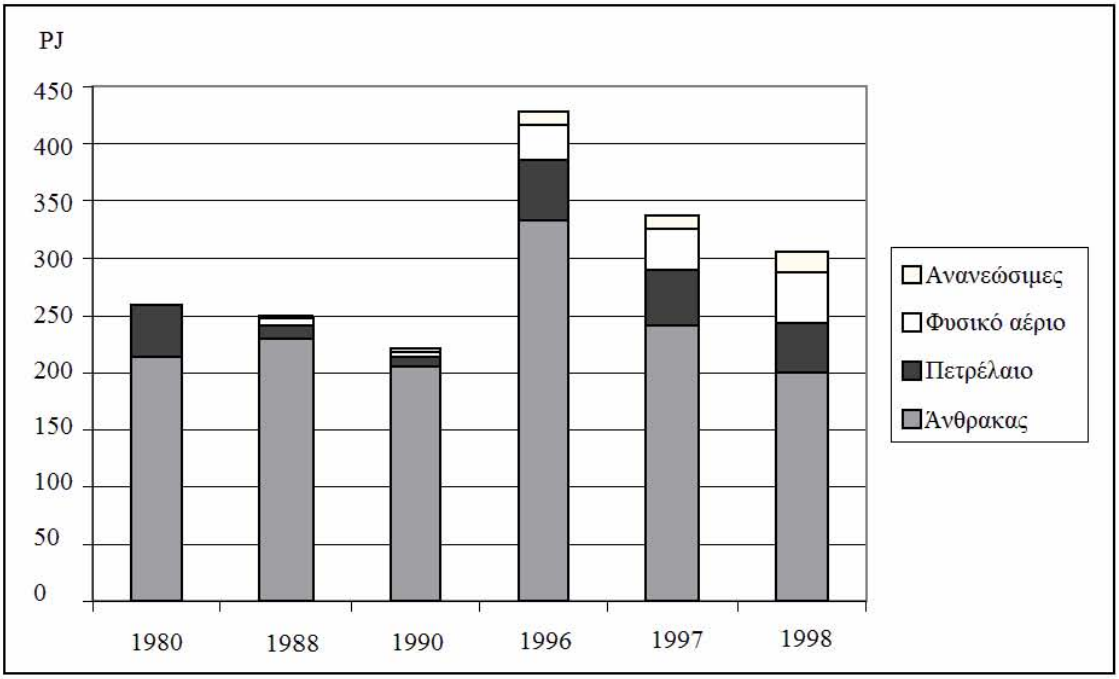
Τα βόρεια βουνά και οι παράκτιες περιοχές προσφέρουν καλούς όρους για την παραγωγή αιολικής ενέργειας στη Φινλανδία. Εντούτοις, η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας ήταν αμελητέα μέχρι το τέλος της δεκαετίας του '90. Οι μειωμένες δαπάνες επένδυσης και η αυξανόμενη ικανότητα ισχύος των μεμονωμένων εγκαταστάσεων παραγωγής αιολικής ενέργειας θα προκαλέσουν πιθανώς τη γρήγορη επέκταση σε αυτό το είδος παραγωγής ενέργειας. Μέσω της παράκτιας τεχνολογίας, η μεγάλη δυνατότητα παραγωγής αιολικής ενέργειας μπορεί να διατεθεί από τις παράκτιες περιοχές.

Β.1.4 Δανία

Όπως και στις άλλες Σκανδιναβικές χώρες έτσι και στη Δανία, η κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε γρήγορα προς το τέλος της δεκαετίας του '50 και της δεκαετίας του '60. Δεδομένου ότι η χώρα δεν έχει σχεδόν κανέναν πόρο υδρενέργειας, η γρήγορη επέκταση της ικανότητας ηλεκτρικής παραγωγής πραγματοποιήθηκε από την αυξανόμενη χρήση θερμοηλεκτρικών σταθμών. Προκειμένου να ενισχυθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα, αναπτύχθηκε η ικανότητα συμπαραγωγής και η θέρμανση περιοχής έγινε η σημαντικότερη πηγή για τον ανεφοδιασμό θερμότητας στις Δανέζικες πόλεις. Από τότε, το μερίδιο αγοράς της θερμότητας περιοχής έχει συνεχίσει να αυξάνεται, δηλαδή 5% το 1950, 30% το 1980 και 50% σήμερα. Το μέσο ποσοστό σύνδεσης στις περιοχές θέρμανσης περιοχής έχει φθάσει το 82%, και αυξάνεται ακόμα [157]

Μετά από το δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο, οι κύριες πηγές καυσίμων ήταν ο άνθρακας, το κοκ, το ξύλο και η τύρφη. Εντούτοις, οι φτηνές τιμές του πετρελαίου στο μέσω της δεκαετίας του '60 οδήγησαν σε μια μεγάλη χρήση του πετρελαίου, και κατά την διάρκεια της πρώτης κρίσης πετρελαίου το 1973 πάνω από το 90% του συνολικού εφοδιασμού καυσίμων ήταν εισαγόμενο πετρέλαιο. Η μισή από τη συνολική ενέργεια καταναλώθηκε με τη θέρμανση περιοχής [157]. Μετά από τις κρίσεις πετρελαίου, η Δανέζικη ενεργειακή πολιτική έχει στοχεύσει στη μείωση της εξάρτησης της χώρας από εισαγόμενο πετρέλαιο. Αυτό έχει επιτευχθεί κυρίως με την επένδυση στην παραγωγή πετρελαίου: Η Δανία έχει σήμερα δώδεκα πηγές πετρελαίου και φυσικού αερίου στη Βόρεια Θάλασσα. Μετά το Ηνωμένο Βασίλειο και τη Νορβηγία, η Δανία είναι ο μεγαλύτερος παραγωγός πετρελαίου στη δυτική Ευρώπη. Επίσης η Δανία έλαβε και μια δέσμη μέτρων όσον αφορά την πλευρά της κατανάλωσης. Σε δύο δεκαετίες, οι ιδιωτικοί λέβητες φυσικού αερίου έχουν κερδίσει ένα μερίδιο αγοράς πάνω από το 20% στις αγορές θερμότητας χώρου. Κατά τη διάρκεια της ίδιας περιόδου, το μερίδιο των λεβήτων νάφθας έχει μειωθεί από 60% σε 20% [158].

Ακόμα κι αν η Δανία είναι γνωστή για το ότι είναι μια από τις κύριες χώρες παραγωγής αιολικής ενέργειας στον κόσμο, ο εφοδιασμός της ηλεκτρικής ενέργειάς της είναι ακόμα έντονα βασισμένος στη συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και χρήσης ορυκτών καυσίμων (Σχήμα Β.7).



Σχήμα Β.7. Κατανάλωση καυσίμων στην ηλεκτρική παραγωγή της Δανίας. Οι εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνουν την παραγωγή τη δεκαετία του '90.

Η Δανία έχει 14 μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, 12 εκ των οποίων είναι θερμότητα περιοχής μέσω εγκαταστάσεων CHP. Το 1998, οι μεγάλης κλίμακας σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κάλυψαν το 72% της ηλεκτρικής παραγωγής και το 51% της παραγωγής θερμότητας περιοχής. Οι μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας χρησιμοποιούν κυρίως τον άνθρακα ως καύσιμο. Οι τοπικές μικρής κλίμακας μονάδες CHP, αντίθετα, τροφοδοτούνται κυρίως από το φυσικό αέριο (60%) και τη βιομάζα (37%). Το 1998, οι μικρής κλίμακας μονάδες CHP παρήγαγαν το 15% της ηλεκτρικής ενέργειας και το 24% της θερμότητας περιοχής [92].

Μετά από το χωρισμό της παραγωγής συμπύκνωσης σε μονάδες CHP, το 54% της συνολικής ηλεκτρικής παραγωγής το 1998 έχει υπολογιστεί ότι προέρχεται από τη συμπαραγωγή. Η παραγωγή στη συμπύκνωση των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας και η ηλεκτρική παραγωγή χωρίς χρησιμοποίηση θερμότητας στις μονάδες CHP, δηλαδή η ισχύς συμπύκνωσης, αποτέλεσαν το 39% της συνολικής παραγωγής. Το υπόλοιπο 7% παράχθηκε από την αιολική ενέργεια. Υπάρχει μόνο ένα αμελητέο ποσό υδρενέργειας και καμία παραγωγής πυρηνικής ενέργειας στη Δανία. Το 1998, η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανήλθε σε 39.0TWh και η συνολική κατανάλωση σε 34.7 TWh. Αντίθετα προς τις άλλες Σκανδιναβικές χώρες, στη Δανία

η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επίσης και η συνολική κατανάλωση ενέργειας, έχουν αυξηθεί ελαφρώς στη δεκαετία του '90.

Η ηλεκτρική παραγωγή η βασισμένη στις θερμοηλεκτρικές μονάδες της Δανίας αλληλεπιδρά έντονα με τα βασισμένα στην υδρενέργεια συστήματα της Νορβηγίας και της Σουηδίας. Το χειμώνα, η εισροή στα υδραγωγεία στη Νορβηγία και τη Σουηδία είναι χαμηλή ενώ η ζήτηση θερμότητας και η παραγωγή CHP στη Δανία είναι υψηλές. Κατά συνέπεια, σε εποχιακή βάση, η Δανία εξάγει την ηλεκτρική ενέργεια ειδικά κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Σε καθημερινή βάση, η Δανία εισάγει τη ηλεκτρική ενέργεια και εξάγει τη θερμική ηλεκτρική ενέργεια. Στην τελευταία δεκαετία, η ανάπτυξη της νέας ικανότητας ηλεκτρικής παραγωγής στη Νορβηγία και τη Σουηδία είναι πολύ πιο αργή από την αύξηση στην κατανάλωση, η οποία έχει το προβάδισμα στις μόνιμες και αυξανόμενες εισαγωγές από τη Δανία.

Στο πρωτόκολλο του Κιότο, η Δανία έχει δεσμευτεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τα επίπεδα 1990 κατά 21% μέχρι το έτος 2010. Η μείωση θα ολοκληρωθεί με την αντικατάσταση της παλαιάς εγκαταστημένης παραγωγής ενέργειας από άνθρακα με τις σύγχρονες εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας από φυσικό αέριο αλλά και την ταυτόχρονη αύξηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος. Τα περαιτέρω μέτρα στον τομέα της ενέργειας περιλαμβάνουν την προώθηση της εξοικονόμησης ενέργειας και την ενεργειακή αποδοτικότητα. Μεταξύ 1996 και 1998, το μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αυξήθηκε από 7% σε 10%, και, σύμφωνα με το πρόγραμμα της Δανέζικης μεταρρύθμισης ηλεκτρικής ενέργειας, το μερίδιο έφτασε στο 20% στο τέλος του 2003. Αυτό επιτεύχθηκε κυρίως μέσω της αιολικής ενέργειας. Σε μια μακροπρόθεσμη προβολή, η κυβέρνηση αναμένει 5,500MW ικανότητας ισχύος από την αιολική ενέργεια μέχρι το 2030 [163].

