



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Κατασκευή μοντέλου γραμμικού
προγραμματισμού για το μακροχρόνιο
ενεργειακό σχεδιασμό

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΜΑΡΙΑΣ-ΕΥΑΓΓΕΛΙΑΣ Ν ΚΑΝΙΝΙΑ

Επιβλέπων: Παντελής Κάπρος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΥΠΟΔΕΙΓΜΑΤΩΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑΣ - ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
Αθήνα, Ιούλιος 2005



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος
Εργαστήριο Υποδειγμάτων Οικονομίας - Ενέργειας - Περιβάλλοντος

Κατασκευή μοντέλου γραμμικού
προγραμματισμού για το μακροχρόνιο
ενεργειακό σχεδιασμό

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΜΑΡΙΑΣ-ΕΥΑΓΓΕΛΙΑΣ Ν ΚΑΝΙΝΙΑ

Επιβλέπων: Παντελής Κάπρος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 14η Ιουλίου 2005.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....
Παντελής Κάπρος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κ. Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Στ. Καβατζά
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2005

(Υπογραφή)

.....
ΜΑΡΙΑ-ΕΥΑΓΓΕΛΙΑ Ν ΚΑΝΙΝΙΑ

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

© 2005 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος
Εργαστήριο Υποδειγμάτων Οικονομίας - Ενέργειας - Περιβάλλοντος

Copyright ©–All rights reserved Μαρία-Ευαγγελία Ν Κανίνια, 2005.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Μαρία-Ευαγγελία Ν Κανίνια, *Κατασκευή μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού για το μακροχρόνιο ενεργειακό σχεδιασμό*, Διπλωματική Εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υποδειγμάτων Οικονομίας - Ενέργειας - Περιβάλλοντος, 9 Σεπτεμβρίου 2005.

Σελίδες: 86

Διαθέσιμο επίσης ως: Τεχνική Αναφορά [κωδικός διπλωματικής], Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος, Εργαστήριο Υποδειγμάτων Οικονομίας - Ενέργειας - Περιβάλλοντος, 9 Σεπτεμβρίου 2005.

URL: <http://artemis.csrlab.ntua.gr/>

FTP:

Ευχαριστίες

Quand il est urgent, c'est déjà trop tard.

Talleyrand (1754-1838)

Everything should be as simple as it is, but not simpler.

Einstein(1879-1955)

Η θητεία μου στο Πολυτεχνείο θα είχε λήξει μάλλον διεκπεραιωτικά αν δεν είχα πραγματοποιήσει τη διπλωματική μου εργασία στο εργαστήριο Υποδειγμάτων Ενέργειας - Οικονομίας - Περιβάλλοντος υπό την επίβλεψη του καθηγητή Παντελή Κάπρου, που αποτελεί για μένα πρότυπο επιστήμονα και πανεπιστημιακού δασκάλου. Για την υποστήριξη του κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής, τις γνώσεις που απέκτησα στο διάστημα αυτό και τις προοπτικές που ανακάλυψα για την περαιτέρω πορεία μου, τον ευχαριστώ.

Περίληψη

Στην παρούσα αναφορά περιγράφεται ένα μοντέλο τύπου δικτύου για το ενεργειακό σύστημα. Το μοντέλο κατανέμει τους διαθέσιμους ενεργειακούς πόρους και επιλέγει το συνδυασμό ενεργειακών τεχνολογιών για να ικανοποιηθεί η προβλεπόμενη για ορισμένο χρονικό ορίζοντα ζήτηση ενέργειας του συστήματος. Χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση του ενεργειακού συστήματος της Γερμανίας, είναι ωστόσο εφαρμόσιμο για οποιαδήποτε χώρα, τροποποιώντας τα δεδομένα εισόδου. Στην κατασκευή του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το περιβάλλον αλγεβρικής μοντελοποίησης GAMS, ενώ για τη βελτιστοποίηση ακολουθείται η μεθοδολογία γραμμικού προγραμματισμού. Στόχος του μοντέλου είναι η βελτιστοποίηση του ενεργειακού συστήματος για τη διάρκεια του μακροχρόνιου ορίζοντα αναφοράς, παρέχοντας ταυτόχρονα ένα υπόβαθρο για την αξιολόγηση των προοπτικών υλοποίησης του ενεργειακού υποσυστήματος του υδρογόνου ("hydrogen economy") στο μακροχρόνιο ορίζοντα.

Λέξεις κλειδιά

ενεργειακή οικονομία, γραμμικός προγραμματισμός, μαθηματική μοντελοποίηση, οικονομία υδρογόνου

Abstract

In this report, we describe a network energy system model that optimally allocates energy resources and selects the optimal mix of energy technologies to meet anticipated demand over time. The model was developed for the German economy (being, due to its volume, sufficiently representative of actual trends). Though, the same model is applicable to other spatial entities by altering the input parameters. The model was formulated using the linear programming technique in GAMS modeling environment. The objective of the model is to optimise the energy system in the long term, providing a background for the assessment of the potential to implement the energy pathway labeled as "hydrogen economy", under environmental constraints corresponding to CO_2 abatement policies.

Keywords

energy economics, mathematical modeling, hydrogen economy, linear programming

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	i
Περίληψη	iii
Abstract	v
Περιεχόμενα	ix
Κατάλογος Σχημάτων	xiii
Κατάλογος Πινάκων	xv
1 Εισαγωγή	1
1.1 Ενεργειακό σύστημα	1
1.2 Ενεργειακός σχεδιασμός	2
1.3 Μοντέλα ενεργειακού σχεδιασμού	2
1.4 Σκοπός της εργασίας - Ενσωμάτωση υποσυστήματος υδρογόνου	5
2 Μαθηματική τυποποίηση ενεργειακού συστήματος	9
2.1 Επιλογή μεθόδου μαθηματικού προγραμματισμού	9
2.1.1 Συνέπειες επιλογής γραμμικού προγραμματισμού	9
2.2 Γραμμικός προγραμματισμός	10
2.3 Το περιβάλλον μοντελοποίησης GAMS	12
2.3.1 Ορισμός συνόλων	12
2.3.2 Παράμετροι	12
2.3.3 Μεταβλητές	12
2.3.4 Εξισώσεις - ορισμός μοντέλου	14
2.4 Αλγόριθμος επίλυσης	14
3 Τεχνικο-οικονομικά χαρακτηριστικά του ενεργειακού υποσυστήματος υδρογόνου	17
3.1 Παραγωγή	17
3.2 Αποθήκευση και μεταφορά	20

3.2.1	Επιλογές μεταφοράς H_2 στην τελική κατανάλωση	22
3.3	Τεχνολογίες τελικής χρήσης	24
4	Ανάπτυξη μοντέλου	27
4.1	Εισαγωγή - Μεθοδολογία	27
4.1.1	Ιδιότητες του μοντέλου	28
4.2	Παράσταση ενεργειακού συστήματος	30
4.2.1	Γράφος αναφοράς	30
4.3	Δομή	32
4.3.1	Υποσύστημα τελικής ενεργειακής ζήτησης	36
4.3.2	Υποσύστημα προσφοράς τελικής ενέργειας	37
4.4	Χρονικές και χωρικές διαστάσεις	41
4.4.1	Χρονικές διαστάσεις	41
4.4.2	Χωρικές διαστάσεις	42
4.5	Μεταβλητές - Εξισώσεις	42
4.5.1	Μεταβλητές	43
4.5.2	Εξισώσεις	44
4.5.3	Δυαδικές μεταβλητές	47
4.5.4	Αντικειμενική συνάρτηση	47
5	Υποσύστημα χρήσης ενέργειας	51
5.1	Τομέας μεταφορών	51
5.2	Βιομηχανικός τομέας	54
5.3	Οικιακός και τριτογενής τομέας	57
6	Ενότητα προσφοράς ενέργειας	59
6.1	Εξόρυξη πρωτογενών ορυκτών πόρων και συλλογή μη ορυκτών πόρων	59
6.2	Εισαγωγές - Εξαγωγές	60
6.3	Διεργασίες μετασχηματισμού ενεργειακών φορέων	62
6.3.1	Μετατροπή προς ηλεκτρισμό - θερμότητα	62
6.3.2	Μετατροπή προς άλλους ενεργειακούς φορείς	64
6.4	Μεταφορά και διανομή ενεργειακών φορέων	65
6.5	Αποθήκευση ενεργειακών φορέων	66
6.6	Συγκεντρωτικά: Αλυσίδα τεχνολογιών υδρογόνου όπως απεικονίζεται στο μοντέλο	69
7	Εξέταση εναλλακτικών σεναρίων	71
7.1	Σενάριο αναφοράς - baseline	71
7.2	Σενάριο αθροιστικού περιορισμού εκπομπών για τη συνολική διάρκεια του ορίζοντα	73

