



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

***Μικροοικονομική σύγκριση των πολιτικών
“Φορολόγηση των εκπομπών του CO₂” και
“Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών”
υπο καθεστώς αβεβαιότητας***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΓΡΗΓΟΡΑΚΑΚΗ ΘΟΔΩΡΗ

Υπεύθυνος Καθηγητής: Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής

Αθήνα, Ιούλιος 2010



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΔΙΑΤΑΞΕΩΝ
ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΑΠΟΦΑΣΕΩΝ

**Μικροοικονομική σύγκριση των πολιτικών “Φορολόγηση
των εκπομπών του CO₂” και “Σύστημα Εμπορεύσιμων
Αδειών” υπο καθεστώς αβεβαιότητας**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΓΡΗΓΟΡΑΚΑΚΗ ΘΟΔΩΡΗ

Επιβλέπων : Ιωάννης Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την

.....
Β. Ασημακόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....
Δ. Ασκούνης
Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Ι. Ψαρράς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα , Ιούλιος 2010

Copyright © ΘΕΟΔΩΡΟΣ Δ. ΓΡΗΓΟΡΑΚΑΚΗΣ
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.

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στον τομέα Ηλεκτρικών Βιομηχανικών Διατάξεων και Συστημάτων Απόφασης της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ. Αντικείμενο της εργασίας είναι η Μικροοικονομική σύγκριση των πολιτικών “Φορολόγηση των εκπομπών του CO₂” και “Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών” υπο καθεστώσ αβεβαιότητας. Υπεύθυνος κατά την εκπόνηση της διπλωματικής ήταν ο Καθηγητής κ. Ι. Ψαρράς, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεση αυτής και τη δυνατότητα που μου δόθηκε να αναπτύξω μια τόσο ενδιαφέρουσα μεθοδολογία για την αντιμετώπιση ενός τόσο επίκαιρου ερωτήματος.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα της διπλωματικής Παπαδέλη Σωτήρη, υποψήφιο διδάκτορα, για την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε κατά την εκπόνηση της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν κατά την εκπόνηση της εργασίας.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

Γρηγορακάκης Θεόδωρος

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση των πολιτικών “περιορισμός των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (emissions cap and trade)” και “φορολόγηση εκπομπών (CO₂ tax)”. Μια συνηθισμένη μέθοδος σύγκρισης πολιτικών είναι η ανάλυση σεναρίων, η οποία όμως είναι αρκετά ευάλωτη στην αβεβαιότητα.

Η ανάλυση σεναρίων πραγματοποιείται από έναν μικρό αριθμό τρεξιμάτων του μοντέλου, τα οποία βασίζονται σε διαφορετικούς συνδυασμούς υποθέσεων. Στην ανάλυση σεναρίων, διαφορετικά σενάρια οδηγούν σε διαφορετικές βέλτιστες αποφάσεις. Σαν αποτέλεσμα, η απάντηση στην ερώτηση “ποιες είναι οι βέλτιστες αποφάσεις δεδομένου του εύρους όλων των πιθανών μελλοντικών καταστάσεων” είναι άρηκτα εξαρτημένη από το ποια σενάρια θεωρούν, αυτοί που λαμβάνουν τις αποφάσεις, πιο πιθανά. Μια τέτοια προσέγγιση είναι εντελώς διαφορετική από εκείνη όπου έχουμε να αντιμετωπίσουμε ισχυρή αβεβαιότητα, όπως στην περίπτωση της αγοράς ενέργειας, όπου τα σενάρια αξιολογούνται με βάση την ικανότητά τους να προσδιορίσουν τις συνθήκες υπο τις οποίες οι βέλτιστες αποφάσεις διαφοροποιούνται σημαντικά.

Για να αντιμετωπίσουμε την αβεβαιότητα του μέλλοντος και την αδυναμία μας για ακριβείς προβλέψεις, θα προχωρήσουμε στην ανάλυση της ευρωστίας των πολιτικών “περιορισμός των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (emissions cap and trade)” και “φορολόγηση εκπομπών (CO₂ tax)”. Για την ανάλυση της ευρωστίας των δυο πολιτικών επιλέξαμε τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας και το επενδυτικό κόστος σαν παράγοντες αβεβαιότητας. Στόχος μας είναι να προσδιορίσουμε τα κατώφλια της ζήτησης και του επενδυτικού κόστους, που καθιστούν την μια πολιτική πιο αποτελεσματική από την άλλη. Η ανάλυση της ευρωστίας των δύο πολιτικών βασίζεται στην ιδέα του εύρωστου γραμμικού προγραμματισμού και η μέθοδος του Ρυθμιζόμενου Εύρωστου Ομόλογου Προβλήματος (Adjustable Robust Counterpart , ARC) αποτελεί την καταλληλότερη μέθοδο, δεδομένης της ύπαρξης έτοιμης πλατφόρμας για τη μοντελοποίηση και επίλυσή της (ROME – Robust Optimization Made Easy).

Πέρα από τη συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών πολιτικών μείωσης των επιπέδων του CO₂, υφίσταται η ανάγκη του προσδιορισμού των κατωφλίων των τιμών των παραμέτρων του υπό εξέταση ενεργειακού συστήματος που χωρίζουν τα σενάρια όπου μια πολιτική έχει αποδεκτή επίδοση από αυτά όπου συμβαίνει το αντίθετο και, συνεπώς, στον προσδιορισμό της ανοχής κάθε πολιτικής στις μεταβολές του εξωτερικού περιβάλλοντος. Με βάση αυτή τη λογική συσχέτισαμε την αποδοτικότητα των πολιτικών με τις τιμές των Εμπορεύσιμων Αδειών στην αγορά, ανιχνεύοντας ένα κατώφλι τιμών για τις άδειες, το οποίο δίνει το “σήμα” για εναλλαγή πολιτικής.

ABSTRACT

The subject of the current diploma thesis is “ Microeconomic analysis under uncertainty of Emissions Trading System and CO₂ taxation schemes “. A usual method for comparing two policies is Scenario Analysis.

However, Scenario Analysis is performed by a small number of model runs based on different combinations of assumptions. In the scenario analysis case, different scenarios yield different optimal decisions. As a result, the answer to the question “what are the optimal decisions to be made given the range of all possible future realizations” is inevitably dependent on which scenarios the decision makers regard as more likely to come true. Such an approach is fundamentally different from the one where deep uncertainty is acknowledged and scenarios are evaluated based on their ability to identify the conditions under which optimal decisions are significantly differentiated.

Consequently, instead of Scenario Analysis we used Robust Optimization Methods to address uncertainty. As part of our analysis we created a model on R.O.M.E. (Robust Optimization Made Easy), which is a MATLAB toolkit for modeling and solving robust optimization problems. This model resembles the energy market and will be used in order to compare the policies of Emissions Trading System and CO₂ taxation under uncertainty. In the model we considered the increase in demand and the learning rate as uncertain variables.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πίνακας περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	10
1.1 ΣΤΟΧΟΣ	10
1.2 ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΠΟΥ ΜΠΟΡΟΥΝ ΝΑ ΠΡΟΣΑΡΜΟΣΤΟΥΝ ΣΤΗ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΤΟΥ ΥΠΟ ΕΞΕΤΑΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	12
2.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΗΧΑΝΙΣΜΩΝ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ	12
2.2 ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΜΠΟΡΕΥΣΙΜΩΝ ΑΔΕΙΩΝ (EU ETS) ΚΑΙ Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΣΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO₂ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	13
2.2.1 ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΚΟΣΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	14
2.2.2 ΒΡΑΧΥΠΡΟΘΕΣΜΗ ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΙΜΗΣ.....	15
2.2.3 ΜΑΚΡΟΠΡΟΘΕΣΜΕΣ ΕΠΙΡΡΟΕΣ ΣΤΗ ΜΙΞΗ ΚΑΥΣΙΜΩΝ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΕΠΕΝΔΥΣΗ	16
2.2.4 ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΣΕ ΠΑΡΑΓΩΓΟΥΣ ΚΑΙ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ.....	17
2.2.5 ΛΟΙΠΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ	18
2.3 Η ΦΟΡΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ ΤΟΥ CO₂	18
2.4 ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΩΝ ΕΡΓΑΛΕΙΩΝ «CARBON TAX» ΚΑΙ «CAP AND TRADE»	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	23
3.1 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ.....	23
3.2 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΕΝΟΣ ΤΥΠΙΚΟΥ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΟΥ – ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	24
3.2.1. ΕΙΣΟΔΟΙ.....	24
3.2.2 ΈΞΟΔΟΙ.....	26
3.2.3 ΔΟΜΗ.....	27
3.2.4 Η ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΛΟΓΙΚΗ ΤΩΝ ΜΟΝΤΕΛΩΝ ΜΕΡΙΚΗΣ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ.	30
3.2.5 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ: ΣΥΝΟΛΙΚΟ ΠΡΟΞΕΦΛΗΜΕΝΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ.....	35

3.2.6 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	36
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	39
4.1 ΠΩΣ Η ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ ΕΥΡΩΣΤΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΟΔΗΓΕΙ ΣΤΗΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΗ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗ ΤΗΣ ΤΥΧΑΙΟΤΗΤΑΣ.	39
4.2 ΕΥΡΩΣΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ (ROBUST OPTIMIZATION)	40
4.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	40
4.2.2 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ	41
4.2.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΒΕΒΑΙΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ	42
4.2.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΑΒΕΒΑΙΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΣΤΑΔΙΩΝ	43
4.3 ROME (ROBUST OPTIMIZATION MADE EASY)	45
4.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	45
4.3.2 ΠΛΑΙΣΙΟ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ROME	45
4.3.3 Το ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ R.O.M.E. (ROBUST OPTIMIZATION MADE EASY)	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	50
5.1 ΣΤΟΧΟΣ	50
5.2 Το ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ.....	51
5.2.1 ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΟ (REFERENCE) ΣΕΝΑΡΙΟ.....	51
5.2.2 ΣΕΝΑΡΙΟ ΜΕ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂ ΚΑΙ ΕΜΠΟΡΙΑ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ (EMISSIONS CAP AND TRADE)	59
5.2.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΜΕ ΦΟΡΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂	60
5.2.4 ΟΙ ΑΒΕΒΑΙΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ.....	61
5.3 Το ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΤΟΥ ROME	64
5.3.1 Τα ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΤΑ ΤΡΙΑ ΣΕΝΑΡΙΑ, ΘΕΩΡΩΝΤΑΣ ΑΒΕΒΑΙΗ ΤΗ ΖΗΤΗΣΗ	64
5.3.2 Τα ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΓΙΑ ΤΑ ΤΡΙΑ ΣΕΝΑΡΙΑ, ΘΕΩΡΩΝΤΑΣ ΑΒΕΒΑΙΗ ΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΤΟ ΡΥΘΜΟ ΜΕΙΩΣΗΣ ΤΟΥ ΕΠΕΝΔΥΤΙΚΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	67
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	70
6.1 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ‘ΦΟΡΟΛΟΓΗΣΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ’ ΚΑΙ ‘ΕΜΠΟΡΙΑ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ’	70

6.2 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΩΝ ΤΡΙΩΝ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΧΩΡΙΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ.....	71
6.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΥΠΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΑΒΕΒΑΙΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ.....	77
6.3.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗΣ ΕΛΑΧΙΣΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ.....	77
6.3.2 ΕΚΠΟΜΠΕΣ CO ₂ ΚΑΙ ΕΠΕΝΔΥΣΕΙΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΟΛΙΤΙΚΗ.....	78
6.4 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΥΠΟ ΚΑΘΕΣΤΩΣ ΑΒΕΒΑΙΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΗΣ ΠΡΟΟΔΟΥ.....	81
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	85

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Στόχος

Ο στόχος της εργασίας είναι η σύγκριση των πολιτικών “περιορισμός των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (emissions cap and trade)” και “φορολόγηση εκπομπών (CO₂ tax)”. Μια συνηθισμένη μέθοδος σύγκρισης πολιτικών είναι η ανάλυση σεναρίων, κατά την οποία καταστρώνεται ένας αριθμός σεναρίων και για κάθε σενάριο ελέγχεται ποια πολιτική είναι καταλληλότερη. Καταστρώνοντας σεσάρια όμως, αναγκάζομαστε να κάνουμε εκτιμήσεις για διάφορες μεταβλητές, συχνά σε μεγάλο χρονικό ορίζοντα. Επειδή τα αποτελέσματα μας εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από αυτές τις εκτιμήσεις, οι οποίες συνήθως απέχουν από την πραγματικότητα, η ανάλυση σεναρίων σαν μέθοδος λήψης αποφάσεων παρουσιάζει σημαντικές αδυναμίες.

Για να αντιμετωπίσουμε την αβεβαιότητα του μέλλοντος και την αδυναμία μας για ακριβείς προβλέψεις, θα προχωρήσουμε στην ανάλυση της ευρωστίας των πολιτικών “περιορισμός των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (emissions cap and trade)” και “φορολόγηση εκπομπών (CO₂ tax)”. Για την ανάλυση της ευρωστίας των δυο πολιτικών επιλέξαμε τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας και το επενδυτικό κόστος σαν παράγοντες αβεβαιότητας. Στόχος μας είναι να προσδιορίσουμε τα κατώφλια της ζήτησης και του επενδυτικού κόστους, που καθιστούν την μια πολιτική πιο αποτελεσματική από την άλλη. Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να βρούμε κάποια μεταβλητή της οποίας η τιμή θα μπορεί να δηλώνει των ανάγκη για εναλλαγή πολιτικής.

1.2 Αναζήτηση πολιτικών που μπορούν να προσαρμοστούν στη μελλοντική εξέλιξη των παραμέτρων του υπό εξέταση ενεργειακού συστήματος

Πέρα από τη συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών πολιτικών, υφίσταται η ανάγκη του προσδιορισμού των κατωφλίων των τιμών των παραμέτρων του υπό εξέταση ενεργειακού συστήματος που χωρίζουν τα σεσάρια όπου μια πολιτική έχει αποδεκτή επίδοση από αυτά όπου συμβαίνει το αντίθετο και, συνεπώς, στον προσδιορισμό της ανοχής κάθε πολιτικής στις μεταβολές του εξωτερικού περιβάλλοντος. Στη συνέχεια, μπορεί να πραγματοποιηθεί η ομαδοποίηση των διαθέσιμων εργαλείων πολιτικής σε τρία είδη συνδυασμών:

1) Συνδυασμοί εργαλείων με κοινά χαρακτηριστικά στις συνθήκες όπου παρουσιάζουν αποδεκτή επίδοση αλλά χωρίς συμπληρωματικότητα. Σε αυτούς τους συνδυασμούς **μία** πολιτική υπερτερεί πάντα έναντι των υπολοίπων (**Μη ανταγωνιστικές πολιτικές**).

2) Συνδυασμοί που παρουσιάζουν συμπληρωματικότητα μεταξύ τους και κοινά χαρακτηριστικά στις συνθήκες όπου παρουσιάζουν αποδεκτή επίδοση. Ως εκ τούτου, μπορούν να υιοθετηθούν παράλληλα / ταυτόχρονα. (**Συμπληρωματικές πολιτικές**).

3) Συνδυασμοί που αποτελούν επιλογές που θα ενεργοποιηθούν μόνο εφόσον η εξέλιξη της αβεβαιότητας υποδηλώνει ότι υπάρχει ανάγκη αντιστάθμισης. Πρόκειται πολιτικές με αρνητική συσχέτιση μεταξύ τους, ως προς τις συνθήκες όπου παρουσιάζουν αποδεκτή επίδοση (**Ανταγωνιστικές πολιτικές**).

Η σύνθεση των ανταγωνιστικών πολιτικών μεταξύ τους είναι το κλειδί για τη δημιουργία εύρωστων πολιτικών. Με δεδομένο ότι οι εύρωστες πολιτικές συμπεριλαμβάνουν εργαλεία πολιτικής που αποτελούν επιλογές που θα ενεργοποιηθούν μόνο εφόσον η εξέλιξη της αβεβαιότητας υποδηλώνει ότι υπάρχει ανάγκη αντιστάθμισης, οι εύρωστες πολιτικές πρέπει να περιλαμβάνουν, πέρα από τον κατάλληλο συνδυασμό εργαλείων, τις συνθήκες για την ενεργοποίηση ενός εργαλείου ως συνάρτηση του χρόνου λήψης της σχετικής απόφασης.

Με δεδομένο ότι οι συνθήκες εξελίσσονται μέσα στο χρόνο, το ζητούμενο είναι ο αρχικός καθορισμός ενός σημείου επανεξέτασης της επίδοσης μιας πολιτικής (π.χ. μία πενατετία μετά την υιοθέτησή της) και ο προσδιορισμός των συνθηκών υπό τις οποίες η πολιτική θα πρέπει να προσαρμοστεί.

Για την αναζήτηση πολιτικών που μπορούν να προσαρμοστούν στη μελλοντική εξέλιξη των παραμέτρων του υπό εξέταση ενεργειακού συστήματος, θα πρέπει να αξιοποιηθεί μία μέθοδος επίλυσης προβλημάτων εύρωστης βελτιστοποίησης που έχει ως είσοδο την περιγραφή της αβεβαιότητας από ένα κυρτό σύνολο τιμών και ως έξοδο τον προσδιορισμό των βέλτιστων μεταβλητών απόφασης ως συνάρτηση του σεναρίου των τιμών των παραμέτρων που πραγματικά έλαβε χώρα (κανόνες απόφασης – *decision rules*).

Προκειμένου για μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού, οι μέθοδοι του Affinely Adjustable Robust Counterpart (Ben-Tal et al., «Adjusting Robust Solutions of Uncertain Linear Programs», 2005) και των Segregated Linear Decision Rules (Goh, J. και Sim M., «Distributionally robust optimization and its tractable approximations», 2009) αποτελούν τα χρηστικότερα εργαλεία, δεδομένης της ύπαρξης έτοιμης πλατφόρμας για τη μοντελοποίηση και επίλυσή τους (ROME – Robust Optimization Made Easy).

Κεφάλαιο 2

Το Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών (European Trading System) και η Φορολογία Εκπομπών του CO₂ (CO₂ Taxation)

2.1 Περιγραφή μηχανισμών της αγοράς

Από το 2007 παρατηρείται μια προσπάθεια στην Ε.Ε. για αυξημένη προσφυγή σε μηχανισμούς της αγοράς και σταδιακή μείωση των μέσων κανονιστικού χαρακτήρα. Σε κοινοτικό επίπεδο, χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι μηχανισμών της αγοράς:

- μηχανισμοί που επενεργούν στις τιμές με αποτέλεσμα την τροποποίησή τους: πρόκειται κυρίως για **φόρους** (οι οποίοι αυξάνουν την τιμή ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας) και **χρηματοδοτικά ή φορολογικά κίνητρα** (τα οποία μειώνουν την τιμή).
- μηχανισμοί που επενεργούν στις ποσότητες, καθορίζοντας μια μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα εκπομπών (σε απόλυτους όρους ή ανά μονάδα παραγωγής), όπως είναι τα συστήματα **εμπορεύσιμων αδειών** (π.χ. το σύστημα εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου) στο πλαίσιο των οποίων καθορίζεται μια μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα εκπομπών ρύπων, η οποία κατανέμεται και αποτελεί αντικείμενο εμπορίας μεταξύ των οικονομικών φορέων σε μια αγορά που δημιουργείται για το σκοπό αυτό, ανάλογα με την ικανότητα των τελευταίων να τηρούν ή όχι το όριο εκπομπών (όποιος εκπέμπει λιγότερους ρύπους από το προβλεπόμενο μεταπωλεί τα μη χρησιμοποιηθέντα δικαιώματά του· όποιος εκπέμπει περισσότερους ρύπους από το προβλεπόμενο αγοράζει τα δικαιώματα που του λείπουν).

Οι μηχανισμοί που επενεργούν στις ποσότητες εξασφαλίζουν μεγαλύτερη βεβαιότητα και διαφάνεια σε ό,τι αφορά την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων όπως ο περιορισμός των εκπομπών. Από την πλευρά τους, οι μηχανισμοί που επενεργούν στις τιμές (π.χ. οι φόροι) παρέχουν ασφάλεια όσον αφορά το κόστος υλοποίησης αυτού του στόχου και η διαχείρισή τους είναι συνήθως ευκολότερη. Εξάλλου, οι φόροι αποτελούν πηγή εσόδων, ενώ τα συστήματα εμπορεύσιμων αδειών μπορεί να οδηγήσουν στην παραγωγή εσόδων μόνο όταν τα εκχωρούμενα δικαιώματα

δημοπρατούνται από τις δημόσιες αρχές. Σημειωτέον ότι οι δασμοί αποτελούν πληρωμή έναντι συγκεκριμένης υπηρεσίας και, κατά συνέπεια, δεν δημιουργούν έσοδα για τον δημόσιο προϋπολογισμό.

Σε σχέση με τα μέσα κανονιστικού χαρακτήρα, οι μηχανισμοί της αγοράς παρουσιάζουν τα ακόλουθα **πλεονεκτήματα**:

- ενσωματώνουν στην τελική τιμή δαπάνες που δεν είχαν συνεκτιμηθεί (ενσωμάτωση εξωτερικού κόστους)·
- προσφέρουν στις επιχειρήσεις μεγαλύτερη ευελιξία όσον αφορά την επίτευξη των στόχων περιορίζοντας έτσι το κόστος της συμμόρφωσης·
- παρέχουν στις επιχειρήσεις κίνητρα υπέρ της καινοτομίας για την περαιτέρω μείωση των αρνητικών επιπτώσεων στο περιβάλλον·
- υποστηρίζουν την απασχόληση, εφόσον χρησιμοποιηθούν στο πλαίσιο μιας περιβαλλοντικής φορολογικής μεταρρύθμισης.

2.2 Το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών (EU ETS) και η επιρροή του στις εκπομπές CO₂ και στην οικονομία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Το ευρωπαϊκό πλάνο για την εκπομπή ρύπων προβλέπει τη μείωση των αερίων θερμοκηπίου έως και 8% για την περίοδο 2008-2012. Χρονικά χωρίζεται σε δύο φάσεις:

1. 2005 έως 2007: οι περιορισμοί είναι διαπραγματεύσιμοι και αποτελεί ένα μεταβατικό στάδιο κατανομής των αδειών στους παραγωγούς.
2. φάσεις διάρκειας 5 ετών (πρώτη 5ετής φάση 2008-2012) υποχρεωτικής υπακοής στο πρωτόκολλο του Κιότο.

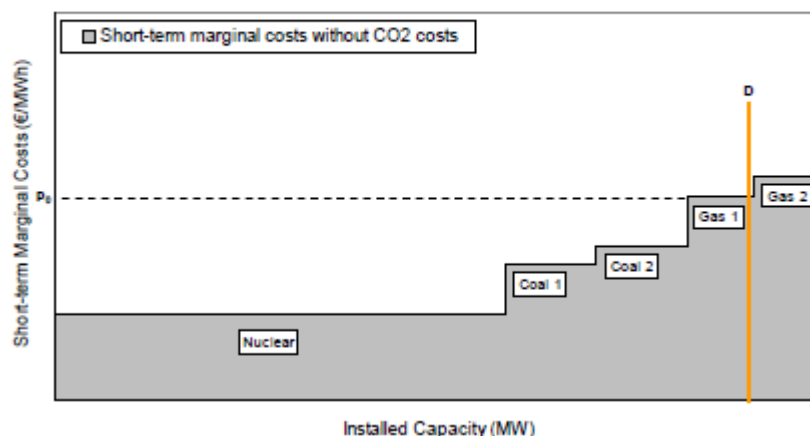
Το αμεσότερο αποτέλεσμα αυτών των περιορισμών είναι η καθιέρωση μίας τιμής για τις εκπομπές CO₂, με απώτερη συνέπεια τη μεταβολή των τιμών ηλεκτρικού ρεύματος.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση (Ε.Ε.) θα χορηγήσει άδειες εκπομπής CO₂ σε 12.000 εταιρίες ηλεκτρικού ρεύματος (υπολογίζεται ότι αντιπροσωπεύουν το 45% των εκπομπών CO₂), οι οποίες άδειες είναι εμπορεύσιμες από τις εταιρίες αυτές. Στην πρώτη χρονική φάση του πλάνου, οι άδειες αυτές καθορίζονται σύμφωνα με το ιστορικό των εκπομπών του CO₂ της κάθε ηλεκτρικής εγκατάστασης. Η επιβολή τιμολόγησης των αδειών εκπομπής CO₂ επηρεάζει την προσφορά και τη ζήτηση του ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς επίσης και το κόστος του ηλεκτρισμού. Συγκεκριμένα, κάθε παραπάνω τόνος CO₂ που εκπέμπεται, επιβαρύνει τον παραγωγό με ένα κόστος, διότι τα περιθώρια εκπομπής CO₂ περιορίζονται με βάση την παραχωρηθείσα άδεια. Αυτό το κόστος εκπομπής επιβαρύνει τον παραγωγό ακόμα και αν η άδεια για εκπομπές CO₂ του έχει παραχωρηθεί δωρεάν. Αυτό συμβαίνει επειδή η άδεια αυτή μπορεί να πωληθεί κάθε στιγμή στην αγορά οπότε μπορούμε να πούμε ότι εμφανίζει ένα «ευκαιριακό κόστος».