Μια αγορά για τις ποσοστώσεις ανανεώσιμης ενέργειας προστατεύει την οικονομικώς αποδοτική ανάπτυξη της ανανεώσιμης ενέργειας [164]. Το σύστημα επιχορήγησης για την ηλεκτρική παραγωγή από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντικαταστάθηκε από την αγορά πιστοποιητικών ανανεώσιμης ενέργειας (πράσινο πιστοποιητικό). Αντί των επιχορηγήσεων για την παραχθείσα ηλεκτρική ενέργεια, οι παραγωγοί λαμβάνουν τα πράσινα πιστοποιητικά, τα οποία μπορούν να πωλήσουν στην αγορά. Εάν το ορισμένο ελάχιστο μερίδιο για την ηλεκτρική παραγωγή από τις

ανανεώσιμες πηγές δεν επιτυγχάνεται, ο παραγωγός ηλεκτρικής ισχύος πρέπει να αγοράσει το αντίστοιχο ποσό πράσινων πιστοποιητικών.

Β.2 Υποχρεώσεις Μείωσης Αερίων Θερμοκηπίου

Στις διαπραγματεύσεις του Κιότο τον Δεκέμβριο του 1997, οι βιομηχανικές χώρες συμφώνησαν σχετικά με τον περιορισμό των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου. Ένα καλάθι των έξι σημαντικότερων αερίων θερμοκηπίου (CO_2, CH_4, N_2O, HFC, PFC και SF_6) καθορίστηκε βασισμένο στη συμβολή τους στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Τα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης συμμετείχαν στις διαπραγματεύσεις ως ενιαία ομάδα, που δεσμεύει από κοινού τις χώρες να μειώσουν τις συνολικές εκπομπές των αερίων θερμοκηπίου κατά 8% μέχρι το 2010 σε σχέση με τις εκπομπές τους το 1990. Το επίπεδο 2010 θα υπολογιστεί ως μέσος όρος των ετών 2008-2012. Στο Συμβούλιο περιβάλλοντος τον Ιούνιο του 1998, μια συμφωνία για την εσωτερική διακοπή της υποχρέωσης της ΕΕ επιτεύχθηκε. Οι στόχοι εκπομπής των διαφόρων κρατών μελών ποικίλλουν εντυπωσιακά: Η Γερμανία και η Δανία έχουν στόχους μείωσης της τάξης του 21%, συγχρόνως η Πορτογαλία έχει την άδεια να αυξήσει τις εκπομπές της κατά 2%.

Δεδομένου ότι η ηλεκτρική παραγωγή στη Νορβηγία και τη Σουηδία είναι σχεδόν συνολικά βασισμένη στην υδρενέργεια και την πυρηνική ενέργεια, λογαριάζονται μόνο για ένα δευτερεύον μέρος των συνολικών εκπομπών αερίου θερμοκηπίου. Στη Σουηδία, το μερίδιο είναι μεταξύ 4% και 10%, ανάλογα με την παραγωγή υδρενέργειας ενώ στη Νορβηγία το μερίδιο είναι ακόμα μικρότερο. Δεδομένου ότι οι εκπομπές στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι τόσο χαμηλές, η δυνατότητα μείωσης πρέπει να εντοπιστεί σε κάποιον άλλον τομέα. Στο πλαίσιο της συμφωνίας του Κιότο, η Νορβηγία έχει την άδεια να αυξήσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κατά 1% σε σχέση με το επίπεδο του 1990 μέχρι το 2010, ενώ η Σουηδία έχει την άδεια να αυξήσει τις εκπομπές κατά 4%, η Νορβηγία είναι η μόνη Σκανδιναβική χώρα που δεν είναι μέλος της ΕΕ, και έτσι ο στόχος συμφωνήθηκε χωριστά στο πρωτόκολλο του Κιότο.

Χωρίς τα νέα μέτρα αντίδρασης, οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στη Νορβηγία προβλέπεται ότι θα αυξηθούν από 55Mt ισοδυνάμων CO_2 το 1990 σε 68Mt

το 2010 [165], που αντιστοιχεί σε μια αύξηση των εκπομπών κατά 23%. Εκπομπές 2.1Mt ισοδυνάμων CO_2 μεταξύ δυο προγραμματισμένων εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας φυσικού αερίου συμπεριλαμβάνονται στους αριθμούς. Αν και η κυβέρνηση αντιτάχθηκε στην κατασκευή εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας από φυσικό αέριο, φαίνεται πιθανότερο ότι τουλάχιστον αυτές οι εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας θα χτιστούν. Μια περαιτέρω επέκταση στη χρησιμοποίηση του φυσικού αερίου είναι επίσης δυνατή κάτι όμως που θα καθιστούσε ακόμα δυσκολότερη τη συμμόρφωση της Νορβηγίας απέναντι στις υποχρεώσεις της. Μια μετατόπιση προς την πράσινη φορολογία θεωρείται το σημαντικότερο πολιτικό όργανο κλίματος. Αυτό θα περιελάμβανε μέτρα προώθησης του φόρου για CO_2 στους τομείς που είναι αυτήν την περίοδο είναι απαλλαγμένοι και μια εισαγωγή ενός φόρου στην τελική διάθεση των αποβλήτων [165]. Εντούτοις, χωρίς εκτενή χρήση των μηχανισμών ευελιξίας, φαίνεται αρκετά απίθανο ότι η Νορβηγία θα φθάσει τα όρια εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Στη Σουηδία, οι συνολικές εκπομπές του CO_2 το 1990 και το 1997 ήταν 59Mt και 62Mt αντίστοιχα, και οι εκπομπές ως αποτέλεσμα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε αυτά τα έτη ήταν 1.4Mt και 3Mt. Η παραγωγή υδρενέργειας ήταν πολύ χαμηλή το 1996 με συνέπεια οι εκπομπές CO_2 να ανέλθουν σε 5.8Mt από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Δεδομένου ότι η Σουηδία είναι προς το παρόν καθαρός εξαγωγέας ηλεκτρικής ενέργειας, τουλάχιστον ο τομέας της ηλεκτρικής ενέργειας θα είχε μια καλή δυνατότητα στο στόχο της αύξησης εκπομπής 4% με την κάλυψη της αυξανόμενης κατανάλωσης με τις μειώσεις της εξαγωγής. Εντούτοις, η πιθανή πυρηνική σταδιακή κατάργηση να αλλάξει την κατάσταση εντελώς. Παραδείγματος χάριν, αν υποτεθεί ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να παραμείνει στα σημερινά επίπεδα, τότε η αντικατάσταση της παραγωγής πυρηνικής ενέργειας με θερμοηλεκτρική ενέργεια από φυσικό αέριο με μια αποδοτικότητα 60% θα οδηγούσε σε μια ετήσια αύξηση εκπομπής κατά 25Mt. Αυτές τις εκπομπές μπορούν ως ένα ορισμένο βαθμό να χαμηλώσουν με τη βοήθεια της συμπαραγωγής, αλλά οι συνολικές εκπομπές θα ήταν ακόμα υψηλές επάνω από 62Mt, η οποία είναι ο στόχος εκπομπής της Σουηδίας. Προκειμένου να κρατηθούν οι εκπομπές κάτω από αυτόν τον στόχο, η παραγωγή πυρηνικής ενέργειας θα έπρεπε να αντικατασταθεί σχεδόν συνολικά από ανανεώσιμη ενεργειακή παραγωγή. Κατά συνέπεια, προς το παρόν, φαίνεται μη ρεαλιστικό η Σουηδία να είναι σε θέση να καταργήσει σταδιακά

την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας και να φθάσει στην υποχρέωση σε σχέση με το πρωτόκολλο του Κιότο.

Η Φινλανδία και η Δανία έχουν υψηλότερες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα στην ηλεκτρική παραγωγή έναντι της Σουηδίας και της Νορβηγίας. Εντούτοις, το σύστημα παραγωγής και στις δύο χώρες είναι αποδοτικό, δεδομένου ότι το μερίδιο της συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ισχύος είναι υψηλό. Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στη Φινλανδία ήταν 73Mt το 1990 και το 1997 οι εκπομπές είχαν αυξηθεί κατά 5.5% σε 77Mt. Το 38% των εκπομπών προήλθε από παραγωγή ενέργειας. Οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου αναμένεται να αυξηθούν κατά τη διάρκεια της παρούσας δεκαετίας, κάτι που οφείλεται στην αύξηση του ενεργοβόρου βιομηχανικού τομέα. Στην εσωτερική διακοπή της ΕΕ, η Φινλανδία έχει δεσμευτεί να σταθεροποιήσει τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου στο επίπεδο του 1990 μέχρι το 2010. Τα χαρακτηριστικά της Φινλανδικής ενεργειακής οικονομίας θα καταστήσουν δύσκολο εγχείρημα να ικανοποιηθεί αυτήν την υποχρέωση: Οι ενεργοβόρες βιομηχανίες, που παρουσιάζουν ήδη μια υψηλή ενεργειακή αποδοτικότητα, έχουν έναν κεντρικό ρόλο στη γενική κατανάλωση ενέργειας που καθιστά τα νέα μέτρα συντήρησης δαπανηρά. Αφ' ετέρου, λόγω της εκτενούς χρήσης της βιοενέργειας, η ένταση άνθρακα του συστήματος ηλεκτρικής παραγωγής είναι κάτω από το μέσο όρο της ΕΕ. Επιπλέον, η μεγάλη χρησιμοποίηση CHP έχει αυξήσει την ενεργειακή αποδοτικότητα σε ένα υψηλό επίπεδο. Τα περισσότερα σημαντικά μέτρα για να περιοριστούν οι εκπομπές αερίων θερμοκηπίου θα αύξαναν την ενεργειακή χρήση των δασικών υπολειμμάτων και τη χρήση του φυσικού αερίου μαζί με την ενεργειακή συντήρηση σε οικογένειες και την επέκταση του CHP όπου είναι δυνατόν [97].

Η δυνατότητα μείωσης αερίων θερμοκηπίου στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι ουσιαστικά μεγαλύτερη στη Δανία από ότι στη Φινλανδία, η οποία προκαλείται κυρίως από το γεγονός ότι οι σημαντικότεροι Δανέζικοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος χρησιμοποιούν τον άνθρακα ως καύσιμο. Η αντικατάσταση των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων άνθρακα από εγκαταστάσεις φυσικού αερίου πραγματοποιείται με έναν μέτριο ρυθμό. Επίσης οι όροι για την παραγωγή αιολικής ενέργειας είναι πολύ ευνοϊκοί στη Δανία και το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ηλεκτρική παραγωγή αυξάνεται γρήγορα. Εν γένει, το Δανέζικο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας έχει σαφώς υψηλότερη ικανότητα όσον αφορά τη μείωση του CO_2 στις Σκανδιναβικές χώρες και αυτή η μείωση

ανέρχεται στο 21% μέχρι το έτος 2010. Το 1990, οι συνολικές εκπομπές αερίων θερμοκηπίου ανήλθαν σε 76.3Mt, ως εκ τούτου ο στόχος για το 2010 είναι 60.2Mt. Αν και σήμερα η Δανία εξάγει ηλεκτρική ενέργεια, το 1990 ήταν καθαρός εισαγωγέας, το οποίο κάνει την επίτευξη του στόχου μείωσης εκπομπής ακόμη δυσκολότερη.