8	Αποτελέσματα	75
8.1	Υποσύστημα H_2	76
	Βιβλιογραφία	84

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Ενεργειακό σύστημα: οριοθέτηση συστήματος και αλληλεπίδραση με εξωτερικά συστήματα	1
1.2	Ενεργειακό μοντέλο σχεδιασμού που βασίζεται στην απεικόνιση των τεχνολογικών διεργασιών του συστήματος.	3
1.3	Ρητή απεικόνιση επιμέρους παραγόντων λήψης αποφάσεων στο ενεργειακό σύστημα	4
1.4	Γενικός γράφος ενεργειακού συστήματος υδρογόνου	6
2.1	Παράδειγμα τμηματικά γραμμικής προσέγγισης μη-γραμμικής σχέσης: Συνάρτηση κόστους ορυκτών ενεργειακών πόρων, όπου ΔQ_1 η διαθέσιμη ποσότητα από επιφανειακά κοιτάσματα και ΔQ_2 η διαθέσιμη ποσότητα από ορυχεία σε μικρό βάθος.	10
2.2	2-διάστατο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού: συμβατική μέθοδος simplex και διάσχιση της περιοχής εφικτών λύσεων προς την κατεύθυνση $\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x_1} \vec{x}_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \vec{x}_2$, όπου f η αντικειμενική συνάρτηση του 2-διάστατου προβλήματος.	16
3.1	Ενεργειακό υποσύστημα βιομάζας	19
3.2	Πίνακας ενδεικτικών μεγεθών για τις βασικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου	21
3.3	Ενεργειακό περιεχόμενο ανά μορφή αποθήκευσης για το υδρογόνο	21
3.4	Προσεγγιστικά μεγέθη δυνατών επιλογών αποθήκευσης του H_2	23
3.5	Δυνατά πεδία εφαρμογών κυψελών καυσίμου H_2	25
3.6	Αρχή λειτουργίας fuel cell - σχηματικό διάγραμμα (πηγή: www.ballard.com): Κυψέλη τύπου PEM όπου τα ιόντα H^+ (πρωτόνια) διέρχονται μέσα από μεμβράνη ώστε να ολοκληρωθεί η αντίδραση οξειδοαναγωγής.	25
4.1	Κατάσταση ισορροπίας στους κόμβους ωφέλιμης ενέργειας - σταθερή ζήτηση για κάθε ενεργειακή υπηρεσία	29
4.2	Κατάσταση ισορροπίας στους ενδιάμεσους κόμβους ενεργειακών φορέων - ενδογενής διαμόρφωση εικονικών χαμπυλών προσφοράς και ζήτησης	29
4.3	Παράσταση τμήματος ενεργειακού συστήματος με διάγραμμα RES	30
4.4	Πίνακας κόμβων-κλάδων για την τοπολογική περιγραφή του γράφου αναφοράς	32
4.5	Βασικό διάγραμμα ροής ενεργειακού συστήματος	33
4.6	Διάρθρωση του γράφου αναφοράς, με σχέσεις διασύνδεσης μεταξύ των συνόλων	35

4.7	Κόμβοι ζήτησης ενεργειακών υπηρεσιών D=DINDUDTRAUDRESUDTER	38
4.8	Χρονολογική καμπύλη ηλεκτρικού φορτίου συστήματος για τη Γερμανία στο έτος βάσης: Με βάση τα ποσοστά συμμετοχής του ηλεκτρισμού στην κάλυψη κάθε ενεργειακής ανάγκης επαληθεύεται η καμπύλη φορτίου όπως έχει διαμορφωθεί για τις επιμέρους υπηρεσίες.	39
4.9	Ισορροπία υποσυστημάτων προσφοράς και ζήτησης στο επίπεδο τελικής ενέργειας	40
4.10	Κατάτμηση του έτους σε περιόδους για τη διαμόρφωση των καμπυλών φορτίου	40
4.11	Μεταφορά δυναμικότητας και προσθήκη νέων επενδύσεων	45
5.1	Η τεχνολογική πρόοδος ως εξωγενής παράμετρος του μοντέλου: Καμπύλη μείωσης του κόστους επένδυσης, εξίσωση [5.3]	53
5.2	Περιορισμός αναλογίας ενεργειακών μορφών που εισέρχονται σε έναν κόμβο ενεργειακής διεργασίας	54
5.3	Δεδομένα για τον τομέα μεταφορών	55
5.4	Ιεραρχία της μοντελοποίησης στο βιομηχανικό τομέα	56
5.5	Καθορισμένος λόγος εισροών ανά τομέα βιομηχανικής παραγωγής	57
5.6	Προσφορά παραπροϊόντων βιομηχανικών διεργασιών: Αντιστοιχούν στον κόμβο τύπου B ενεργειακής μορφής BYG που ανακυκλώνεται στο σύστημα ως καύσιμο θερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.	57
6.1	Τμήμα πρωτογενούς παροχής ενέργειας στο σύστημα	61
6.2	Επιβολή περιορισμών στις εισαγωγές και εξαγωγές του συστήματος (επίλυση για μεμονωμένη χώρα)	62
6.3	Εφικτή περιοχή λειτουργίας των τεχνολογιών συμπαραγωγής	63
6.4	Στιγμιότυπο κόμβων πολλαπλών εξόδων με δεσμευμένη αναλογία	63
6.5	Απλοποιημένη παράσταση διύλιση τριίου	64
6.6	Απεικόνιση δικτύου ηλεκτρισμού	66
6.7	Εξομάλυνση των αιχμών ενεργειακής ζήτησης στο σύστημα μέσω των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Η ημερήσια διακύμανση που απεικονίζεται στο γράφημα αντιστοιχεί σε μια τυπική καμπύλη ηλεκτρικού φορτίου. Για ενεργειακούς φορείς όπως το φυσικό αέριο, όπου η ημερήσια διακύμανση εξυπηρετείται από την ποσότητα που ρέει στους αγωγούς, τα συστήματα αποθήκευσης είναι σχεδιασμένα για να ικανοποιούν εποχικές διακυμάνσεις.	67
6.8	Ισορροπία μεταξύ αποταμιευόμενων και εκταμιευόμενων ποσοτήτων ενεργειακών φορέων.	68
6.9	Εξίσωση ισορροπίας στους κόμβους ενεργειακών φορέων με δυνατότητα αποθήκευσης.	68
6.10	Ενεργειακό υποσύστημα H_2 όπως απεικονίστηκε στο μοντέλο με έμφαση στους δυνατούς συνδυασμούς μεταφοράς και αποθήκευσης	70
7.1	Διερεύνηση σεναρίων σε ένα ενεργειακό μοντέλο	72

7.2	Υπολογισμός εκπομπών αερίων με βάση τις ενεργειακές ροές κατά μήκος των κλάδων.	72
7.3	Ειδική περίπτωση αρνητικού συντελεστή εκπομπών στο ενεργειακό υποσύστημα της βιομάζας.	72
7.4	Καμπύλη οριακού κόστους αποφυγής εκπομπών	73
8.1	Πίνακας βασικών ενεργειακών ροών και δεικτών για το σενάριο αναφοράς	77
8.2	Πίνακας βασικών ενεργειακών ροών και δεικτών για το σενάριο περιορισμού CO_2 κατά 40%	78
8.3	Τελική ζήτηση ενέργειας	79
8.4	Κόμβοι ζήτησης ενεργειακών υπηρεσιών D=DINDUDTRAUDRESUDTER	79
8.5	Καμπύλη εκπομπών CO_2 ως προς τις εκπομπές του έτους βάσης	80
8.6	Καμπύλη οριακού κόστους περιορισμού εκπομπών CO_2 . Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει την 7.4.	80
8.7	Παραγωγή H_2 για κάθε εκδοχή του σεναρίου - $(1 - uLim)$ στον κατακόρυφο άξονα	81
8.8	Ποσοστό H_2 στην κάλυψη της ζήτησης τελικής ενέργειας ανά τομέα	81

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Ορισμός συνόλων: Η απαρίθμηση των μελών των συνόλων γίνεται στο αρχείο εισόδου EXCEL του μοντέλου.	13
2.2	Ορισμός παραμέτρων	13
2.3	Ορισμός μεταβλητών	14
2.4	Δήλωση και ορισμός εξισώσεων	15
3.1	Παράμετροι επιλογής μεθόδου αποθήκευσης και μεταφοράς	24
3.2	Ενδεικτικοί υπολογισμοί κόστους οδικής μεταφοράς H_2 (πηγή: [9])	24
3.3	Χαρακτηριστικά τεχνικοοικονομικά μεγέθη στατικών εφαρμογών ηλεκτροπαραγωγής από κυψέλες καυσίμου H_2	26
4.1	κατηγοριοποίηση κόμβων N σε σύνολα	35
5.1	πεδία δεδομένων για το σύνολο τεχνολογιών μεταφοράς TTRA	52
5.2	πεδία δεδομένων για τα σύνολο τεχνολογιών χρησιμοποίησης τελικής ενέργειας TIND, TRES, TTER	58
6.1	Κατηγοριοποίηση κλάδων του δικτύου	65
8.1	Οριακό κόστος αποφυγής εκπομπών CO_2	76

Κεφάλαιο 1

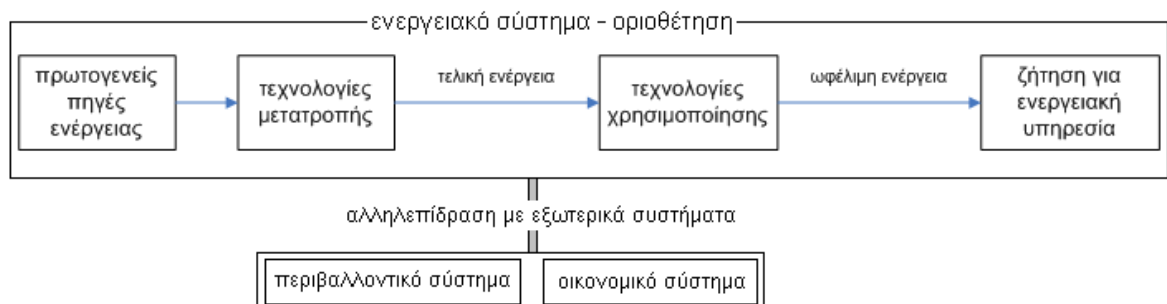
Εισαγωγή

1.1 Ενεργειακό σύστημα

Η κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας οικονομίας αντιμετωπίζεται στα πλαίσια ενός συστήματος στο οποίο οι διεργασίες μετασχηματισμού¹ ενέργειας συνδέονται μεταξύ τους με ροές ενεργειακών μορφών². Το σύνολο των συνδεδεμένων ενεργειακών μετασχηματισμών (ενεργειακό σύστημα) διαχωρίζεται από άλλες βιομηχανικές και οικονομικές διαδικασίες (συστημική θεώρηση της ενέργειας). Αντιμετωπίζεται ως ενιαίο σύστημα με εσωτερικούς νόμους και χαρακτηριστικά αλλά και αλληλεπιδράσεις με άλλα συστήματα.