Οι επιρροές αυτές χωρίζονται σε πέντε μεγάλες κατηγορίες:

2.2.1 Βραχυπρόθεσμη επιρροή κόστους παραγωγής

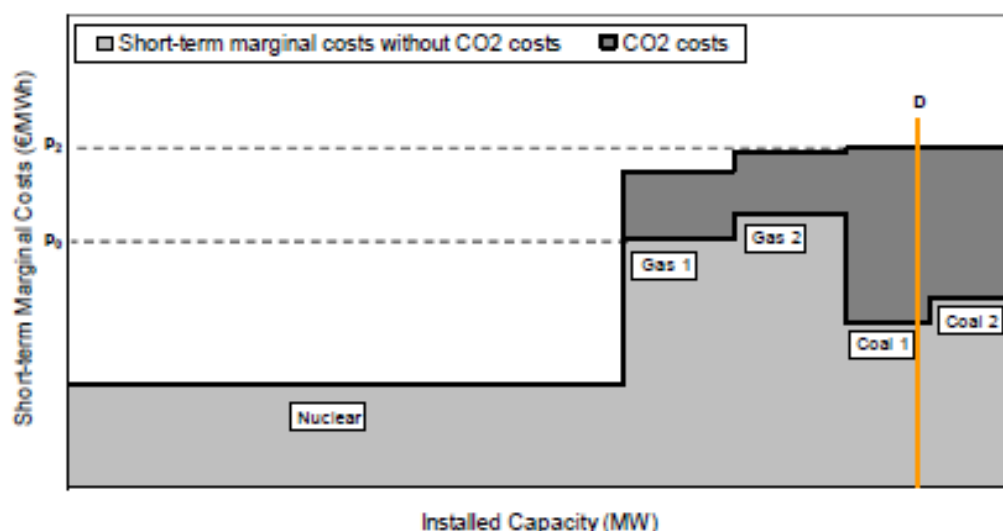
Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης πραγματοποιείται από μια σειρά αγοράς τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας (merit order), ταξινομημένων σε αύξουσα σειρά βραχυπρόθεσμου οριακού κόστους (short-term marginal cost, STMC). Ο οριακός παραγωγός είναι ο παραγωγός με το μεγαλύτερο βραχυπρόθεσμο οριακό κόστος και ταυτόχρονα αυτός ο οποίος καθορίζει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά. Η ανωτέρω προσέγγιση παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Παράδειγμα σειράς αγοράς τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας

Πηγή: Dr David Harrison, Steve Sorrell, Daniel Radov, Per Klevnas, Andrew Foss, members of NERA Consulting. *Interactions of the EU ETS with Green And White Certificate Schemes*. 17 November 2005. [14]

Εάν κοστολογηθεί η εκπομπή CO₂ το βραχυπρόθεσμο οριακό κόστος των παραγωγών που εκπέμπουν CO₂ θα αυξηθεί, οδηγώντας και σε αύξηση της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας. Η αύξηση όμως του βραχυπρόθεσμου οριακού κόστους δεν θα είναι ομοιόμορφη καθώς για κάποια καύσιμα δεν θα υπάρχει μεταβολή (πυρηνική ενέργεια, ανανεώσιμες), ενώ για τον ρυπογόνο γαιάνθρακα η αύξηση θα είναι περίπου διπλάσια σε σχέση με αυτή του αερίου. Υπολογίζεται ότι εάν η εκπομπή CO₂ κοστολογηθεί με 20€/τόνο CO₂, το βραχυπρόθεσμο οριακό κόστος (short-term marginal cost, STMC) των εγκαταστάσεων γαιάνθρακα θα υπερβεί το αντίστοιχο βραχυπρόθεσμο οριακό κόστος των εγκαταστάσεων αερίου. Στην περίπτωση αυτή είναι πολύ πιθανό να μεταβληθεί η σειρά των καυσίμων στην ενεργειακή σειρά αγοράς, οδηγώντας τεχνολογίες μειωμένων εκπομπών CO₂ σε μειωμένες τιμές βραχυπρόθεσμου οριακού κόστους και κατά συνέπεια σε πιο συχνή λειτουργία (Σχήμα 2).



Σχήμα 2: Μεταβολές στην ενεργειακή σειρά αγοράς με κοστολόγηση CO₂

Πηγή: Dr David Harrison, Steve Sorrell, Daniel Radov, Per Klevnas, Andrew Foss, members of NERA Consulting. *Interactions of the EU ETS with Green And White Certificate Schemes*. 17 November 2005. [14]

2.2.2 Βραχυπρόθεσμη επιρροή τιμής

Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση τιμής παίζουν και οι συνθήκες της αγοράς (ελευθερία, συγκέντρωση αγοράς, ενεργειακά αποθέματα, μίξη καυσίμων, μέθοδος καταμερισμού των περιορισμών της αγοράς). Κυρίαρχο πρόβλημα είναι το πόσο επηρεάζει την ενεργειακή σειρά αγοράς (merit order) η κοστολόγηση του CO₂. Αν υποθέσουμε ότι δεν θα υπάρξει μεταβολή στην ενεργειακή σειρά αγοράς, τότε η αύξηση του οριακού κόστους παραγωγής θα περάσει αυτούσια στην τιμή αγοράς του ηλεκτρισμού. Αν υποθέσουμε όμως ότι θα υπάρξει μεταβολή στην ενεργειακή σειρά αγοράς (σχήμα 2), τότε η αύξηση της τιμής θα είναι λίγο μεγαλύτερη, καθιστώντας όμως τα εργοστάσια αερίου περισσότερο συμφέροντα για τους παραγωγούς.

Για την πρώτη περίοδο (2005-2007) ο καταμερισμός θα γίνει με βάση τα ιστορικά στοιχεία για τις εκπομπές των εγκαταστάσεων. Ο μελλοντικός καταμερισμός κοστολόγησης CO₂ θα γίνει με μία διαδικασία «αναβάθμισης» των τρεχουσών συνθηκών. Προσοχή πρέπει να δοθεί στη διαδικασία «αναβάθμισης» καθώς αν ο καταμερισμός κάθε φάσης βασίζεται στις εκπομπές της προηγούμενης, αυξημένες εκπομπές CO₂ σε μια περίοδο θα δημιουργούν έμμεσα οφέλη στους παραγωγούς από τις διογκωμένες άδειες της επομένης περιόδου.

Εάν λάβουμε υπόψη όλους τους περιορισμούς για την εκπομπή CO₂ τότε είναι σαν να επανατοποθετούμε την τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος σε άλλη βάση. Προφανώς, κατά αυτόν τον τρόπο επηρεάζεται άμεσα η αγοραστική δύναμη του καθενός και η συγκέντρωση της αγοράς. Επομένως, κάποιοι παραγωγοί θα επιδιώξουν να επηρεάσουν την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, σε αντίθεση με το εάν είχαμε τέλει ανταγωνισμό. Το κατεστημένο οικοδόμημα αγοράς, λοιπόν, πλήττεται

και πλέον οι εταιρίες διαπραγματεύονται μεταξύ ισχυρών και αδύναμων πελατών. Το γεγονός αυτό καθιστά τις αδύναμες επιχειρήσεις περισσότερο ανταγωνιστικές. Συμπερασματικά, η ελεύθερη αγορά ηλεκτρικού ρεύματος στην Ε.Ε. αναιρείται, ενώ οι περιορισμοί διέπουν ενεργά τις οικονομίες των κρατών μελών και τα μακροχρόνια «ηλεκτρικά» συμβόλαια αμφισβητούνται.

2.2.3 Μακροπρόθεσμες επιρροές στη μίξη καυσίμων και στην επένδυση

Αρχικά, είναι γνωστό ότι το βραχυπρόθεσμο οριακό κόστος (STMC) καθορίζει εάν συμφέρει τον παραγωγό να δημιουργήσει μια επιπλέον μονάδα MWh ηλεκτρικής ενέργειας (σε μια υπάρχουσα μονάδα παραγωγής) για τη διαμορφωμένη ενιαία τιμή ηλεκτρικού ρεύματος. Λαμβάνοντας υπόψη το κόστος κεφαλαίου, τα κόστη συντήρησης και λειτουργίας, καθώς και άλλα σταθερά έξοδα όπως η φορολογία, διαμορφώνεται το μακροπρόθεσμο οριακό κόστος (LTMC). Με βάση αυτό οι επενδυτές παίρνουν τις αποφάσεις για επένδυση στον ενεργειακό τομέα (κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση νέων μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας). Δεδομένου ότι η κοστολόγηση του CO₂ επηρεάζει το LTMC, μπορεί να επηρεάσει τις αποφάσεις των επενδυτών για τον τύπο των ενεργειακών μονάδων που θα κατασκευάσουν. Παραδείγματος χάριν, ενώ απουσία κοστολόγησης CO₂, οι εγκαταστάσεις γαιάνθρακα θα ήταν η πιο συμφέρουσα επιλογή, παρουσία κοστολόγησης τα δεδομένα αλλάζουν και οι πυρηνικές καθώς και οι αιολικές εγκαταστάσεις εμφανίζονται ως οι ιδανικές επιλογές.

Επίσης η μακροπρόθεσμη τιμή ηλεκτρικού ρεύματος επηρεάζει τη ζήτηση, σύμφωνα με τους νόμους της αγοράς. Η κοστολόγηση του CO₂ θα οδηγήσει σε αύξηση του LTMC, η οποία μακροπρόθεσμα θα οδηγήσει σε ανάλογη μείωση της ζήτησης ηλεκτρικού ρεύματος.

Παράλληλα, οι μακροπρόθεσμες επενδύσεις απομακρύνονται πλέον από τις εγκαταστάσεις γαιάνθρακα και τη θέση τους λαμβάνουν αυτές του συνδυασμένου κύκλου αερίου (CCGT) ή οι ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις αερίου, με αποτέλεσμα να αναδύεται η ανάγκη για περισσότερες εγκαταστάσεις φυσικού αερίου.

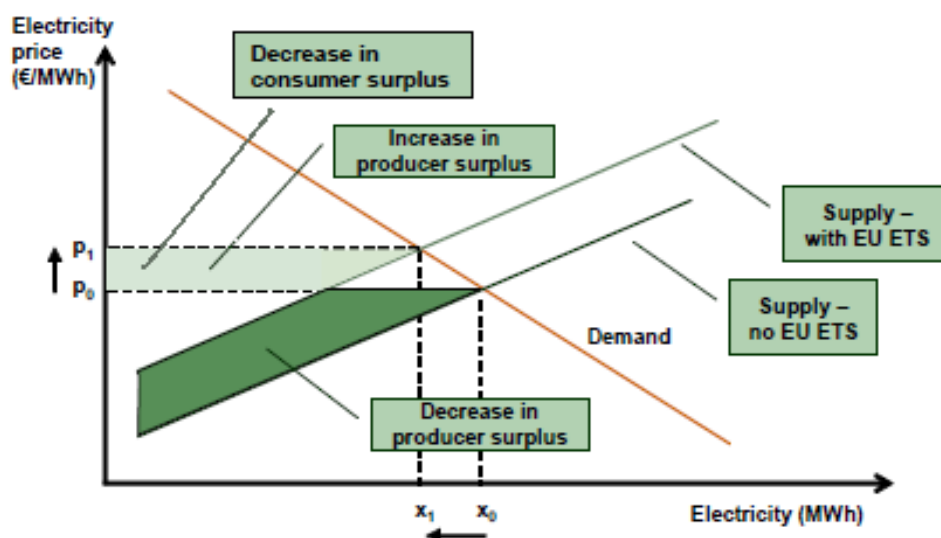
Συνοπτικά το προτεινόμενο από την Ε.Ε. πλάνο εμφανίζει τις ακόλουθες επιπτώσεις:

- i. Μείωση των συσσωρευμένων εκπομπών CO₂
- ii. Μείωση των επιζήμιων μονάδων εκπομπής CO₂
- iii. Αύξηση των τιμών χονδρικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας
- iv. Υψηλότερες τιμές λιανικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές
- v. Μείωση συσσωρευμένης ζήτησης ηλεκτρισμού
- vi. Στροφή σε άλλες μορφές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας
- vii. Καθιέρωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως πιο οικονομικά ελκυστικές
- viii. Βελτίωση των συντελεστών απόδοσης των εγκαταστάσεων, η οποία συνδυάζει χαμηλότερες εκπομπές CO₂ και περισσότερη παραγωγή ηλεκτρισμού.

2.2.4 Επιπτώσεις σε παραγωγούς και καταναλωτές

Η κοστολόγηση του CO₂ αυξάνει το βραχυπρόθεσμο οριακό κόστος παραγωγής ενέργειας για τις τεχνολογίες που εκπέμπουν CO₂, ενώ ταυτόχρονα αυξάνει και την τιμή της αγοράς για την ηλεκτρική ενέργεια. Έτσι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα πυρηνικά εργοστάσια αυξάνουν το πλεόνασμά τους, ενώ οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πυκνότητα εκπομπών CO₂ υψηλότερη από την οριακή στάθμη πρόκειται να μειώσουν τα κέρδη τους (εγκαταστάσεις γαιάνθρακα). Αντιθέτως για εγκαταστάσεις με χαμηλότερες εκπομπές CO₂ (εγκαταστάσεις αερίου) είναι πιθανό η αύξηση της τιμής να υπερβαίνει την αύξηση του κόστους παραγωγής, οδηγώντας έτσι σε αύξηση του πλεονάσματος παραγωγής.

Η αύξηση όμως της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας θα οδηγήσει μακροπρόθεσμα σε μείωση της ζήτησης, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 3. Συγκεκριμένα η αύξηση στο πλεόνασμα των παραγωγών, που απεικονίζεται με ανοικτό πράσινο χρώμα, θα ωφελήσει τους παραγωγούς με χαμηλές εκπομπές CO₂, ενώ τη μείωση του πλεονάσματος των παραγωγών (σκούρο πράσινο) θα επωμιστούν κυρίως οι παραγωγοί με υψηλές εκπομπές CO₂. Η αύξηση της τιμής ταυτόχρονα θα μειώσει και το πλεόνασμα των καταναλωτών, καθώς θα καταναλώνουν λιγότερη ενέργεια, την οποία θα πληρώνουν σε υψηλότερη από πριν τιμή.



Σχήμα 3: Μακροπρόθεσμες επιδράσεις των EU ETS στα πλεονάσματα παραγωγών και καταναλωτών, στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας

Πηγή: Dr David Harrison, Steve Sorrell, Daniel Radov, Per Klevnas, Andrew Foss, members of NERA Consulting. *Interactions of the EU ETS with Green And White Certificate Schemes*. 17 November 2005. [14]

2.2.5 Λοιπές επιπτώσεις

Το περιβάλλον κανονισμών αγοράς μεταβάλλεται για να ισορροπήσει το κόστος εκπομπής CO₂. Νέες μεθοδολογίες καταμερισμού των περιορισμών επινοούνται σε ένα περιβάλλον αγοραστικού ανταγωνισμού. Νέες τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος παρουσιάζονται ως πιο κερδοφόρες και πιο ελκυστικές τόσο για τους παραγωγούς όσο και για τους καταναλωτές.

Με βάση τις παραπάνω μικροοικονομικές όσο και μακροοικονομικές επιπτώσεις του συστήματος εμπορεύσιμων αδειών μπορούμε να συνοψίσουμε τα πλεονεκτήματα μιας τέτοιας πολιτικής:

- Ένα σύστημα εμπορεύσιμων αδειών δημιουργεί βεβαιότητα στην επίτευξη συγκεκριμένων επιπέδων εκπομπών CO₂, διαμορφώνοντας έτσι μια πιο αυστηρή και ξεκάθαρη περιβαλλοντολογική πολιτική.
- Ένα καλοσχεδιασμένο σύστημα προσφέρει μεγαλύτερη και περισσότερο μακροπρόθεσμη επενδυτική βεβαιότητα σε σχέση με την επιβολή φόρων. Έτσι μπορεί ο ιδιωτικός τομέας να προσδιορίσει την τιμή άδειας που θα του επιτρέψει να ολοκληρώσει το έργο του. Αντιθέτως, η επιβολή φορολόγησης ξεκινάει με χαμηλές τιμές λόγω πολιτικών πιέσεων αλλά η εξέλιξή τους είναι απρόβλεπτη καθώς εξαρτάται τόσο από την αποτελεσματικότητα στη μείωση των εκπομπών όσο και από οικονομικές συνθήκες.
- Με την εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος, το σύνολο των καταναλωτών ενέργειας θα ενδιαφερθεί για συμπληρωματικές πολιτικές που μειώνουν τις εκπομπές. Για παράδειγμα όλοι οι καταναλωτές θα επωφεληθούν από χαμηλότερες τιμές αν πιέσουν την κυβέρνηση να προωθήσει μέτρα ενεργειακής αποδοτικότητας για κτήρια, συσκευές και οχήματα.

2.3 Η φορολόγηση των εκπομπών του CO₂

Ο φόρος άνθρακα είναι ένας έμμεσος φόρος ο οποίος επιβάλλεται με βάση το περιεχόμενο σε άνθρακα του κάθε ορυκτού καυσίμου και για αυτόν τον λόγο εφαρμόζεται μόνο σε καύσιμα που περιέχουν άνθρακα. Ο φόρος άνθρακα, όπως υπονοεί και η ονομασία του, φορολογεί καύσιμα βάσει της περιεκτικότητάς τους σε άνθρακα. Ο στόχος είναι να γίνουν οι καθαρότερες πηγές ενέργειας λιγότερο ακριβές από αυτές που ρυπαίνουν περισσότερο το περιβάλλον, ή τουλάχιστον να μικρύνει το ουσιαστικό χάσμα τιμών που υπάρχει μεταξύ των ορυκτών καυσίμων και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι ο φόρος άνθρακα μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε φόρο CO₂ αφού ένας τόνος άνθρακα ισοδυναμεί με 3,67 τόνους CO₂.

Η φορολογία των εκπομπών του CO₂ μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα:

- Η επιβολή φόρου για το CO₂ δημιουργεί περισσότερα έσοδα για την κυβέρνηση, εκτός αν υποθέσουμε ότι τα εκχωρούμενα δικαιώματα δημοπρατούνται από τις δημόσιες αρχές.
- Πολύ πιο απλή εφαρμογή του φόρου για το CO₂ σε σχέση με ένα σύστημα εμπορεύσιμων αδειών (cap and trade scheme) καθώς μπορεί να στηριχτεί στους ήδη υπάρχοντες φοροεισπρακτικούς μηχανισμούς και αρχές. Η νομική θεσμοθέτηση και ο προσδιορισμός των όρων ενός συστήματος εμπορεύσιμων αδειών αποτελεί μια εξαιρετικά σύνθετη υπόθεση και ελλοχεύει τον κίνδυνο νομικών κενών ή ασαφειών τα οποία θα μπορούσαν να μειώσουν την αποτελεσματικότητα του μέτρου.
- Αποφεύγεται η μεγάλη ευμεταβλησία των τιμών του άνθρακα που έχει παρατηρηθεί σε άλλες εφαρμογές του συστήματος εμπορεύσιμων αδειών. (αιχμές στη διακύμανση των τιμών του NO₂ SO₂ στις Η.Π.Α. και η απότομη πτώση στην τιμή του άνθρακα στην Ε.Ε. από το 2007 και μετά)
- Ο φόρος του CO₂ μπορεί πιο εύκολα να υιοθετηθεί από πολλές κυβερνήσεις, αποτελώντας έτσι ένα παγκόσμιο μέτρο κατά των κλιματικών αλλαγών. Αντιθέτως δύσκολα μπορούμε να φανταστούμε ένα οικουμενικό σύστημα εμπορεύσιμων αδειών.
- Επιβάλλοντας φόρο εκπομπών δημιουργείται ένα απλό, ξεκάθαρο και κατανοητό οικονομικό κίνητρο για μείωση των εκπομπών, το οποίο θα οδηγήσει στην ανάγκη ανάπτυξης νέων τεχνολογιών, αλλά και βελτίωση των ήδη υπάρχουσών, με απώτερο σκοπό τη μείωση της φορολογίας. Έτσι η εφαρμογή του μπορεί να κάνει πιο ελκυστικές τις επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το φυσικό αέριο (παραγωγή ενέργειας) και σε τεχνολογίες βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας (βιομηχανία)

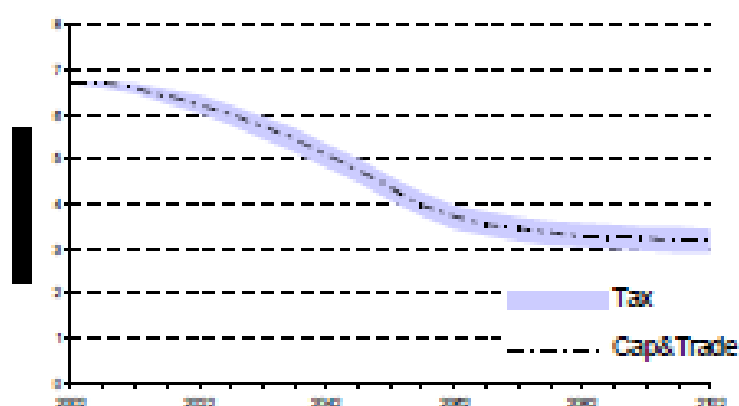
2.4 Ανάλυση ανταγωνιστικότητας των εργαλείων «carbon tax» και «cap and trade»

Τα δύο κύρια και ανταγωνιστικά εργαλεία για τη μείωση των εκπομπών CO₂ είναι η φορολόγηση του άνθρακα που εκπέμπεται (carbon tax) και η θεσμοθέτηση ενός άνω ορίου για τις εκπομπές CO₂, με παράλληλη διάθεση και δυνατότητα εμπορίας αδειών για την εκπομπή συγκεκριμένων ποσοτήτων (cap and trade). Ο carbon tax ελέγχει τις εκπομπές CO₂ ελέγχοντας το κόστος της διαδικασίας παραγωγής ή χρήσης της ενέργειας (price control), ενώ ο μηχανισμός cap and trade ελέγχει την ποσότητα των εκπομπών αυτών (quantity control).

Έχει αποδειχθεί ότι σε κατάσταση πλήρους βεβαιότητας, οι δύο μηχανισμοί (price control και quantity control) είναι ισοδύναμοι. Ωστόσο, όπως έχει καταδείξει ήδη ο Weitzman (1974) [11], η συμπεριφορά τους διαφοροποιείται όταν τα κόστη συμμόρφωσης αποτελούν παράγοντα αβεβαιότητας. Ειδικότερα, ο price control συνεπάγεται αβέβαια επίπεδα συμμόρφωσης, ενώ ο quantity control οδηγεί σε αβέβαιες τιμές των εμπορεύσιμων αδειών εκπομπής CO₂. Ας αναλύσουμε τις ακόλουθες περιπτώσεις:

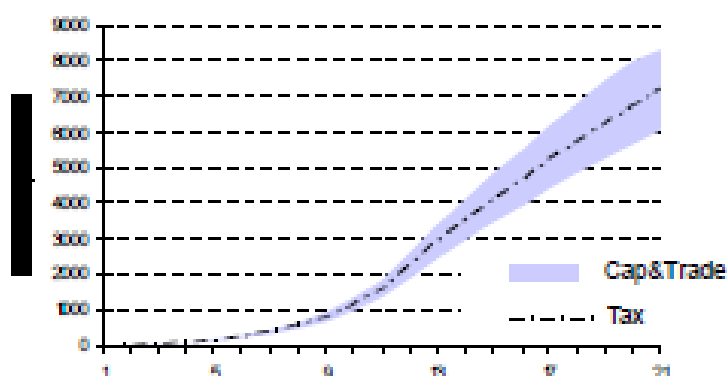
- Υποθέτουμε ότι η καμπύλη οριακού οφέλους της περιβαλλοντολογικής πολιτικής είναι πιο απότομη από την καμπύλη οριακού κόστους. Η καταστροφή αυξάνει απότομα με την αύξηση της ποσότητας του CO₂ στην ατμόσφαιρα. Σε αυτή την περίπτωση είναι επιθυμητό να είμαστε απολύτως βέβαιοι για το επίπεδο της μόλυνσης, παρά να ρισκάρουμε ευρύτερες περιβαλλοντολογικές καταστροφές.
- Ας υποθέσουμε από την άλλη ότι η καμπύλη οριακού κόστους είναι πιο απότομη από την καμπύλη οριακού οφέλους. Η καταστροφή αυξάνει αργά σε σχέση με το επίπεδο της μόλυνσης. Ένας μηχανισμός ελέγχου της ποσότητας μπορεί να αυξήσει σε πολύ υψηλά επίπεδα το οριακό κόστος εκπομπών (περιορίζοντας την ανάπτυξη) για πολύ μικρά περιβαλλοντολογικά οφέλη. Σε αυτή την περίπτωση είναι προτιμότερη η φορολόγηση των εκπομπών του CO₂.

Industrial Carbon Emissions



Σχήμα 4: Ο price control (tax) συνεπάγεται αβέβαια επίπεδα εκπομπών άνθρακα
Πηγή: Valentina Bosetti, et al. [9]

Price of Carbon



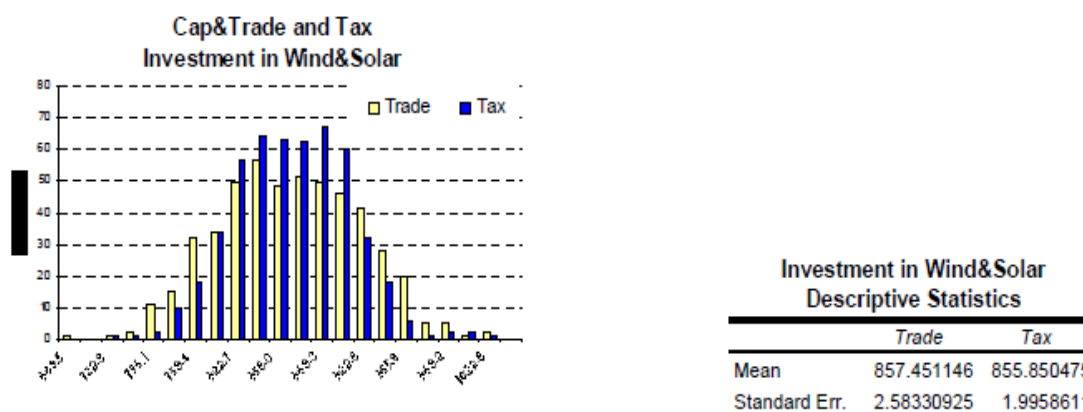
Σχήμα 5: Ο quantity control (cap&trade) οδηγεί σε αβέβαιες τιμές των εμπορεύσιμων αδειών εκπομπής CO₂
Πηγή: Valentina Bosetti, et al. [9]

Όσον αφορά τον carbon tax, περιμένει κανείς ότι η εφαρμογή του μπορεί να κάνει πιο ελκυστικές τις επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και το φυσικό αέριο (παραγωγή ενέργειας) και σε τεχνολογίες βελτίωσης της ενεργειακής

αποδοτικότητας (βιομηχανία). Ιδιαίτερα εάν ο carbon tax συνδυαστεί με επιδοτήσεις για τις προαναφερόμενες τεχνολογίες, τότε αποτελεί ένα βασικό εργαλείο διαμόρφωσης της επενδυτικής συμπεριφοράς στο βιομηχανικό τομέα και στον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Πλεονέκτημα αποτελεί επίσης ότι σε αυτή την περίπτωση ο φόρος που επιβαρύνει τις εταιρίες με υψηλά επίπεδα εκπομπής CO₂ καταλήγει στο κράτος, ενώ στην περίπτωση του μηχανισμού cap and trade τα χρήματα για την αγορά αδειών μπορεί να βγαίνουν έξω από τα σύνορα μιας χώρας.