Σε μια μελέτη σχετικά με την επίτευξη των στόχων εκπομπής αερίων θερμοκηπίου, υποστηρίζεται ότι η Δανία θα είναι σε θέση να μειώσει τις εκπομπές κατά έναν μέσο όρο 16.6% έως 63.6Mt μέχρι την περίοδο μεταξύ του 2008 έως 2012 [166]. Αυτή η πρόβλεψη περιλαμβάνει την υπόθεση ότι οι εκπομπές ως αποτέλεσμα της εξαγωγής ενέργειας θα ισορροπούνταν με την αγορά των διεθνών ποσοστώσεων αερίων θερμοκηπίου με αποτέλεσμα οι εξαγωγές να μη φορτώνουν την ισορροπία των αερίων θερμοκηπίου της Δανίας. Διαφορετικά οι εξαγωγές προβλέπεται να αυξήσουν τις εκπομπές σε 13Mt, καθιστώντας το στόχο εκπλήρωσης ουσιαστικά δύσκολα επιτεύξιμο [100].

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ

ΠΑΚΕΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Γ.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το Παράρτημα παρουσιάζονται οι κώδικες των προγραμμάτων που υλοποιήθηκαν σε MATLAB 7.0. Όπως εύκολα μπορεί να γίνει αντιληπτό, παρουσιάζονται τόσο οι διεπαφές (αρχικά προγράμματα φιλικά προς το χρήστη όπου εισάγονται όλες οι μεταβλητές εισόδου και γίνεται επίκληση των συναρτήσεων) όσο και οι συναρτήσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται κάθε φορά έτσι ώστε οι μέθοδοι οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν για την περαιτέρω έρευνα και προώθηση του θέματος της εύρωστης λήψης αποφάσεων με χρήση της μεθόδου χάσματος πληροφορίας για την προσέγγιση ενεργειακών ζητημάτων που μπορεί να απασχολήσουν τόσο γενικά την Ευρωπαϊκή Ένωση όσο και ειδικά τη χώρα μας (αλλά και κάποια άλλη χώρα αλλά και διαμερίσματα ή περιοχές της χώρας).

Επίσης, για τη διευκόλυνση στην κατανόηση των προγραμμάτων, οι μεταβλητές οι οποίες σχετίζονται με τα μοντέλα χάσματος πληροφορίας έγινε προσπάθεια να διατηρήσουν τη διεθνή τους ορολογία ενώ τα ονόματα των συναρτήσεων όσο και δευτερεύουσες μεταβλητές έγινε η προσπάθεια να τους δοθούν ελληνικά ονόματα (επεξήγηση πολλές φορές) για είναι τα προγράμματα ευκολότερα στην κατανόησή τους και τη μελλοντική τους επέκταση.

Γ.2 Πακέτο Προγραμμάτων

Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι διεπαφές και οι συναρτήσεις των προγραμμάτων τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την προσέγγιση του ενεργειακού ζητήματος.

Γ.2.1 Πρόγραμμα της Συνάρτησης Ευρωστίας με Δεδομένο Κατώφλι Κόστους

Στο Σχήμα Γ.1 παρουσιάζεται η διεπαφή του προγράμματος το οποίο υπολογίζει την ευρωστία με δεδομένο κατώφλι. Στο Σχήμα Γ.1 παρουσιάζεται και ένα παράδειγμα εκτέλεσης της μεθόδου με ανάθεση στις μεταβλητές εισόδου τιμών. Οι μεταβλητές εισόδου είναι το επιτόκιο (*Epitokio*), το διάνυσμα της αρχικής απόφασης για την ενεργειακή πολιτική των Σκανδιναβικών χωρών (q) το οποίο είναι στην ουσία ένας πίνακας στήλη όπου κάθε στοιχείο του πίνακα είναι το ποσοστό του ακολουθούμενου σεναρίου, η ακρίβεια στη δημιουργία του συνόλου εισόδου (*akriveia*) η χρησιμότητα της οποίας θα παρουσιαστεί στην πορεία, το εύρος και το βήμα με το οποίο θα προσεγγιστεί η ευρωστία. Ακόμη, παρουσιάζεται η επίκληση των συναρτήσεων αλλά και ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση. Η έξοδος για κάθε κατώφλι είναι η ευρωστία που δίνεται από τη μεταβλητή *RobustA*. Στην περίπτωση όπου δεν είναι δυνατή η εύρεση αβεβαιότητας που δίνει κόστος μικρότερο από την τιμή κατωφλίου τότε δίνεται καταχρηστικά η τιμή -1 στην ευρωστία (στο Κεφάλαιο 7 όπου παρουσιάζονται τα αποτελέσματα χρησιμοποιείται η τιμή -0.1 έτσι ώστε να μην αλλοιώνεται το σχήμα ως προς την παρεχόμενη ακρίβεια του παρουσιαζόμενου Σχήματος). Ας σημειωθεί ότι αρχικοποιείται τόσο η ακρίβεια της μεθόδου αλλά και καθορίζεται το εύρος της ευρωστίας έτσι ώστε το πρόβλημα να βρίσκεται πιο κοντά στην πραγματικότητα.

```
clear all;
addpath('C:\Users\user\Σχολη\Μεταπτυχιακά\MBA\Μεταπτυχιακη\Προγραμματα\toolbox_1_DedomenoRc_ZhtoumenoA\');


%%Εισοδοι
Epitokio=0.10;
q=[0.90;
   0.00;
   0.10;
   0.00];
akriveia=0.01;

deiktis=0;
for rc=(0*(10^(9)):1*(10^(8)):10*(10^(9)))
    deiktis=deiktis+1;

RobustA=-1;
for alpha=(0:0.01:0.20)
    alpha
    ASynoloEisodon=SynoloEisodon(Epitokio,q,alpha,akriveia);
    AYpologismosKostousSynolou=YpologismosKostousSynolou(Epitokio,ASynoloEisodon);
    AReward=Reward(AYpologismosKostousSynolou);
    if (AReward<=rc)
        RobustA=alpha;
    end
end

    x(deiktis)=rc;
    y(deiktis)=RobustA;

end

figure;
plot(x,y)
rmpath('C:\Users\user\Σχολη\Μεταπτυχιακά\MBA\Μεταπτυχιακη\Προγραμματα\toolbox_1_DedomenoRc_ZhtoumenoA\');
```

Σχήμα Γ.1. Η διεπαφή του προγράμματος της συνάρτησης ευρωστίας με δεδομένο κατώφλι.

Στο Σχήμα Γ.2 παρουσιάζεται το πρόγραμμα το οποίο αναπτύχθηκε για να περιγράψει τη συνάρτηση $SynoloEisodon(Epitokio, q, alpha, akriveia)$.

```
function num=SynoloEisodon(Epitokio,Politics,alpha,akriveia)
%clear all;


%%Εισοδοι
%Epitokio=0.00;
%Politics=[0.90;
%          0.00;
%          0.10;
%          0.00];
%alpha=0.20;
%akriveia=0.01;

%Δημιουργια Ευρους για τα loops
MaxPolitics=(alpha)+Politics;
MinPolitics=(-alpha)+Politics;

%Δημιουργια Οριων Ευρος
MaxPolitics=min(1,MaxPolitics);
MinPolitics=max(MinPolitics,0);

%Δημιουργια Συνολου διανυσματων υ περισπωμενη
deiktis=0;
for DeiktisA=(MinPolitics(1):akriveia:MaxPolitics(1))
    for DeiktisB=(MinPolitics(2):akriveia:MaxPolitics(2))
        for DeiktisC=(MinPolitics(3):akriveia:MaxPolitics(3))
            for DeiktisD=(MinPolitics(4):akriveia:MaxPolitics(4))
                PAR=DeiktisA+DeiktisB+DeiktisC+DeiktisD;
                if (PAR<1.0001)&(PAR>0.9999)
                    deiktis=deiktis+1;
                    U(:,deiktis)=[DeiktisA;
                                  DeiktisB;
                                  DeiktisC;
                                  DeiktisD];
                end
            end
        end
    end
end

num=U;
```

Σχήμα Γ.2. Η συνάρτηση $SynoloEisodon(Epitokio, q, alpha, akriveia)$.

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα Γ.2, η συνάρτηση παίρνει ως δεδομένα τις μεταβλητές $Epitokio$, q, $alpha$ και $akriveia$. Στη συνάρτηση αυτή δημιουργείται μέσω της μεταβλητής $alpha$ το εύρος μέσα στο οποίο μπορεί να κινηθεί κάθε σενάριο. Επίσης, ελέγχεται κατά πόσο όλες αυτές οι πολιτικές οι οποίες προκύπτουν είναι ρεαλιστικές από το άθροισμα των στοιχείων των ποσοστών που πρέπει να είναι ίσο με τη μονάδα. Στη συνέχεια δημιουργείται το σύνολο U όπου κάθε στήλη περιέχει τέσσερις γραμμές. Κάθε στήλη αναπαριστά τις δυνατές πολιτικές με κάθε γραμμή το ποσοστό του σεναρίου όπου $DeiktisA$, $DeiktisB$, $DeiktisC$ και $DeiktisD$ κάθε στήλης είναι τα $per_NoExchg$, $per_NoExchg$, per_NorGas, per_SwePO και per_GhgLim για κάθε υποψήφια πολιτική. Η έξοδος της συνάρτησης είναι το σύνολο U. Όπως μπορεί να φανεί και από το πρόγραμμα η τιμή της μεταβλητής

εισόδου *akriveia* είναι αυτή που καθορίζει την ακρίβεια και κατ' επέκταση το πλήθος των εναλλακτικών δυνατών πολιτικών που θα ληφθούν υπόψη κατά τη δημιουργία του συνόλου U.

Στο Σχήμα Γ.3 παρουσιάζεται το πρόγραμμα το οποίο αναπτύχθηκε για να περιγράψει τη συνάρτηση $YpologismosKostousSynolou(Epitokio,U)$.

```
function num=YpologismosKostousSynolou(Epitokio,U)
%clear all;


%%Εισοδοι
%Epitokio=0.00;
%U=[0.10 0.20;
%   0.90 0.80;
%   0.00 0.00;
%   0.00 0.00];

DIASTASEIS=size(U);
GRAMMES=DIASTASEIS(1);
STILES=DIASTASEIS(2);

deiktis=0;
for i=(1:1:STILES)
    CostSynolou(i)=Blackbox1(Epitokio,U(:,i));
end

num=CostSynolou;
```

Σχήμα Γ.3. Η συνάρτηση $YpologismosKostousSynolou(Epitokio,U)$.

Η συνάρτηση $YpologismosKostousSynolou(Epitokio,U)$ λαμβάνει ως εισόδους τις μεταβλητές *Epitokio* και το σύνολο U και δίνει ως έξοδο το κόστους κάθε πολιτικής του συνόλου U αφού για κάθε πολιτική του συνόλου γίνεται η επίκληση της συνάρτησης $Blackbox1(Epitokio, Politics)$.