¹Οι διεργασίες ενεργειακών μετασχηματισμών περιλαμβάνουν: τεχνολογίες εξόρυξης ενεργειακών πόρων, μετατροπής από μια μορφή ενέργειας σε μια δευτερογενή μορφή (διύλιση πετρελαίου, παραγωγή ηλεκτρισμού) και τεχνολογίες τελικής χρήσης.

²Με τον όρο ενεργειακή μορφή ή ενεργειακός φορέας ορίζεται κάθε στοιχείο ενός συνόλου προϊόντων της οικονομία που περιλαμβάνει εκμεταλλεύσιμη ενέργεια και μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για μετατροπή σε άλλο ενεργειακό φορέα είτε για την παραγωγή ωφέλιμης ενέργειας. Οι φορείς διακρίνονται σε πυκνούς (ηλεκτρισμός, υγρά καύσιμα) και διάχυτους (θερμότητα δικτύου) και σε αποθηκεύσιμους (στερεά καύσιμα) και μη-αποθηκεύσιμους (ηλεκτρισμός).



Σχήμα 1.1: Ενεργειακό σύστημα: οριοθέτηση συστήματος και αλληλεπίδραση με εξωτερικά συστήματα

1.2 Ενεργειακός σχεδιασμός

Ο ενεργειακός σχεδιασμός αναπαριστά το πρόβλημα απόφασης που σχετίζεται με την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής και διάθεσης της ενέργειας στους καταναλωτές. Το πρόβλημα ελαχιστοποίησης του κόστους του ενεργειακού συστήματος σε *διαχρονική κλίμακα*³ ισοδυναμεί, σύμφωνα με τη οικονομική θεωρία των Dorfman, Samuelson, Solow ([4]), με τη μακροχρόνια ισορροπία των ενεργειακών αγορών, υπό την προϋπόθεση ότι υφίσταται πλήρης και τέλειος ανταγωνισμός.

Διαμόρφωση τιμών καταναλωτή ενεργειακών προϊόντων: Το μοντέλο ενεργειακού σχεδιασμού διαχρονικού ολικού κόστους, όντας ισόμορφο με το μοντέλο πλήρους και τέλειου ανταγωνισμού, αντιστοιχεί σε *τιμολόγηση στο μακροχρόνιο οριακό κόστος*⁴. Σε σύγκριση με την πραγματική οικονομία όπου σπάνια επιβεβαιώνεται η παραπάνω υπόθεση πλήρους και τέλειου ανταγωνισμού, οι τιμές που διαμορφώνονται στο σύστημα διαφοροποιούνται ως προς το ότι δεν περιλαμβάνουν τα ολιγοπωλιακά κέρδη λόγω του ατελούς ανταγωνισμού.

1.3 Μοντέλα ενεργειακού σχεδιασμού

Ο *αριθμητικός υπολογισμός* του μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού λαμβάνει τη μορφή εφαρμοσμένου μαθηματικού μοντέλου⁵ μεγάλης κλίμακας το οποίο προσομοιώνει τη λειτουργία του συστήματος. Διακρίνονται οι ακόλουθες βασικές κατηγορίες μοντέλων μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού:

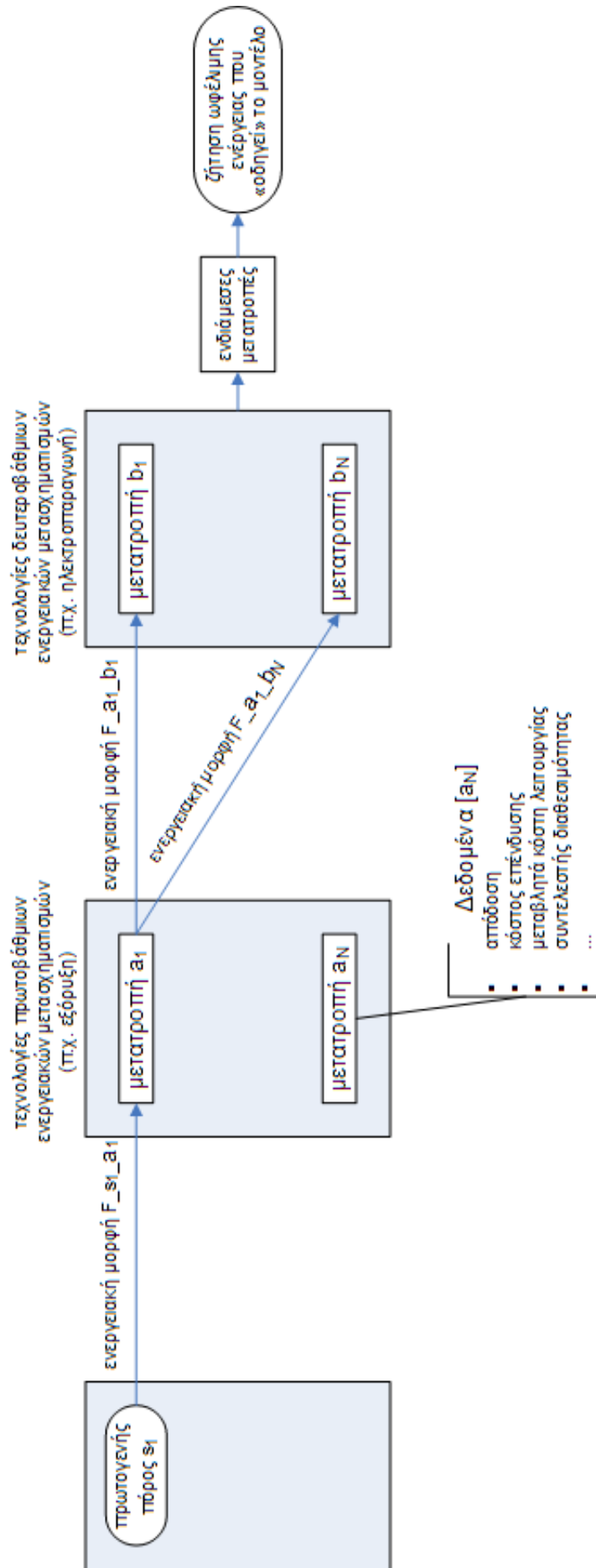
- Μοντέλα λεπτομερούς απεικόνισης του ενεργειακού συστήματος από την τεχνολογική του σκοπιά: Το σύστημα απεικονίζεται μέσω των διαθέσιμων τεχνολογιών στα διάφορα στάδια ενεργειακών μετασχηματισμών. Ανήκουν στη γενικότερη κλάση bottom-up των ενεργειακών μοντέλων. Μέσω της τεχνολογικής απεικόνισης του συστήματος προσδιορίζεται το μίγμα τεχνολογιών ελάχιστου κόστους που ικανοποιεί τη ζήτηση για μια ορισμένη ενεργειακή υπηρεσία.⁶

³ Στην περίπτωση του μακροχρόνιου σχεδιασμού το ενεργειακό σύστημα επεκτείνεται ώστε να συμπεριλάβει πιθανές για τον ορίζοντα σχεδιασμού ενεργειακές τεχνολογίες και μορφές.

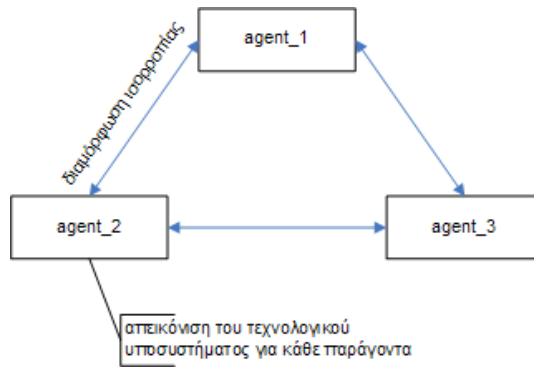
⁴ Για τη διαμόρφωση για παράδειγμα των τιμών του ηλεκτρισμού ως τελικής ενέργειας το οριακό κόστος που υπολογίζεται περιλαμβάνει το κόστος της οριακής επένδυσης και λειτουργίας των ενεργειακών εγκαταστάσεων ηλεκτροπαραγωγής, το οριακό κόστος από εξάντληση των ενεργειακών πόρων και το οριακό κόστος χρησιμοποίησης του ηλεκτρικού δικτύου.

⁵ Ο όρος **μοντέλο** στην ενεργειακή ανάλυση περιγράφει ένα μαθηματικό σύστημα που αποτελεί απλούστευση του πραγματικού συστήματος. Τα ενεργειακά μοντέλα αναπτύσσονται για προσομοίωση ή βελτιστοποίηση των ενεργειακών συστημάτων. Τα μοντέλα σχεδιασμού είναι μοντέλα βελτιστοποίησης με βάση μια αντικειμενική συνάρτηση που μεγιστοποιείται ή ελαχιστοποιείται. Τυπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης αποτελεί η ελαχιστοποίηση του κόστους του συστήματος ενώ οι εκπομπές αερίων περιορίζονται κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο.