Προκειμένου για το cap and trade, ισχύουν παρόμοια πράγματα, απλά το στοιχείο παραμετροποίησης είναι κατά βάση το επίπεδο του cap. Χαρακτηριστικό του ελέγχου των ποσοτήτων είναι ότι το οικονομικό ρίσκο το λαμβάνουν οι μονάδες παραγωγής ενέργειας, ρισκάροντας μειωμένα κέρδη από λάθος προβλέψεις των μελλοντικών τιμών των αδειών (Edenhofer et al. [7]). Αντίθετα στην περίπτωση της φορολόγησης των εκπομπών το περιβαλλοντολογικό ρίσκο το επωμίζεται η κυβέρνηση. Για περιορισμό του οικονομικού ρίσκου στο cap and trade σύστημα μπορεί κανείς να παραδεχτεί ότι οι τιμές των permits δεν θα αφεθούν ανεξέλεγκτες, αλλά θα οριστούν άνω και κάτω όρια για τις τιμές τους. Ο έλεγχος των τιμών συνεπάγεται πως η υπεύθυνες κεντρικές αρχές θα μαζεύουν από την αγορά ή θα εκδίδουν νέα permits, ανάλογα με την πορεία των τιμών τους. Σε αυτήν την περίπτωση, ο μηχανισμός δεν διαφέρει πολύ από το carbon tax (παρά μόνο σε θέματα monitoring και κατανομής των εσόδων από τα permits).

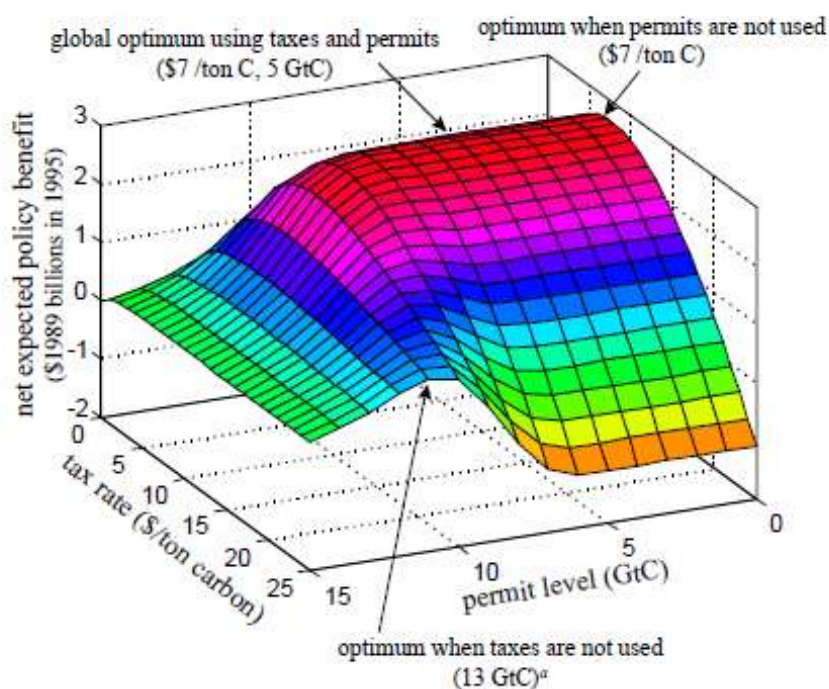
Ο παράγοντας που θα οδηγήσει σε διαφοροποίηση των πολιτικών είναι το ύψος των επενδύσεων σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τεχνολογίες μειωμένων εκπομπών (Edenhofer et al. [7]). Για τον λόγο αυτό πρέπει κατά τον σχεδιασμό των τεχνολογιών να δημιουργηθούν επιπλέον κίνητρα για επενδύσεις σε εναλλακτικές τεχνολογίες. Επιπλέον πρέπει για κάθε μέτρο να υπάρχει σαφής μακροχρόνια πολιτική (με καθορισμένη την εξέλιξη του φόρου ή του πλήθους των αδειών) ώστε να δοθεί η δυνατότητα στις εταιρίες παραγωγής ενέργειας για μακροπρόθεσμο σχεδιασμό. Με βάση την παραπάνω προσέγγιση η φορολόγηση του CO₂ είναι προτιμότερη καθώς δημιουργεί ελαφρώς υψηλότερες επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες και τεχνολογίες που χρησιμοποιούν την αιολική και την ηλιακή ενέργεια. (Bosetti et al. [9]).



Σχήμα 6: Επενδύσεις σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας συναρτήσει της αποδοτικότητας των επενδύσεων.

Πηγή: Valentina Bosetti et al. [9]

Σε δεύτερη φάση, μπορεί κανείς να προσθέσει και μια υβριδική πολιτική (συνδυασμό tax και cap and trade), σε συμφωνία με τους Roberts και Spence (1976) [12], η οποία οδηγεί σε ελαφρώς μειωμένο κόστος (0.5% του ΑΕΠ). Η φορολόγηση των εκπομπών του CO₂ μπορεί να ξεκινά πολύ χαμηλά και να αυξάνεται σε κανονικά βήματα, μέχρι ο στόχος να επιτευχθεί. Παράλληλα το σύστημα εμπορεύσιμων αδειών μπορεί να ξεκινήσει πολύ “γενναιοδωρο” αλλά σταδιακά να περιορίζει τον περιορισμό της ποσότητας μέχρι την εκπλήρωση του στόχου. Σίγουρα δεν μπορούμε να ξέρουμε ποιο από τα δύο μέτρα θα μας οδηγήσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα πρώτο αλλά από άποψη ταχύτητας και αποδοτικότητας-τόσο οικονομικά όσο και πολιτικά- έχει νόημα να κινούμαστε προς τον στόχο από δύο πλευρές, χρησιμοποιώντας περισσότερα από ένα εργαλεία. Τα οικονομικά οφέλη της ανωτέρω υβριδικής πολιτικής μελετήθηκαν από τον William A. Pizer [10] , και αποδείχτηκαν σχεδόν ισοδύναμα με απλή φορολόγηση των εκπομπών του CO₂ (Σχήμα).



Σχήμα 7: Σύγκριση υβριδικών πολιτικών για μείωση των εκπομπών του CO₂.
Πηγή: William A. Pizer. *Prices vs. Quantities Revisited: The Case of Climate Change* [10]

Κεφάλαιο 3

Ενεργειακά Μοντέλα

3.1 Κατηγορίες Ενεργειακών Μοντέλων

Αρκετά μοντέλα που αφορούν στρατηγικό σχεδιασμό και χάραξη πολιτικών στον ενεργειακό τομέα έχουν αναπτυχθεί τις τελευταίες δεκαετίες και έχουν συζητηθεί στην βιβλιογραφία. Τα περισσότερα μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για σχεδιασμό βάση σεναρίου, όπως στην περίπτωση του μοντέλου που αναπτύξαμε στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας.

Τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό βάση σεναρίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση διαφορετικά κριτήρια. Η πρώτη κατηγοριοποίηση είναι ανάμεσα σε μοντέλα *βελτιστοποίησης* και *προσομοίωσης*. Τα μοντέλα βελτιστοποίησης καλύπτουν μια δοσμένη ζήτηση ενέργειας μέσα από συνδυασμούς πηγών ενέργειας έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος ή οι εκπομπές CO₂ για παράδειγμα. Τα μοντέλα προσομοίωσης δεν προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν κάποια παράμετρο, παρόλο που αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να εμπεριέχονται σε αυτά. Αντιθέτως επιτρέπουν στους σχεδιαστές να δοκιμάσουν την ευρωστία μιας πολιτικής ή στρατηγικής, δοσμένων κάποιων προκαθορισμένων συνθηκών. Τέτοιες εύρωστες πολιτικές ή στρατηγικές μπορεί να μην είναι ιδανικές. Όμως για μακροπρόθεσμο σχεδιασμό βάση σεναρίων, όπου η αντιμετώπιση της αβεβαιότητας είναι το κύριο ζητούμενο, τα μοντέλα προσομοίωσης είναι καταλληλότερα γιατί οδηγούν σε μια εύρωστη (robust) πολιτική, δηλαδή μια πολιτική που δουλεύει καλά τις περισσότερες φορές.

Τα πιο γνωστά μοντέλα βελτιστοποίησης είναι το MARKAL και το TIMES, τα οποία δημιουργούν τεχνο-οικονομικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να παράγουν σενάρια για την ανάλυση του μέλλοντος σε ένα συγκεκριμένο ενεργειακό τομέα ή ολόκληρο τον ενεργειακό τομέα. Κάθε σενάριο αποτελείται από αρκετά στοιχεία: καμπύλες ζήτησης και προσφοράς, υποθέσεις για τις πολιτικές και γενικά οικονομικά, διαθεσιμότητα τεχνολογιών, αποθέματα. Μια σειρά εκτελέσεων ενός μοντέλου MARKAL εξετάζει ένα σύνολο διαφορετικών πιθανών χαρακτηριστικών της ζήτησης ενέργειας, από τα οποία θα βρει τον λιγότερο ακριβό συνδυασμό για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Τα μοντέλα προσομοίωσης μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε *Ντετερμινιστικά* ή *Στοχαστικά Μοντέλα Προσομοίωσης*: Αν ένα μοντέλο προσομοίωσης δεν

περιλαμβάνει πιθανολογικά (δηλαδή "τυχαία") τμήματα, ονομάζεται ντετερμινιστικό. Στα ντετερμινιστικά μοντέλα, η έξοδος είναι καθορισμένη, με δεδομένο το σύνολο των ποσοτήτων και σχέσεων εισόδου του μοντέλου. Όμως, πολλά συστήματα πρέπει να χρησιμοποιήσουν στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης, δηλαδή μοντέλα που θα έχουν τουλάχιστον ορισμένα τμήματα με "τυχαία" είσοδο.

Τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν πειραματική μέθοδο που έχει σαν σκοπό τη βελτιστοποίηση ενός συστήματος, τη μελέτη της λειτουργίας του και την ανάλυση της ευαισθησίας του. Μπορεί να αποτελεί την μόνη προσέγγιση για την επίλυση κάποιων προβλημάτων. Μερικά πλεονεκτήματα των μοντέλων προσομοίωσης είναι τα ακόλουθα:

- Μπορεί να κοστίζει λιγότερο
- Παρουσιάζει μεγαλύτερη ευαισθησία στην αντίληψη των σχέσεων μεταξύ των προβλημάτων
- Είναι ασφαλής μέθοδος
- Δίνει τη δυνατότητα επανάληψης του ίδιου φαινομένου
- Δίνει τη δυνατότητα πλήρους ενόρασης του συστήματος που εξετάζεται από όλες τις πλευρές

Ανεξάρτητα από το αν ένα ενεργειακό μοντέλο που βοηθάει στον στρατηγικό σχεδιασμό βάση σεναρίου αποτελεί μοντέλο βελτιστοποίησης ή μοντέλο προσομοίωσης (ντετερμινιστικό ή στοχαστικό), παρουσιάζει κάποια κοινά χαρακτηριστικά όπως οι είσοδοι, οι έξοδοι, η δομή του, η οικονομική λογική, η αντικειμενική συνάρτησης και οι περιορισμοί πάνω στα οποία βασίζεται. Η ανάλυση των ανωτέρω στοιχείων πραγματοποιείται παρακάτω.

3.2 Στοιχεία ενός τυπικού οικονομικού – ενεργειακού μοντέλου

3.2.1. Είσοδοι

Η είσοδος κάθε μοντέλου αντιστοιχεί σε ένα σενάριο, δηλαδή σε ένα σύνολο συνεπών υποθέσεων (coherent assumptions) για τη μελλοντική εξέλιξη των παραμέτρων του υπό εξέταση ενεργειακού συστήματος. Ένα πλήρες σενάριο αποτελείται από τέσσερις τύπους δεδομένων:

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

Ειδικότερα:

Ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών

Η δημιουργία του σεναρίου ζήτησης αναφοράς (reference demand scenario) απαιτεί τον προσδιορισμό της ζήτησης των ενεργειακών υπηρεσιών τελικής χρήσης (end-use energy service demands), όπως είναι η ζήτηση ενέργειας για μεταφορές, για φωτισμό κατοικημένων περιοχών, για παραγωγή χάλυβα κτλ., κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα στον οποίο το σενάριο θα λειτουργήσει. Η ζήτηση παρέχεται από το χρήστη μόνο για το σενάριο αναφοράς. Όταν το μοντέλο οργανώνεται για εναλλακτικά σενάρια, όπως για παράδειγμα για μια περίπτωση περιορισμού της εκπομπής αερίων ρύπων ή για ένα σύνολο εναλλακτικών τεχνολογικών υποθέσεων, είναι δυνατό η ζήτηση να επηρεαστεί.

Κάθε μοντέλο έχει την ικανότητα του υπολογισμού της μεταβολής της ζήτησης ως προς τους μεταβαλλόμενους όρους ενός εναλλακτικού σεναρίου. Για να γίνει αυτό, το μοντέλο απαιτεί ακόμη ένα σύνολο μεταβλητών εισόδου που είναι οι ελαστικότητες τιμής - ζήτησης (elasticities of the demands to their own prices). Στην πραγματικότητα, κάθε μοντέλο οδηγείται όχι από τη ζήτηση αλλά από καμπύλες ζήτησης σε σχέση με την τιμή της ενέργειας (demand curves).

Διαθεσιμότητα πόρων

Το δεύτερο συστατικό ενός σεναρίου είναι ένα σύνολο καμπύλων προσφοράς (supply curves) για την πρωτογενή ενέργεια και τους υλικούς πόρους. Οι πολλών βαθμίδων καμπύλες προσφοράς (multi-stepped supply curves) προκύπτουν ώστε κάθε βαθμίδα να αναπαριστά ένα ορισμένο δυναμικό (potential) του διαθέσιμου πόρου ως προς το κόστος αυτού. Επιπλέον, η διαθεσιμότητα πόρων περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των εμπορικών συναλλαγών.

Πολιτική που έχει τεθεί

Στο μέτρο που μια πολιτική επηρεάζει το ενεργειακό σύστημα, μπορεί να αποτελέσει 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 σενάρια εναλλακτικών πολιτικών (alternate policy scenarios) μπορεί να επιβάλουν περιορισμούς εκπομπών ή φόρους

εκπομπής. Η λεπτομερής αποτύπωση των διαθέσιμων τεχνολογιών στα ενεργειακά μοντέλα επιτρέπει την προσομοίωση μιας ευρείας ποικιλίας τόσο στοχευμένων μέτρων (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 όπως είναι ο γενικός φόρος άνθρακα (general carbon tax) ή το σύστημα εμπορικών συναλλαγών δικαιωμάτων εκπομπών αερίου. Απλούστερα παραδείγματα πολιτικής αποτελούν ο περιορισμός της μελλοντικής επέκτασης των πυρηνικών εγκαταστάσεων, η επιβολή φόρων στα καύσιμα ή η χορήγηση βιομηχανικών επιχορηγήσεων.

Περιγραφές ενός συνόλου τεχνολογιών

Το τέταρτο και τελευταίο συστατικό ενός σεναρίου είναι το σύνολο των τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη για το μετασχηματισμό των αρχικών πόρων σε ενεργειακές υπηρεσίες. Οι σχετικές τεχνοοικονομικές παράμετροι περιγράφονται με τη μορφή τεχνολογιών που μετασχηματίζουν μερικά προϊόντα σε άλλα (καύσιμα, υλικά, ενεργειακές υπηρεσίες, εκπομπές). Μερικές τεχνολογίες μπορούν να επιβληθούν ενώ άλλες μπορούν απλά να είναι διαθέσιμες στους επενδυτές και καταναλωτές ενέργειας.

3.2.2 Έξοδοι

Χρησιμοποιώντας τα προαναφερόμενα, 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 του εξοπλισμού (equipment operation), την προσφορά ενέργειας και το ενεργειακό εμπόριο (energy trade).

Ειδικότερα, για κάθε δεδομένο σενάριο, η λύση του γραμμικού προγράμματος του μοντέλου, για κάθε χρονική περίοδο και σε κάθε περιοχή, προσδιορίζει:

- Το σύνολο των 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.
- Τις παραγόμενες ροές (ηλεκτρισμού και μη) από κάθε τεχνολογία.

- Τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κάθε ουσίας από κάθε τεχνολογία, κάθε τομέα και σύνολο.

3.2.3 Δομή

Η δομή ενός μοντέλου καθορίζεται από τις εξισώσεις και τις μεταβλητές, που με τη σειρά τους καθορίζονται από τα δεδομένα που παρέχονται από το χρήστη. Η βάση δεδομένων του μοντέλου περιέχει τόσο ποιοτικά (qualitative data) όσο και ποσοτικά στοιχεία (quantitative data).

Τα ποιοτικά δεδομένα περιλαμβάνουν για παράδειγμα τους καταλόγους πηγών 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 εκπομπές αερίων που πρόκειται να υπολογιστούν. Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε υποομάδες. Παραδείγματος χάριν, οι πηγές ενέργειας μπορούν να χωριστούν σύμφωνα με τον τύπο τους σε ορυκτά καύσιμα, πυρηνική ενέργεια, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, κ.λπ.

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.

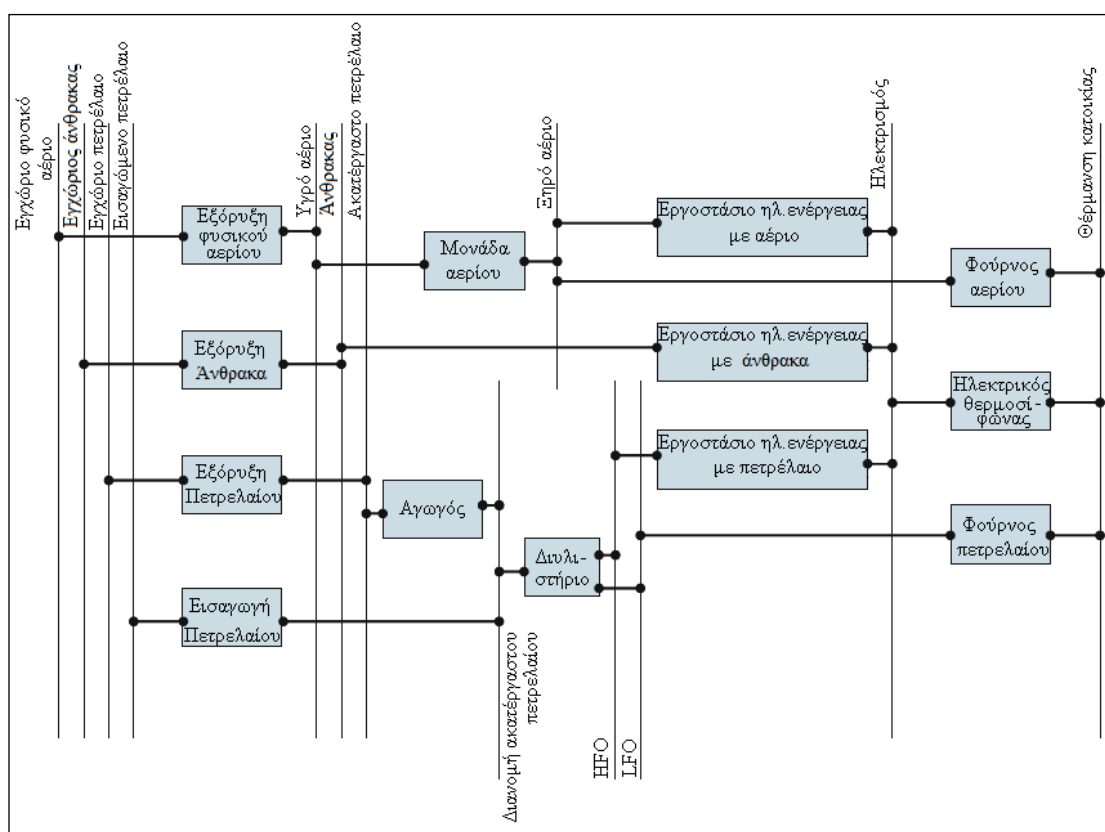
3.2.3.1 Η θεώρηση RES

Κάθε μοντέλο περιλαμβάνει τρεις τύπους οντοτήτων:

- Οι τεχνολογίες, επίσης αποκαλούμενες και 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 που παράγονται 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 συνδεδεμένη 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.

Κατά παράδοση, οι σχέσεις μεταξύ των οντοτήτων απεικονίζονται σε ένα διάγραμμα δικτύου (network diagram) το οποίο καλείται και Ενεργειακό Σύστημα Αναφοράς (Reference Energy System ή RES). 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 ακόλουθο σχήμα απεικονίζεται ένα μικρό κομμάτι ενός υποθετικού RES που περιέχει μια ενιαία ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών, όπως είναι στην περίπτωση αυτή θέρμανση για κατοικίες



Σχήμα 1 – Παράδειγμα RES

Πηγή: Richard Loulou, Maryse Labriet. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model, 24 February 2007. [13]

3.2.3.2 Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις διαδικασίες

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

- Τεχνικές παράμετροι. Οι τεχνικές παράμετροι περιλαμβάνουν την αποδοτικότητα (efficiency), τον παράγοντα διαθεσιμότητας (availability factor), τις καταναλώσεις προϊόντων ανά μονάδα δραστηριότητας, την λειτουργική διάρκεια ζωής μιας διαδικασίας, τη χρονική διάρκεια κατασκευής, τη χρονική διάρκεια αποσυναρμολόγησης (dismantling lead-time).
- Οικονομικές και πολιτικές παράμετροι. Οι οικονομικές και πολιτικές παράμετροι περιλαμβάνουν τις δαπάνες που συνδέονται με την επένδυση, την αποσυναρμολόγηση, τη συντήρηση και τη λειτουργία μιας διαδικασίας. Επιπλέον, περιλαμβάνονται οι φόροι και οι επιχορηγήσεις, καθώς και 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.
- Άνω και κάτω όρια. Τα άνω και κάτω όρια μπορούν να επιβληθούν στην επένδυση, στην ικανότητα και στη δραστηριότητα μιας διαδικασίας.

3.2.3.3 Οι παράμετροι που σχετίζονται με τα προϊόντα

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

- Τεχνικές παράμετροι. Αυτές είναι η γενική αποδοτικότητα (παραδείγματος χάριν αποδοτικότητα δικτύου μεταφοράς) και οι ετήσιες καμπύλες ζήτησης και φορτίων.
- Οικονομικές παράμετροι. Οι οικονομικές παράμετροι περιλαμβάνουν 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 ζήτηση και ο αριθμός των βημάτων (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.

3.2.3.4 Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις ροές προϊόντων

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 ροές που εξάγονται, που είναι διαφορετικών τύπων μεταξύ τους (καύσιμα, υλικά, ζήτηση ή εκπομπές).

- Οι τεχνικές παράμετροι επιτρέπουν τον πλήρη έλεγχο του μέγιστου ή/και ελάχιστου μεριδίου μιας δεδομένης εισαγωγής ή της ροής παραγωγής που μπορεί να ληφθεί στην ίδια ομάδα προϊόντων. Παραδείγματος χάριν, μια ευέλικτη τουρμπίνα μπορεί να δεχτεί πετρέλαιο ή φυσικό 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.
- Οι οικονομικές παράμετροι περιλαμβάνουν φόρους, επιχορηγήσεις και άλλες δαπάνες που συνδέονται με μια μεμονωμένη ροή διαδικασίας.

3.2.4 Η οικονομική λογική των μοντέλων μερικής ισορροπίας

Όλα τα μοντέλα μερικής ισορροπίας (partial equilibrium models) έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό γνώρισμα: την ταυτόχρονη διαμόρφωση της παραγωγής, της κατανάλωσης προϊόντων και των τιμών τους. Τέτοια προϊόντα είναι τα καύσιμα και οι υπηρεσίες ενέργειας. Η τιμή της παραγωγής προϊόντων έχει επιπτώσεις στη ζήτηση των προϊόντων, ενώ συγχρόνως η ζήτηση έχει επιπτώσεις στην τιμή τους. Μια αγορά λέγεται ότι βρίσκεται σε ισορροπία (equilibrium) όταν οι τιμές p^* και οι ποσότητες

q^* είναι τέτοιες ώστε κανένας καταναλωτής 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.

Η ισορροπία χαρακτηρίζεται από τρεις θεμελιώδεις ιδιότητες που είναι: 1) η γραμμικότητα (linearity), 2) η μεγιστοποίηση του πλεονάσματος (maximization of surplus) και 3) η ανταγωνιστικότητα των αγορών ενέργειας (competitiveness of energy markets). Αυτές οι ιδιότητες οδηγούν σε δύο πρόσθετα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που είναι η τιμολόγηση βάσει οριακού κόστους (marginal cost pricing) και η ιδιωτική συμπεριφορά μεγιστοποίησης κέρδους.

3.2.4.1 Γραμμικότητα

Σε μια πραγματική οικονομία, μια δεδομένη τεχνολογία είναι συνήθως διαθέσιμη σε διακριτά μεγέθη, παρά σε συνεχή (παραδείγματος χάριν εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας ή ένα υδροηλεκτρικό πρόγραμμα). Το γεγονός ότι οι εξισώσεις των μοντέλων είναι γραμμικές, δεν σημαίνει ότι οι λειτουργίες παραγωγής συμπεριφέρονται γραμμικά. Στην πράξη, οι καμπύλες παραγωγής είναι συνήθως ιδιαίτερα μη γραμμικές (αλλά κυρτές), αντιπροσωπεύοντας τις μη γραμμικές καμπύλες ως βαθμωτή ακολουθία γραμμικών καμπύλων (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).