Η συνάρτηση $Blackbox1(Epitokio, Politics)$ (η οποία βασίζεται τόσο στην εκτέλεση του προγράμματος TIMES όσο και στην οικονομοτεχνική μελέτη κάθε σεναρίου) είναι αυτή η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα Γ.4.

```
function Cost=Blackbox1(Epitokio,Politics)
%%function [Cost,Cum_Politics]=Blackbox2(Epitokio,Politics)
%clear all;


%%Εισοδοι
%Epitokio=0.00;
%Politics=[0.10 0.10 0.10 0.10 0.10;
%          0.20 0.20 0.20 0.20 0.20;
%          0.30 0.30 0.30 0.30 0.30;
%          0.40 0.40 0.40 0.40 0.40];
%Politics=[0.10;0.20;0.30;0.40];


%Μετατροπη Πινακα Πολιτικης σε Πλλων Διαστασεων
Time=    [2005 2010 2015 2020 2025];

DIASTASEISa=size(Politics);
GRAMMESa=DIASTASEISa(1);
STILESa=DIASTASEISa(2);
DIASTASISb=size(Time);
GRAMMESb=DIASTASISb(1);
STILESb=DIASTASISb(2);
if (STILESa==1)
    Politics_beta=Politics;
    Politics=[];
    for Stoixeio_Pinaka=(1:1:STILESb)
        Politics(:,Stoixeio_Pinaka)=Politics_beta(:,1);
    end
end


NoExchg=[664.7058824 558.8235294 576.4705882 700 841.1764706]*(10^6);

NorGas=[-852.9411765 -1011.764706 -994.1176471 -782.3529412 -694.1176471]*(10^6);

SwePO=[1088.235294 1582.352941 3788.235294 4952.941176 4847.058824]*(10^6);

GhgLim=[3700 4370.588235 5729.411765 6470.588235 6541.176471]*(10^6);

%Μετατροπη Πινακα με Επιτοκιο Προεξοφλησης
DIASTASIS=size(Time);
GRAMMES=DIASTASIS(1);
STILES=DIASTASIS(2);
for Stoixeio_Pinaka=(1:1:STILES)
    PinakasProeksoflisis(Stoixeio_Pinaka)=1/((1+Epitokio)^(Time(Stoixeio_Pinaka)-Time(1)));
end

%Πινακας με Προεξοφλημενες Τιμες
Cum_NoExchg=NoExchg.*PinakasProeksoflisis;
Cum_NorGas=NorGas.*PinakasProeksoflisis;
Cum_SwePO=SwePO.*PinakasProeksoflisis;
Cum_GhgLim=GhgLim.*PinakasProeksoflisis;

%%Συνολικο Κοστος απο Πινακα με Προεξοφλημενες Τιμες (Απλη επιλογη μεθοδου)
%Sum_Cum_NoExchg=sum(Cum_NoExchg);
%Sum_Cum_NorGas=sum(Cum_NorGas);
%Sum_Cum_SwePO=sum(Cum_SwePO);
%Sum_Cum_GhgLim=sum(Cum_GhgLim);
%
%%figure;
%%plot(Time,NoExchg,Time,NorGas,Time,SwePO,Time,GhgLim);



%Πολιτικη και Πινακας με Προεξοφλημενες Τιμες
Cum_Politics=[];
for Stoixeio_Pinaka1=(1:1:STILES)
    Cum_Politics(Stoixeio_Pinaka1)=(Politics(1,Stoixeio_Pinaka1)*Cum_NoExchg(Stoixeio_Pinaka1))+...
     ...(Politics(2,Stoixeio_Pinaka1)*Cum_NorGas(Stoixeio_Pinaka1))+...
     ...(Politics(3,Stoixeio_Pinaka1)*Cum_SwePO(Stoixeio_Pinaka1))+...
     ...(Politics(4,Stoixeio_Pinaka1)*Cum_GhgLim(Stoixeio_Pinaka1));
end

%Υπολογισμος Συνολικου Κοστους
Cost=sum(Cum_Politics);

%figure;
%plot(Time,Cum_Politics);



%figure;
%plot(Time,NoExchg,Time,NorGas,Time,SwePO,Time,GhgLim);
```

Σχήμα Γ.4. Η συνάρτηση $Blackbox1(Epitokio, Politics)$.

Στο Σχήμα Γ.4 παρουσιάζεται η συνάρτηση $Blackbox1(Epitokio, Politics)$. Η συνάρτηση αυτή λαμβάνει ως μεταβλητές εισόδου τις μεταβλητές *Epitokio* και

Politics. Εντός τη συνάρτησης αυτής αφήνεται η εναλλακτική μελλοντικής επέκτασης του μοντέλου σε μια πιο προσαρμόσιμη έκδοση (adaptive policy) του μοντέλου όπου ο συνδυασμός σεναρίων θα μπορεί να αλλάζει από τη μια περίοδο στην άλλη εκτιμώντας τα αποτελέσματα αλλά και λαμβάνοντας υπόψη αλλαγή αποφάσεων. Στη συνέχεια υπολογίζεται το σχετικό κόστος κάθε περιόδου για την πολιτική που έχει επιλεχθεί. Αφού υπολογιστεί το σχετικό κόστος λόγω της αξίας του χρήματος που πρέπει να ληφθεί υπόψη, τα σχετικά κόστη προεξοφλούνται στο παρόν με τη χρήση του επιτοκίου προεξόφλησης. Αφού τα σχετικά κόστη προεξοφληθούν στη συνέχεια αθροίζονται δίνοντας το συνολικό σχετικό κόστος. Αυτό το κόστος είναι και η έξοδος της συνάρτησης $Blackbox1(Epitokio, Politics)$. Εξετάζοντας ως εδώ την ανάλυση, το πρόγραμμα έχει υπολογίσει το κόστος για κάθε μια από τις δυνατές εναλλακτικές πολιτικές οι οποίες χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα. Αυτή η αβεβαιότητα των πολιτικών είναι που δημιουργεί και την αβεβαιότητα του κόστους.

Έτσι στο Σχήμα Γ.5 παρουσιάζεται η συνάρτηση $Reward(CostSynolou)$.

```
function num=Reward(CostSynolou)

%num=[min(CostSynolou) max(CostSynolou)];
num=max(CostSynolou);
```

Σχήμα Γ.5. Η συνάρτηση $Reward(CostSynolou)$.

Η συνάρτηση $Reward(CostSynolou)$ λαμβάνει ως είσοδο τη μεταβλητή *CostSynolou* και δίνει ως έξοδο τόσο το εύρος της διακύμανσης του κόστους από τις πιθανές δυνατές πολιτικές (εναλλακτικά) όσο και το μέγιστο κόστος του συνόλου των πιθανών δυνατών πολιτικών. Αφού το σύνολο των πιθανών δυνατών πολιτικών χαρακτηρίζεται από αβεβαιότητα έτσι και το μέγιστο κόστος του συνόλου χαρακτηρίζεται και αυτό από αβεβαιότητα.

Επιστρέφοντας στο Σχήμα Γ.1, είναι αντιληπτό ότι το μέγιστο κόστος το οποίο ικανοποιεί το κατώφλι με δεδομένο το μέγιστο ορίζοντα αβεβαιότητας είναι η ζητούμενη ευρωστία.

Όπως έγινε αντιληπτό και κατά την παρουσίαση των συναρτήσεων οι συναρτήσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα Γ.2, Σχήμα Γ.3, Σχήμα Γ.4 και Σχήμα Γ.5 για να μπορέσουν να αποδώσουν θα πρέπει να αποτελούν στοιχεία εργαλειοθήκης

(toolbox) η οποία θα καλείται από το πρόγραμμα της διεπαφής που παρουσιάζεται στο Σχήμα Γ.1 όπως άλλωστε είναι εμφανές.

Γ.2.2 Πρόγραμμα της Συνάρτησης Κατωφλίου Κόστους με Δεδομένη Ευρωστία

Για τον υπολογισμό του κατωφλίου με δεδομένη την ευρωστία του ενεργειακού προβλήματος (πρόβλημα το οποίο είναι το δυικό του προβλήματος της εύρεσης της ευρωστίας με δεδομένο κατώφλι) όπως είναι λογικό χρησιμοποιήθηκαν κοινές συναρτήσεις με αυτές που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Για την πληρότητα της παρουσίασης, θα παρουσιαστεί η ολότητα των συναρτήσεων σε αυτήν την υποπαράγραφο.

Στο Σχήμα Γ.6 παρουσιάζεται η διεπαφή του προγράμματος το οποίο υπολογίζει το κατώφλι με δεδομένη την ευρωστία. Στο Σχήμα Γ.6 παρουσιάζεται και ένα παράδειγμα εκτέλεσης της μεθόδου με ανάθεση στις μεταβλητές εισόδου τιμών. Οι μεταβλητές εισόδου είναι το επιτόκιο (*Epitokio*), το διάνυσμα της αρχικής απόφασης για την ενεργειακή πολιτική των Σκανδιναβικών χωρών (q) το οποίο είναι στην ουσία ένας πίνακας στήλη όπου κάθε στοιχείο του πίνακα είναι το ποσοστό του ακολουθούμενου σεναρίου, η ακρίβεια στη δημιουργία του συνόλου εισόδου (*akriveia*) και η ευρωστία. Ακόμη, παρουσιάζεται η επίκληση των συναρτήσεων αλλά και ο τρόπος με τον οποίο είναι δυνατή η γραφική απεικόνιση. Η έξοδος για κάθε ευρωστία είναι το κατώφλι που δίνεται από τη μεταβλητή *RobustRc*. Ας σημειωθεί ότι αρχικοποιείται τόσο η ακρίβεια της μεθόδου αλλά και καθορίζεται το εύρος της ευρωστίας έτσι ώστε το πρόβλημα να βρίσκεται πιο κοντά στην πραγματικότητα.

```
clear all;
addpath('C:\Users\user\Σχολη\Μεταπτυχιακά\MBA\Μεταπτυχιακη\Προγραμματα\toolbox_2_DedomenoA_ZhtoumenoRc\');


%%Εισοδοι
Epitokio=0.10;
q=[0.10;
   0.20;
   0.30;
   0.40];
akriveia=0.01;

deiktis=0;
for alpha=(0:0.01:0.15)
    deiktis=deiktis+1

    ASynoloEisodon=SynoloEisodon(Epitokio,q,alpha,akriveia);
    AYpologismosKostousSynolou=YpologismosKostousSynolou(Epitokio,ASynoloEisodon);
    AReward=Reward(AYpologismosKostousSynolou);
    RobustRc=AReward;

    x(deiktis)=alpha;
    y(deiktis)=RobustRc;

end

figure;
plot(x,y)
rmpath('C:\Users\user\Σχολη\Μεταπτυχιακά\MBA\Μεταπτυχιακη\Προγραμματα\toolbox_2_DedomenoA_ZhtoumenoRc\');
```

Σχήμα Γ.6. Η διεπαφή του προγράμματος της συνάρτησης κατωφλίου με δεδομένη ευρωστία.