⁶ Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα πρώτα ενεργειακά μοντέλα σχεδιασμού που κατασκευάστηκαν: Η βασική εκδοχή του MARKAL (<http://www.etsap.org/tools.htm>) καθώς και τα EFOM ([7]), το στατικό μοντέλο βελτιστοποίησης (BESOM[11]) και η εξέλιξή του ως δυναμικό μοντέλο (μοντέλα πρώτης γενιάς που κατασκευάζουν ένα ολικό πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού για το συνολικό ενεργειακό σύστημα)



Σχήμα 1.2: Ενεργειακό μοντέλο σχεδιασμού που βασίζεται στην απεικόνιση των τεχνολογικών διεργασιών του συστήματος.



Σχήμα 1.3: Ρητή απεικόνιση επιμέρους παραγόντων λήψης αποφάσεων στο ενεργειακό σύστημα

- Μοντέλα συμπυκνωμένης μορφής (reduced-form), όπου αντί της αναλυτικής αναπαράστασης των ενεργειακών διεργασιών προτιμώνται συναρτήσεις ή εξισώσεις συμπεριφοράς που προκύπτουν από στατιστικές μεθόδους.
- Μικτά μοντέλα όπου απεικονίζονται ρητά τα επιμέρους πρόσωπα που λαμβάνουν αποφάσεις στο ενεργειακό σύστημα⁷. Τα μοντέλα αυτά προσομοιώνουν και ισορροπία υπό ατελή ανταγωνισμό.

Στην παρούσα εργασία υιοθετείται το παράδειγμα μοντέλων bottom-up ως αντιπροσωπευτικό του προβλήματος βέλτιστου σχεδιασμού.

Γενικά:

Σε ένα μακροχρόνιο μοντέλο ενεργειακού σχεδιασμού ζητείται να βρεθεί η βέλτιστη σύνθεση δραστηριοτήτων προσφοράς μορφών ωφέλιμης ενέργειας που θα ικανοποιήσει τις ανάγκες της οικονομίας.

Ο μακροχρόνιος ενεργειακός σχεδιασμός εξαρτάται από αποφάσεις της ενεργειακής πολιτικής, οι οποίες εισάγονται στο μοντέλο με τη μορφή παραμέτρων και εξισώσεων περιορισμών. Τέτοιες αποφάσεις μπορεί να αφορούν: φόρους και επιδοτήσεις, περιορισμούς αναλογίας ενεργειακών μορφών⁸ ή τεχνολογιών⁹, περιβαλλοντικούς περιορισμούς, κριτήρια αξιοπιστίας και ασφάλειας ή περιορισμούς μίξης ενεργειακών μορφών που σχετίζονται με την ελάττωση του γεωπολιτικού ρίσκου.

Η αριθμητική επίλυση του μοντέλου σχεδιασμού παρέχει ένα εργαλείο αποτίμησης των αποτελεσμάτων των εφαρμοζόμενων ενεργειακών πολιτικών. Εκτελείται συνήθως μια πρώτη

εντάσσονται σε αυτή την κατηγορία, παριστώντας το ενεργειακό σύστημα ως δίκτυο ροών που ακολουθεί την τεχνολογική δομή του συστήματος.

⁷ Στην κατηγορία αυτή ανήκουν τα μοντέλα NEMS (www.eia.doe.gov/oiaf/aeo/overview) και PRIMES (www.e3mlab.ntua.gr) που αναπτύχθηκαν για τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ευρώπη αντίστοιχα.

⁸ για παράδειγμα, συμμετοχή κατ' ελάχιστο σε ορισμένο ποσοστό των βιοκαυσίμων στον τομέα μεταφορών [κοινοτική οδηγία 2003/30/EC]

⁹ αντίστοιχα, η κοινοτική οδηγία 2001/77/EC προωθεί τη συμμετοχή των τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή

επίλυση αναφοράς (reference case) με την υπόθεση ότι στην περίοδο που εξετάζεται ισχύουν οι τάσεις (trends) του έτους βάσης (business-as-usual). Εξετάζοντας εναλλακτικά σενάρια για την εξέλιξη του συστήματος προκύπτουν αποτελέσματα χρήσιμα για τη λήψη αποφάσεων. Η σύγκριση ταξινομείται κατά παράγοντα ώστε να υποστηρίξει *ανάλυση κόστους - οφέλους*. Στους παράγοντες αυτούς περιλαμβάνονται τυπικά: το συνολικό κόστος του συστήματος, τα οριακά κόστη των ενεργειακών φορέων ή τα επίπεδα εκπομπών του συστήματος.

Η ερμηνευτική και προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου περιορίζεται σημαντικά¹⁰ από την επιτυχία της πρόβλεψης για την τεχνολογική πρόοδο (τεχνικο-οικονομικά χαρακτηριστικά τεχνολογιών στον ορίζοντα του μοντέλου)¹¹. Σύμφωνα με τη θεωρία της ανάπτυξης των Solow, Arrow, η τεχνολογική πρόοδος έχει δύο συνιστώσες:

- Την *αυτόνομη* τεχνολογική πρόοδο που είναι ανεξάρτητη από την οικονομία (λόγου χάρη, μια τυχαία επιστημονική ανακάλυψη).
- Τη συνιστώσα που εξαρτάται από την οικονομική ανάπτυξη ή τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς.

Τα σύγχρονα μοντέλα ενεργειακού σχεδιασμού προσπαθούν να ενσωματώσουν μηχανισμούς με βάση τους οποίους μεγάλο ποσοστό της τεχνικής προόδου να καθίσταται ενδογενές και να απεικονίζεται ως συνέπεια της οικονομικής εξέλιξης (ενδογενής τεχνολογική πρόοδος). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το μοντέλο learning-by-doing που προτάθηκε από τον K Arrow το 1962 ([3]).

1.4 Σκοπός της εργασίας - Ενσωμάτωση υποσυστήματος υδρογόνου

Αναπτύσσεται ένα μοντέλο μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού με μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο χρησιμεύει ως υπόβαθρο για την ενσωμάτωση του ενεργειακού υποσυστήματος του υδρογόνου, πραγματοποιώντας μερικό ανασχεδιασμό του συμβατικού ενεργειακού συστήματος.

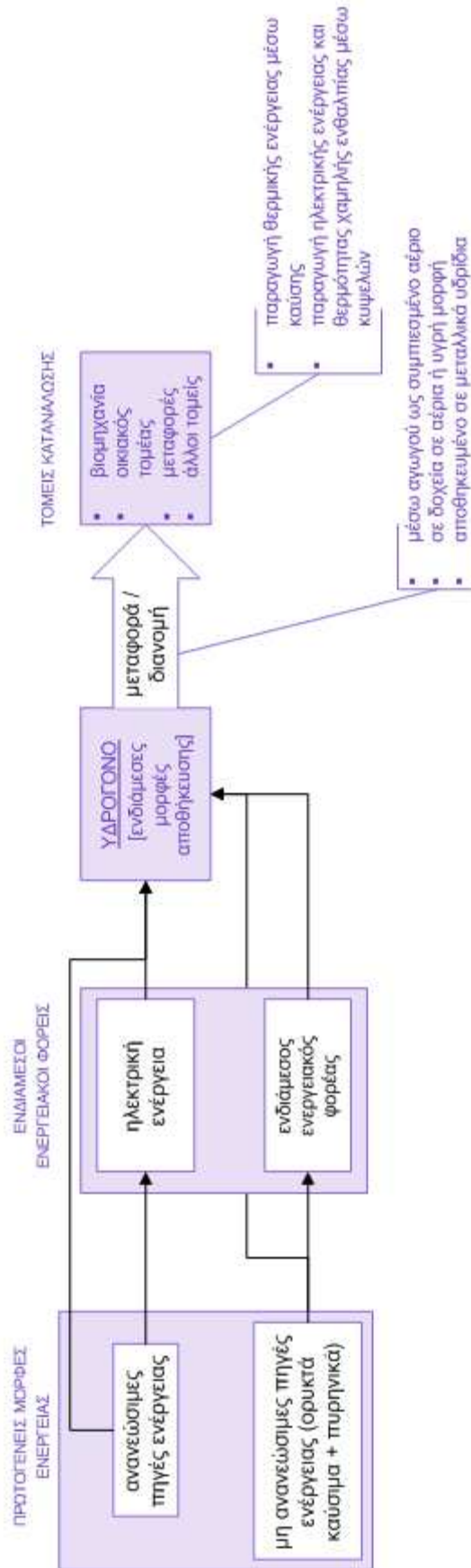
Η οικονομία του υδρογόνου συζητείται ως ένα μεσοπρόθεσμα έως μακροπρόθεσμα δυνητικά βιώσιμο σενάριο για την εξέλιξη των ενεργειακών συστημάτων. Στο πλαίσιο αυτό έχουν αναπτυχθεί προγράμματα χρηματοδότησης της έρευνας για το υδρογόνο (τόσο από τη σκοπιά των τεχνολογιών υδρογόνου όσο και από τη σκοπιά μελετών ενσωμάτωσής τους στο υπάρχον ενεργειακό σύστημα)¹². Τα παρακάτω χαρακτηριστικά του υδρογόνου αποτελούν βασικούς μοχλούς για την προώθηση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα είναι:

¹⁰Υποθέτοντας ότι οι υπόλοιπες παράμετροι του συστήματος είναι γνωστές με ακρίβεια

¹¹Στο μοντέλο που αναπτύσσεται στα πλαίσια της εργασίας θεωρούμε τα τεχνικο-οικονομικά δεδομένα των τεχνολογιών εξωγενή.