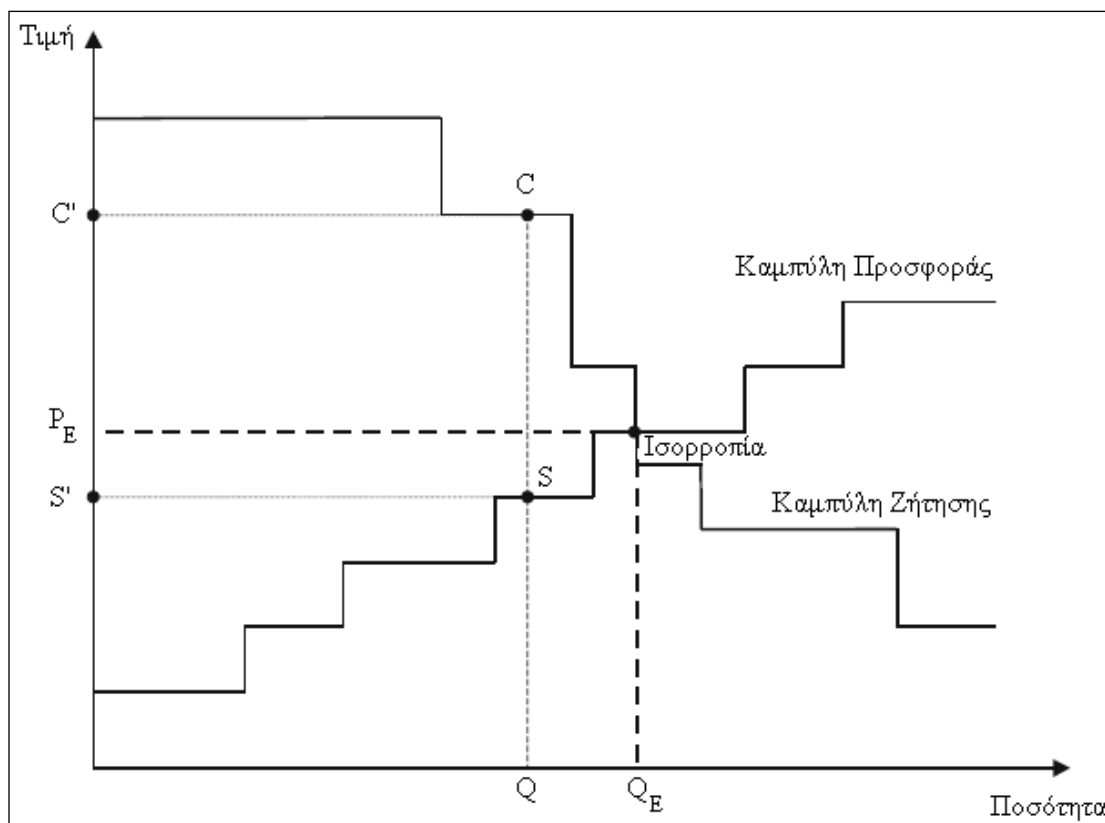
3.2.4.2 Η Μεγιστοποίηση του Πλεονάσματος

Το συνολικό πλεόνασμα μιας οικονομίας είναι το άθροισμα των πλεονασμάτων των προμηθευτών και των καταναλωτών. Οι προμηθευτές προϊόντων είναι τεχνολογίες που προμηθεύουν προϊόντα και οι καταναλωτές προϊόντων είναι τεχνολογίες ή ζήτηση υπηρεσιών 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 μια καμπύλη προσφοράς (supply curve), σχεδιάζοντας το οριακό κόστος παραγωγής των προϊόντων (marginal production cost) ως συνάρτηση της παρεχόμενης ποσότητας. Η καμπύλη προσφοράς προϊόντων δεν διευκρινίζεται ρητά, αλλά παράγεται ενδογενώς από το ίδιο το μοντέλο.

Ένα αποτέλεσμα της θεωρίας γραμμικού προγραμματισμού είναι ότι η αντίστροφη καμπύλη προσφοράς είναι βηματική. Κάθε οριζόντιο βήμα της αντίστροφης καμπύλης προσφοράς δείχνει ότι τα προϊόντα παράγονται από ένα ορισμένο σύνολο τεχνολογιών. Δεδομένου ότι οι παραχθείσες ποσότητες αυξάνονται, ένας ή περισσότεροι πόροι του συνόλου των πόρων εξαντλούνται, και επομένως το σύστημα πρέπει να καταφύγει σε ένα διαφορετικό σύνολο τεχνολογιών. Κατά συνέπεια, κάθε αλλαγή στο σύνολο της παραγωγής δημιουργεί ένα βήμα στην καμπύλη παραγωγής, κόστους υψηλότερου από αυτό του προηγούμενου βήματος.

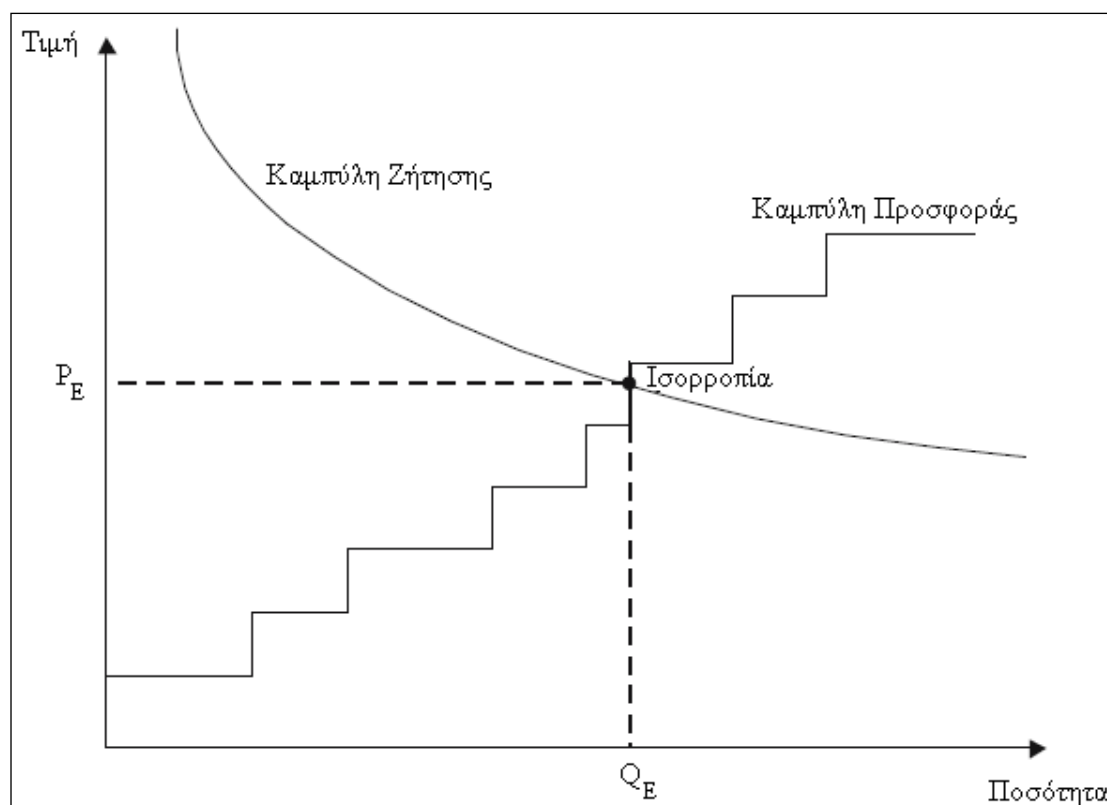
Κατά τρόπο συμμετρικό, ένα μοντέλο καθορίζει μια σειρά καμπύλων ζήτησης (demand curves). Για τη ζήτηση, μπορεί να γίνει η διάκριση μεταξύ δύο περιπτώσεων. Εάν η παραγωγή και η κατανάλωση ενός προϊόντος είναι ενδογενής του μοντέλου, τότε η καμπύλη ζήτησης κατασκευάζεται ενδογενώς ως μια ελαττούμενη βηματικά συνάρτηση της ποσότητας που απαιτείται (Σχήμα 2).



Σχήμα 2 - Ισορροπία στην περίπτωση ενεργειακής μορφής όταν το μοντέλο ενδογενώς κατασκευάζει τόσο την καμπύλη προσφοράς όσο και την καμπύλη ζήτησης

Πηγή: Richard Loulou, Maryse Labriet. *ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model*, 24 February 2007. [13]

Εάν το προϊόν είναι ζήτηση για μια ενεργειακή υπηρεσία, τότε η καμπύλη ζήτησης καθορίζεται εξογενώς από το χρήστη μέσω της ελαστικότητας τιμής-ζήτησης. Η καμπύλη ζήτησης είναι σε αυτήν την περίπτωση μια ομαλά μειούμενη καμπύλη όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 3).



Σχήμα 3 - Ισορροπία στην περίπτωση ενεργειακής υπηρεσίας όπου ο χρήστης ρητά παρέχει την καμπύλη ζήτησης

Πηγή: Richard Loulou, Maryse Labriet. *ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model*, 24 February 2007. [13]

Η ισορροπία προσφοράς-ζήτησης βρίσκεται 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 . Η ισορροπία αφορά σε πολλά προϊόντα και, ως εκ τούτου, είναι ένα πολυδιάστατο ανάλογο των προαναφερόμενων, όπου Q_E και το P_E είναι διανύσματα και όχι βαθμωτά μεγέθη.

Χρησιμοποιώντας το Σχήμα 3, 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 ορίζει την 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 και καταναλωτών) είναι η περιοχή που αποτελείται μεταξύ των δύο αντίστροφων καμπύλων στα αριστερά του Q . Όπως φαίνεται από το Σχήμα 3, το συνολικό πλεόνασμα μεγιστοποιείται ακριβώς όταν το Q είναι ίσο με την ποσότητα ισορροπίας Q_E . Επομένως, η ισορροπία προσφοράς-ζήτησης επιτυγχάνεται όταν το συνολικό πλεόνασμα μεγιστοποιείται.

3.2.4.3 Ανταγωνιστικές Αγορές Ενέργειας

Η υπόθεση των ανταγωνιστικών αγορών συνεπάγεται ότι η τιμή αγοράς των προϊόντων είναι ίση με το οριακό κόστος παραγωγής τους, κάτι το οποίο αποτελεί τυποποιημένο αποτέλεσμα της μικροοικονομικής θεωρίας. Μια ενδιαφέρουσα ιδιότητα μπορεί να προκύψει από τις υποθέσεις της ανταγωνιστικότητας: Ενώ ο δεδηλωμένος στόχος του μοντέλου είναι να μεγιστοποιηθεί το συνολικό πλεόνασμα, αυτό έχει αποτέλεσμα κάθε οικονομικός φορέας στο μοντέλο να προσπαθεί να μεγιστοποιεί το δικό του ιδιωτικό κέρδος. Αυτή η ιδιότητα είναι συγγενής με την ιδιότητα των «αοράτων χεριών» (invisible hand) των ανταγωνιστικών αγορών. Ως αποτέλεσμα, η λογική του μοντέλου μπορεί να μετατοπιστεί από ένα παγκόσμιο, κοινωνικό μοντέλο (μεγιστοποίηση πλεονάσματος) σε ένα τοπικό, αποκεντρωμένο μοντέλο (μεμονωμένη μεγιστοποίηση χρησιμότητας). Αυτή η ισοδυναμία ισχύει μόνο στο μέτρο που ούτε μεμονωμένοι παραγωγοί ούτε μεμονωμένοι καταναλωτές έχουν αγοραστική δύναμη.

3.2.5 Αντικειμενική Συνάρτηση: Συνολικό Προεξοφλημένο Κόστος Συστημάτων

Ο στόχος της μεγιστοποίησης του πλεονάσματος (surplus maximization objective) μετασχηματίζεται σε έναν ισοδύναμο στόχο ελαχιστοποίησης δαπανών (cost minimization) με τη λήψη τον αρνητικού του πλεονάσματος και τον ορισμό αυτού ως συνολικού κόστους του ενεργειακού συστήματος (total system cost). Στόχος του μοντέλου είναι επομένως να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος του συστήματος. Όλα τα στοιχεία δαπανών είναι προεξοφλημένα (discounted) σε ένα επιλεγμένο έτος.

Γενικά, 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) 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.
- 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.

3.2.6 Περιορισμοί

Ελαχιστοποιώντας το συνολικό προεξοφλημένο κόστος, το μοντέλο πρέπει να ικανοποιήσει έναν 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. Στη συνέχεια απαριθμούνται και παρουσιάζονται εν συντομία οι κύριοι τύποι περιορισμών.

3.2.6.1 Συντήρηση των Επενδύσεων

Η επένδυση σε μια ιδιαίτερη τεχνολογία αυξάνει την εγκατεστημένη δυναμικότητά της (installed capacity) κατά τη διάρκεια της φυσικής ζωής της τεχνολογίας. Στο τέλος της φυσικής ζωής, η συνολική δυναμικότητα για αυτήν την τεχνολογία μειώνεται κατά το ίδιο ποσό. Κατά τον υπολογισμό της διαθέσιμης δυναμικότητας σε κάποιο χρονικό διάστημα, το μοντέλο λαμβάνει υπόψη όλες τις επενδύσεις 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), καθώς και άλλες που έχουν αποφασιστεί από το μοντέλο στην ή μετά από την αρχική περίοδο μέχρι και την εν λόγω περίοδο.

Η συνολική διαθέσιμη δυναμικότητα (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 αρχική δυναμικότητα (σε ισχύ πριν από την έναρξη του ορίζοντα μοντελοποίησης) που είναι ακόμα διαθέσιμη.

3.2.6.2 Χρήση της δυναμικότητας

Σε κάθε χρονική περίοδο το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιήσει μέρος ή το σύνολο της εγκατεστημένης δυναμικότητας σύμφωνα με τον παράγοντα διαθεσιμότητας της τεχνολογίας (availability factor). Ας σημειωθεί ότι το μοντέλο μπορεί να αποφασίσει να χρησιμοποιήσει λιγότερη από τη διαθέσιμη δυναμικότητα κατά τη διάρκεια μιας ή περισσότερων περιόδων, εάν μια τέτοια απόφαση συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του γενικού κόστους.

Για κάθε τεχνολογία p και περίοδο t , η δραστηριότητα της τεχνολογίας δεν μπορεί να υπερβεί τη διαθέσιμη δυναμικότητά της.

3.2.6.3 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.

3.2.6.4 Καθορισμός των σχέσεων ροής σε μια διαδικασία

Μια διαδικασία με μια ή περισσότερες 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).

3.2.6.5 Περιορισμοί στα προϊόντα

Είναι δυνατό να επιβληθούν συσσωρευτικά όρια (cumulative bounds) στα προϊόντα κατά τη διάρκεια περισσότερων από μιας περιόδου, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα χρήσιμο στην περίπτωση οριοθέτησης 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 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.

3.2.6.6 Περιορισμοί χρήστη

Εκτός από τους τυποποιημένους περιορισμούς, ο χρήστης μπορεί να εισάγει πρόσθετους περιορισμούς για να εκφράσει ειδικούς όρους. Παραδείγματος χάριν, μπορεί να υπάρξει περιορισμός στην 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.

Κεφάλαιο 4

Εύρωστη Βελτιστοποίηση και το προγραμματιστικό περιβάλλον του R.O.M.E.

4.1 Πως η αναζήτηση εύρωστων πολιτικών οδηγεί στην αποτελεσματική αντιμετώπιση της τυχαιότητας.

Μία ερμηνεία της τυχαιότητας είναι ότι επειδή έχουμε ατελείς (ή ελλιπείς) πληροφορίες, τα συστήματα μπορεί να φαίνονται ότι συμπεριφέρονται τυχαία. Η βάση του συλλογισμού αυτού είναι ότι αν γνωρίζαμε όλους τους νόμους της φύσης και είχαμε μια πλήρη περιγραφή του σύμπαντος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή, θεωρητικά θα μπορούσαμε να προβλέψουμε κάθε λεπτομέρεια της έκτοτε εξέλιξής του με βεβαιότητα. Μια δεύτερη ερμηνεία της τυχαιότητας είναι ότι το σύμπαν πράγματι συμπεριφέρεται τυχαία. Με άλλα λόγια, έχοντας μια πλήρη περιγραφή του σύμπαντος και των νόμων της φυσικής δεν είναι αρκετά για να προβλέψουμε το μέλλον. Στην καλύτερη περίπτωση, αυτά μπορούν να παράσχουν στατιστικές εκτιμήτριες του τι πρόκειται να συμβεί. Ακόμα, οι ίδιες αρχικές συνθήκες μπορεί να μην οδηγήσουν σε ίδιες μελλοντικές καταστάσεις.

Πάντως, ανεξάρτητα από το αν η τυχαιότητα είναι εγγενής ή οφείλεται στην έλλειψη πληροφοριών, οι συνέπειες είναι οι ίδιες: πολλές όψεις της ζωής, συμπεριλαμβανόμενης της άσκησης πολιτικής, είναι απρόβλεπτες. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε να είμαστε ποτέ σίγουροι για τα αποτελέσματα των πολιτικών εργαλείων που θα χρησιμοποιήσουμε. Πράγματι, ξεκινώντας με τις ίδιες συνθήκες και χρησιμοποιώντας το ίδιο πολιτικό εργαλείο σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές μπορεί να οδηγήσει σε διαφορετικά αποτελέσματα. Αυτό δεν σημαίνει ότι πρέπει να παραιτηθούμε από το σχεδιασμό στρατηγικών, αλλά ότι το κύριο μέλημά μας πρέπει να είναι η αναζήτηση εύρωστων πολιτικών για την αποτελεσματική αντιμετώπιση της τυχαιότητας.

Μία εύρωστη (robust) πολιτική είναι μια πολιτική που δουλεύει καλά τις περισσότερες φορές. Αυτό διαφέρει από την βέλτιστη πολιτική που είναι η καλύτερη δυνατή πολιτική για μια συγκεκριμένη ομάδα συνθηκών. Ένα ισχυρό εργαλείο που μπορεί να έχει μια ομάδα λήψης αποφάσεων, είναι ένα εργαλείο προσομοίωσης της πραγματικότητας, με το οποίο να μπορέσει να προσεγγίσει τα αποτελέσματα των διαφόρων εργαλείων πολιτικής, ακόμα και για διαφορετικά σενάρια.

4.2 Εύρωστη Βελτιστοποίηση (Robust optimization)

4.2.1 Εισαγωγή

Η εύρωστη βελτιστοποίηση έχει χρησιμοποιηθεί για να προστατέψει τα προβλήματα βελτιστοποίησης από την δυσκολία που προκαλούσαν αβεβαιότητες στις παραμέτρους του μοντέλου. Τυπικά, το αρχικά αβέβαιο πρόβλημα βελτιστοποίησης μετατρέπεται σε μια ισοδύναμη ντετερμινιστική εκδοχή (robust counterpart) με χρήση δυικών μετασχηματισμών και στη συνέχεια επιλύεται με χρήση δεδομένων convex αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Οι Ben-Tal et al. [2] σταδιακά γενικεύσανε το αρχικό πλαίσιο της εύρωστης βελτιστοποίησης και εισάγανε το Adjustable Robust Counterpart (ARC) δίνοντας τη δυνατότητα για σταδιακή λήψη αποφάσεων, η οποία βασίζεται στην πραγμάτωση μέρους ή όλων των αβεβαιοτήτων του μοντέλου, καθιστώντας έτσι τη μέθοδο της εύρωστης βελτιστοποίησης κατάλληλη για μοντελοποίηση προβλημάτων απόφασης δύο ή τριών σταδίων. Παρόλο όμως που το ARC έδωσε τη δυνατότητα για πιο πλούσιες μοντελοποιήσεις, η υπολογιστική του πολυπλοκότητα οδήγησε του συγγραφείς στην επικέντρωση της μελέτης σε ένα κομμάτι του ARC, όπου οι αρχικές αβεβαιότητες περιορίζονταν σε σχετικές συναρτήσεις των αβεβαιοτήτων, οδηγώντας έτσι στο Affinely - Adjustable Robust Counterpart (AARC).

Τα μοντέλα της εύρωστης βελτιστοποίησης μπορούν να θεωρηθούν σαν ειδική περίπτωση minmax στοχαστικών προγραμμάτων, η μελέτη των οποίων αρχικά πραγματοποιήθηκε από τον Zackova [3]. Σε αυτό το πλαίσιο οι αβεβαιότητες μοντελοποιούνται έχοντας μια κατανομή η οποία δεν προσδιορίζεται πλήρως, αλλά θεωρείται ότι ανήκει σε μια οικογένεια κατανομών. Οι βέλτιστες αποφάσεις στη συνέχεια λαμβάνονται για την κατανομή του χειρότερου σεναρίου μέσα στην οικογένεια. Οι λύσεις οπότε είναι κατανεμημένα εύρωστες στο δεδομένο πλαίσιο αβεβαιότητας. Οι οικογένειες κατανομών προσδιορίζονται από κλασσικές ιδιότητες όπως ροπή ή πιο πρόσφατα ιδιότητες όπως κατευθυνόμενη ροπή.

Τα minmax στοχαστικά προγράμματα με αναδρομικές αποφάσεις είναι γενικά δύσκολο να επιλυθούν. Ακόμα και όταν η οικογένεια κατανομών αποτελείται από ένα μέτρο πιθανότητας, ένα πρόβλημα δύο σταδίων έχει αποδειχθεί υπολογιστικά πολύπλοκο. Παρόλο που δεν υπάρχει τυπική πολυπλοκότητα για το πρόβλημα στοχαστικού προγραμματισμού πολλαπλών σταδίων, οι περισσότεροι συγγραφείς πιστεύουν ότι η πολυπλοκότητα είναι υπολογιστικά ανεξέλεγκτη.

Αντί να προσπαθήσει να επιλύσει αυτά τα ανεξέλεγκτα προβλήματα απευθείας, ένα τμήμα έρευνας στην εύρωστη βελτιστοποίηση επικεντρώνεται στη χρήση της μεθοδολογίας του Ben-Tal [2], ώστε να αποκτήσει υπό-βέλτιστες, αλλά απολύτως ελέγξιμες, προσεγγίσεις τέτοιων προβλημάτων περιορίζοντας την δομή των αναδρομικών αποφάσεων σε απλές, όπως LDRs (linear decisions rules). Η βασική κατεύθυνση σε αυτό το κομμάτι της έρευνας είναι η αναζήτηση τεχνικών που μπορούν να χαλαρώσουν τον σχετικά αυστηρό περιορισμό των αναδρομικών αποφάσεων, οδηγώντας σε περισσότερο ευέλικτες λύσεις. Τέτοιες προσεγγίσεις περιλαμβάνουν τον αποκλίνοντα LDR του Chen et al. [4], καθώς και τον διευρυμένο AARC των Chen και Zhang[5].

4.2.2 Προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού

Έστω ότι έχουμε το ακόλουθο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού:

$$\min_x \{c^T x + d : Ax \leq b\}$$

Όπου:

$x \in \mathbb{R}^n$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης

$c \in \mathbb{R}^n$, $d \in \mathbb{R}$ σχηματίζουν την αντικειμενική συνάρτηση

A ($m \times n$ πίνακας) και $b \in \mathbb{R}^m$ αποτελούν τις σταθερές

Τα δεδομένα όμως του ανωτέρω προβλήματος μπορεί να μην είναι ακριβώς γνωστά διότι μπορεί:

- να αποτελούν εκτιμήσεις τιμών (μελλοντική ζήτηση κλπ)
- να αντιστοιχούν σε παραμέτρους τεχνολογικών συσκευών οι οποίες δεν μπορούν να εκτιμηθούν επακριβώς
- να προκύψουν μεταβλητές απόφασης με τιμές αδύνατο να εφαρμοστούν στην πράξη

Συχνά τα ποσοστά σφάλματος που συναντάμε για τις παραπάνω τιμές δεν ξεπερνούν το 1%. Σε αρκετές εφαρμογές λύνεται το πρόβλημα του γραμμικού προγραμματισμού ελπίζοντας ότι οι αβεβαιότητες στα δεδομένα του προβλήματος δεν μπορούν να επιφέρουν μεγάλες μεταβολές στην αντικειμενική συνάρτηση. Ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού με 1000 μεταβλητές και 410 σταθερές, μια αβεβαιότητα της τάξεως του 0.1% στις τιμές του πίνακα A , μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολές της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης άνω του 450% [1].

Η αβεβαιότητα λοιπόν των παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε μη πραγματοποιήσιμες λύσεις. Για τον λόγο αυτό κρίνεται επιτακτική η ανάγκη μιας μεθόδου ικανής να ανιχνεύσει περιπτώσεις όπου η αβεβαιότητα των δεδομένων μπορεί να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό την βέλτιστη λύση και σε αυτές τις περιπτώσεις να δημιουργήσει μια “αξιόπιστη” λύση, η οποία να είναι ανθεκτική στην αβεβαιότητα.

4.2.3 Προβλήματα αβέβαιου γραμμικού προγραμματισμού

Ένα πρόβλημα αβέβαιου γραμμικού προγραμματισμού είναι ένα σύνολο επιμέρους προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού των οποίων τα δεδομένα βρίσκονται σε ένα συγκεκριμένο σύνολο αβεβαιότητας U .

LO_U (linear optimization problem under uncertainty U):

$$\left\{ \min_x \{c^T x + d : Ax \leq b\} \right\}_{(c,d,A,b) \in U}$$

Το σύνολο U ορίζεται συνήθως ως συνάρτηση ενός μεταβλητού διανύσματος ζ το οποίο κινείται σε ένα δεδομένο σύνολο Z .

$$U = \left\{ \left[\begin{array}{c|c} c^T & d \\ \hline A & b \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c|c} c_0^T & d_0 \\ \hline A_0 & b_0 \end{array} \right] + \sum_{\ell=1}^L \zeta_\ell \left[\begin{array}{c|c} c_\ell^T & d_\ell \\ \hline A_\ell & b_\ell \end{array} \right] : \zeta \in Z \subset \mathbb{R}^L \right\}.$$

Το σύνολο Z (δηλαδή τα όρια στα οποία κινείται το διάνυσμα ζ) καθορίζει τη γεωμετρία του συνόλου αβεβαιότητας U . Συγκεκριμένα μπορούμε να έχουμε:

- παραλληλεπίπεδο σύνολο αβεβαιότητας: $\{\xi \in \mathbb{R}^k : -1 \leq \xi_j \leq 1, j = 1, \dots, k\}$
- ελλειψοειδές σύνολο αβεβαιότητας: $\{\chi \in \mathbb{R}^k : \|\chi\|_2^2 = \chi^T \chi \leq 1\}$
- κωνικό σύνολο αβεβαιότητας: $\{\chi \in \mathbb{R}^k : x_k \geq \sqrt{x_1^2 + \dots + x_{k+1}^2}\}$

Για το ανωτέρω πρόβλημα αβέβαιου γραμμικού προγραμματισμού δεν υπάρχει βέλτιστη λύση. Η λύση που θα δοθεί στο πρόβλημα εξαρτάται από το περιβάλλον απόφασης. Στην περίπτωση μας το περιβάλλον απόφασης προσδιορίζεται από τους ακόλουθους ορισμούς:

Ορισμός 1: Ένα διάνυσμα $x \in \mathbb{R}^n$ είναι μια εύρωστη λύση του LO_U αν ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς που προκύπτουν από το σύνολο των αβεβαιοτήτων:

$$Ax \leq b \quad \forall (c, d, A, b) \in U.$$

Ορισμός 2: Δεδομένης μιας υποψήφιας λύσης x , η εύρωστη τιμή του $\hat{c}(x)$ είναι η μέγιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για όλες τις τιμές του συνόλου αβεβαιοτήτων

$$\hat{c}(x) = \sup_{(c,d,A,b) \in U} [c^T x + d].$$

Ορισμός 3: Το Εύρωστο Δυικό Πρόβλημα (Robust Counterpart , RC) του αβέβαιου LO_U είναι το πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\min_x \left\{ \widehat{c}(x) = \sup_{(c,d,A,b) \in \mathcal{U}} [c^T x + d] : Ax \leq b \forall (c,d,A,b) \in \mathcal{U} \right\}$$

το οποίο αναζητεί λύση x τέτοια ώστε να ελαχιστοποιεί την εύρωστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε όλο το σύνολο των αβέβαιων τιμών.