Στο Σχήμα Γ.7 παρουσιάζεται το πρόγραμμα το οποίο αναπτύχθηκε για να περιγράψει τη συνάρτηση $SynoloEisodon(Epitokio, q, alpha, akriveia)$.

```
function num=SynoloEisodon(Epitokio,Politics,alpha,akriveia)
%clear all;


%%Εισοδοι
%Epitokio=0.00;
%Politics=[0.90;
%          0.00;
%          0.10;
%          0.00];
%alpha=0.20;
%akriveia=0.01;

%Δημιουργια Ευρους για τα loops
MaxPolitics=(alpha)+Politics;
MinPolitics=(-alpha)+Politics;

%Δημιουργια Οριων Ευρος
MaxPolitics=min(1,MaxPolitics);
MinPolitics=max(MinPolitics,0);

%Δημιουργια Συνολου διανυσματων υ περισπωμενη
deiktis=0;
for DeiktisA=(MinPolitics(1):akriveia:MaxPolitics(1))
    for DeiktisB=(MinPolitics(2):akriveia:MaxPolitics(2))
        for DeiktisC=(MinPolitics(3):akriveia:MaxPolitics(3))
            for DeiktisD=(MinPolitics(4):akriveia:MaxPolitics(4))
                PAR=DeiktisA+DeiktisB+DeiktisC+DeiktisD;
                if (PAR<1.0001)&(PAR>0.9999)
                    deiktis=deiktis+1;
                    U(:,deiktis)=[DeiktisA;
                                  DeiktisB;
                                  DeiktisC;
                                  DeiktisD];
                end
            end
        end
    end
end

num=U;
```

Σχήμα Γ.7. Η συνάρτηση $SynoloEisodon(Epitokio, q, alpha, akriveia)$.

Όπως φαίνεται και από το Σχήμα Γ.7, η συνάρτηση $SynoloEisodon(Epitokio, q, alpha, akriveia)$ είναι η ίδια με αυτήν που έχει ήδη παρουσιαστεί στο Σχήμα Γ.2.

Στο Σχήμα Γ.8 και Σχήμα Γ.9 παρουσιάζονται οι συναρτήσεις $YpologismosKostousSynolou(Epitokio, U)$, $Blackbox1(Epitokio, Politics)$ και $Reward(CostSynolou)$ όπως αυτές έχουν παρουσιαστεί στο Σχήμα Γ.3, στο Σχήμα Γ.4 και στο Σχήμα Γ.5 αντίστοιχα.

```
function num=YpologismosKostousSynolou(Epitokio,U)
%clear all;


%%Εισοδοι
%Epitokio=0.00;
%U=[0.10 0.20;
%   0.90 0.80;
%   0.00 0.00;
%   0.00 0.00];

DIASTASEIS=size(U);
GRAMMES=DIASTASEIS(1);
STILES=DIASTASEIS(2);

deiktis=0;
for i=(1:1:STILES)
    CostSynolou(i)=Blackbox1(Epitokio,U(:,i));
end

num=CostSynolou;
```

Σχήμα Γ.8. Η συνάρτηση $YpologismosKostousSynolou(Epitokio, U)$.

```
function Cost=Blackbox1(Epitokio,Politics)
%%function [Cost,Cum_Politics]=Blackbox2(Epitokio,Politics)
%clear all;


%%Εισοδοι
%Epitokio=0.00;
%Politics=[0.10 0.10 0.10 0.10 0.10;
%          0.20 0.20 0.20 0.20 0.20;
%          0.30 0.30 0.30 0.30 0.30;
%          0.40 0.40 0.40 0.40 0.40];
%Politics=[0.10;0.20;0.30;0.40];


%Μετατροπη Πινακα Πολιτικης σε Πλλων Διαστασεων
Time=   [2005 2010 2015 2020 2025];

DIASTASEISa=size(Politics);
GRAMMESa=DIASTASEISa(1);
STILESa=DIASTASEISa(2);
DIASTASISb=size(Time);
GRAMMESb=DIASTASISb(1);
STILESb=DIASTASISb(2);
if (STILESa==1)
    Politics_beta=Politics;
    Politics=[];
    for Stoixeio_Pinaka=(1:1:STILESb)
        Politics(:,Stoixeio_Pinaka)=Politics_beta(:,1);
    end
end


NoExchg=[664.7058824 558.8235294 576.4705882 700 841.1764706]*(10^6);

NorGas=[-852.9411765 -1011.764706 -994.1176471 -782.3529412 -694.1176471]*(10^6);

SwePO=[1088.235294 1582.352941 3788.235294 4952.941176 4847.058824]*(10^6);

GhgLim=[3700 4370.588235 5729.411765 6470.588235 6541.176471]*(10^6);

%Μετατροπη Πινακα με Επιτοκιο Προεξοφλησης
DIASTASIS=size(Time);
GRAMMES=DIASTASIS(1);
STILES=DIASTASIS(2);
for Stoixeio_Pinaka=(1:1:STILES)
    PinakasProeksoflisis(Stoixeio_Pinaka)=1/((1+Epitokio)^(Time(Stoixeio_Pinaka)-Time(1)));
end

%Πινακας με Προεξοφλημενες Τιμες
Cum_NoExchg=NoExchg.*PinakasProeksoflisis;
Cum_NorGas=NorGas.*PinakasProeksoflisis;
Cum_SwePO=SwePO.*PinakasProeksoflisis;
Cum_GhgLim=GhgLim.*PinakasProeksoflisis;

%%Συνολικο Κοστος απο Πινακα με Προεξοφλημενες Τιμες (Απλη επιλογη μεθοδου)
%Sum_Cum_NoExchg=sum(Cum_NoExchg);
%Sum_Cum_NorGas=sum(Cum_NorGas);
%Sum_Cum_SwePO=sum(Cum_SwePO);
%Sum_Cum_GhgLim=sum(Cum_GhgLim);
%
%%figure;
%%plot(Time,NoExchg,Time,NorGas,Time,SwePO,Time,GhgLim);



%Πολιτικη και Πινακας με Προεξοφλημενες Τιμες
Cum_Politics=[];
for Stoixeio_Pinaka1=(1:1:STILES)
    Cum_Politics(Stoixeio_Pinaka1)=(Politics(1,Stoixeio_Pinaka1)*Cum_NoExchg(Stoixeio_Pinaka1))+...
     ...(Politics(2,Stoixeio_Pinaka1)*Cum_NorGas(Stoixeio_Pinaka1))+...
     ...(Politics(3,Stoixeio_Pinaka1)*Cum_SwePO(Stoixeio_Pinaka1))+...
     ...(Politics(4,Stoixeio_Pinaka1)*Cum_GhgLim(Stoixeio_Pinaka1));
end

%Υπολογισμος Συνολικου Κοστους
Cost=sum(Cum_Politics);

%figure;
%plot(Time,Cum_Politics);



%figure;
%plot(Time,NoExchg,Time,NorGas,Time,SwePO,Time,GhgLim);
```

Σχήμα Γ.9. Η συνάρτηση $Blackbox1(Epitokio, Politics)$.

```
function num=Reward(CostSynolou)

%num=[min(CostSynolou) max(CostSynolou)];
num=max(CostSynolou);
```

Σχήμα Γ.10. Η συνάρτηση $Reward(CostSynolou)$.

Επιστρέφοντας στο Σχήμα Γ.6, είναι αντιληπτό ότι με δεδομένη την ευρωστία και συνεπώς τη μέγιστη αβεβαιότητα του ενεργειακού ζητήματος από τη συνάρτηση $Reward(CostSynolou)$ το μέγιστο κόστος το οποίο προκύπτει για το σύνολο είναι και ταυτόχρονα το κατώφλι.

Όπως έγινε αντιληπτό, οι συναρτήσεις που παρουσιάζονται στο Σχήμα Γ.7, Σχήμα Γ.8, Σχήμα Γ.9 και Σχήμα Γ.10 για να μπορέσουν να αποδώσουν θα πρέπει να αποτελούν στοιχεία εργαλειοθήκης (toolbox) η οποία θα καλείται από το πρόγραμμα της διεπαφής που παρουσιάζεται στο Σχήμα Γ.6 όπως άλλωστε είναι εμφανές.

Γ.2.3 Πρόγραμμα Υπολογισμού Λύπης (Κόστους) με Δεδομένη Ευρωστία

Στο Σχήμα Γ.11 παρουσιάζεται το πρόγραμμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε για να προκύψουν οι γραφικές παραστάσεις της λύπης του συσωρευτικού κόστους όταν υπάρχει δεδομένη ευρωστία για την περίπτωση πολιτικής τριών σεναρίων.

```
clear all;
addpath('C:\Users\user\Σχολη\Μεταπτυχιακά\MBA\Μεταπτυχιακη\Προγραμματα\toolbox_2_DedomenoA_ZhtoumenoRc\');


%%Εισοδοι
for politikh=(1:1:4)
    politikh
    if (politikh==1)
        q=[0.34;0.33;0.33;0.00];
    elseif (politikh==2)
        q=[0.34;0.33;0.00;0.33];
    elseif (politikh==3)
        q=[0.34;0.00;0.33;0.33];
    elseif (politikh==4)
        q=[0.00;0.34;0.33;0.33];
    end

    deiktis_Epitokio=0;
    for Epitokio=(0.00:0.01:0.20)
        deiktis_Epitokio=deiktis_Epitokio+1

        alpha_step=0.01;
        akriveia=0.01;

        deiktis_alpha=0;
        for alpha=(0.00:alpha_step:0.20)
            deiktis_alpha=deiktis_alpha+1;

            ASynoloEisodon=SynoloEisodon(Epitokio,q,alpha,akriveia);
            AYpologismosKostousSynolou=YpologismosKostousSynolou(Epitokio,ASynoloEisodon);
            AReward=Reward(AYpologismosKostousSynolou);
            RobustRc=AReward;

            x(deiktis_Epitokio)=Epitokio;
            y(deiktis_alpha)=alpha;
            z(deiktis_alpha,deiktis_Epitokio,politikh)=RobustRc/(10^6);
        end
    end

    MaxPerformance=min(min(z(:,:,politikh)));
    Regret(:,:,politikh)=(z(:,:,politikh)-MaxPerformance);
    Relative_Regret(:,:,politikh)=Regret(:,:,politikh)/abs(MaxPerformance);
end

figure;
subplot(2,2,1); [C,h]=contourf(100*x,y,Relative_Regret(:,:,1));
    caxis([0 10]); h=clabel(C,h); set(h,'BackgroundColor',[1 1 .6],'Edgecolor',[.7 .7 .7]);colormap(ColorFigure(1));
    set(gca,'YDir','reverse');set(gca,'XDir','reverse');
    xlabel('Discount rate (%)','FontSize',16,'Linewidth',15);
    ylabel('Robustness','FontSize',16);
    %legend('Relative regret');
    title('NoExchg (34%) + NorGas (33%) + SwePO (33%)');

subplot(2,2,2); [C,h]=contourf(100*x,y,Relative_Regret(:,:,2));
    caxis([0 10]); h=clabel(C,h); set(h,'BackgroundColor',[1 1 .6],'Edgecolor',[.7 .7 .7]);colormap(ColorFigure(1));
    set(gca,'YDir','reverse');set(gca,'XDir','reverse');
    xlabel('Discount rate (%)','FontSize',16,'Linewidth',15);
    ylabel('Robustness','FontSize',16);
    %legend('Relative regret');
    title('NoExchg (34%) + NorGas (33%) + GhgLim (33%)');

subplot(2,2,3); [C,h]=contourf(100*x,y,Relative_Regret(:,:,3));
    caxis([0 10]); h=clabel(C,h); set(h,'BackgroundColor',[1 1 .6],'Edgecolor',[.7 .7 .7]);colormap(ColorFigure(1));
    set(gca,'YDir','reverse');set(gca,'XDir','reverse');
    xlabel('Discount rate (%)','FontSize',16,'Linewidth',15);
    ylabel('Robustness','FontSize',16);
    %legend('Relative regret');
    title('NoExchg (34%) + SwePO (33%) + GhgLim (33%)');

subplot(2,2,4); [C,h]=contourf(100*x,y,Relative_Regret(:,:,4));
    caxis([0 10]); h=clabel(C,h); set(h,'BackgroundColor',[1 1 .6],'Edgecolor',[.7 .7 .7]);colormap(ColorFigure(1));
    set(gca,'YDir','reverse');set(gca,'XDir','reverse');
    xlabel('Discount rate (%)','FontSize',16,'Linewidth',15);
    ylabel('Robustness','FontSize',16);
    %legend('Relative regret');
    title('NorGas (34%) + SwePO (33%) + GhgLim (33%)');

    set(gcf, 'PaperUnits', 'inches');
    set(gcf, 'PaperPosition', [0.37 02.5 7.77 11.00]);

rmpath('C:\Users\user\Σχολη\Μεταπτυχιακά\MBA\Μεταπτυχιακη\Προγραμματα\toolbox_2_DedomenoA_ZhtoumenoRc\');

%Ηχος Τελους
load chirp;
y1 = y; Fs1 = Fs;
load gong;
wavplay(y1,Fs1,'sync')
wavplay(y,Fs)
```

Σχήμα Γ.11. Η συνάρτηση για τον υπολογισμό της λύπης.