¹²

- Στα <http://www.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/> και <http://www.hydrogen.energy.gov/> περιγράφεται το πρόγραμμα υδρογόνου των Ηνωμένων Πολιτειών.
- Στο <http://www.ieahia.org/> περιγράφεται το πρόγραμμα υδρογόνου της Διεθνούς Υπηρεσίας Ενέρ-



Σχήμα 1.4: Γενικός γράφος ενεργειακού συστήματος υδρογόνου

- Όπως ο ηλεκτρισμός, αποτελεί ενεργειακό φορέα με μηδενικές εκπομπές ρύπων¹³ στο σημείο της κατανάλωσης. Αν το υδρογόνο προέρχεται από τεχνολογίες παραγωγής με βάση την πυρηνική ενέργεια ή τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας τότε η περιβαλλοντική επιβάρυνση σε όρους εκπομπών είναι μηδενική. Ακόμη και αν το υδρογόνο προέλθει από μετατροπή ορυκτών πόρων για κατανάλωση, έστω, στον τομέα των μεταφορών, οι εκπομπές αερίων μετατοπίζονται από τις αστικές περιοχές στην περιοχή της εγκατάστασης παραγωγής υδρογόνου, όπου μπορεί επιπλέον να εφαρμοστεί κατακράτηση των αερίων, απαλλάσσοντας τις αστικές περιοχές από μέρος του φορτίου ρύπων.
- Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με διάφορους συνδυασμούς τεχνολογιών και πρωτογενών ενεργειακών φορέων. Αυτό μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από εισαγόμενους πρωτογενείς πόρους.
- Σε αντίθεση με τον ηλεκτρισμό, που επίσης συνιστά καθαρή μορφή ενέργειας σε επίπεδο τελικής χρήσης, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί, αυξάνοντας την αξιοπιστία του συστήματος παροχής ενέργειας. Επίσης ευνοεί την προώθηση τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με διακοπτόμενη παροχή (intermittent supply), όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια, για τις οποίες σοβαρό μειονέκτημα είναι η ανάγκη συγχρονισμού της παραγωγής με την καμπύλη φορτίου.

Η μετάβαση ωστόσο από την ενεργειακή οικονομία στη σημερινή της μορφή (όπου κυριαρχούν οι ορυκτοί ενεργειακοί πόροι) στην ενδεχόμενη οικονομία του υδρογόνου εξαρτάται από τις τεχνολογικές εξελίξεις (υλοποίηση ή βελτίωση αποδοτικών τεχνολογιών μετατροπής υδρογόνου όπως οι κυψέλες καυσίμου, τεχνολογιών παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου καθώς και υποδομών μεταφοράς και διανομής).

Συνοπτικά (χαρακτηριστικά μεγέθη των τεχνολογιών υδρογόνου αναφέρονται στο 3):

- Πρώτες ύλες: Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από πληθώρα πρωτογενών ή ενδιάμεσων ενεργειακών φορέων (άνθρακα, πετρελαιοειδή, φυσικό αέριο, βιομάζα, καθώς και από ανανεώσιμες (πλην βιομάζας) μορφές ενέργειας ή πυρηνική ή ηλεκτρική ενέργεια με διάσπαση ή ηλεκτρόλυση του νερού).
- Διαδρομή προς την τελική κατανάλωση: Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί επί τόπου ή σε κεντρικές μονάδες. Η μεταφορά και διανομή του μπορεί να γίνει μέσω αγωγών, δοχείων συμπιεσμένου ή υγροποιημένου αερίου ή μέσω μεταλλικών υδριδίων. Η αποθήκευση του υδρογόνου καθώς και η υποδομή διανεμητήρων (σταθμών ανεφοδιασμού για χρήση στις μεταφορές) ολοκληρώνουν τη χάραξη ενεργειακών διαδρομών υδρογόνου προς την τελική κατανάλωση.

γειας.

- Το αντίστοιχο πρόγραμμα της ΕΕ παρουσιάζεται στο <https://www.hfpeurope.org/>.

¹³Όταν η τεχνολογία χρησιμοποιήσής του αντιστοιχεί σε ηλεκτροχημική διεργασία σε κυψέλη καυσίμου. Ωστόσο, όταν το H_2 χρησιμοποιηθεί σε θερμική διεργασία (συμβατική καύση) με ατμοσφαιρικό αέρα (που περιέχει άζωτο (N_2) σε ποσοστό 79%) και όχι με καθαρό O_2 δημιουργούνται οξείδια του αζώτου NO_x .

- Τελική κατανάλωση: Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί μέσω της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου στις μεταφορές και την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας χαμηλής ενθαλπίας (π.χ. ατμός για οικιακή θέρμανση). Επίσης, σε ανάμιξη με φυσικό αέριο ή ως καθαρό υδρογόνο σε υγρή ή αέρια μορφή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμικές διεργασίες (καύση).

Κεφάλαιο 2

Μαθηματική τυποποίηση ενεργειακού συστήματος

2.1 Επιλογή μεθόδου μαθηματικού προγραμματισμού

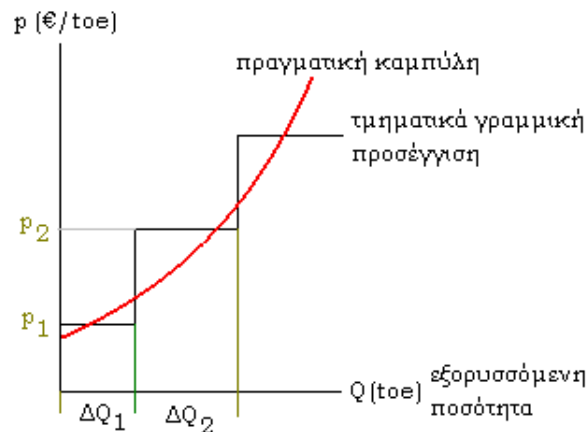
Η πολυπλοκότητα της διασύνδεσης των δομικών στοιχείων ενός ενεργειακού συστήματος και ο αριθμός των χρονικών περιόδων που λαμβάνονται υπ' όψιν για επίλυση στο μακροχρόνιο ορίζοντα δημιουργούν ένα μαθηματικό σύστημα προς επίλυση μεγάλου μεγέθους στα όρια της διαθέσιμης υπολογιστικής ισχύος. Για το λόγο αυτό τα μοντέλα μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού αναπτύσσονται ως προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού (απλουστεύοντας τις πραγματικές μη γραμμικές ή ακέραιες σχέσεις που περιγράφουν το ενεργειακό σύστημα) (2.2) με δεδομένο ότι οι αλγόριθμοι επίλυσης συστημάτων γραμμικού προγραμματισμού υπερτερούν σε ταχύτητα και ευστάθεια¹.

2.1.1 Συνέπειες επιλογής γραμμικού προγραμματισμού

Προκειμένου να περιγραφεί το ενεργειακό σύστημα με γραμμικές σχέσεις, εφαρμόζονται απλουστεύσεις σχετικά με την αναπαράσταση τεχνικών σχέσεων και σχέσεων συμπεριφοράς που παρατηρούνται στον ενεργειακό τομέα της οικονομίας. Οι απλουστεύσεις αυτές μπορεί να αφορούν:

1. Τεχνικές σχέσεις με πραγματική μη-γραμμική μορφή (π.χ. το πραγματικό μεταβλητό κόστος παραγωγής ηλεκτρισμού από μονάδες συνδυασμένου κύκλου εξαρτάται από το συντελεστή χρησιμοποίησης της μονάδας, σχέση που εκφράζεται με μη-γραμμικούς όρους).
2. Οριακό κόστος από εξάντληση ενεργειακών πόρων (προσδιορίζεται από μη γραμμική σχέση) ή μη γραμμικές καμπύλες κόστους που αναπαριστούν τη δυσκολία χρήσης της γης για ενεργειακές εγκαταστάσεις.

¹σε σχέση με τους αλγόριθμους μη-γραμμικού προγραμματισμού



Σχήμα 2.1: Παράδειγμα τμηματικά γραμμικής προσέγγισης μη-γραμμικής σχέσης: Συνάρτηση κόστους ορυκτών ενεργειακών πόρων, όπου ΔQ_1 η διαθέσιμη ποσότητα από επιφανειακά κοιτάσματα και ΔQ_2 η διαθέσιμη ποσότητα από ορυχεία σε μικρό βάθος.

3. Συμπεριφορές παραγόντων που δρουν στα πλαίσια ενός ενεργειακού συστήματος (π.χ. οικιακοί καταναλωτές ή επενδυτές σε μονάδες παραγωγής). Οι συμπεριφορές των επιμέρους φορέων αποτελούν θεμελιώδες μη-γραμμικό στοιχείο (διαχείριση κινδύνου-αβεβαιότητα). Η τάση για αποφυγή κινδύνου των επιμέρους παραγόντων οδηγεί σε καταμερισμό των επενδύσεων (μίγμα επιλογών), ενώ ο γραμμικός προγραμματισμός επιλέγει ακραίες λύσεις.
4. Οικονομίες (ή δυσοικονομίες) κλίμακας (ιδίως στις τεχνολογίες εντάσεως κλίμακας)².

Ορισμένες από τις μη-γραμμικές σχέσεις (αυτές που εκφράζουν αύξουσα σχέση τιμής - ποσότητας, σχήμα 2.1.1) στα πλαίσια του ενεργειακού συστήματος μπορούν να παρασταθούν με τμηματική γραμμικοποίηση.

Επίσης για την εφαρμογή γραμμικού προγραμματισμού υποθέτουμε ότι όλες οι τεχνολογίες είναι διαθέσιμες σε *συνεχή* μεγέθη³.