4.2.4 Προβλήματα αβέβαιου γραμμικού προγραμματισμού πολλαπλών σταδίων

Ένας γενικός τύπος προβλήματος αβέβαιου προγραμματισμού είναι ο ακόλουθος:

$$\mathcal{P} = \left\{ \min_x \{f(x, \zeta) : F(x, \zeta) \in \mathbf{K}\} : \zeta \in \mathcal{Z} \right\}$$

Όπου:

$x \in \mathbb{R}^n$ είναι το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης

$\zeta \in \mathbb{R}^L$ αναπαριστά την αβεβαιότητα των δεδομένων, η οποία περιορίζεται στον χώρο $\mathcal{Z} \subseteq \mathbb{R}^L$

$f(x, \zeta)$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση

$F(x, \zeta)$ παίρνει τιμές στο $\mathbf{K} \subseteq \mathbb{R}^m$ προσδιορίζοντας τους περιορισμούς

Το εύρωστο δυικό πρόβλημα (robust counterpart) που αντιστοιχεί στο πρόβλημα \mathcal{P} είναι το ακόλουθο:

$$\min_{x,t} \{t : \forall \zeta \in \mathcal{Z} : f(x, \zeta) \leq t, F(x, \zeta) \in \mathbf{K}\};$$

Μέχρι στιγμής έχουμε υποθέσει ότι όλες οι μεταβλητές απόφασης αποτελούν «εδώ και τώρα» αποφάσεις (here and now decisions). Δηλαδή πρέπει να λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές σαν αποτέλεσμα της επίλυσης του προβλήματος πριν τα πραγματικά δεδομένα αποκαλυφθούν. Ωστόσο αυτή η υπόθεση δεν ισχύει σε όλες τις περιπτώσεις. Πολλές φορές στην πράξη οι αποφάσεις σε μια δεδομένη χρονική στιγμή εξαρτώνται από τις τιμές των πραγματικών δεδομένων που έχουν αποκαλυφθεί μέχρι τότε. Τέτοιου τύπου αποφάσεις ονομάζονται «περίμενε και δεξ» αποφάσεις (wait and see decisions). Για παράδειγμα, σε ένα σύστημα παραγγελιών πολλαπλών σταδίων, η ποσότητα παραγγελίας τη χρονική στιγμή t μπορεί να εξαρτάται από τη ζήτηση των χρονικών στιγμών $t-3$, $t-2$, $t-1$ η οποία έχει αποκαλυφθεί.

Ένας τρόπος για να μοντελοποιήσουμε την εξάρτηση των μεταβλητών μας είναι ο ακόλουθος: Για κάθε $j \leq n$, επιτρέπουμε στο χ_j να εξαρτάται από ένα συγκεκριμένο «ποσοστό» $P_j \zeta$ των πραγματικών δεδομένων ζ :

$$\chi_j = X_j(P_j \zeta)$$

Όπου $P_1 \dots P_n$ είναι πίνακες που προσδιορίζουν τη «βάση δεδομένων» των αποφάσεων χ_j και $X_j(\cdot)$ είναι οι κανόνες απόφασης που θα επιλεγούν.

Αντικαθιστώντας στο εύρωστο ομόλογο πρόβλημα (robust counterpart , RC) του προβλήματος P τις μεταβλητές απόφασης χ_j με συναρτήσεις $X_j(P_j \zeta)$ καταλήγουμε στο πρόβλημα:

$$\min_{t, \{X_j(\cdot)\}_{j=1}^n} \{t : \forall \zeta \in Z : f(X(\zeta), \zeta) \leq t, F(X(\zeta), \zeta) \in \mathbf{K}\},$$
$$X(\zeta) = [X_1(P_1 \zeta); \dots; X_n(P_n \zeta)].$$

Το οποίο ονομάζεται *Ρυθμιζόμενο Εύρωστο ομόλογο Πρόβλημα (Adjustable Robust Counterpart , ARC)*

Τα ρυθμιζόμενα εύρωστα ομόλογα προβλήματα (Adjustable Robust Counterpart , ARC) είναι γενικά δύσκολο να επιλυθούν. Ακόμα και όταν η οικογένεια κατανομών αποτελείται από ένα μέτρο πιθανότητας, ένα πρόβλημα δύο σταδίων έχει αποδειχθεί υπολογιστικά πολύπλοκο. Παρόλο που δεν υπάρχει τυπική πολυπλοκότητα για το πρόβλημα στοχαστικού προγραμματισμού πολλαπλών σταδίων, οι περισσότεροι συγγραφείς πιστεύουν ότι η πολυπλοκότητα είναι υπολογιστικά ανεξέλεγκτη.

Αντί να προσπαθήσουμε να επιλύσουμε αυτά τα ανεξέλεγκτα προβλήματα απευθείας, περιορίζουμε την δομή των αναδρομικών αποφάσεων σε απλές, όπως LDRs (linear decisions rules) ώστε να αποκτήσουμε υπό-βέλτιστες, αλλά απολύτως ελέγξιμες, προσεγγίσεις.

4.3 ROME (Robust Optimization Made Easy)

4.3.1 Εισαγωγή

Παρόλες τις πρόσφατες εξελίξεις στην θεωρία και τεχνική της εύρωστης βελτιστοποίησης, υπάρχει μια έλλειψη συνοδευτικής τεχνολογίας η οποία θα βοηθήσει τη μετάβαση από τη θεωρία στην πράξη. Επιπλέον, το ανωτέρω πρόβλημα συνοδεύεται από το γεγονός ότι οι ντετερμινιστικές εκδοχές πολλών μοντέλων ανάλυσης ευρωστίας είναι υπερβολικά πολύπλοκες και κουραστικές να αποδοθούν σαφώς. Το αλγεβρικό περιβάλλον (βασισμένο στο Matlab) το οποίο αναπτύχθηκε από τους Joel Goh και Melvyn Sim προσπαθεί να καλύψει το υπάρχον κενό και να αντιμετωπίσει τα ανωτέρω προβλήματα. Το ROME (Robust Optimization Made Easy) μπορεί να μοντελοποιήσει και να επιλύσει προβλήματα εύρωστης βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας έναν απλό, κατανοητό και μαθηματικά διαισθητικό τρόπο μοντελοποίησης. Τέλος να σημειωθεί ότι το ROME δεν είναι πρόγραμμα επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης, αλλά μια προγραμματιστική γλώσσα μοντελοποίησης η οποία μετατρέπει τα αβέβαια προβλήματα βελτιστοποίησης σε ντετερμινιστικές εκδοχές. Για την επίλυση των ντετερμινιστικών αυτών εκδοχών καλεί τρίτα προγράμματα επίλυσης γραμμικού προγραμματισμού όπως τα SDPT3, MOSEK, CPLEX.

4.3.2 Πλαίσιο επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης στο περιβάλλον του ROME

Με βάση τη θεωρία που προηγήθηκε για την επίλυση προβλημάτων αβέβαιου γραμμικού προγραμματισμού με σταδιακή λήψη αποφάσεων, θα περιγράψουμε το μαθηματικό μοντέλο των προβλημάτων που επιλύει το ROME.

- Ορίζουμε τη μεταβλητή \bar{z} ως ένα N-διάστατο διάνυσμα αβεβαιοτήτων με κατανομή P, η οποία δεν θεωρείται γνωστή αλλά μπορούμε να προσδιορίσουμε διάφορες ιδιότητες της όπως μέσο όρο ή διασπορά.
- Οι μεταβλητές απόφασης στο μοντέλο μας εμπεριέχονται στο διάνυσμα \mathbf{x} , ένα n-διάστατο διάνυσμα μεταβλητών απόφασης οι οποίες λαμβάνονται θεωρώντας τις αβεβαιότητες μη ορισμένες.
- Ο πίνακας δεικτών $\{I_k\}_{k=1}^K$, όπου $I_k \subseteq [N]$ για κάθε $k \in [K]$ δηλώνει τις εξαρτήσεις ανάμεσα στις αναδρομικές αποφάσεις και τις αβεβαιότητες.

Το γενικό μοντέλο που θέλουμε να επιλύσουμε έχει την μορφή:

$$\begin{aligned}
 Z_{GEN}^* = & \min_{\mathbf{x}, \{\mathbf{y}^k(\cdot)\}_{k=1}^K} c^{0'} \mathbf{x} + \sup_{\mathbb{P} \in \mathbb{F}} \mathbb{E}_{\mathbb{P}} \left(\sum_{k=1}^K d^{0,k'} \mathbf{y}^k(\tilde{z}) \right) \\
 \text{s.t.} & c^{l'} \mathbf{x} + \sup_{\mathbb{P} \in \mathbb{F}} \mathbb{E}_{\mathbb{P}} \left(\sum_{k=1}^K d^{l,k'} \mathbf{y}^k(\tilde{z}) \right) \leq b_l \quad \forall l \in [M] \\
 & T(\tilde{z})\mathbf{x} + \sum_{k=1}^K U^k \mathbf{y}^k(\tilde{z}) = \mathbf{v}(\tilde{z}) \\
 & \underline{\mathbf{y}}^k \leq \mathbf{y}^k(\tilde{z}) \leq \overline{\mathbf{y}}^k \quad \forall k \in [K] \\
 & \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \\
 & \mathbf{y}^k \in \mathcal{Y}(m_k, N, I_k) \quad \forall k \in [K].
 \end{aligned}$$

Ωστόσο το ανώτερο πρόβλημα βελτιστοποίησης τις περισσότερες φορές δεν επιλύεται. Για να αντιμετωπίσουμε το πρόβλημα αυτό εισάγουμε μερικούς γραμμικούς κανόνες απόφασης (LDR), εξαρτώντας τις αναδρομικές αποφάσεις από τις αβεβαιότητες του μοντέλου μέσω γραμμικών εξαρτήσεων.

Συγκεκριμένα ορίζουμε:

$$\mathcal{L}(m, N, I) \triangleq \{f : \mathbb{R}^N \rightarrow \mathbb{R}^m : \exists \mathbf{y}^0 \in \mathbb{R}^m, \mathbf{Y} \in \mathbb{R}^{m \times N} : f(\mathbf{z}) = \mathbf{y}^0 + \mathbf{Y}\mathbf{z}, \mathbf{Y}\mathbf{e}^i = \mathbf{0}, \forall i \in I^c\}.$$

μετατρέποντας το πρόβλημα βελτιστοποίησης στο ακόλουθο:

$$\begin{aligned}
 Z_{LDR} = & \min_{\mathbf{x}, \{\mathbf{y}^k(\cdot)\}_{k=1}^K} c^{0'} \mathbf{x} + \sup_{\mathbb{P} \in \mathbb{F}} \mathbb{E}_{\mathbb{P}} \left(\sum_{k=1}^K d^{0,k'} \mathbf{y}^k(\tilde{z}) \right) \\
 \text{s.t.} & c^{l'} \mathbf{x} + \sup_{\mathbb{P} \in \mathbb{F}} \mathbb{E}_{\mathbb{P}} \left(\sum_{k=1}^K d^{l,k'} \mathbf{y}^k(\tilde{z}) \right) \leq b_l \quad \forall l \in [M] \\
 & T(\tilde{z})\mathbf{x} + \sum_{k=1}^K U^k \mathbf{y}^k(\tilde{z}) = \mathbf{v}(\tilde{z}) \\
 & \underline{\mathbf{y}}^k \leq \mathbf{y}^k(\tilde{z}) \leq \overline{\mathbf{y}}^k \quad \forall k \in [K] \\
 & \mathbf{x} \geq \mathbf{0} \\
 & \mathbf{y}^k \in \mathcal{L}(m_k, N, I_k) \quad \forall k \in [K].
 \end{aligned}$$

Μετά την επίλυση του ανωτέρω προβλήματος από το ROME η μεταβλητή απόφασης μπορεί να εκφραστεί ως γραμμική συνάρτηση των αβεβαιοτήτων του προβλήματος:

$$\hat{\mathbf{x}}(\tilde{z}) = (\mathbf{x}^0 + \mathbf{X}\tilde{z}) + \mathbf{P}(\mathbf{y}^0 + \mathbf{Y}\tilde{z})^-$$

4.3.3 Το προγραμματιστικό περιβάλλον του R.O.M.E. (Robust Optimization Made Easy)

α) Επίλυση ενός απλού προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού

Θεωρούμε το ακόλουθο απλό πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού:

Αντικειμενική συνάρτηση:

$$\max Z = 12x + 15y$$

περιορισμοί:

$$\begin{aligned}x + 2y &\leq 40 \\4x + 3y &\leq 120 \\x, y &\geq 0\end{aligned}$$

Ο αντίστοιχος κώδικας επίλυσης στο rome είναι ο ακόλουθος:

```
% Set up ROME Environment
rome_begin;
h = rome_model('Simple LP'); % Create Rome Model

% set up modeling variables
newvar x y;

% set up objective function
rome_maximize(12 * x + 15 * y);

% input constraints constraints
rome_constraint(x + 2*y <= 40);
rome_constraint(4*x + 3*y <= 120);
rome_constraint(x >= 0);
rome_constraint(y >= 0);

% solve
h.solve;

% extract objective values
x_val = h.eval(x);
y_val = h.eval(y);
```

β) Δήλωση αβέβαιων μεταβλητών

Το Rome δίνει τη δυνατότητα να δηλωθούν μεταβλητές οι οποίες να μην αποτελούν μεταβλητές απόφασης, αλλά αβέβαιες μεταβλητές. Επιπλέον δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να ορίσει περιορισμούς για αυτές τις μεταβλητές όπως όρια τιμών, περιορισμούς που αφορούν τη μέση τιμή τους ή τη διακύμανση.

```
newvar z (1,10) uncertain ;           % δήλωση αβέβαιης μεταβλητής 1x10
rome_constraint (z. mean >= -1);     % περιορισμός μέσης τιμής
z. Covar = 4* eye (N);               % περιορισμός συνδιακύμανσης
rome_constraint (z >= 1);             % περιορισμός τιμών της αβέβαιης
                                     μεταβλητής
```

γ) Δήλωση γραμμικών μεταβλητών απόφασης (Linear-Decision Rules Variables)

Για να δηλώσουμε μια γραμμική μεταβλητή απόφασης πρέπει πρώτα να δηλώσουμε μια αβέβαιη μεταβλητή.

```
z = newvar (6, 'uncertain ');
```

Στη συνέχεια για να δηλώσουμε μια μεταβλητή τέτοια ώστε:

$$y(z) = y^0 + \sum_{i=1}^6 z_i y^i, \quad z \in \mathbb{R}^6, \quad y(z) \in \mathbb{R}^{5 \times 3}$$

χρησιμοποιούμε το ακόλουθο τμήμα κώδικα:

```
y = newvar (5, 3, z, 'linearrule ');
```

Η επίλυση του μοντέλου θα οδηγήσει στον προσδιορισμό των συντελεστών y^i , δίνοντας μια γραμμική σχέση μεταξύ των αβεβαιοτήτων και των μεταβλητών απόφασης.

Ενδιαφέρον αποτελεί το παράδειγμα όπου θέλουμε να δηλώσουμε μια N-διάστατη LDR μεταβλητή y , η οποία να εξαρτάται από τη αβέβαιη μεταβλητή z . Ωστόσο για λόγους μη-πρόβλεψης θέλουμε το $i^{\text{στο}}$ στοιχείο της μεταβλητής y να εξαρτάται μόνο από τα τρία προηγούμενα στοιχεία της αβεβαιότητας z ($(j-1)^{\text{στο}}$, $(j-2)^{\text{στο}}$, $(j-3)^{\text{στο}}$). Η ανωτέρω εξάρτηση μπορεί να δηλωθεί με τη βοήθεια ενός πίνακα λογικών μεταβλητών `PatternY` διαστάσεων $(M,N+1)$ όπου:

M: οι διαστάσεις εξόδου της LDR

N: ο διαστάσεις της αβεβαιότητας

Στο στοιχείο (i, j) στοιχείο του πίνακα έχουμε λογικό 1 αν το $i^{\text{στο}}$ στοιχείο της μεταβλητής y εξαρτάται από το $(j-1)^{\text{στο}}$ στοιχείο της αβεβαιότητας. Η πρώτη στήλη αφορά το σταθερό στοιχείο της εξάρτησης. Στο παράδειγμά μας ο πίνακας `PatternY` πρέπει να έχει τη μορφή:

```
PatternY=
      1  1  0  0  0  0  0  0  0  0
      1  1  1  0  0  0  0  0  0  0
      1  1  1  1  0  0  0  0  0  0
      1  0  1  1  1  0  0  0  0  0
      1  0  0  1  1  1  0  0  0  0
      1  0  0  0  1  1  1  0  0  0
      1  0  0  0  0  1  1  1  0  0
      1  0  0  0  0  0  1  1  1  0
      1  0  0  0  0  0  0  1  1  1
      1  0  0  0  0  0  0  0  1  1
```

Το αντίστοιχο τμήμα κώδικα ακολουθεί:

```
newvar z(N) uncertain ;
PatternY= [true(N,1),tril(true(N))-tril(true(N),-3)];
newvar y(N, z, `Pattern`, patternY);
```

Κεφάλαιο 5

Το Ενεργειακό Μοντέλο για την σύγκριση των πολιτικών

5.1 Στόχος

Ο στόχος του μοντέλου είναι η σύγκριση των πολιτικών “περιορισμός των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (emissions cap and trade)” και “φορολόγηση εκπομπών (CO₂ tax)”. Για να αντιμετωπίσουμε την αβεβαιότητα του μέλλοντος και την αδυναμία μας για ακριβείς προβλέψεις, θα προχωρήσουμε στην ανάλυση της ευρωστίας των δυο πολιτικών. Η μελέτη της ευρωστίας των πολιτικών θα γίνει θεωρώντας τη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας και το επενδυτικό κόστος σαν παράγοντες αβεβαιότητας. Στόχος μας είναι να προσδιορίσουμε τα κατώφλια της ζήτησης και του επενδυτικού κόστους, που καθιστούν την μια πολιτική πιο αποτελεσματική από την άλλη. Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να βρούμε κάποια μεταβλητή της οποίας η τιμή θα μπορεί να δηλώνει των ανάγκη για εναλλαγή πολιτικής.

Θα εξετάσουμε 3 πολιτικές μείωσης των εκπομπών του CO₂:

- 1) Ονομαστικό σενάριο (Business as Usual) χωρίς κάποια πολιτική μείωσης εκπομπών του CO₂
- 2) Σενάριο με περιορισμό των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (emissions cap and trade)
- 3) Σενάριο φορολόγησης εκπομπών (CO₂ tax)

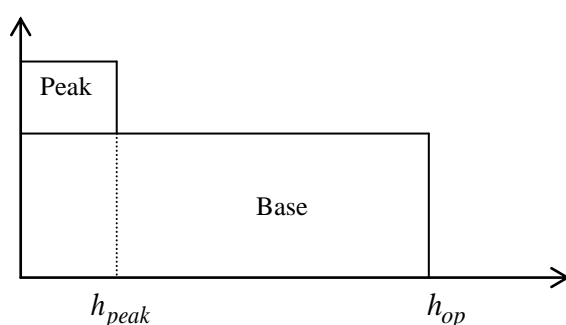
Όλα τα σενάρια θα είναι multi-period, με ορίζοντα προγραμματισμού το 2030.

5.2 Το Μαθηματικό Μοντέλο

5.2.1 Ονομαστικό (reference) σενάριο

5.2.1.1 Μοντέλο μίας περιόδου ($t = 0$)

Η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να διακριθεί σε ζήτηση ή φορτίο αιχμής (peak) ζήτηση ή φορτίο βάσης (base).



h_{peak} είναι ο αριθμός των ωρών μέσα στο έτος που απαιτείται φορτίο αιχμής.

te	Τύπος τεχνολογίας
l	Είδος του φορτίου (βάσης ή αιχμής)

h_{op}	Ο μέγιστος συνολικός χρόνος λειτουργίας των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας (έστω ίσος με 8.760 ώρες)
OC_{te}	Το μεταβλητό κόστος λειτουργίας της τεχνολογίας te (kWh) μη συμπεριλαμβανομένου του κόστους καυσίμου
$q_{l,te}$	Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kW) από την τεχνολογία te για την κάλυψη της ζήτησης l
D_l^{ref}	Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) για την κάλυψη της ζήτησης l στο ονομαστικό σενάριο.
q_{te}^{ref}	Ενέργεια που παράγεται από την τεχνολογία te (kW) στο ονομαστικό σενάριο. $q_{te}^{ref} = \sum_l q_{l,te}$
P_l	Διάρκεια (ώρες) του τύπου ζήτησης l
FC_{te}	Κόστος καυσίμου της τεχνολογίας te (€/GJ)
n_{te}	Η αποδοτικότητα της τεχνολογίας te .

	$0 \leq n_{te} \leq 1$
C_{te}	Η υφιστάμενη δυναμικότητα (kW) της τεχνολογίας te

Τα $q_{l,te}^{ref}$ θα βρεθούν από την επίλυση του ακόλουθου γραμμικού προβλήματος:

$$\min_{q_{l,te}, INV_s^{neg}} \left\{ \sum_l \sum_{te} (OC_{te} \cdot q_{l,te} \cdot P_l) + \sum_l \sum_{te} \left(FC_{te} \cdot \frac{q_{l,te}}{n_{te}} \cdot P_l \right) \right\}$$

s.t.

$$\sum_{te} (q_{l,te} \cdot P_l) = D_l^{ref}, \quad \forall l$$

$$\sum_l q_{l,te} \leq C_{te}, \quad \forall te$$

$$q_{l,te} \geq 0, \quad \forall l, te$$

5.2.1.2 Μοντέλο πολλών περιόδων

t	Χρονική περίοδος (έτος)
te	Τύπος τεχνολογίας
l	Είδος του φορίου (βάσης ή αιχμής)
Coal	Το σύνολο των τεχνολογιών που βασίζονται σε Coal
Gas	Το σύνολο των τεχνολογιών που βασίζονται σε Gas
Wind	Το σύνολο των τεχνολογιών που βασίζονται σε Wind
Waste	Το σύνολο των τεχνολογιών που βασίζονται σε Waste

h_{op}	Ο μέγιστος συνολικός χρόνος λειτουργίας των εγκαταστάσεων παραγωγής ενέργειας (έστω ίσος με 8.760 ώρες)
$OC_{te,t}$	Το μεταβλητό κόστος λειτουργίας της τεχνολογίας te (kWh) κατά τη χρονική περίοδο t μη συμπεριλαμβανομένου του κόστους καυσίμου
$q_{l,te,t}$	Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kW) από την τεχνολογία te για την κάλυψη της ζήτησης l κατά τη χρονική περίοδο t .
$D_{l,t}^{ref}$	Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) για την κάλυψη της ζήτησης l στο ονομαστικό σενάριο κατά τη χρονική περίοδο t .
$q_{te,t}^{ref}$	Ενέργεια που παράγεται από την τεχνολογία te (kW) στο ονομαστικό σενάριο κατά τη χρονική περίοδο t . $q_{te,t}^{ref} = \sum_l q_{l,te,t}$
$P_{l,t}$	Διάρκεια (ώρες) του τύπου ζήτησης l κατά τη χρονική περίοδο t .
$FC_{te,t}$	Κόστος καυσίμου της τεχνολογίας te (€/GJ) κατά τη χρονική περίοδο t .
$n_{te,t}$	Η αποδοτικότητα της τεχνολογίας te κατά τη χρονική περίοδο t . $0 \leq n_{te,t} \leq 1$
$C_{te,t}$	Η συνολική δυναμικότητα (kW) της τεχνολογίας te μέχρι τη χρονική περίοδο t .
$INVC_{te,t}$	Το επενδυτικό κόστος (investment cost) για τη δημιουργία νέας δυναμικότητας (€) της τεχνολογίας te κατά τη χρονική περίοδο t .
$SC_{te,t}$	Το μοναδιαίο επενδυτικό κόστος (investment cost) για τη δημιουργία νέας δυναμικότητας (€/kW) της τεχνολογίας te κατά τη χρονική περίοδο t .
$INV_{te,t}$	Η αύξηση της δυναμικότητας της τεχνολογίας te (kW) κατά τη χρονική περίοδο t .
LT_{te}	Ο χρόνος (έτη) που απαιτείται για την κατασκευή ενός εργοστασίου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τεχνολογίας te

Η αντικειμενική συνάρτηση του νέου προβλήματος θα έχει τη μορφή:

$$\min NPV \Rightarrow \min \sum_{t=0}^T \frac{annualCost(t)}{(1+d)^t}$$

όπου:

d το επιτόκιο προεξόφλησης (συνήθως 5% ή 6%)

$$annualCost(t) = \sum_l \sum_{te} (OC_{te} \cdot q_{l,te,t} \cdot P_{l,t}) + \sum_l \sum_{te} \left(FC_{te,t} \cdot \frac{q_{l,te}}{n_{te}} \cdot P_{l,t} \right) + \sum_{te \in Coal} INVC_{te,t} + \sum_{te \in Gas} INVC_{te,t} + \sum_{te \in Wind} INVC_{te,t} + \sum_{te \in Waste} INVC_{te,t}$$

Ισχύει:

$$C_{te,t} = C_{te,0} + \sum_{\tau=1}^t INV_{te,\tau} - \sum_{\tau=1}^t phaseOut_{te,\tau} \quad \forall te, t$$

Η υφιστάμενη δυναμικότητα για την τεχνολογία te μειώνεται αν έχει προγραμματιστεί phase-out (σε kW) κατά το έτος t

Ο όρος $INVC_{te,t}$ της αντικειμενικής συνάρτησης θα γραφεί ως:

$$INVC_{te,t} = SC_{te,t} \cdot INV_{te,t}$$

Πηγή αβεβαιότητας στο μοντέλο

Οι περιορισμοί του μοντέλου είναι οι εξής:

$$C_{te,t} = C_{te,o} + \sum_{\tau=1}^t INV_{te,\tau} - \sum_{\tau=1}^t phaseOut_{te,\tau} \quad \forall te, t \geq LT_{te}$$
$$\sum_l q_{l,te,t} \leq C_{te,t}, \quad \forall te, t$$
$$\sum_{te} (q_{l,te,t} \cdot P_{l,t}) = D_{l,t}^{ref}, \quad \forall l, t$$
$$q_{l,te,t} \geq 0, \quad \forall l, te, t$$

Το επενδυτικό κόστος $SC_{te,t}$ και η ζήτηση $D_{l,t}^{ref}$ αποτελούν τις παραμέτρους αβεβαιότητας του προβλήματος και προσδιορίζονται στην επόμενη παράγραφο.