Για τον υπολογισμό της λύπης γίνεται χρήση των συναρτήσεων που παρουσιάστηκαν παραπάνω. Όπως μπορεί να διαπιστωθεί και από την παρατήρηση του προγράμματος ο υπολογισμός βασίζεται στη σχετική λύπη όπως ορίστηκε σε προηγούμενα Κεφάλαια και Παραρτήματα.

Γ.2.4 Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης για τον Αλγόριθμο Εισόδου

Στο Σχήμα Γ.12 παρουσιάζεται μια βελτιστοποιημένη έκδοση του προγράμματος $SynoloEisodon(Epitokio, q, alpha, akriveia)$. Όπως έχει ήδη αναφερθεί τόσο θεωρητικά όσο και στο Κεφάλαιο που παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, ο χρόνος που απαιτείται για να εκτελεστεί το πακέτο προγραμμάτων και να παρουσιαστούν ολοκληρωμένα αποτελέσματα είναι σημαντικός (από ώρες έως μέρες) με την υπάρχουσα τεχνολογική υποδομή.

Προσπάθειες οι οποίες στοχεύουν στη βελτιστοποίηση των αλγορίθμων είναι σημαντικές γιατί οδηγούν σε μικρότερους χρόνους εκτέλεσης.

```
function num=SynoloEisodon(Epitokio,Politics,alpha,akriveia)
%clear all;


%%Εισοδοι
%Epitokio=0.00;
%Politics=[0.90;
%          0.00;
%          0.10;
%          0.00];
%alpha=0.20;
%akriveia=0.01;

%Δημιουργια Ευρους για τα loops
MaxPolitics=(alpha)+Politics;
MinPolitics=(-alpha)+Politics;

%Δημιουργια Οριων Ευρος
MaxPolitics=min(1,MaxPolitics);
MinPolitics=max(MinPolitics,0);

%%Δημιουργια Συνολου διανυσματων υ περισπωμενη (Εκδοση 1)
%deiktis=0;
%for DeiktisA=(MinPolitics(1):akriveia:MaxPolitics(1))
%    for DeiktisB=(MinPolitics(2):akriveia:MaxPolitics(2))
%        for DeiktisC=(MinPolitics(3):akriveia:MaxPolitics(3))
%            for DeiktisD=(MinPolitics(4):akriveia:MaxPolitics(4))
%                PAR=DeiktisA+DeiktisB+DeiktisC+DeiktisD;
%                if (PAR<1.0001)&(PAR>0.9999)
%                    deiktis=deiktis+1;
%                    U(:,deiktis)=[DeiktisA;
%                                  DeiktisB;
%                                  DeiktisC;
%                                  DeiktisD];
%                end
%            end
%        end
%    end
%end

%Δημιουργια Συνολου διανυσματων υ περισπωμενη (Εκδοση 2-Βελτιστοποιημενη)
deiktis=0;
for DeiktisA=(MinPolitics(1):akriveia:MaxPolitics(1))
    for DeiktisB=(MinPolitics(2):akriveia:min(max(max(0,1-DeiktisA),MinPolitics(2)),MaxPolitics(2)))
        for DeiktisC=(MinPolitics(3):akriveia:min(max(max(0,1-DeiktisA-DeiktisB),MinPolitics(3)),MaxPolitics(3)))
            for DeiktisD=(MinPolitics(4):akriveia:min(max(max(0,1-DeiktisA-DeiktisB-DeiktisC),MinPolitics(4)),MaxPolitics(4)))
                PAR=DeiktisA+DeiktisB+DeiktisC+DeiktisD;
                if (PAR<1.0001)&(PAR>0.9999)
                    deiktis=deiktis+1;
                    U(:,deiktis)=[DeiktisA;
                                  DeiktisB;
                                  DeiktisC;
                                  DeiktisD];
                end
            end
        end
    end
end

num=U;
```

Σχήμα Γ.12. Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης υπολογισμού συνόλου των πιθανών δυνατών πολιτικών από σενάρια.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] R. A. Freeze and J. A. Cherry, *Groundwater*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1979.

[2] V. P. Singh, Ed., *Environmental Hydrology*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 1995.

[3] *Environmental Hydrology*, A. D. Ward and W. J. Elliot, Eds. Boca Raton, FL: CRC, 1995.

[4] L. Fang, K. W. Hipel, and D. M. Kilgour, *Interactive Decision Making: The Graph Model for Conflict Resolution*. New York: Wiley, 1993.

[5] R. von Mises, *Probability, Statistics and Truth*. Mineola, NY: Dover, 1981.

[6] A. Bardossy and L. Duckstein, *Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems*. Boca Raton, FL: CRC, 1995.

[7] D. Dubois and H. Prade, *Possibility Theory: An Approach to Computerized Processing of Uncertainty*. New York: Plenum, 1988.

[8] G. J. Klir and T. A. Folger, *Fuzzy Sets, Uncertainty, and Information*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1988.

[9] L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. SMC-3, pp. 28–44, 1973.

[10] L. A. Zadeh, "A fuzzy set-theoretic interpretation of linguistic hedges," *J.Cybern.*, vol. 2, pp. 4–34, 1972.

[11] Y. Ben-Haim, *The Assay of Spatially Random Material*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer, 1985.

[12] Y. Ben-Haim and I. Elishakoff, *Convex Models of Uncertainty in Applied Mechanics*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 1990.

[13] Y. Ben-Haim, *Robust Reliability in the Mechanical Sciences*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1996.

[14] Y. Ben-Haim, "Reliability of vibrating structures with uncertain inputs," *Shock Vibration Dig.*, vol. 30, pp. 106–113, 1998.

[15] Ben-Haim Y. Information-gap decision theory: decisions under severe uncertainty. London: Academic Press; 2001.

[16] Ben-Haim Y. Design certification with information-gap uncertainty. Struct Safety 1999;21:269–89.

[17] Ben-Haim Y, Cogan S, Sanseigne L. Usability of mathematical models in mechanical decision processes. Mech Syst Signal Process 1998;12:121–34.

[18] Tikhonov AN, Arsenin VY. Solutions of ill-posed problems. New York: Wiley; 1977. μεταφρασμένο από τον Fritz John.

[19] www.etsap/org/documentation

[20] Fishbone LG, Abilock H (1981) MARKAL, a linear programming model for energy systems analysis: technical description of the BNL version. Int J Energy Res 5:353–375.

[21] Fishbone LG, Giesen G, Hymmen HA, Stocks M, Vos H, Wilde D, Zoelcher R, Balzer C, Abilock H (1983) Users guide for MARKAL: a multi-period, linear programming model for energy systems analysis. BNL Upton, NY, and KFA, Julich, BNL 51701.

[22] Berger C, Dubois R, Haurie A, Lessard E, Loulou R,Waaub J-Ph (1992) Canadian MARKAL: an advanced linear programming system for energy and environment modelling. INFOR 20:114–125.

[23] Finon D (1974) Optimization model of the French energy sector. Energy Policy 2(2):136–151.

[24] van der Voort E, Donni E, Thonet C, Bois d'Enghien E, Dechamps C, Guilmot JF (1984) Energy supply modelling package EFOM-12C Mark I, Mathematical description. Commission of the European Communities, Louvain-la-Neuve, EUR-8896.

[25] Nakicenovic N (ed) (2000) Special report on emissions scenarios. A special report of working III of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge p 599.

[26] Moomaw WR,Moreira JR (2001) Technological and economic potential of greenhouse greenhouse gas emissions reduction. In: Climate change 2001: Mitigation.

[27] Samuelson PA (1952) Spatial price equilibrium and linear programming. Am Econ Rev 42:283–303.

[28] Takayama T, Judge GG (1971) Spatial and temporal price and allocation models. North Holland, Amsterdam.

[29] Kanudia A, Loulou R (1998) Robust responses to climate change via stochastic MARKAL: the case of Québec. Eur J Oper Res 106:15–30.

[30] Dantzig GB (1963) Linear programming and extensions. Princeton University Press, Princeton.

[31] Loulou R, KanudiaA(1999) Minimax regret strategies for greenhouse gas abatement: methodology and application. Oper Res Lett 25:219–230.

[32] Loulou R, Kanudia A (2000) Using advanced technology-rich models for regional and global economic analysis of GHG mitigation. In: Decision and control: Essays in honor of Alain Haurie. Zaccour G (ed) Kluwer, Norwell pp 153–175. Μια συμπυκνωμένη έκδοση αυτού του άρθρου δημοσιεύθηκε ηλεκτρονικά στο the Proceedings of the International Energy Agency International conference on Climate Change Modelling and Analysis, held in Washington DC, June15–17, 1999.

[33] Nordhaus W (1993) Rolling the DICE: an optimal transition path for controlling GHG's. Resour Energy Econ 15(1):27–50.

[34] The Solver Manual of the GAMS A USER'S GUIDE, Anthony Brooke, David Kendrick, Alexander Meeraus, and Ramesh Raman, December 1998.

[35] Tosato GC (1980) Extreme Scenarios in MARKAL LP Model: use of Demand Elasticity. In: Presented at the 5th Italian–Polish symposium on applications of systems theory to economics and technology, Torun, 11–16 June 1980.

[36] Loulou R, LavigneD(1996) MARKALmodel with elastic demands: application to GHGemission control. In: Carraro C, Haurie A (eds) Operations research and environmental engineering, Kluwer, Dordrecht, pp 201–220.

[37] HoganWW(1975) Energy policy models for project independence. Comput Oper Res 2:251–27.

[38] Barreto L (2001) Technological learning in energy optimisation models and the deployment of emerging technologies. PhD Thesis no 14151, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ETHZ). Zurich, Switzerland.