2.2 Γραμμικός προγραμματισμός

Η γενική μορφή ενός μοντέλου *μαθηματικού προγραμματισμού* είναι:

$$\begin{aligned}
 \min z &= z(x_1, \dots, x_n) \\
 g_1(x_1, \dots, x_n) &\geq b_1 \\
 &\vdots \\
 g_m(x_1, \dots, x_n) &\geq b_m
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

²Ο όρος *οικονομία κλίμακας* περιγράφει τη μείωση του μοναδιαίου κόστους του προϊόντος μιας διεργασίας όταν αυξάνεται η ποσότητα του παραγόμενου προϊόντος.

³Για να ληφθεί υπ'όψιν ο περιορισμός ότι ορισμένες τεχνολογίες είναι διαθέσιμες σε διακριτά μεγέθη πρέπει να εφαρμοστεί *ακέραιος προγραμματισμός*.

Στην περίπτωση του ενεργειακού μοντέλου που αναπτύσσεται, η αντικειμενική συνάρτηση αντιστοιχεί στο ολικό κόστος του συστήματος για την ικανοποίηση της εξωγενούς ζήτησης των καταναλωτών, υπό περιορισμούς. Η συνάρτηση που εκφράζει το ανηγμένο συνολικό κόστος του συστήματος (4.5.4) και οι περιορισμοί περιέχουν μόνο γραμμικούς όρους των μεταβλητών:

Ορισμός 2.1. Ένα μοντέλο ονομάζεται γραμμικό, όταν οι μαθηματικές εκφράσεις που περιγράφουν τους περιορισμούς του μοντέλου και την αντικειμενική συνάρτηση δεν περιέχουν μη-γραμμικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών του συστήματος.

Αντίστοιχα, η γραφή του μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού είναι:

$$\begin{aligned} \min z &= c_1x_1 + \dots + c_nx_n \\ a_{11}x_1 + \dots + a_{1n}x_n &\geq b_1 \\ &\vdots \\ a_{m1}x_1 + \dots + a_{mn}x_n &\geq b_m \end{aligned} \quad (2.2)$$

ή, σε διανυσματική μορφή:

$$\begin{aligned} \min z &= c\bar{x} \\ A\bar{x} &\geq b \\ \bar{x} &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

Η βασική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού ακολουθεί την εξής ιδέα (αλγόριθμος simplex): Εντοπίζεται η περιοχή εφικτών λύσεων για το πρόβλημα (στη γενική περίπτωση πρόκειται για ένα κυρτό κλειστό πολυέδρο N διαστάσεων, όπου N το πλήθος μεταβλητών του προβλήματος). Στη συνέχεια ο αλγόριθμος μετακινείται επί των ακμών του πολυέδρου μεταξύ των κορυφών του (κάθε κορυφή αποτελεί πιθανή βέλτιστη λύση), μέχρι να εντοπίσει την ολική βέλτιστη λύση. Η ολική βέλτιστη λύση θα είναι το σημείο όπου το πολυέδρο του χώρου εφικτών λύσεων εφάπτεται με ένα ισούψές επίπεδο της αντικειμενικής συνάρτησης. Σε κάθε φάση της αναζήτησης, οι ακμές του πολυέδρου που πρόσκεινται στην τρέχουσα κορυφή που εξετάζεται αντιστοιχούν σε δεσμευτικούς περιορισμούς (σύμφωνα με την ορολογία του simplex, ανήκουν στη βάση του συστήματος).

Για κάθε πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού (σύστημα 2.3) ορίζεται το αντίστοιχο δυαδικό:

$$\begin{aligned} \max z &= b^T\bar{\lambda} \\ A^T\bar{\lambda} &\leq c \\ \bar{\lambda} &\geq 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Τα δύο προβλήματα συνδέονται μεταξύ τους με το ισχυρό θεώρημα δυϊκότητας⁴, που ορίζει

⁴Εάν στο αρχικό σύστημα (2.3) ο αριθμός των περιορισμών υπερβαίνει τον αριθμό των μεταβλητών, τότε ο αλγόριθμος επιλέγει να λύσει το δυϊκό πρόβλημα. Αυτό εξοικονομεί υπολογιστικούς πόρους, εφ' όσον η βάση του συστήματος πάνω στην οποία εκτελούνται αλγεβρικοί μετασχηματισμοί ισοδυναμίας είναι τετραγωνική με διάσταση τον αριθμό περιορισμών του συστήματος.

ότι αν για ένα από τα δύο συστήματα (2.3) και (2.4) υπάρχει βέλτιστη λύση, τότε θα υπάρχει και για το άλλο, ενώ η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης θα είναι η ίδια:

$$b^T \bar{\lambda}^* = c\bar{x}^* \quad (2.5)$$

Οι μεταβλητές λ_i του δυαδικού προβλήματος αντιστοιχούν στους περιορισμούς του πρωτεύοντος. Για κάθε περιορισμό που είναι περιοριστικός στο σημείο ολικού βελτίστου, η αντίστοιχη σκιαώδης μεταβλητή έχει τιμή διάφορη του μηδενός:

$$\lambda_i = \frac{\partial z}{\partial b_i} \neq 0 \quad \text{αν } i\text{-στός περιορισμός δεσμευτικός}$$

και εκφράζει τη μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στο σημείο βελτίστου για μοναδιαία μεταβολή του σταθερού όρου του αντίστοιχου περιορισμού.

2.3 Το περιβάλλον μοντελοποίησης GAMS

Το σύστημα GAMS⁵ (Γενικό Σύστημα Αλγεβρικής Μοντελοποίησης) αναπτύχθηκε αρχικά από ειδικούς βελτιστοποίησης συστημάτων στην Παγκόσμια Τράπεζα για να διευκολύνει την ανάπτυξη μοντέλων βελτιστοποίησης επενδύσεων σε αναπτυσσόμενες χώρες. Επιτρέπει στο χρήστη να εισαγάγει το σύστημα προς επίλυση σε περιγραφική γλώσσα (high-level) και διασυνδέει το μοντέλο με τον αλγόριθμο επίλυσης που εφαρμόζεται.

2.3.1 Ορισμός συνόλων

Η μαθηματική τυποποίηση μοντέλων στο GAMS βασίζεται στον ορισμό συνόλων, με βάση τα οποία γίνεται ο ορισμός των δεδομένων και των εξισώσεων. Όλα τα δομικά στοιχεία του συστήματος (ενεργειακές μορφές και τεχνολογίες) ανήκουν σε τουλάχιστον ένα σύνολο. Η δήλωση των βασικών συνόλων του μοντέλου φαίνεται στον πίνακα 2.1.

2.3.2 Παράμετροι

Τα δεδομένα του μοντέλου οργανώνονται σε αρχεία EXCEL και εισάγονται στο GAMS μέσω κατάλληλων ενδιάμεσων προγραμμάτων⁶. Πριν γίνει η ανάθεση δεδομένων, πρέπει να έχουν οριστεί οι παράμετροι του μοντέλου (πίνακας 2.2). Πέρα από τις ρητές αναθέσεις τιμών στις παραμέτρους, το GAMS εκτελεί επιπλέον αναθέσεις σε εικονικές παραμέτρους.

2.3.3 Μεταβλητές

Αντίστοιχα δηλώνονται οι μεταβλητές του συστήματος. Η αντικειμενική συνάρτηση αντιστοιχεί επίσης σε μεταβλητή (πίνακας 2.3).

⁵ www.gams.com

⁶ Τα αρχεία EXCEL διασυνδέονται με το GAMS μέσω της εφαρμογής gdxrw.

```

//SET_DEFINITIONS_NETWORK_TOPOLOGY_DATA-----
SET      P          periods in model horizon
//-----
A          all entities (nodes and overlying entities)
N(A)      network nodes set {representing activity or energy form}
F(A)      infrastructure entities: regulated networks
//-----
D(N)      terminal nodes: [associated with useful energy demand]
DRES(D),DTER(D),DIND(D),DTRA(D) demand nodes - subsets
TCLASS    end-use utilising technologies classes /ORD,IMP,ADV/
T(N)      utilizing devices nodes: [end-use utilising technologies]
TINDi,TTERi,TRESi virtual nodes
TIND(N),TTRA(N),TRES(N),TTER(N)
F(N)      nodes: [final energy] by aggregate sector
FRES(N),FTER(N),FIND(N),FTRA(N)
//-----
PRI(N)    primary energy sources
NPRI(N)   non depletable primary energy sources
FPRI(N)   fossile primary energy sources
EXTR(N)   fossile primary energy sources extraction nodes
RSRC(N)   fossile primary energy resources nodes
TRNO(N)   transformation activities nodes
INTE(N)   intermediate energy carriers nodes
EHGX(N)   electricity + heat generation nodes [existing]
EHGF(N)   electricity + heat generation nodes [future]
//-----
IMPO(N)   imports nodes
EXPO(N)   exports nodes
...
;

```

Πίνακας 2.1: Ορισμός συνόλων: Η απαρίθμηση των μελών των συνόλων γίνεται στο αρχείο εισόδου EXCEL του μοντέλου.

```

//PARAMETERS_DEFINITION_BEGIN-----
...
IMPOQ    (IMPO,P)      imported energy carriers upper limit
...
EMF      (M,N,E)      emission factor by emission type by arc
...
KO       (*{M,F},CY)  existing capacity in base year
...
CC       (*{M,F},P)   capital cost overnight investment
...
UEDEM    (D,CY,*)    useful energy demand data [in specific useful energy units]
...
//PARAMETERS_DEFINITION_END-----

```

Πίνακας 2.2: Ορισμός παραμέτρων

```
//-----VARIABLES-----
Variable      obj      objective function
Positive Variable
              x(L,CY,P,S)    energy flow along arc L:M-->N [in ktoe]
              Ki(A,CY,P)    investment in capacity [in ktoe per y]
              xIn(M,CY,P,S)  injection in node with storage capacity
              xOut(M,CY,P,S)  extraction from node with storage capacity
...
;
//-----BOUND-VARIABLES-----
//no investment allowed in baseyear - existing equipment is fixed
Ki.fx(A,CY,P)$[ord(P) eq 1]=0;
...
```

Πίνακας 2.3: Ορισμός μεταβλητών

2.3.4 Εξισώσεις - ορισμός μοντέλου

Οι εξισώσεις του συστήματος δηλώνονται και στη συνέχεια ορίζονται. Για να ολοκληρωθεί η τυποποίηση του μοντέλου, προσδιορίζεται η μεταβλητή που αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση και η κατεύθυνση της βελτιστοποίησης (πίνακας 2.4).