5.2.1.3 Δεδομένα

Έστω ότι έχουμε μία κλειστή (όχι εισαγωγές ή εξαγωγές ενέργειας) αγορά ηλεκτρικής ενέργειας όπου ανταγωνίζονται για μερίδιο αγοράς οι ακόλουθες τεχνολογίες:

Coal

- Conventional plants (Steam turbine)
- Pulverized Coal power stations
- Integrated Gasification Combined Cycle plants (IGCC)

Natural gas

- Simple Cycle Gas turbine
- Natural Gas Combined Cycle (NGCC)

Renewables

- Wind turbines
- Biomass

Όταν το CO₂ δεσμεύεται στα εργοστάσια παραγωγής η ανάλογη τεχνολογία δηλώνεται ως “CO₂seq”.

A. Χαρακτηριστικά τεχνολογιών

Τύποι εργοστασίων παραγωγής ενέργειας	1 ^{ος} χρόνος διαθεσιμότητας	Διάρκεια ζωής (έτη)	Βαθμός διαθεσιμότητας (%)	Αποδοτικότητα καυσίμου (%)			Καύσιμ ο
				2010	2020	2050	
Conventional coal	1990	30	80	34	35	35	coal
Pulverised coal (USC)	-	30	80	39	43	44	coal
Pulverised coal (USC-CO ₂ seq)	2020	30	80	32	36	38	coal
Coal gasification Combined Cycle (IGCC)	-	25	80	40	45	47	coal
Coal gasification Combined Cycle (IGCC-CO ₂ seq)	2020	25	80	32	37	40	coal
Simple Cycle Gas turbine	1990	25	80	37	41	43	gas
NGCC power plant	1995	20	80	58	63	66	gas
NGCC power	2020	20	80	50	58	61	gas

Τύποι εργοστασίων παραγωγής ενέργειας	1 ^{ος} χρόνος διαθεσιμότητας	Διάρκεια ζωής (έτη)	Βαθμός διαθεσιμότητας (%)	Αποδοτικότητα καυσίμου (%)			Καύσιμo
				2010	2020	2050	
plant - CO ₂ seq							
Wind turbine onshore at seaside	1990	20	27	100	100	100	wind
Wind turbine offshore	-	20	37	100	100	100	wind
Municipal waste incinerator	1990	30	68	25	25	25	municipal waste

B. Κόστη τεχνολογιών

Τύποι εργοστασίων παραγωγής ενέργειας	Αρχικό επενδυτικό κόστος (€/KW)	Αρχικό σταθερό κόστος λειτουργίας (€/KW)	Αρχικό μεταβλητό κόστος λειτουργίας (€/GJ _{el})
Conventional coal	1229	33	1,150
Pulverised coal (USC)	1244	27	2,277
Pulverised coal (USC-CO ₂ seq)	2142	31	2,505
Coal gasification Combined Cycle (IGCC)	1286	33	1,139
Coal gasification Combined Cycle (IGCC-CO ₂ seq)	2250	39	1,253
Simple Cycle gas turbine	349	10	0,666
NGCC power plant	477	10	0,526
NGCC power plant - CO ₂ seq	822	13	0,678
Wind turbine onshore at seaside	934	15	0,278
Wind turbine offshore	1682	80	0,903
Municipal waste incinerator	1229	33	1,150

Γ. Χαρακτηριστικά καυσίμων

Καύσιμο	Specific Energy Content (kWh / kg fuel)	CO2 Emission (kgCO ₂ / kWh)
coal	7,5	0,37
gas	12	0,23
municipal waste	2,27	0,7

Δ. Κόστη καυσίμων

Καύσιμο	2010 (€/GJ)	2020 (€/GJ)	2030 (€/GJ)
coal	1,48	1,48	1,48
gas	3,65	3,65	3,65
municipal waste	0	0	0

Ε. Αρχικές δυναμικότητες (2010)

Τύποι εργοστασίων παραγωγής ενέργειας	C _{te,o} (GW)
Conventional coal	60
Pulverised coal (USC)	0
Pulverised coal (USC-CO ₂ seq)	0
Coal gasification Combined Cycle (IGCC)	0
Coal gasification Combined Cycle (IGCC-CO ₂ seq)	0
Gas turbine	15
NGCC power plant	5
NGCC power plant - CO ₂ seq	0
Wind turbine onshore at seaside	4
Wind turbine offshore	0
Municipal waste incinerator	2
ΣΥΝΟΛΟ	86

5.2.2 Σενάριο με περιορισμό των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (emissions cap and trade)

Η αντικειμενική συνάρτηση του νέου προβλήματος θα έχει τη μορφή:

$$\min NPV \Rightarrow \min \sum_{t=0}^T \frac{annualCost(t)}{(1+d)^t}$$

με συνάρτηση για τον υπολογισμό του ετήσιου κόστους ίδια με αυτή που χρησιμοποιήσαμε στο σενάριο αναφοράς.

$$annualCost(t) = \sum_l \sum_{te} (OC_{te} \cdot q_{l,te,t} \cdot P_{l,t}) + \sum_l \sum_{te} \left(FC_{te,t} \cdot \frac{q_{l,te}}{n_{te}} \cdot P_{l,t} \right) + \sum_{te \in Coal} INVC_{te,t} + \sum_{te \in Gas} INVC_{te,t} + \sum_{te \in Wind} INVC_{te,t} + \sum_{te \in Waste} INVC_{te,t}$$

Οι περιορισμοί του μοντέλου είναι οι εξής:

$$C_{te,t} = C_{te,0} + \sum_{\tau=1}^t INV_{te,\tau} - \sum_{\tau=1}^t phaseOut_{te,\tau} \quad \forall te, t \geq LT_{te}$$

$$\sum_l q_{l,te,t} \leq C_{te,t}, \quad \forall te, t$$

$$\sum_{te} (q_{l,te,t} \cdot P_{l,t}) = D_{l,t}^{ref}, \quad \forall l, t$$

$$\sum_{te} (q_{l,te,t} \cdot emissions_{te}) \leq Permits_t, \quad \forall l, t$$

$$q_{l,te,t} \geq 0, \quad \forall l, te, t$$

Το $emissions_{te}$ αφορά τις εκπομπές CO₂ ανα KWh ενέργειας, όπως αυτές προσδιορίζονται στον παρακάτω πίνακα, για τις διάφορες τεχνολογίες.

Καύσιμο	CO2 Emission (kgCO ₂ / kWh)
coal	0,37
gas	0,23
municipal waste	0,7

Το $permits_t$ αντιπροσωπεύει το σύνολο των εμπορεύσιμων αδειών που έχουν δοθεί στην αγορά κατά το έτος t.

5.2.3 Σενάριο με φορολόγηση των εκπομπών CO₂

Η αντικειμενική συνάρτηση του νέου προβλήματος θα έχει τη μορφή:

$$\min NPV \Rightarrow \min \sum_{t=0}^T \frac{annualCost(t)}{(1+d)^t}$$

με συνάρτηση για τον υπολογισμό του ετήσιου κόστους που περιλαμβάνει και το φόρο που επιβάλλεται στις εκπομπές του CO₂.

$$annualCost(t) = \sum_l \sum_{te} (OC_{te} \cdot q_{l,te,t} \cdot P_{l,t}) + \sum_l \sum_{te} \left(FC_{te,t} \cdot \frac{q_{l,te}}{n_{te}} \cdot P_{l,t} \right) +$$

$$taxCO_2 \cdot \sum_l \sum_{te} (emissions_{te} \cdot q_{l,te,t} \cdot P_{l,t}) +$$

$$\sum_{te \in Coal} INVC_{te,t} + \sum_{te \in Gas} INVC_{te,t} + \sum_{te \in Wind} INVC_{te,t} + \sum_{te \in Waste} INVC_{te,t}$$

Το emissions_{te} αφορά τις εκπομπές CO₂ ανα kWh ενέργειας, όπως αυτές προσδιορίζονται στον παρακάτω πίνακα, για τις διάφορες τεχνολογίες.

Καύσιμο	CO2 Emission (kgCO ₂ / kWh)
coal	0,37
gas	0,23
municipal waste	0,7

Το taxCO₂ αντιπροσωπεύει το φόρο που επιβάλλεται στο CO₂. (€ / kgCO₂)

Οι περιορισμοί του μοντέλου είναι οι εξής:

$$C_{te,t} = C_{te,o} + \sum_{\tau=1}^t INV_{te,\tau} - \sum_{\tau=1}^t phaseOut_{te,\tau} \quad \forall te, t \geq LT_{te}$$

$$\sum_l q_{l,te,t} \leq C_{te,t}, \quad \forall te, t$$

$$\sum_{te} (q_{l,te,t} \cdot P_{l,t}) = D_{l,t}^{ref}, \quad \forall l, t$$

$$q_{l,te,t} \geq 0, \quad \forall l, te, t$$

5.2.4 Οι αβέβαιες παράμετροι του μοντέλου

5.2.4.1 Ζήτηση Ηλεκτρικής Ενέργειας

Θεωρούμε την ακόλουθη καμπύλη ζήτησης ως ζήτηση αναφοράς για τα επόμενα 20 χρόνια:

$$D_t^{ref} = 70 \cdot 10^9 \cdot e^{0,1+t \cdot 0,04}, \quad t > 1$$

Θεωρούμε ότι θα υπάρχει κάθε έτος μια επιπρόσθετη ζήτηση σε σχέση με την πρόβλεψη μας, με τιμή *growth*. Η παράμετρος *growth* είναι η πρώτη μεταβλητή αβεβαιότητας του προβλήματος μας.

Οπότε:

$$D_t = D_t^{ref} + growth \cdot t, \quad t > 1$$

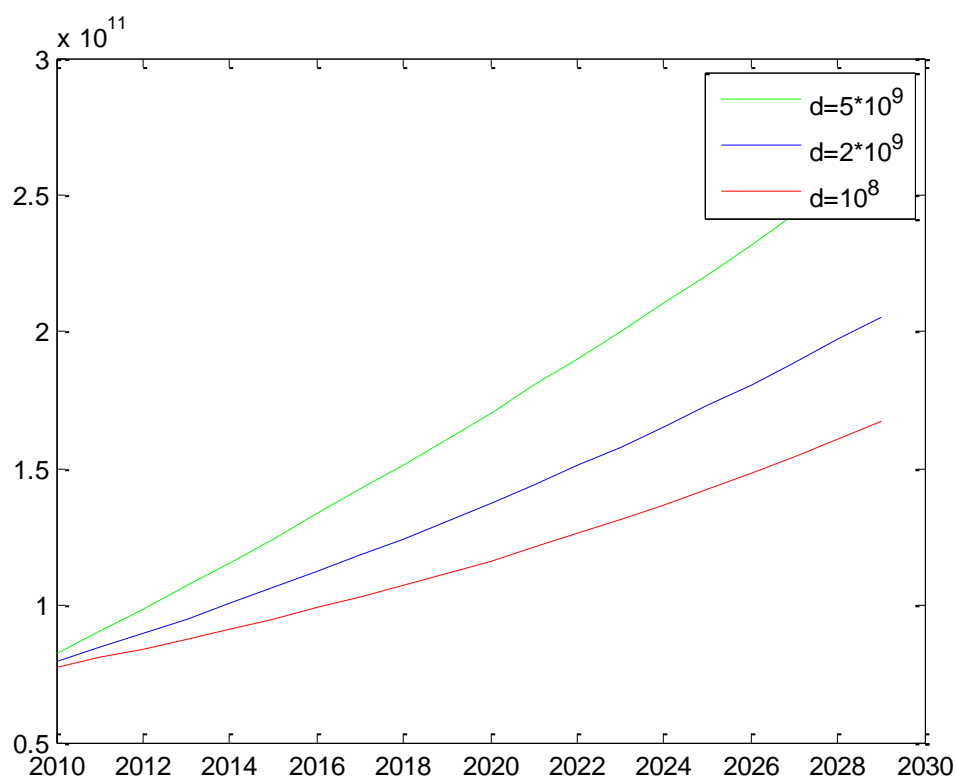
όπου:

$$10^8 \leq growth \leq 5 \cdot 10^9 \text{ σε kWh}$$

Ο αντίστοιχος κώδικας του Matlab ακολουθεί:

```
D10=70*10^9*exp([0.1:0.04:1]);  
Dl=D10+[1:1:Y]*z(1);  
rome_constraint(z(1)<=5*10^9);  
rome_constraint(z(1)>=10^8);
```

Οι ανωτέρω σχέσεις οδηγούν στις καμπύλες ζήτησης που απεικονίζονται στο παρακάτω διάγραμμα:



5.2.4.2 Κόστος επένδυσης σε νέες τεχνολογίες

Το έτος 2010 θεωρούμε ότι το επενδυτικό κόστος $SC_{te,o}$ δίνεται από τον παρακάτω πίνακα:

Τύποι εργοστασίων παραγωγής ενέργειας	Αρχικό επενδυτικό κόστος (€/KW)
Conventional coal	1229
Pulverised coal (USC)	1244
Pulverised coal (USC-CO ₂ seq)	2142
Coal gasification Combined Cycle (IGCC)	1286
Coal gasification Combined Cycle (IGCC-CO ₂ seq)	2250
Simple Cycle gas turbine	349
NGCC power plant	477
NGCC power plant - CO ₂ seq	822

Τύποι εργοστασίων παραγωγής ενέργειας	Αρχικό επενδυτικό κόστος (€/KW)
Wind turbine onshore at seaside	934
Wind turbine offshore	1682
Municipal waste incinerator	1229

Κάθε έτος θεωρούμε ότι το επενδυτικό κόστος μειώνεται κατά ένα ποσοστό $learn$ επί του αρχικού επενδυτικού κόστους, λόγω εξέλιξης της τεχνολογίας.

Το $SC_{te,t}$ (επενδυτικό κόστος το έτος t) μπορεί να γραφεί ως :

$$SC_{te,t} = SC_{te,t-1} - learn \cdot SC_{te,0}$$

όπου το $0.001 \leq learn \leq 0.01$, είναι η δεύτερη παράμετρος αβεβαιότητας του προβλήματος

5.3 Το προγραμματιστικό μοντέλο στο περιβάλλον του ROME

Τα ανωτέρω σενάρια των διαφόρων πολιτικών, συμπεριλαμβανομένων και των αβεβαιοτήτων του προβλήματος, υλοποιήθηκαν στο Matlab με χρήση των συναρτήσεων εύρωστης βελτιστοποίησης του προγραμματιστικού περιβάλλοντος του ROME. Ο κώδικας του προγράμματος ακολουθεί, με τα απαραίτητα σχόλια.

5.3.1 Τα ενεργειακά μοντέλα για τα τρία σενάρια, θεωρώντας αβέβαιη τη ζήτηση

```
% Εισαγωγή Δεδομένων

% l=1 φορτίο αιχμής

Y=20;           %years
te=11;         %different technologies

P1=1000;       % ώρες τύπου ζήτησης
h_op=8760;

dh=5*10^9;
dl=10^8;
dstep=10^8;

D10=70*10^9*exp([0.1:0.04:50]);
D10=D10(1:Y);
plot([2010:1:2010+Y-1],D10+[1:1:Y]*4.35*10^9,'b',[2010:1:2010+Y-1],D10+[1:1:Y]*dh,'r',[2010:1:2010+Y-1],D10+[1:1:Y]*dl,'g')

technologies=xlsread('multiperiodfull.xls','technologies');

n=xlsread('multiperiodfull.xls','performance','B2:AP12')'/100;
n=n(1:Y,:);
life=technologies(:,2)';
INVC=technologies(:,7)';
OC=technologies(:,8)'/277;
FC=technologies(:,9)'/277;
LT=technologies(:,10)';
C0=technologies(:,11) '*10^6;
co2em=technologies(:,12)';

SC= repmat(INVC,Y,1);
FC= repmat(FC,Y,1);
FCn=FC./n;
annualrate=(1.05*ones(1,Y)).^[1:1:Y];

phaseout=zeros(te,Y);
```



```
for i=[1,6,7,9,11];
phaseout(i,life(i))=C0(i);
end

% % % % % % % % Ενεργειακό Μοντέλο για το Ονομαστικό Σενάριο % % % %
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
% %

rome_begin ; % Set up ROME Environment
h = rome_model ('multiperiod model'); % Create Rome Model

% Δήλωση μεταβλητών
newvar z uncertain;

q = newvar(te,Y,z, 'linearrule','nonneg');
INV = newvar(te,Y,z, 'linearrule','nonneg');

% Αντικειμενική Συνάρτηση
rome_minimize(sum((Pl*OC*q+ Pl*sum(FCn'.*q) +
sum(SC'.*INV))./annualrate));

% Περιορισμοί
rome_constraint(q(:,1)<=C0');

for t=2:Y
    rome_constraint(q(:,t)<=C0'+sum(INV(:,1:t),2)-
sum(phaseout(:,1:t),2));
end

Dl=Dl0+[1:1:Y]*z;

rome_constraint(Pl*sum(q)==Dl);

rome_constraint(z<=dh);
rome_constraint(z>=dl);

% Επίλυση
h. solve('MOSEK') ;
x_val = h. eval (q);
y_val = h. eval (INV);
z=h.objective
df=h.eval(sum((Pl*OC*q+ Pl*sum(FCn'.*q) +
sum(SC'.*INV))./annualrate))
em=h.eval(co2em*sum(q,2)*Pl*10^-3)

rome_end ; % Clear up ROME environment

% % % Ενεργειακό Μοντέλο για το Σενάριο Φορολόγησης των Εκπομπών % %
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
% %

rome_begin ; % Set up ROME Environment
h = rome_model ('multiperiod model'); % Create Rome Model

newvar z uncertain;
```

```
% Δήλωση μεταβλητών
q = newvar(te,Y,z, 'linearrule','nonneg');
INV = newvar(te,Y,z, 'linearrule','nonneg');

euro_per_tco2=80;
% Αντικειμενική Συνάρτηση
rome_minimize(sum((P1*OC*q+ P1*sum(FCn'.*q) +
sum(SC'.*INV)+euro_per_tco2*co2em*10^-3*q*P1)./annualrate));

% Περιορισμοί
rome_constraint(q(:,1)<=C0');

for t=2:Y
    rome_constraint(q(:,t)<=C0'+sum(INV(:,1:t),2) -
sum(phaseout(:,1:t),2));
end

Dl=Dl0+[1:1:Y]*z;
rome_constraint(P1*sum(q)==Dl);

rome_constraint(z<=dh);
rome_constraint(z>=dl);

% Επίλυση
h. solve('MOSEK') ;
x_val = h. eval (q);
y_val = h. eval (INV);

emtax=h.eval (co2em*sum(q,2)*P1*10^-3)

rome_end ; % Clear up ROME environment

% % % % Ενεργειακό Μοντέλο για το Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειων % % %
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
%

rome_begin ; % Set up ROME Environment
h = rome_model ('multiperiod model'); % Create Rome Model

newvar z uncertain;

% Δήλωση μεταβλητών
q = newvar(te,Y,z, 'linearrule','nonneg');
INV = newvar(te,Y,z, 'linearrule','nonneg');

% Αντικειμενική Συνάρτηση
rome_minimize(sum((P1*OC*q+ P1*sum(FCn'.*q) +
sum(SC'.*INV)).)/annualrate));

% Περιορισμοί
rome_constraint(q(:,1)<=C0');

total tco2 allowance=4*10^8;
```

```

rome_constraint (sum (co2em*10-3*q*P1)<=total_tco2_allowance);

for t=2:Y
    rome_constraint (q (:, t)<=C0'+sum (INV (:, 1:t), 2) -
    sum (phaseout (:, 1:t), 2));
end

Dl=Dl0+[1:1:Y]*z;
rome_constraint (P1*sum (q)==Dl);

rome_constraint (z<=dh);
rome_constraint (z>=dl);

% Επίλυση
h. solve ('MOSEK') ;
x_val = h. eval (q);
y_val = h. eval (INV);

emets=h.eval (co2em*sum (q, 2) *P1*10-3)

rome_end ;                % Clear up ROME environment

% Απεικόνιση Αποτελεσμάτων
vectorize_flag=true;
figure,plot ([dl:dstep:dh], em.insert ([dl:dstep:dh],vectorize_flag), 'r'
, [dl:dstep:dh], emtax.insert ([dl:dstep:dh],vectorize_flag), 'g', [dl:dst
ep:dh], emets.insert ([dl:dstep:dh],vectorize_flag), 'b');
ylabel ('Total CO2 emissions over 40 years (tCO2)');
xlabel ('annual increase of demand');
legend ('no policy', 'CO2 taxation', 'EU ETS');

```

5.3.2 Τα ενεργειακά μοντέλα για τα τρία σενάρια, θεωρώντας αβέβαιη τη ζήτηση και το ρυθμό μείωσης του επενδυτικού κόστους

```

% % % Ενεργειακό Μοντέλο για το Σενάριο Φορολόγησης των Εκπομπών % %
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %

rome_begin ;                % Set up ROME Environment
h = rome_model ('multiperiod model'); % Create Rome Model

% Δήλωση μεταβλητών
newvar z (2) uncertain;
q = newvar (te, Y, z, 'linearrule', 'nonneg');
INV = newvar (te, Y, z, 'linearrule', 'nonneg');

SC=SC0-SC0.* (z (2) *repmat ([1:1:Y], te, 1))';

```

```
euro_per_tco2=80;

% Αντικειμενική Συνάρτηση
rome_minimize (sum((Pl*OC*q+ Pl*sum(FCn'.*q) +
sum(SC'.*INV)+euro_per_tco2*co2em*10^-3*q*Pl)./annualrate));

% Περιορισμοί
rome_constraint (q(:,1)<=C0');

for t=2:Y
    rome_constraint (q(:,t)<=C0'+sum(INV(:,1:t),2) -
sum(phaseout(:,1:t),2));
end

Dl=Dl0+[1:1:Y]*z(1);
rome_constraint (Pl*sum(q)==Dl);

rome_constraint (z(1)<=dh);
rome_constraint (z(1)>=dl);

rome_constraint (z(2)<=lrh);
rome_constraint (z(2)>=lrl);

% Επίλυση
h. solve('MOSEK') ;
x_val = h. eval (q);
y_val = h. eval (INV);

costtax=h.eval (sum((Pl*OC*q+ Pl*sum(FCn'.*q) +
sum(SC'.*INV)+euro_per_tco2*co2em*10^-3*q*Pl)./annualrate))
emtax=h.eval (co2em*sum(q,2)*Pl*10^-3);

rome_end ;

% Clear up ROME environment

% % % % Ενεργειακό Μοντέλο για το Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειων % % %
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %
% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % %

rome_begin ;
h = rome_model ('multiperiod model');

% Δήλωση μεταβλητών
newvar z(2) uncertain;
q = newvar(te,Y,z, 'linearrule','nonneg');
INV = newvar(te,Y,z, 'linearrule','nonneg');

SC=SC0-SC0.*(z(2)*repmat([1:1:Y],te,1))';

% Αντικειμενική Συνάρτηση
rome_minimize (sum((Pl*OC*q+ Pl*sum(FCn'.*q) +
sum(SC'.*INV))./annualrate));

% Περιορισμοί
rome_constraint (q(:,1)<=C0');

total_tco2_allowance=4*10^8;
```

```
rome_constraint (sum (co2em*10^-3*q*Pl)<=total_tco2_allowance);

for t=2:Y
    rome_constraint (q(:,t)<=C0'+sum (INV(:,1:t),2)-
sum (phaseout(:,1:t),2));
end

Dl=Dl0+[1:1:Y]*z(1);
rome_constraint (Pl*sum (q)==Dl);

rome_constraint (z(1)<=dh);
rome_constraint (z(1)>=dl);

rome_constraint (z(2)<=lrh);
rome_constraint (z(2)>=lrl);

% Επίλυση
h. solve('MOSEK') ;
x_val = h. eval (q);
y_val = h. eval (INV);

costets=h.eval (sum ((Pl*OC*q+ Pl*sum (FCn' .*q) +
sum (SC' .*INV) ) ./annualrate))
emets=h.eval (co2em*sum (q,2) *Pl*10^-3);

rome_end ; % Clear up ROME environment

% Απεικόνιση Αποτελεσμάτων
vectorize_flag=true;

ii=0;
jj=0;
for lr=lrl:lrstep:lrh
    ii=ii+1;
    jj=0;
    for d=dl:dstep:dh
        jj=jj+1;
        policy(ii,jj)=costtax.insert ([d
lr],vectorize_flag)>costets.insert ([d lr],vectorize_flag);
    end
end

[x,y] = meshgrid(lrl:lrstep:lrh,dl:dstep:dh);

surf(x,y,(policy*50)')
xlabel('learning rate');
ylabel('increase in demand');
```

Κεφάλαιο 6

Αποτελέσματα Προσομοίωσης και Συμπεράσματα

6.1 Καθορισμός των χαρακτηριστικών των πολιτικών ‘Φορολόγηση Εκπομπών’ και ‘Εμπορία Δικαιωμάτων’

Για να προχωρήσουμε στην προσομοίωση σεναρίων πρέπει να καθορίσουμε σαφώς τις υπό σύγκριση πολιτικές. Συγκεκριμένα πρέπει να υπολογίσουμε την τιμή του φόρου για την ‘Φορολόγηση Εκπομπών’ και το άνω όριο εκπομπών για την ‘Εμπορία Δικαιωμάτων’, που καθιστούν τις δύο πολιτικές ισοδύναμες, έστω και υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

Θεωρώντας ζήτηση ίση με:

$$D_t = 70 \cdot 10^9 \cdot e^{0,1+t \cdot 0,04} + 10^9 \cdot t \quad , \quad t > 1$$

και καμία μείωση του επενδυτικού κόστους θα συγκρίνουμε τις ακόλουθες πολιτικές:

A) Περιορισμός των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (*emissions cap and trade*)

Στο μοντέλο της αγοράς ενέργειας εισάγουμε τον περιορισμό :

$$\sum_{ie} (q_{l,ie,t} \cdot emissions_{ie}) \leq Permits_t, \quad \forall l, t$$

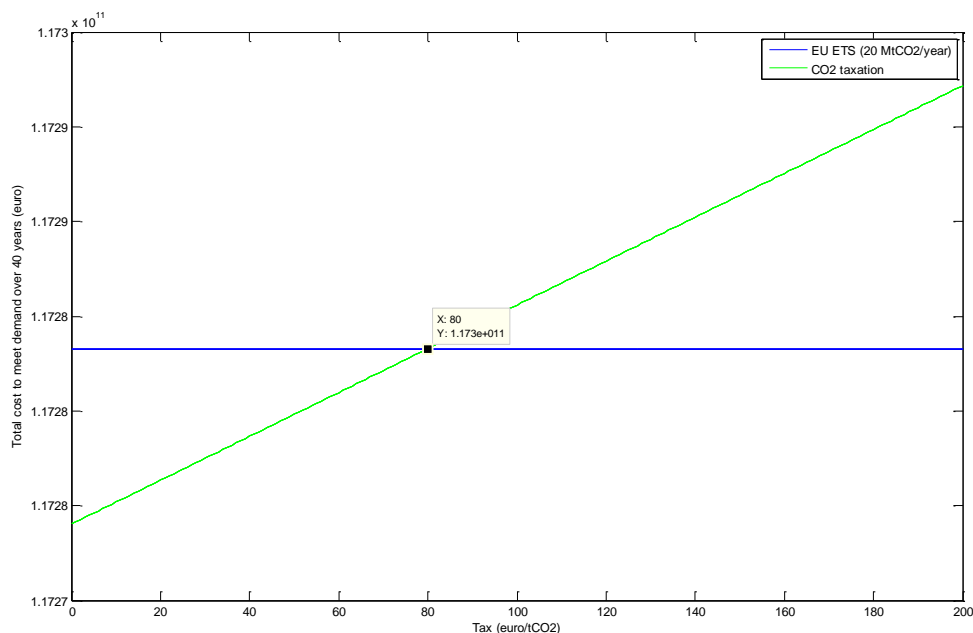
Όπου $Permits_t = 400 \text{ MtCO}_2$, τιμή η οποία αντιστοιχεί στο σύνολο των εμπορεύσιμων αδειών που δίνονται στην αγορά αθροιστικά για όλα τα έτη και ισοδυναμεί με 20 MtCO₂ ανά έτος.