[39] R. Loulou and M. Labriet, "ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model Part I: Model structure", Springer-Verlag, 2007.

[40] R. Loulou, "ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. part II: mathematical formulation", Springer-Verlag, 2007.

[41] von Neumann, J., and Morgenstern, O. (1944). *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton University Press, Princeton, NJ.

[42] Savage, L. J. (1954). *The Foundation of Statistics*, Dover Publications.

[43] Camerer, C., and Weber, M. (1992). "Recent Developments in Modelling Preferences: Uncertainty and Ambiguity." *Journal of Risk and Uncertainty*, 5, 325-370.

[44] Quade, E. S., and Carter, G. M. (1989). *Analysis for Public Decisions*, North-Holland, New York, NY.

[45] Keeney, R. L., and Raiffa, H. (1993). *Decisions with Multiple Objectives*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

[46] Ellsberg, D. (1961). "Risk, Ambiguity, and the Savage Axioms." *The Quarterly Journal of Economics*, 75(4), 643-669.

[47] Smithson, M. (1989). *Ignorance and Uncertainty - Emerging paradigms*, Springer-Verlag, New York, NY.

[48] Wallsten, T. S., and Budescu, D. V. (1995). "A review of human linguistic probability processing: General principles and empirical evidence." *The Knowledge Engineering Review*, 10(1), 43-62.

[49] Gardenfors, P., and Sahlin, N.-E. (1982). "Unreliable Probabilities, Risk Taking, and Decision Making."*Synthese*, 53, 361-386.

[50] Wu, S. M., Huang, G. H., and Guo, H. C. (1997). "An Interactive Inexact-Fuzzy Approach for Multiobjective Planning of Water Resource Systems." *Water Science and Technology*, 36(5), 235-242.

[51] Morgan, M. G., Kandilikar, M., Risbey, J., and Dowlatabadi, H. (1999). "Why Conventional Tools For Policy Analysis Are Often Inadequate for Problems of Global Change." *Climatic Change*, 41, 271-281.

[52] Rosenhead, J. (1989). "Robustness analysis: keeping your options open." Rational Analysis for a Problematic World, J. Rosenhead, ed., John Wiley & Sons, Chichester.

[53] Lempert, R., Nakicenovic, N., Sarewitz, D., and Schlesinger, M. (2004). "Characterizing Climate-Change Uncertainties for Decision-Makers." *Climatic Change*, 65, 1-9.

[54] Lempert, R. J., and Bonomo, J. (1998). "New Methods for Robust Science and Technology Planning." RAND, Santa Monica, California.

[55] Lempert, R. J., Groves, D. G., Popper, S. W., and Bankes, S. C. (2005). "A General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios." *Submitted to Management Sciences.*

[56] Lempert, R. J., Popper, S. W., and Bankes, S. C. (2003). *Shaping the Next One Hundred Years: New methods for quantitative, long-term policy analysis*, RAND, Santa Monica, California.

[57] Lempert, R. J., and Schlesinger, M. E. (2000). "Robust Strategies for Abating Climate Change." *Climatic Change*, 45(3/4), 387-401.].

[58] Lempert, R. J., Schlesinger, M. E., Bankes, S. C., and Andronova, N. G. (2000). "The Impact of Variability on Near-Term Climate-Change Policy Choices." *Climatic Change*, 45(1), 129-161.

[59] Bankes, S. C. (1993). "Exploratory Modeling for Policy Analysis." *Operations Research*, 41(3), 435-449.

[60] Bankes, S. C. (2002). "Tools and Techniques for Developing Policies for Complex and Uncertain Systems."*Proceedings of the National Academy of Sciences.*

[61] Davis, P. K., and Hillestad, R. (2002). "Exploratory Analysis for Strategy Problems with Massive Uncertainty." RAND Corporation, Santa Monica, CA.

[62] Bigelow, J. H., and Davis, P. K. (2003). "Implications for Model Validation of Multiresolution, Multiperspective Modeling (MRMPM) and Exploratory Analysis." *MR-1750-AF*, RAND Corporation, Santa Monica, CA.

[63] Beven, K. (2001). "How far can we go in distributed hydrological modelling?" *Hydrology and Earth System Sciences*, 5(1), 1-12.

[64] Lempert, R. J., Schlesinger, M. E., and Bankes, S. C. (1996). "When We Don't Know the Costs or the Benefits: Adaptive Strategies for Abating Climate Change." *Climatic Change*, 33(2), 235-274.

[65] Robalino, D. A., and Lempert, R. J. (2000). "Carrots and Sticks for New Technology: Abating Greenhouse Gas Emissions in a Heterogeneous and Uncertain World." *Integrated Assessment*, 1(1), 1-19.

[66] Brooks, A., Bankes, S. C., and Bennett, B. (1999). "An Application of Exploratory Analysis: The Weapon Mix Problem." *Military Operations Research*, 4(1).

[67] Kahneman, D., and Tversky, A. (1979). "Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk." *Econometrica*, 47(2), 263-292.

[68] Loomes, G., and Sugden, R. (1982). "Regret Theory: An Alternative Theory of Rational Choice Under Uncertainty." *The Economic Journal*, 92(368), 805-824.

[69] Loomes, G., and Sugden, R. (1987). "Some Implications of a More General Form of Regret Theory." *Journal of Economic Theory*, 41, 270-287.

[70] Simon, H. A. (1959). "Theories of Decision-Making in Economic and Behavioral Science." *The American Economic Review*, 49(3), 253-283.

[71] Dewar, J. A. (2002). *Assumption-Based Planning - A Tool for Reducing Avoidable Surprises*, Cambridge University Press, Santa Monica, CA.

[72] Dewar, J. A., Bankes, S. C., Edwards, S. J. A., and Wendt, J. C. (2000). "Expandability of the 21st Century Army." *MR-1190-A*, RAND Corporation, Santa Monica, CA.

[73] Schwartz, P. (1991). *The Art of the Long View*, Currency-Doubleday, New York, NY.

[74] Schwartz, P. (1996). *The Art of the Long View - Planning for the Future in an Uncertain World*, Currency-Doubleday, New York, NY.

[75] Friedman, J. H., and Fisher, N. I. (1999). "Bump Hunting in High-Dimensional Data." *Statistics and Computing*, 9, 123-143.

[76] D.Groves, "New Methods for Identifying Robust Long-Term Water Resources Management Strategies for California," Ph.D. dissertation, Pardee Rand Graduate School, Sep. 2005.

[77] http://europa.eu.

[78] A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy-COM(2006) 105, 8 March 2006.

[79] European Parliament and Council Decision of 5 June 1996 (1254/96) establishing a series of guidelines on trans-European networks in the energy sector

[80] Amendments have been made through Commission Decision (97/548) of 11 July 1997; and Decision 1741/1999 of the European Parliament and of the Council.

[81] Decision No 1229/2003/EC of the European Parliament and of the Council of 26 June 2003.

[82] European Energy and Transport-Trends to 2030, EC 2003.

[83] Commission of the European Communities, "Green paper - A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy", COM(2006) 105 fi nal, 8 March 2006. http://ec.europa.eu.

[84] UCTE IPSUPS Study, "Feasibility Study: Synchronous Interconnection of the Power Systems of IPS/UPS with UCTE – Summary of Project Status", December 2006.

[85] Decision No 1364/2006/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 laying down guidelines for trans-European energy networks and repealing Decision 96/391/EC and Decision No 1229/2003/EC.

[86] http://www.hyways.de/.

[87] European Energy and Transport Energy Trends to 2030, 2003, http://europa.eu.

[88] Nordel 1999. Annual Report 1998. Nordel, Oslo, Norway. Statistics available at <http://www.nordel.org/eng/index.html>. Referenced on May 16th, 2000.

[89] Nordpool 2000. Nord Pool, the Nordic Power Exchange, Oslo, Norway. <http://www.nordpool.no/>. Referenced on September 12th, 2000.

[90] KVF 2000. The Swedish Power Association, Stockholm, Sweden. Statistics avail-able at <http://www.kvf.se/vrapp.pdf>. Referenced on July 11th, 2000.

[91] Energiemyndigheten 2000. Energiläget i siffror 1999. Swedish National Energy Administration, Eskilstuna, Sweden. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.stem.se/web/fakta.nsf/atkomstsve/sveriges_energisystem?opendoc ument>. Referenced on August 4th, 2000.

[92] Energiestyrelsen 1999b. Energy Statistics 1998. The Danish Energy Agency, Co-penhagen, Denmark. Statistics available at <http://www.ens.dk/uk/statis.htm>. Referenced on August 4th, 2000.

[93] Tilastokeskus 1998. Energy statistics 1998. Statistics Finland, Helsinki, Finland.

[94] KTM 1997. Energy Economy 2025 – Review of Various Scenarios. Ministry of Trade and Industry, Helsinki, Finland.

[95] NOU 1998. Energi- og kraftbalansen mot 2020. Norges Offentlige Utredninger, NOU 1998:11, Norway. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://balder.dep.no/nou/1998-11/innhold.htm>. Referenced on July 8th, 2000.

[96] Energiemyndigheten 1997. Klimatrapport 1997. Swedish National Energy Administration, Eskilstuna, Sweden. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.stem.se/web/fakta.nsf/atkomstsve/sveriges_energisystem?opendocument>. Referenced on August 4th, 2000.

[97] Lehtilä, A. and Tuhkanen, S. 1999. Integrated cost-effectiveness analysis of greenhouse gas emission abatement. The case of Finland. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 374, Espoo, Finland.

[98] Energiestyrelsen 1996. Energy 21, The Danish Government's Action Plan for Energy. The Danish Energy Agency, Copenhagen, Denmark.

[99] IPCC 1996. Climate Change 1995: The Science of Climate Change – Contribu-tion of Working Group I to the Second Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Summary available at <http://www.ipcc.ch/pub/reports.htm>. Referenced on September 12th, 2000.

[100] J. Mäkelä, "Development of an Energy System Model of the Nordic Electricity Production System", PHd dissertation, Helsinki University of Technology, Oct. 2000.

[101] Yakov Ben-Haim, *Info-Gap Theory: Decisions Under Severe Uncertainty,* 2nd edition, Academic Press, London, 2006.

[102] Tintner, G., Abraham Wald's contributions to econometrics, *The Annals of Mathematical Statistics,* 23(1), 21-28, 1952.

[103] Fox D., Ben-Haim Y., Hayes K., McCarthy M., Wintle B., and Dunstan P.,"*An info-gap approach to power and sample size calculations,*" Environmetrics 2007, 18, pp. 189-203.

[104] Regan H., Ben-Haim Y., Langford B., Wilson W., Lundberg P., Andelman S., and Burgman M., "*Robust Decision-Making under Severe Uncertainty for Conservation Management,*" Ecological Applications by Ecological Society of America, 15(4), 2005, pp.1471-1477.

[105] Krokhmal P., "Risk Management Techniques for Decision making in Highly Uncertain Environments", Phd dissertation, University of Florida, 2003.

[106] Ξανθάκης, Μ. και Αλεξάκης, Χ., "*Χρηματοοικονομική Ανάλυση*", Εκδόσεις Σταμούλη, Αθήνα 2007.