2.4 Αλγόριθμος επίλυσης

Για την επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιείται το πρόγραμμα επίλυσης (solver) **CPLEX**⁷, που διασυνδέεται με την τυποποιημένη περιγραφή του μοντέλου μέσω του **GAMS**. Πέρα από τη βασική ιδέα του αλγορίθμου simplex ο **CPLEX** ενσωματώνει τεχνικές που επιταχύνουν την εύρεση του βέλτιστου σημείου του συστήματος, όπως η διάσχιση της περιοχής εφικτών λύσεων αντί της εξέτασης διαδοχικών κορυφών (σχήμα 2.2).

⁷www.cplex.com

```

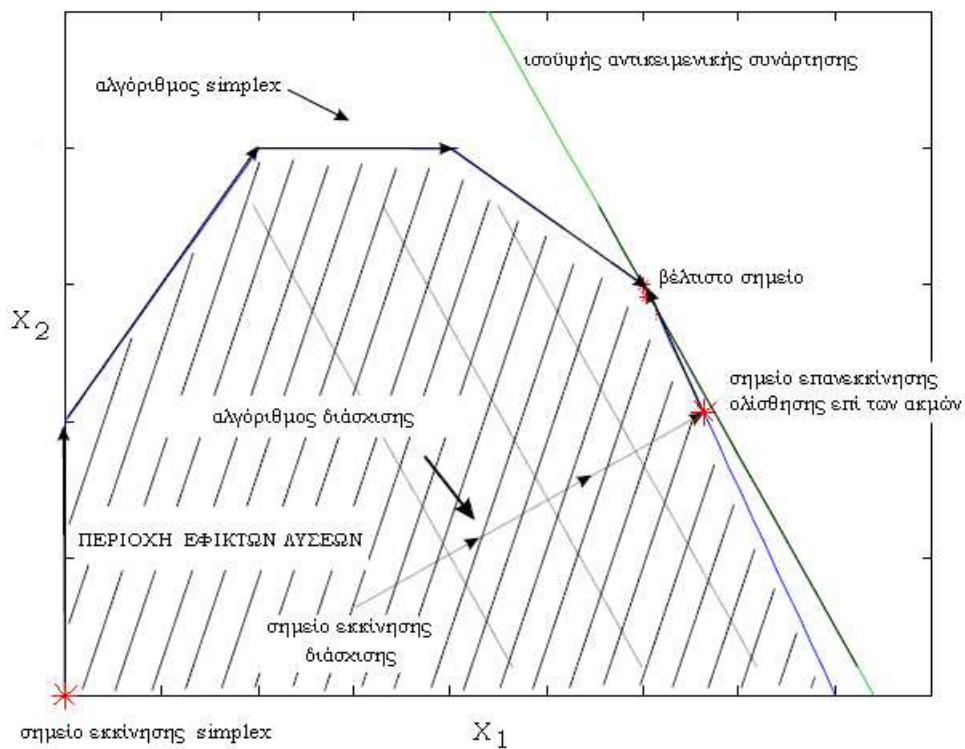
//-----EQUATIONS-----
//-----declaration
Equations
    udemDRES(DRES,CY,P,S)        satisfy demand at residential sector useful energy demand nodes
    ...
    eqFE(FE,CY,P,S)              balance at final energy supply nodes
    ...
    defObj                        objective function definition
    ...
//-----EQUATIONS-----
//-----definition
udemDRES(DRES,CY,P,S)..
    SUM(L,[iNet(L,DRES)*x(L,CY,P,S)]$[iNet(L,DRES) =+1]) =g=
        UEDEM(DRES,CY,P)*delta(S)/8760*alphaD(DRES,CY,S);
    ...

eqFE(FE,CY,P,S)..
    SUM(L,[iNet(L,FE)*x(L,CY,P,S)*(1-LLoss(L))*(1-SUM(F$iFLINK(L,F),LossF(F)))]$[iNet(L,FE)=+1]) =e=
        -SUM(L,[iNet(L,FE)*x(L,CY,P,S)]$[iNet(L,FE)=-1]);
    ...

defObj.. obj =e= SUM(CY,
    SUM(P,( ... {objective function terms}
        )/[(1+R(CY))**(PLEN*(ord(P)-1))])
    ))/1e+9;
//-----DEFINE MODEL = EQUATION SETS-----
Model BEASTLP /ALL/;
SOLVE BEASTLP using LP minimizing obj;

```

Πίνακας 2.4: Δήλωση και ορισμός εξισώσεων



Σχήμα 2.2: 2-διάστατο πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού: συμβατική μέθοδος simplex και διάσχιση της περιοχής εφικτών λύσεων προς την κατεύθυνση $\nabla f = \frac{\partial f}{\partial x_1} \vec{x}_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} \vec{x}_2$, όπου f η αντικειμενική συνάρτηση του 2-διάστατου προβλήματος.

Κεφάλαιο 3

Τεχνικο-οικονομικά χαρακτηριστικά του ενεργειακού υποσυστήματος υδρογόνου

Το υδρογόνο έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο κατά μάζα από όλα τα καύσιμα ($120-144 \frac{MJ}{kg}$)¹. Ωστόσο, σε κανονικές συνθήκες ($300K, 1atm$) το ενεργειακό του περιεχόμενο κατά όγκο είναι 3 τάξεις μικρότερο από αυτό που απαιτείται για χρησιμοποίησή του σε οποιαδήποτε κλίμακα ($10.8-12.7 \frac{MJ}{Nm^3}$), κάτι που καθιστά τις τεχνολογίες αποθήκευσης και μεταφοράς του υδρογόνου σε συμπιεσμένη ή υγρή μορφή κρίσιμο στάδιο στη διαμόρφωση ενός βιώσιμου ενεργειακού συστήματος υδρογόνου.

3.1 Παραγωγή

Το υδρογόνο είναι δευτερογενής ενεργειακός φορέας. Για την παραγωγή υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι συνδυασμοί πρώτης ύλης και πρωτογενούς² ενεργειακού φορέα. Η μόνη περίπτωση όπου διαφοροποιείται η πρώτη ύλη από τον ενεργειακό φορέα είναι στην παραγωγή υδρογόνου από νερό (μέσω ηλεκτρόλυσης ή θερμικής διάσπασης). Θεωρώντας ότι το νερό βρίσκεται σε αφθονία, η ταξινόμηση που ακολουθεί βασίζεται στον πρωτογενή ενεργεια-

	λ_M	$\lambda_V(l)$	$\lambda_V(g)$
υδρογόνο	1.00	1.00	1.00
μεθάνιο	0.25	2.10	3.30
αιθάνιο	0.20	2.60	
προπάνιο	0.18	2.50	8.70
πετρελαιοειδή	0.16	3.40	
αιθανόλη	0.13	2.30	
μεθανόλη	0.12	1.70	

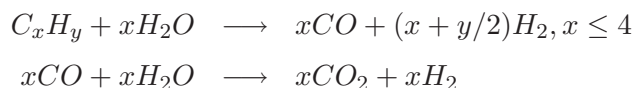
(όπου οι λόγοι του ενεργειακού περιεχομένου των συμβατικών

καυσίμων προς το ενεργειακό περιεχόμενο του H_2 δίνονται ως εξής: λ_M κατά μάζα, $\lambda_V(l)$ κατά όγκο υγρού ή υγροποιημένου καυσίμου (ανάλογα με τη φυσική κατάσταση του καυσίμου σε συνθήκες περιβάλλοντος) και $\lambda_V(g)$ κατά όγκο καυσίμου σε αέρια κατάσταση)

²Οι ενεργειακοί φορείς που μπορεί να μετασχηματιστούν σε υδρογόνο δεν είναι αποκλειστικά πρωτογενείς. Αναφέρονται ως πρωτογενείς γιατί προηγούνται του υδρογόνου στην αλυσίδα ενεργειακών μετατροπών.

κό φορέα - είσοδο κάθε τεχνολογίας. Ακολουθούν οι μηχανισμοί των βασικών τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου (ταξινομήση ανά εισερχόμενο στη διεργασία ενεργειακό φορέα)³:

1. Παραγωγή από φυσικό αέριο - ανασχηματισμός (**natural gas steam reforming**). Πρόκειται για την εξής καταλυόμενη ενδόθερμη αντίδραση σε δύο στάδια:



Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σήμερα σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας για την παραγωγή του υδρογόνου που καταναλώνεται από τη βιομηχανία σε χημικές διεργασίες. Μπορεί να συνδυαστεί με συλλέκτες ηλιακής θερμικής ενέργειας για την αύξηση της απόδοσης.