B) Φορολόγηση εκπομπών (*CO₂ tax*)

Στην αντικειμενική συνάρτηση προστίθεται ο όρος:

$$taxCO_2 \cdot \sum_l \sum_{ie} (emissions_{ie} \cdot q_{l,ie,t} \cdot P_{l,t})$$

Η μεταβλητή $taxCO_2$ αντιστοιχεί στον φόρο εκπομπών, θεωρείται αβέβαιη στο μοντέλο μας και υπολογίζεται σε €/tCO₂



Σχήμα1: Καθορισμός του επιπέδου του φόρου που καθιστά τις δυο πολιτικές ισοδύναμες ως προς το κόστος κάλυψης της ενεργειακής ζήτησης.

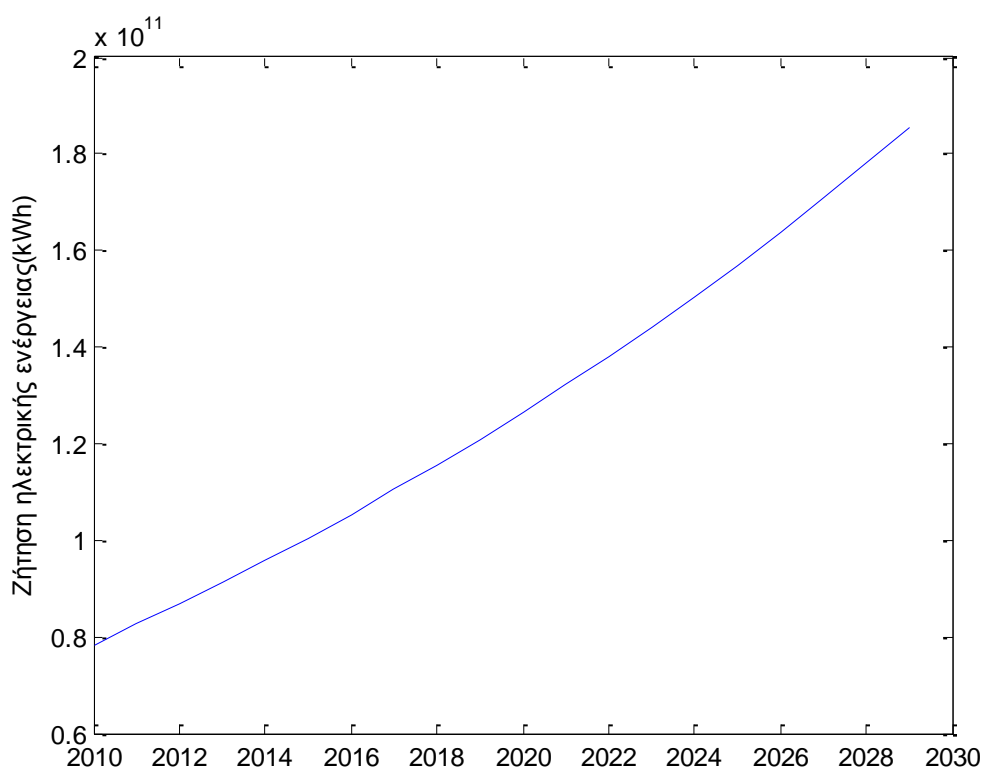
Με βάση το ανωτέρω διάγραμμα καταλήγουμε ότι η πολιτική Α με $Permits_t = 400 MtCO_2$ είναι ισοδύναμη με την πολιτική Β με $taxCO_2 = 80 \text{ €/tCO}_2$.

6.2 Προσομοίωση των τριών σεναρίων χωρίς αβεβαιότητες

Θεωρώντας ζήτηση για τα επόμενα χρόνια που προσδιορίζεται από την σχέση:

$$D_t = 70 \cdot 10^9 \cdot e^{0,1+t \cdot 0,04} + 10^9 \cdot t \quad , \quad t > 1$$

Έχουμε την παρακάτω καμπύλη ζήτησης:

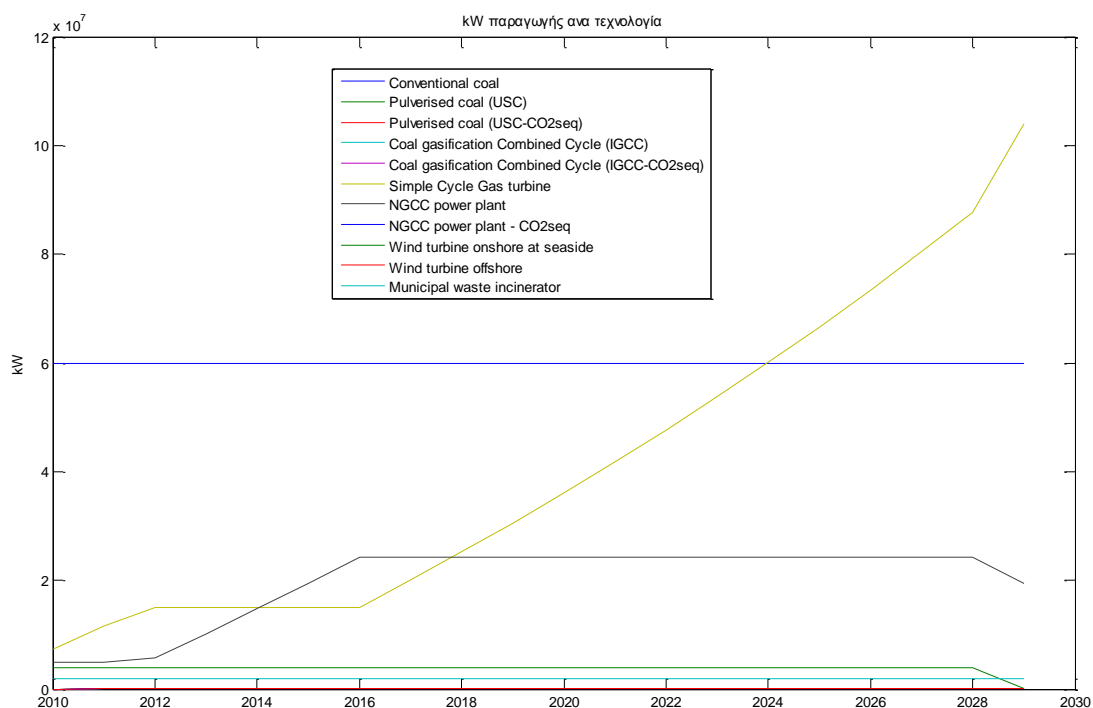


Σχήμα 2: Καμπύλη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για τα επόμενα 20 έτη

Για την κάλυψη της παραπάνω ζήτησης θα θεωρήσουμε τρία διαφορετικά σενάρια.

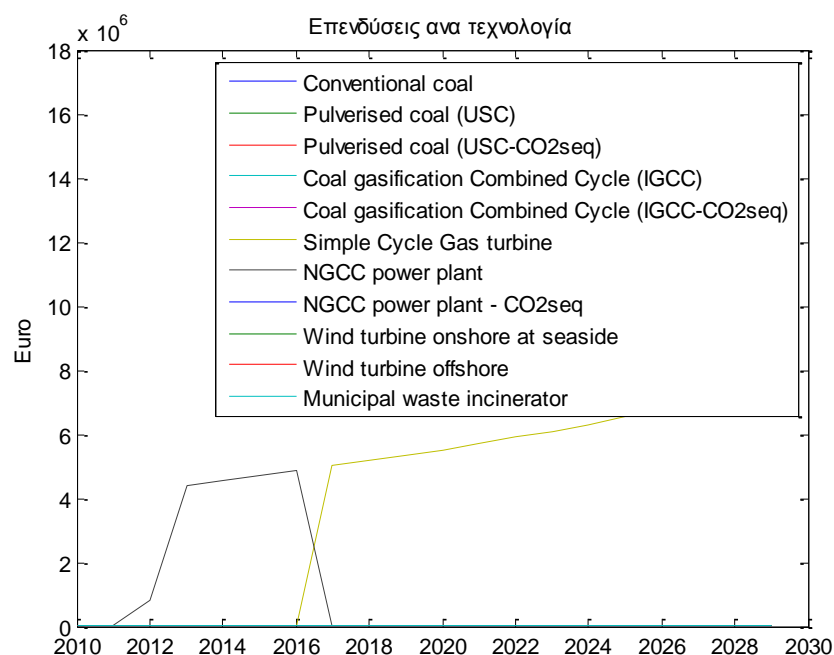
4) Ονομαστικό σενάριο (*Business as Usual*)

Στο ονομαστικό σενάριο υποθέτουμε ότι δεν θα εφαρμοστεί καμία πολιτική μείωσης των εκπομπών του CO₂. Η κατανομή της παραγωγής των διαφόρων τεχνολογιών διαμορφώνεται ως εξής:



Σχήμα 3: kW παραγωγής ανά τεχνολογία στο ονομαστικό σενάριο

Οι αντίστοιχες επενδύσεις διαμορφώνονται ως εξής:



Σχήμα 4: Επενδύσεις ανά τεχνολογία στο ονομαστικό σενάριο

Παρατηρούμε ότι δεν δίνεται κάποιο οικονομικό κίνητρο στους παραγωγούς ηλεκτρικής ενέργειας για να στραφούν σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Κατά συνέπεια δεν γίνονται επενδύσεις σε αυτόν τον τομέα και η παραγωγή ενέργειας από Ανεμογεννήτριες παραμένει σταθερή στα 4GW, όση ήταν και το έτος 2010.

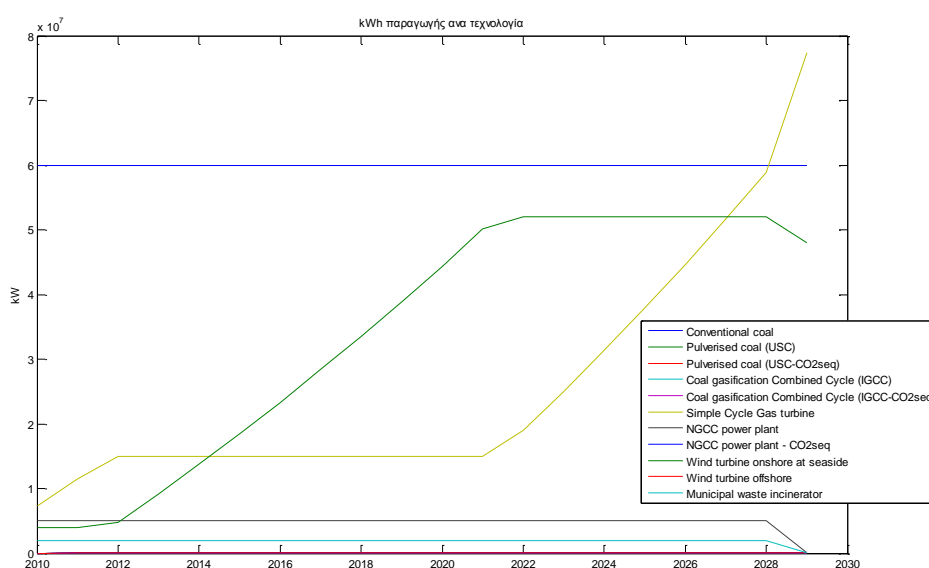
Η επιπλέον ζήτηση που δημιουργείται καλύπτεται από επενδύσεις σε τεχνολογίες που χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη το φυσικό αέριο. Συγκεκριμένα για τα έτη 2011-2017 πραγματοποιούνται επενδύσεις στην τεχνολογία NGCC (Natural Gas Combined Cycle), ενώ τα έτη 2017-2030 πραγματοποιούνται επενδύσεις στην τεχνολογία Simple Cycle Gas Turbine.

5) Σενάριο με περιορισμό των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (*emissions cap and trade*)

Στο σενάριο με περιορισμό των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (*emissions cap and trade*) υποθέτουμε ότι επιβάλλεται ένα άνω όριο στους παραγωγούς για τις συνολικές εκπομπές CO₂. Στην προσομοίωσή μας υποθέσαμε άνω όριο εκπομπών 400 MtCO₂ αθροιστικά για όλα τα έτη, τιμή που αντιστοιχεί σε 20 MtCO₂ ανά έτος. Έτσι στους περιορισμούς του μοντέλου προστίθεται και ο ακόλουθος:

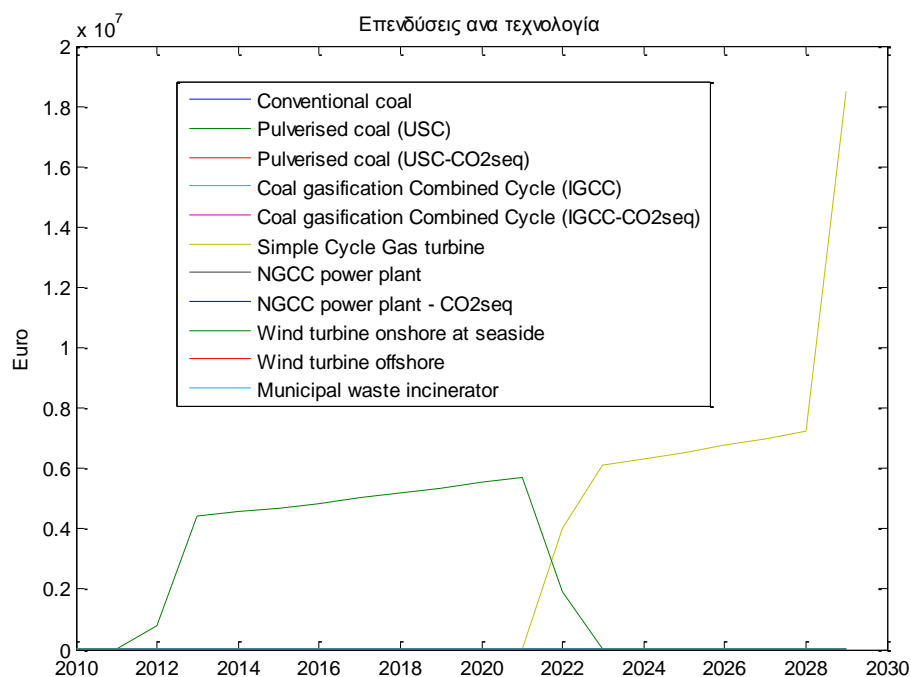
$$\sum_{te} (q_{l,te,t} \cdot emissions_{te}) \leq 400 \text{ MtCO}_2$$

Η κατανομή της παραγωγής των διαφόρων τεχνολογιών διαμορφώνεται ως εξής:



Σχήμα 5: kW παραγωγής ανά τεχνολογία στο σενάριο με περιορισμό των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (*emissions cap and trade*)

Οι αντίστοιχες επενδύσεις διαμορφώνονται ως εξής:



Σχήμα 6: Επενδύσεις ανά τεχνολογία στο σενάριο με περιορισμό των εκπομπών CO₂ και εμπορία δικαιωμάτων (emissions cap and trade)

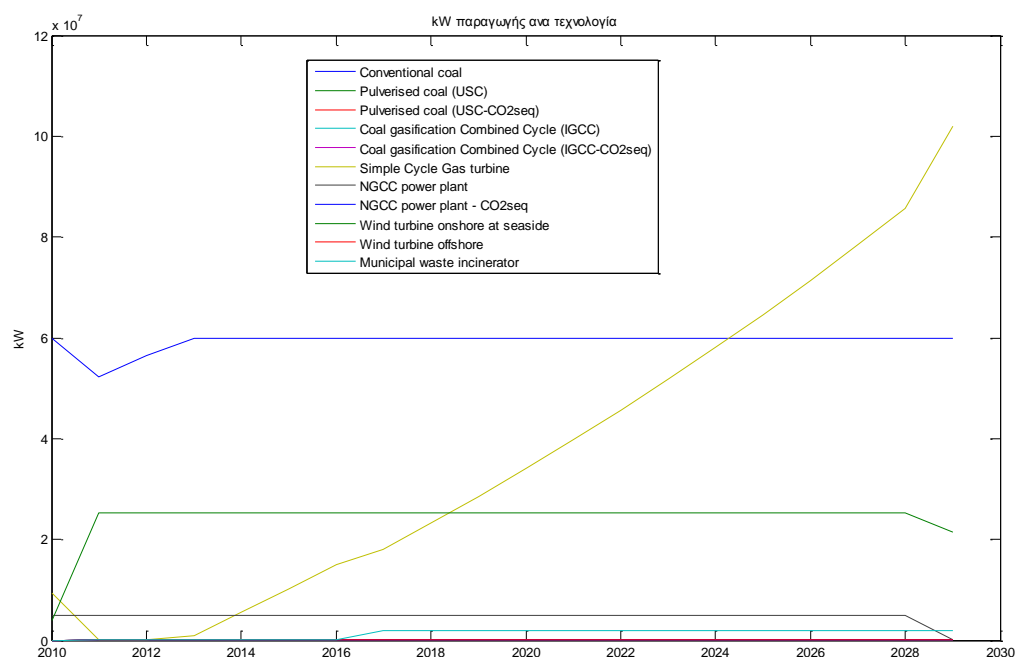
Από τα ανωτέρω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι το Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών (ETS) δίνει ισχυρά κίνητρα για επενδύσεις σε Ανεμογεννήτριες αντί για επενδύσεις σε εργοστάσια φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου, οι οποίες μάλιστα πραγματοποιούνται τα πρώτα χρόνια της προσομοίωσης. Επειδή υπάρχει συγκεκριμένο όριο εκπομπών οι παραγωγοί επιλέγουν να πραγματοποιήσουν την επένδυση που θα απαιτηθεί στις ανεμογεννήτριες όσο το δυνατόν γρηγορότερα ώστε να επωφεληθούν από το χαμηλό μεταβλητό κόστος λειτουργίας τους.

<i>Τύπος εργοστασίου</i>	<i>Λειτουργικό κόστος</i>
Εργοστάσιο Υγραερίου Απλού Κύκλου	0,526 €/GJ
Χερσαία Ανεμογεννήτρια	0,278 €/GJ

Η επιπλέον ζήτηση που εμφανίζεται τα επόμενα χρόνια θα καλυφθεί από επενδύσεις σε εργοστάσια Υγραερίου Απλού Κύκλου

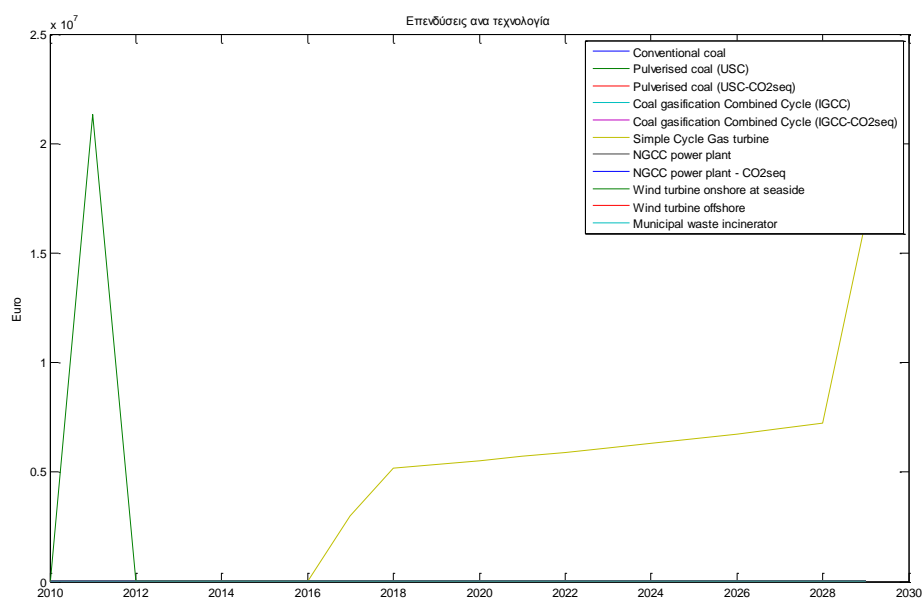
6) Σενάριο φορολόγησης εκπομπών (CO₂ tax)

Στο σενάριο φορολόγησης εκπομπών (CO₂ tax) υποθέτουμε ότι επιβάλλεται φόρος 80 €/tCO₂ στις εκπομπές του CO₂. Η κατανομή της παραγωγής των διαφόρων τεχνολογιών διαμορφώνεται ως εξής:



Σχήμα 7: kW παραγωγής ανά τεχνολογία στο σενάριο φορολόγησης εκπομπών (CO₂ tax)

Οι αντίστοιχες επενδύσεις διαμορφώνονται ως εξής:



Σχήμα 8: Επενδύσεις ανά τεχνολογία στο σενάριο φορολόγησης εκπομπών (CO₂ tax)

Με την επιβολή φόρου στις εκπομπές παρατηρούμε ότι τα πρώτα έτη (2010-2012) πραγματοποιούνται επενδύσεις σε ανεμογεννήτριες, όμως από το 2016 και μετά η αυξανόμενη ζήτηση καλύπτεται από εργοστάσιου υγραερίου απλού κύκλου, καθώς ο φόρος δεν είναι αρκετά υψηλός για να καταστήσει τις τεχνολογίες που δεν παράγουν CO₂ πιο συμφέρουσες.

6.3 Σύγκριση των πολιτικών υπό καθεστώς αβέβαιης ζήτησης

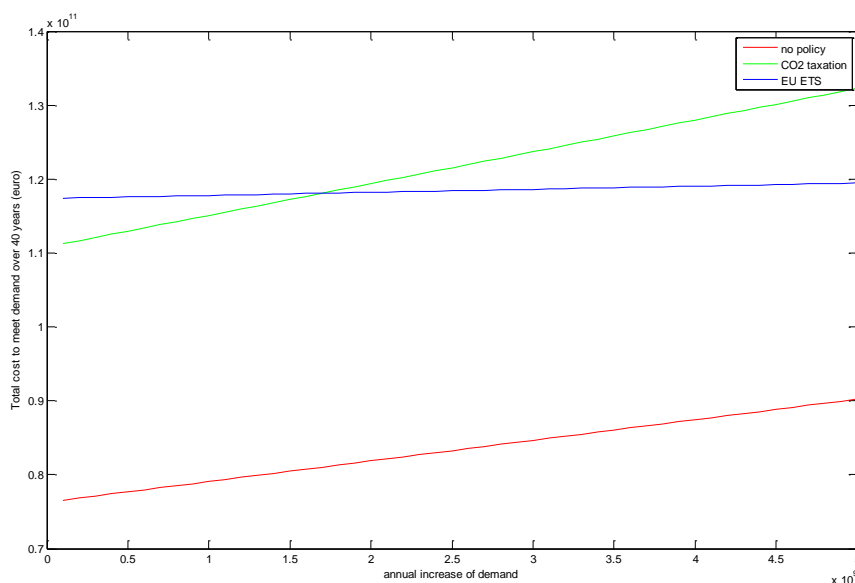
Θεωρούμε ότι η ζήτηση μας δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$D_t = 70 \cdot 10^9 \cdot e^{0,1+t \cdot 0,04} + growth \cdot t, \quad t > 1$$

όπου growth είναι η παράμετρος αβεβαιότητας, με τιμή:

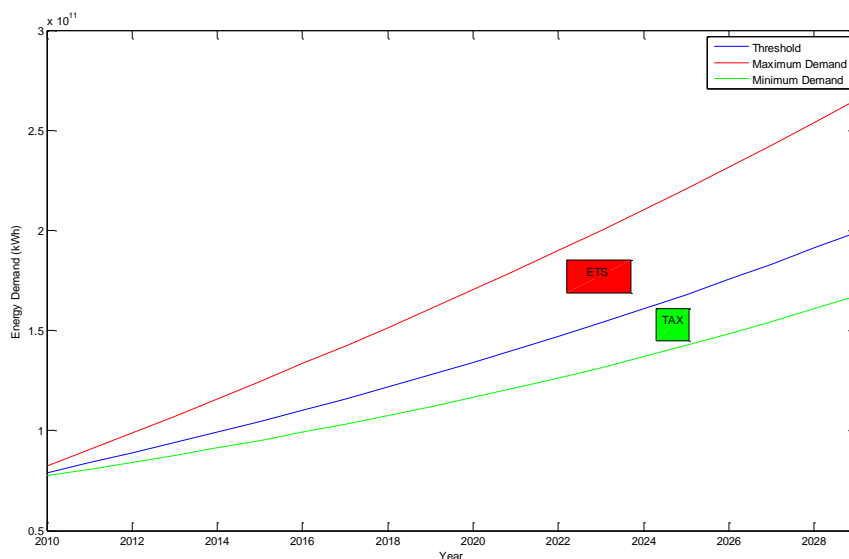
$$10^8 \leq growth \leq 5 \cdot 10^9 \text{ σε kWh}$$

6.3.1 Επιλογή πολιτικής ελαχίστου κόστους



Σχήμα 9: Συνολικό κόστος ανά πολιτική συναρτήσει της ζήτησης

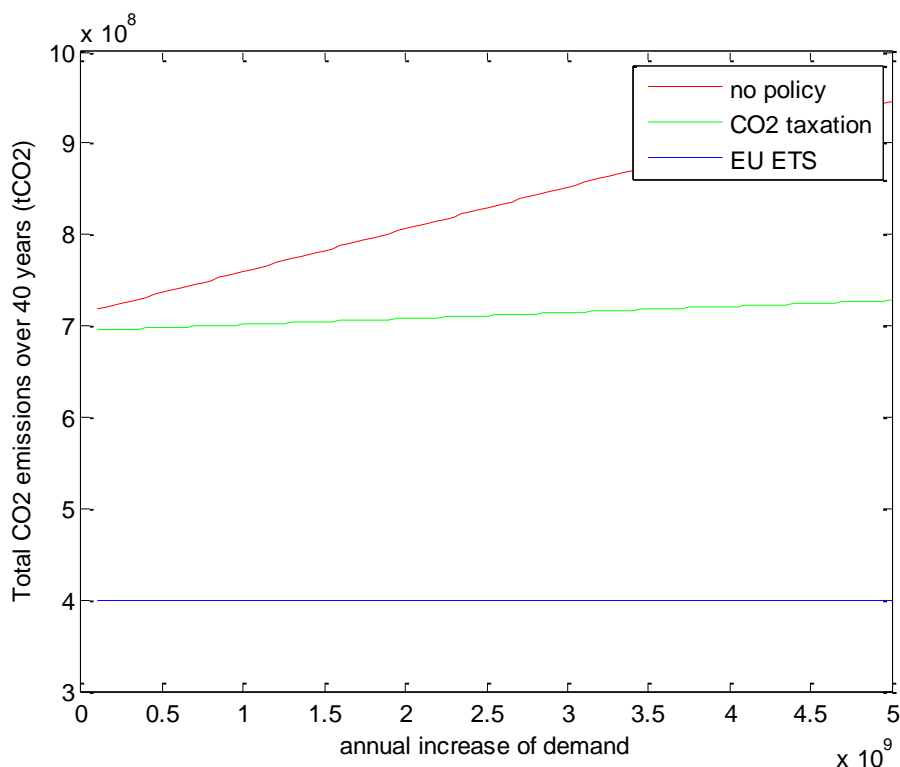
Από την ανωτέρω προσομοίωση παρατηρούμε ότι για τιμές της μεταβλητής growth μεγαλύτερες από $1,7 \cdot 10^9$ η πολιτική φορολόγησης παρουσιάζει μεγαλύτερο κόστος, καθιστώντας το Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών προτιμότερη επιλογή. Τα άνω και κάτω όρια της ζήτησης καθώς και το κατώφλι που διαχωρίζει τις δυο πολιτικές παρουσιάζονται στο σχήμα 10.