[107] Kouvelis, P., and G. Yu, *Robust Discrete Optimization and Its Applications,* Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1997.

[108] Metz B, Davidson O, Swart R, Pan J (eds) Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Third Assessment Report, Working Group III Cambridge University Press, Cambridge pp 167–299.

[109] Kahneman, Daniel, Paul Slovic, and Amos Tversky, *Judgment Under Uncertainty: Heuristics and Biases,* New York: Cambridge University Press, 1982.

[110] Kahneman, Daniel, and Amos Tversky, *The Simulation Heuristic,* New York: Cambridge University Press, 1982.

[111] Klein, Gary, *Sources of Power: How People Make Decisions,* Cambridge, Mass.: MIT Press, 1998.

[112] Morgan, Millett G., and Max Henrion, eds., *Uncertainty: A Guide to Dealing with Uncertainty in Quantitative Risk and Policy Analysis*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.

[113] Davis, Paul K., "Exploratory Analysis and Implications for Modeling," in Stuart E. Johnson et al., *New Challenges, New Tools for Defense Decisionmaking,* Santa Monica, Calif.: RAND, MR-1576-RC, 2003, pp. 255–283.

[114] van Asselt, Marjolein B. A., *Perspectives on Uncertainty and Risk,* Dordrecht, the Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 2000.

[115] de Cooman, G., T. L. Fine, and T. Seidenfeld, *Proceedings of the Second International Symposium on Imprecise Probabilities and Their Applications,* The Netherlands: Shaker Publishing, 2001.

[116] Zhou, K., J. Doyle, and K. Glover, *Robust and Optimum Control Theory,* Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1996.

[117] Epstein, Joshua, and Robert L. Axtell, *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*, Cambridge, Mass.: MIT Press, 1996.

[118] Bankes, "Agent-Based Modeling: A Revolution?" *Proceedings of the National Academy of Sciences,* Vol. 99, Supplement 3, 2002a, pp. 7199–7200.

[119] Bankes, Steven C., and James Gillogly, "Validation of Exploratory Modeling," in Adrian Tentner, ed., *High Performance Computing:* Shaping the Next One Hundred Years *Grand Challenges in Computer Simulation,* San Diego, Calif.: The Society for Computer Simulation, 1994a.

[120] Bankes, *Exploratory Modeling: Search Through Spaces of Computational Experiments*, Third Annual Conference on Evolutionary Programming, World Scientific, 1994b.

[121] Bankes, Steven C., Robert J. Lempert, and Steven W. Popper, "Computer-Assisted Reasoning," *Computing in Science and Engineering*, 2001, pp. 71–77.].

[122] Walter, Dave, ed., *Today Then: America's Best Minds Look 100 Years into the Future on the Occasion of the 1893 World's Columbian Exposition,* Helena, Mont.: American & World Geographic Publishing,1992.

[123] Davis, Steven, *The Diffusion of Process Innovations,* Cambridge, UK: The Cambridge University Press, 1979.

[124] Utterback, James M., *Mastering the Dynamics of Innovation,* Boston: Harvard Business School Press, 1994.

[125] Gupta, S. K., and J. Rosenhead, "Robustness in Sequential Investment Decisions," *Management Science,* Vol. 15, No. 2, 1972 pp. 18– 29.

[126] Rosenhead, M. J., M. Elton, and S. K. Gupta, "Robustness and Optimality as Criteria for Strategic Decisions," *Operational Research Quarterly,* Vol. 23, No. 4, 1972, pp. 413–430.

[127] van der Heijden, K., *Scenarios: The Art of Strategic Conversation,* Chichester, UK: Wiley and Sons, 1996.

[128] Dewar, James A., Carl H. Builder, William M. Hix, and Morlie H. Levin, *Assumption-Based Planning*: *A Tool for Very Uncertain Times,* Santa Monica, Calif.: RAND, MR-114-A, 1993.

[129] Lempert, Robert J., Steven W. Popper, Susan Resetar, and S. Hart, *Capital Cycles and the Timing of Climate Change Mitigation Policy,* Arlington, Va.: Pew Center on Global Climate Change, 2002.

[130] ICSU, *Resilience and Sustainable Development,* International Council for Science, 2002.

[131] Berger, James O., *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis,* New York: Springer-Verlag, 1985.

[132] Benkard, C. Lanier, *Learning and Forgetting: The Dynamics of Aircraft,* Stanford, Calif.: Stanford Graduate School of Business,1999.

[133] Payne, John. W., James R. Bettman, and Eric J. Johnson, *The Adaptive Decision-Maker,* New York: Cambridge University Press, 1993.

[134] Haeckel, S., and Adrian Slywotzky, *Adaptive Enterprise: Creating and Leading Sense-and-Respond Organizations*, Harvard Business School, 1999.

[135] Trigeorgis, L., *Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation,* Cambridge, Mass.: MIT Press, 1996.

[136] Dewar, James A., *The Information Age and the Printing Press: Looking Backward to See Ahead,* Santa Monica, Calif.: RAND, P- 8014, 1998.

[137] Dewar, James A., Steven C. Bankes, James S. Hodges, Thomas W. Lucas, Desmond K. Saunders-Newton, and Patrick Vye, *Credible Uses of the Distributed Interactive Simulation (DIS) Environment,* Santa Monica, Calif.: RAND, MR-607-A, 1996.

[138] Carley, Kathleen, "Computational Organizational Science: A New Frontier," *Proceedings of the National Academy of Sciences,* Vol. 99, supplement 3, 2002, pp. 7257–7262.

[139] DeCanio, Steve J., Catherine Dibble, and Keyvan Amir-Atefi, "The Importance of Organizational Structure for the Adoption of Innovations," *Management Science,* Vol. 46, No. 10, 2000, pp. 1285– 1299.

[140] DeCanio, "Organizational Structure and the Behavior of Firms: Implications for Integrated Assessment," *Climate Change,* Vol. 48, 2001, pp. 487–514.

[141] Walters, Carl, *Adaptive Management of Renewable Resources,* Caldwell, N.J.: The Blackburn Press, 1986.

[142] McMillan, John, *Reinventing the Bazaar: A Natural History of Markets,* New York: W. W. Norton & Company, 2002.

[143] Holmes, Stephen, *Passions and Constraints: On the Theory of Liberal Democracy*, Chicago: University of Chicago Press, 1995.

[144] Schelling, Thomas, *Micromotives and Macrobehavior,* New York: W. W. Norton and Company, 1978.

[145] Hammitt, J. K., R. J. Lempert, and M. E. Schlesinger, "A Sequential- Decision Strategy for Abating Climate Change," *Nature,* Vol. 357, 1992, pp. 315–318.

[146] Manne, A. S., and R. G. Richels, *Buying Greenhouse Insurance: The Economic Costs of Carbon Dioxide Emissions Limits,* Cambridge, Mass.: MIT Press, 1992.

[147] Nordhaus, W. D., *Managing the Global Commons: The Economics of Global Change,* Cambridge, Mass.: MIT Press, 1994.

[148] Gigerenzer, G., and P. M. Todd, *Simple Heuristics That Make Us Smart,* New York: Oxford University Press, 1999.

[149] Saltelli, A., K. Chan, and M. Scott, *Sensitivity Analysis,* New York: Wiley, 2000.

[150] Bankes, Steven C., Steven W. Popper, and Robert J. Lempert, *Incorporating Adversarial Reasoning in COAA Planning*, Topanga, Calif.: Evolving Logic, 2000.

[151] Watson, Stephen R., and Dennis M. Buede, *Decision Synthesis,* Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1987.

[152] Victor, David, *The Collapse of the Kyoto Protocol and the Struggle to Slow Global Warming,* Princeton, N.J.: Princeton University Press, 2001.

[153] Lindblom, C. E., "The Science of Muddling Through," *Public Administration Review,* Vol. 19, 1959, pp. 79–88.

[154] Adato 1999b. Sähkö ja kaukolämpö 1998. Adato Energia Oy, Helsinki, Finland. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.energia.fi/sahko/saka98.pdf>. Περιλαμβάνεται αγγλική μετάφραση. Referenced on June 8th, 2000.

[155] Energiemyndigheten 1998. Swedish Electricity Market 1998. Swedish National Energy Administration, Eskilstuna, Sweden. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.stem.se/web/fakta.nsf/atkomstsve/sveriges_energisystem?opendocument>. Referenced on August 4th, 2000.

[156] Energiemyndigheten 1999. Energy in Sweden. Swedish National Energy Admini-stration, Eskilstuna, Sweden. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.stem.se>. Referenced on September 8th, 2000.

[157] Energiestyrelsen 1997. Combined Heat and Power in Denmark. The Danish En-ergy Agency, Copenhagen, Denmark. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.ens.dk/pub/chp/chptext.htm>. Referenced on August 4th, 2000.

[158] Energiestyrelsen 1999a. Review of Energy Policy 1999. The Danish Energy Agency, Copenhagen, Denmark. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.ens.dk/uk/about.htm>. Referenced on August 4th, 2000.

[159] IEA 1997. Energy Policies of IEA Countries, Norway 1997 Review. International Energy Agency, Paris, France. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.iea.org/pubs/reviews/files/nor97/nor02.htm>. Referenced on June 8th, 2000.

[160] OED 1999. Om energipolitikken. St meld nr 29 (1998-1999). Ministry of Petro-leum and Energy (OED), Oslo, Norway. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://balder.dep.no/repub/98-99/stmld/29/>. Referenced on August 4th, 2000.

[161] Andersson, B. and Hådén, E. 1997. "Power production and the price of electricity: an analysis of a phase-out of Swedish nuclear power." Energy Policy, Vol 25, No. 13, pp. 1051-1064.

[162] Gasum 1999. Annual Report 1999. Gasum Oy, Espoo, Finland. Publication avail-able at <http://www.gasum.fi/frindex_eng.htm>. Referenced on June 8th, 2000.

[163] Energiestyrelsen 1999c. Wind power in Denmark, Technology, Policies, Results. The Danish Energy Agency, Copenhagen, Denmark. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.ens.dk/uk/publica.htm>. Referenced on June 8th, 2000.

[164] Energiestyrelsen 1999d. Report on the Danish green certificate market. The Dan-ish Energy Agency, Copenhagen, Denmark. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.ens.dk/uk/publica.htm>. Referenced on June 8th, 2000.

[165] MD 1999. Norwegian Climate Change Policy. Ministry of the Environment (MD), Oslo, Norway. Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://balder.dep.no/md/publ/1999/climate_change/>. Referenced on May 16th, 2000.

[166] Energiestyrelsen 2000. Climate 2010 – Status and Perspectives for Denmark's Climate Change Policy. The Danish Energy Agency, Copenhagen, Denmark. Summary of the Η δημοσίευση είναι διαθέσιμη στο <http://www.ens.dk/Publikationer/2000/klima2012/summary.pdf>. Referenced on August 4th, 2000.

[167] http://ec.europa.eu/research/ fp6/ssp/weto_h2_en.htm

[168] http://ec.europa.eu/research/research-eu

[169] http://publications.europa.eu

[170] Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems, "*Energy Corridors*", 2007.

[171] Liefeng Bo, Ling Wang, Licheng Jiao: Training Multi-layer Perceptrons Using MiniMin Approach. CIS (1) 2005: 909-914.