Σχήμα 10: Καθορισμός καμπύλης ζήτησης που καθιστά την μια πολιτική πιο ακριβή από την άλλη

6.3.2 Εκπομπές CO₂ και επενδύσεις για κάθε πολιτική

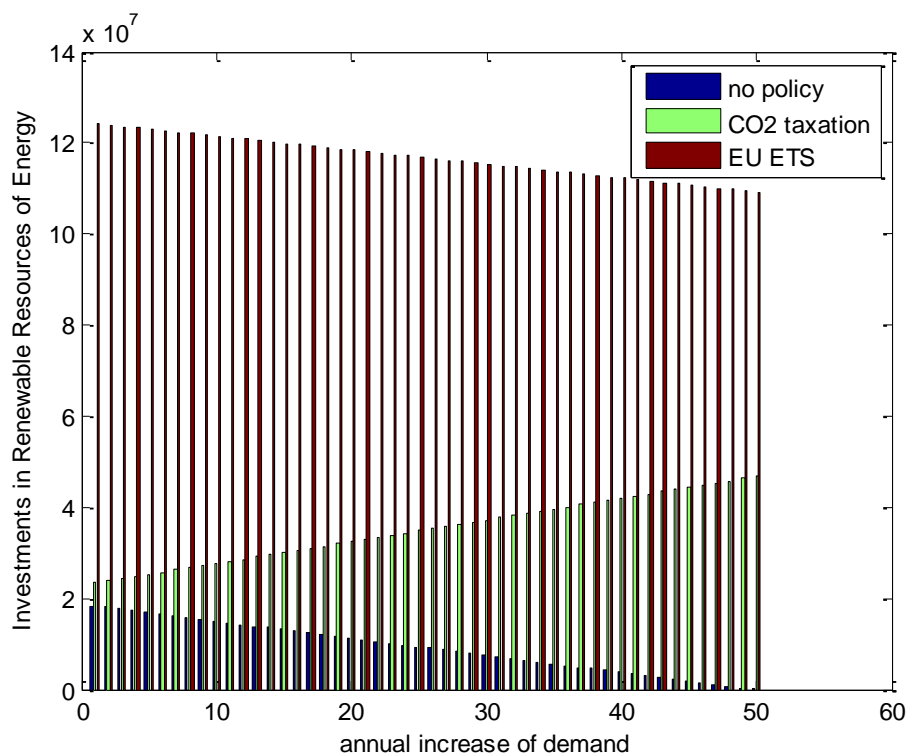
Εκτός από το κόστος των πολιτικών, σημαντική παράμετρο απόφασης αποτελεί και το σύνολο των εκπομπών του CO₂ που συνεπάγεται η εφαρμογή της κάθε πολιτικής. Από το σχήμα 11 παρατηρούμε ότι και οι δύο πολιτικές μείωσης εκπομπών επιτυγχάνουν τον στόχο τους, με το Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών όμως να οδηγεί σε σχεδόν τις μισές εκπομπές σε σχέση με τη Φορολόγηση των Εκπομπών. Σημαντικό πλεονέκτημα του Συστήματος Εμπορεύσιμων Αδειών αποτελεί η σιγουριά που παρέχει για το σύνολο των εκπομπών, ανεξάρτητα από τα επίπεδα της ζήτησης. Αντίθετα η Φορολόγηση των Εκπομπών οδηγεί σε αβέβαια επίπεδα εκπομπών.



Σχήμα 11: Συνολικές εκπομπές CO₂ για τις δύο πολιτικές, συναρτήσεως της ετήσιας αύξησης της ζήτησης.

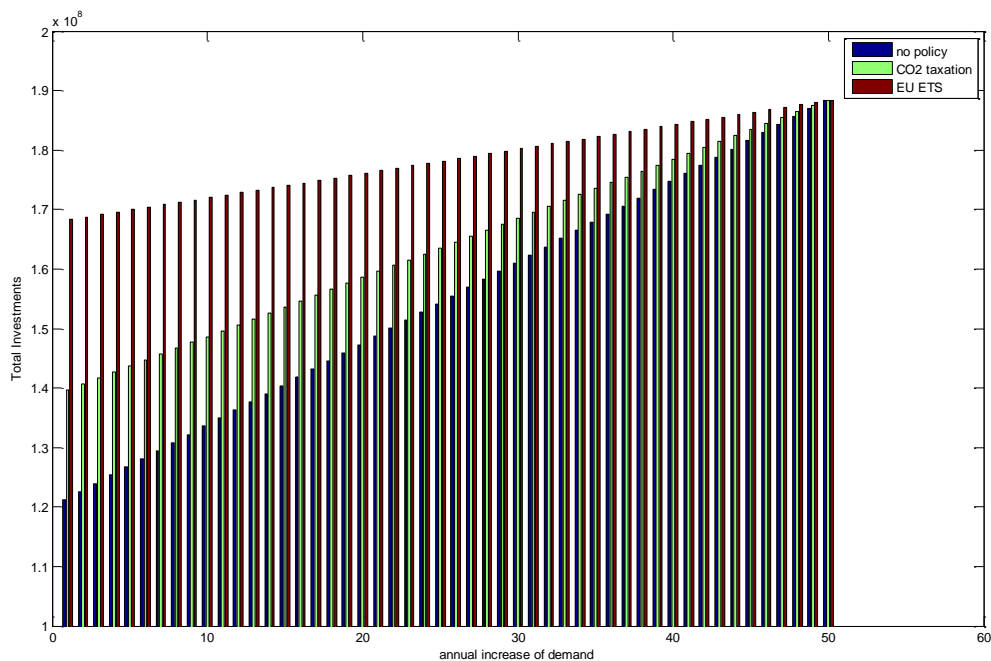
Επίσης παρατηρούμε ότι ενώ οι εκπομπές για χαμηλά επίπεδα ζήτησης είναι ίδιες στη Φορολόγηση των Εκπομπών και στο Ονομαστικό Σενάριο, ο ρυθμός αύξησής τους περιορίζεται στο ένα δέκατο όταν επιβληθεί φορολογία στις εκπομπές. Η επίδραση αυτή της Φορολόγησης των Εκπομπών αντικατοπτρίζεται στο σχήμα 12, όπου παρατηρούμε ότι ενώ η αύξηση της ζήτησης στο ονομαστικό σενάριο οδηγεί σε μείωση των επενδύσεων σε Α.Π.Ε., στο σενάριο της Φορολογίας οδηγεί σε αύξηση των επενδύσεων.

Τα χαμηλά επίπεδα εκπομπών που παρατηρούνται στο Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών αιτιολογούνται από τις υψηλές επενδύσεις σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (σχήμα 12). Ωστόσο ενώ στο Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών η αύξηση της ζήτησης οδηγεί σε αύξηση των επενδύσεων, οι επενδύσεις σε Α.Π.Ε. μειώνονται με την αύξηση της ζήτησης.



Σχήμα 12: Επενδύσεις σε Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας για τις δύο πολιτικές, συναρτήσει της ετήσιας αύξησης της ζήτησης.

Από το ύψος των συνολικών επενδύσεων (σχήμα 13) παρατηρούμε ότι για πολύ υψηλά επίπεδα ζήτησης και στα τρία σενάρια απαιτούνται υψηλές επενδύσεις για αύξηση της δυναμικότητας. Ωστόσο στο Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών οι παραγωγοί έχουν την δυνατότητα να ξοδέψουν περισσότερα χρήματα σε επενδύσεις, ενώ στο Σύστημα Φορολόγησης των Εκπομπών τα αντίστοιχα χρήματα καταλήγουν στο κράτος με τη μορφή φορολογίας.



Σχήμα 13: Επενδύσεις σε νέες εγκαταστάσεις για τις δύο πολιτικές, συναρτήσει της ετήσιας αύξησης της ζήτησης.

6.4 Σύγκριση των πολιτικών υπό καθεστώς αβέβαιης ζήτησης και αβέβαιης τεχνολογικής προόδου

Θεωρούμε την ακόλουθη καμπύλη ζήτησης:

$$D_t = 70 \cdot 10^9 \cdot e^{0,1+t \cdot 0,04} + growth \cdot t, \quad t > 0$$

όπου: $10^8 \leq growth \leq 15 \cdot 10^8$ σε kWh

Η παράμετρος growth είναι η πρώτη μεταβλητή αβεβαιότητας του προβλήματος μας.

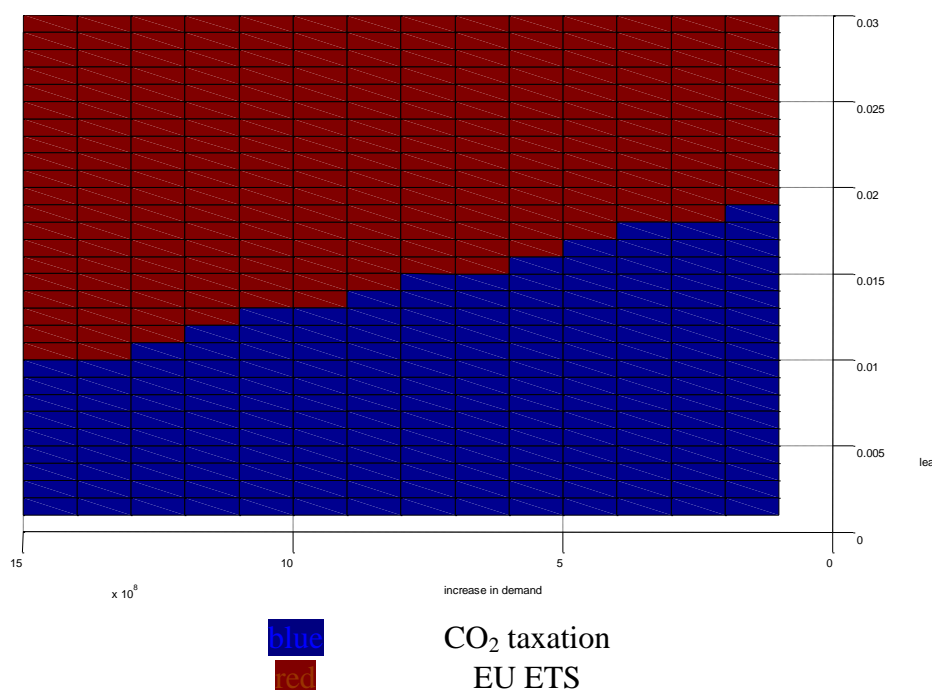
Το επενδυτικό κόστος το έτος t μπορεί να γραφεί ως :

$$SC_{te,t} = SC_{te,t-1} - learn \cdot SC_{te,0} \quad \text{για } t > 0$$

όπου: $0.001 \leq learn \leq 0.03$

Η παράμετρος learn είναι η δεύτερη παράμετρος αβεβαιότητας του προβλήματός μας.

Με βάση τις ανωτέρω συναρτήσεις ζήτησης και επενδυτικού κόστους μπορούμε να ελέγξουμε ποια πολιτική έχει το μικρότερο κόστος, μέσα στο εύρος των αβεβαιοτήτων. Από τη σύγκριση των δύο πολιτικών προκύπτει το παρακάτω διάγραμμα.

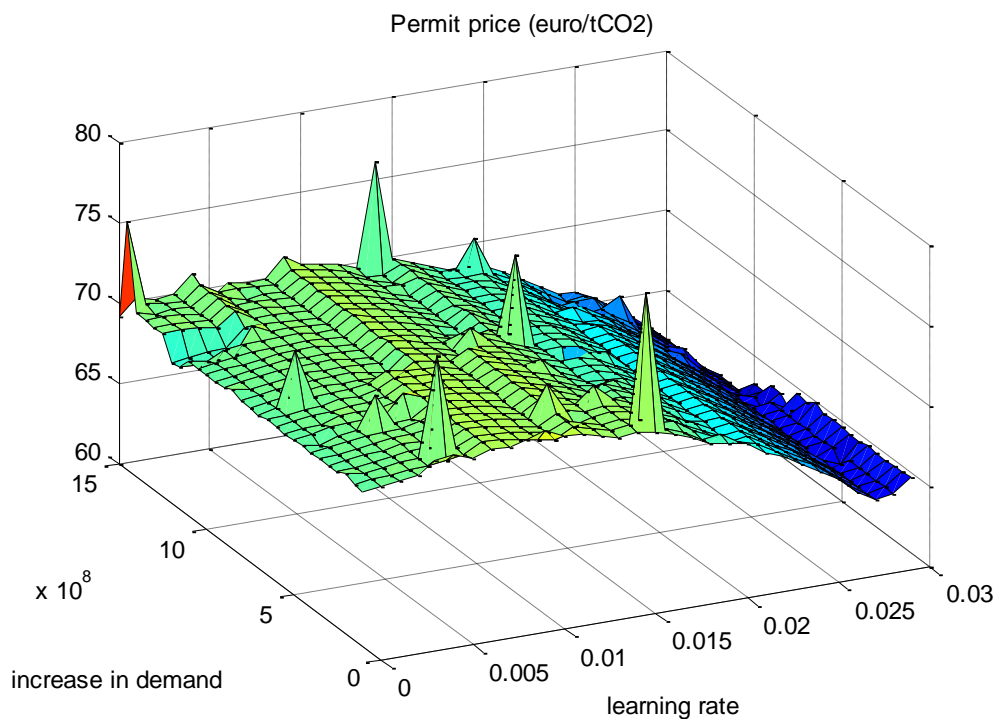


Σχήμα 14: Επιλογή της πολιτικής ελαχίστους κόστους για διάφορες τιμές αύξησης ζήτησης και τεχνολογικής προόδου

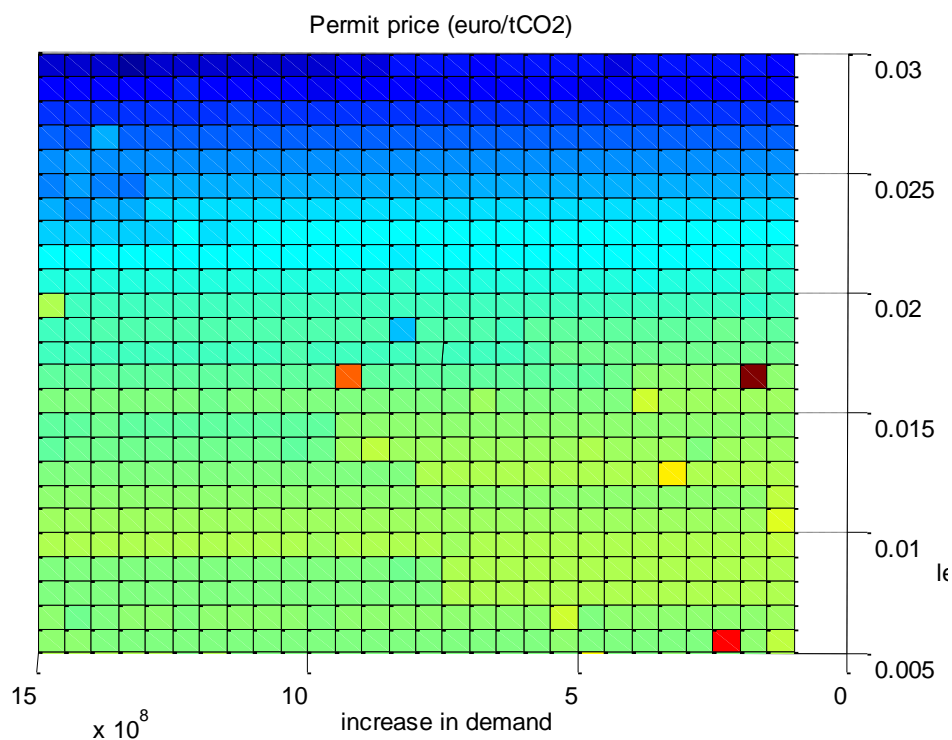
- Ο οριζόντιος άξονας αντιπροσωπεύει την ετήσια αύξηση της ζήτησης για τα επόμενα 20 χρόνια (μεταβλητή growth)
- Ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει την ετήσια μείωση του επενδυτικού κόστους για τα επόμενα 20 χρόνια (μεταβλητή learn)

Από το σχήμα 14 μπορούμε, κάνοντας μια πρόβλεψη για τη ζήτηση και μια για το επενδυτικό κόστος να επιλέξουμε την πολιτική ελαχίστους κόστους. Ωστόσο η πρόβλεψη αυτή λόγω του μεγάλου χρονικού ορίζοντα (20 έτη) είναι πολύ πιθανό να μην είναι ακριβής και στην πορεία τα νέα δεδομένα να δημιουργήσουν την ανάγκη αλλαγής πολιτικής.

Το κατώφλι του σχήματος 14 μπορεί να μας δώσει το σήμα για εναλλαγή πολιτικής, με τον υπολογισμό των τιμών των Εμπορεύσιμων Αδειών για κάθε πιθανό σενάριο. Ως τιμή μιας εμπορεύσιμης άδειας ορίζουμε την μείωση του συνολικού κόστους όταν διατεθεί στην αγορά μια επιπλέον άδεια. Οι τιμές των αδειών για το εύρος των αβεβαιοτήτων παρουσιάζονται στα σχήματα 15,16 .



Σχήμα 15: Τιμές αδειών (Τρισδιάστατη αναπαράσταση)



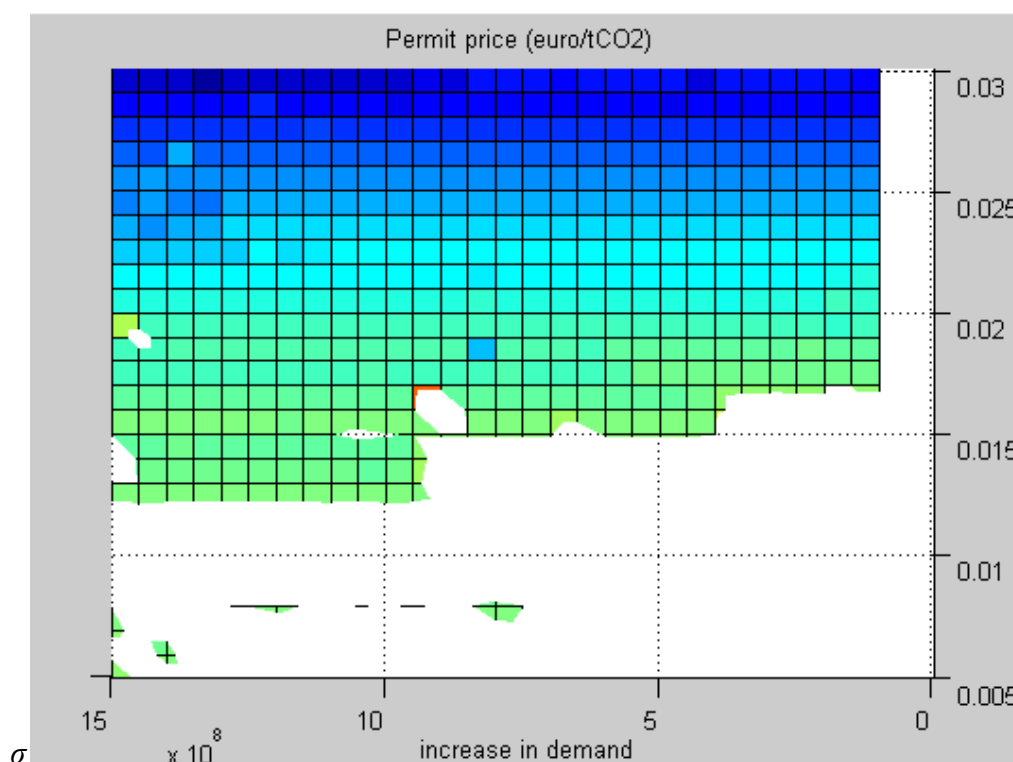
Σχήμα 16: Τιμές Αδειών (Δισδιάστατη αναπαράσταση)

Παρατηρούμε ότι το Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών έχει μικρότερο κόστος για τιμές αδειών μικρότερες από 70€/tCO₂, όπως παρουσιάζεται στο σχήμα 17. Όταν λοιπόν η τιμή των αδειών περάσει το κατώφλι των 70€/tCO₂, σημαίνει ότι πρέπει να γίνει εναλλαγή πολιτικής.

Για παράδειγμα έστω ότι το έτος 2010 προβλέπουμε ζήτηση για τα επόμενα είκοσι χρόνια, η οποία προκύπτει από τον τύπο:

$$D_t = 70 \cdot 10^9 \cdot e^{0,1+t \cdot 0,04} + 10^9 \cdot t, \quad t > 0$$

και ετήσια μείωση του επενδυτικού κόστους 2% για κάθε τεχνολογία. Από το σχήμα 14 οι τιμές αυτές δηλώνουν ότι το Σύστημα Εμπορεύσιμων Αδειών είναι η πολιτική με το μικρότερο κόστος. Από το σχήμα 15 βρίσκουμε ότι η τιμή μιας εμπορεύσιμης άδειας στην αγορά, με βάση την πρόβλεψη μας, είναι 68,885 €/tCO₂. Όσο η τιμή των εμπορεύσιμων αδειών διατηρείται κάτω από 70€/tCO₂ δεν υπάρχει ανάγκη αλλαγής πολιτικής. Όταν όμως η τιμή των εμπορεύσιμων αδειών περάσει το κατώφλι των 70€/tCO₂, πρέπει να αλλάξουμε πολιτική και να στραφούμε στην ανταγωνιστική πολιτική της Φορολόγησης των Εκπομπών.



Σχήμα 17: Τιμές αδειών κάτω από 70€/tCO₂

Βιβλιογραφία

- [1] Aharon Ben-Tal, Laurent El Ghaoui, Arkadi Nemirovski, Robust Optimization
- [2] A. Ben-Tal, A. Goryashko, E. Guslitzer, and A. Nemirovski. Adjustable robust solutions of uncertain linear programs. *Mathematical Programming*, 99:351 , 2004.
- [3] J. Zackova. On minimax solution of stochastic linear programming problems. 91:423 1966.
- [4] X. Chen, M. Sim, P. Sun, and J. Zhang. A linear decision-based approximation approach to stochastic programming. *Operations Research*, 56 : 344 , 2008.
- [5] X. Chen and Y. Zhang. Uncertain linear programs: Extended affinely adjustable robust counterparts. *Operations Research*, 2009.
- [6] Henry D. Jacoby and A. Denny Ellerman. The Safety Valve and Climate Policy , Report No. 83 , February [Revised: July] 2002
- [7] Ottmar Edenhofer, Robert Pietzcker, Matthias Kalkuhl, and Elmar Kriegler. Price and quantity regulation for reducing greenhouse gas emissions
- [8] Cédric Philibert. Certainty versus Ambition: Economic Efficiency in Mitigating Climate Change , October 2006
- [9] Valentina Bosetti, Alexander Golub, Anil Markandya, Emanuele Massetti, Massimo Tavoni. Abatement. Cost Uncertainty and Policy Instrument Selection. A Dynamic Analysis
- [10] William A. Pizer. Prices vs. Quantities Revisited: The Case of Climate Change
- [11] Martin L. Weitzman. *The Review of Economic Studies*, Vol. 41, No. 4 (Oct., 1974), pp. 477-49
- [12] Roberts, Marc J. & Spence, Michael, 1976. "Effluent charges and licenses under uncertainty," *Journal of Public Economics*, Elsevier, vol. 5(3-4), pages 193-208
- [13] Richard Loulou, Maryse Labriet. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model , 24 February 2007.
- [14] Dr David Harrison, Steve Sorrell, Daniel Radov, Per Klevnas, Andrew Foss, members of NERA Consulting. Interactions of the EU ETS with Green And White Certificate Schemes. 17 November 2005.
- [15] Robert J. Lempert, David G. Groves, Steven W. Popper, Steve C. Bankes. A General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios. *MANAGEMENT SCIENCE* Vol. 52, No. 4, April 2006, pp. 514–528.
- [16] G. Davis Golden, B. Owens. Optimizing the Level of Renewable Electric R&D Expenditures Using Real Options Analysis. February 2003.
- [17] Patrícia Fortes, Júlia Seixas, Sofia Simões, João Cleto. Long Term Energy Scenarios under Uncertainty. IEEE.
- [18] Steve Sorrell, David Harrison, Daniel Radov, Per Klevnas, Andrew Foss. White certificate schemes: Economic analysis and interactions with the EU ETS. 2009.
- [19] Papadelis, S., Flamos, A., Psarras J. (2009), “A Framework to address uncertainties in Energy Policy Formulation”, *Energy Source part Br* (in press).