2. Παραγωγή από βαρείς υδρογονάνθρακες με μερική οξείδωση (**partial oxidation**). Πραγματοποιείται απ' ευθείας αντίδραση μερικής οξείδωσης των βαρέων υδρογονανθράκων σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση:



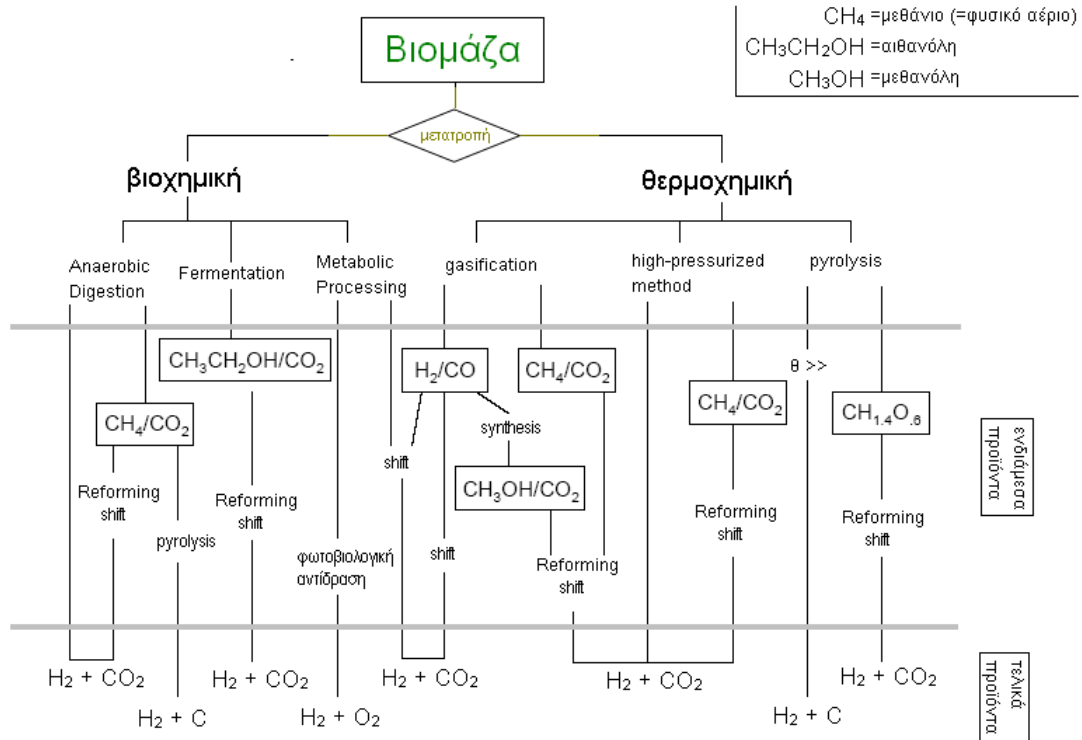
Η διεργασία αυτή πραγματοποιείται συνήθως σε εγκαταστάσεις διύλιση για ανακύκλωση βαρέων υδρογονανθράκων χαμηλής ποιότητας. Είναι εφαρμόσιμη μόνο σε μεγάλη κλίμακα.

3. Παραγωγή από άνθρακα με αεριοποίηση (**gasification**). Πραγματοποιείται μερική καύση (οξείδωση) του άνθρακα, ενώ το H_2 απομονώνεται σε δεύτερη φάση από το προκύπτον μίγμα H_2 και CO (syngas). Αποτελεί αποδοτική τεχνολογία αν υπάρχουν διαθέσιμα κοιτάσματα άνθρακα. Είναι δυνητικά συμβατή με την ανάπτυξη ενός περιβαλλοντικά βιώσιμου ενεργειακού συστήματος αν συνδυαστεί με υποσυστήματα κατακράτησης του CO_2 .
4. Παραγωγή από βιομάζα (;)(σχήμα 3.1): Οι αλυσίδες μετατροπής με είσοδο τη βιομάζα διαιρούνται σε άμεσες και έμμεσες (στις οποίες δημιουργούνται ενδιάμεσα αποθηκεύσιμα ενεργειακά προϊόντα)⁴. Ως προς τη διεργασία που εφαρμόζεται για τη μετατροπή της βιομάζας, διακρίνουμε τις εξής κατηγορίες:

- Θερμοχημικές μέθοδοι (αεριοποίηση, πυρόλυση): Προτείνονται πολλαπλές επιλογές για τη διάρθρωση της διεργασίας σε βιομηχανικό επίπεδο. Γενικά, η αεριοποίηση της βιομάζας έχει χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από την αεριοποίηση του άνθρακα (λόγω του χαμηλότερου περιεχομένου σε H_2 της βιομάζας). Το τελικό προϊόν της

³ Στοιχεία για την τεχνικο-οικονομική αξιολόγηση των τεχνολογιών που σχετίζονται με το ενεργειακό υποσύστημα του υδρογόνου παρατίθενται στα [14],[9]

⁴ Το ;; αναφέρει ως πλεονέκτημα των έμμεσων μεθόδων τη δυνατότητα διάσπασης τις αλυσίδας μετατροπής σε επιμέρους στάδια, ώστε το πρώτο στάδιο να υλοποιείται όπου υπάρχει διαθέσιμότητα βιομάζας και το δεύτερο όπου υπάρχει ζήτηση υδρογόνου. Ο συνδυασμός αυτός ελαχιστοποιεί τα κόστη μεταφοράς.

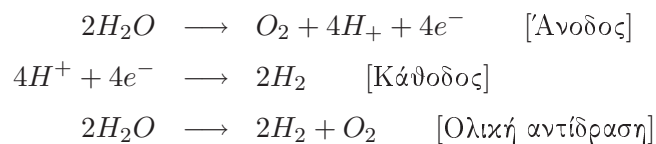


Σχήμα 3.1: Ενεργειακό υποσύστημα βιομάζας

αεριοποίησης είναι μίγμα κυρίως $\text{H}_2, \text{CO}_x, \text{CH}_4$ που ανάλογα με τα στάδια εμπλουτισμού και καθαρισμού δίνει το τελικό προϊόν σε διάφορους βαθμούς ενεργειακού περιεχομένου.

- Βιοχημικές μέθοδοι.

5. Από ηλεκτρισμό (ηλεκτρόλυση). Πρόκειται για ηλεκτροχημική διεργασία που πραγματοποιείται σε κύτταρα ηλεκτρόλυσης. Η βασική αρχή λειτουργίας (αντίστροφη των κυψελών καυσίμου) συνίσταται στις εξής αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στα ηλεκτρόδια του ηλεκτρολύτη⁵:



Το μεγαλύτερο μέρος της τιμής που διαμορφώνεται για το παραγόμενο υδρογόνο οφείλε-

⁵Βασικές κατηγορίες κυττάρων ηλεκτρόλυσης:

- Αλκαλικοί ηλεκτρολύτες
- Τύπου “Proton Exchange Membrane”
- Στερεών οξειδίων (Solid Oxide)

ται στο κόστος του ηλεκτρισμού, όταν η διεργασία ηλεκτρόλυσης τροφοδοτείται από το δίκτυο. Όταν ο ηλεκτρισμός προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές και παράγεται στη μονάδα ηλεκτρόλυσης, τότε το κόστος επένδυσης κυριαρχεί στη διαμόρφωση της τελικής τιμής. Η ηλιακή ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ηλεκτρόλυση είτε άμεσα με διοχέτευση ρεύματος στη συσκευή ηλεκτρόλυσης σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, είτε έμμεσα, όπου ένα μέρος της συλλεγόμενης ηλιακής ενέργειας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού στον οποίο εφαρμόζεται η ηλεκτρόλυση. Αντίστοιχα διαμορφώνονται αλυσίδες παραγωγής υδρογόνου από άλλες ανανεώσιμες πηγές. Η ηλεκτρόλυση έχει το πλεονέκτημα ότι υπάρχει ευελιξία στη διακοπή και επανεκκίνηση της διαδικασίας. Επομένως η παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρισμό του δικτύου τις ώρες χαμηλής ζήτησης προσθέτει μια δυνατή επιλογή αποθήκευσης ηλεκτρισμού στο ενεργειακό σύστημα.

6. Από θερμική ενέργεια: Το νερό μπορεί να διασπαστεί σε H_2 και O_2 σε ενδόθερμο καταλυόμενο κύκλο⁶ χρησιμοποιώντας θερμότητα από ηλιακή ή πυρηνική ενέργεια⁷.

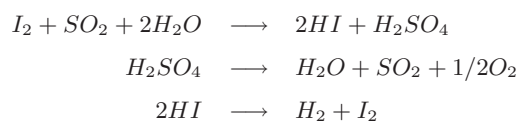
Ορισμένες από τις παραπάνω βασικές κατηγορίες μεθόδων παραγωγής υδρογόνου μπορούν να υλοποιηθούν σε μικρή ή μεγάλη κλίμακα (οπότε η τιμή του υδρογόνου σε επίπεδο τελικού καταναλωτή διαφοροποιείται αντίστοιχα). Η επιλογή κεντρικής ή κατανεμημένης παραγωγής προσθέτει έναν ακόμη βαθμό ελευθερίας στη διάρθρωση του υποσυστήματος υδρογόνου.

Βασικά τεχνικο-οικονομικά μεγέθη τεχνολογιών παραγωγής παρατίθενται στον πίνακα 3.2⁸.

3.2 Αποθήκευση και μεταφορά

Η χρησιμοποίηση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα απαιτεί τη μεταφορά και αποθήκευσή του στον τόπο της παραγωγής ή κατανάλωσης για κυμαινόμενα χρονικά διαστήματα⁹, προκειμένου να ταυτοχρονιστεί η παραγωγή με τη ζήτηση. Στον πίνακα 3.3 φαίνεται το ενεργειακό

⁶ Ενδεικτικά αναφέρεται ο κύκλος $S - I_2$:



⁷ Η μελέτη των δυνατών θερμοδυναμικών κύκλων παραγωγής H_2 από πυρηνική θερμική ενέργεια φθίνει, μεταξύ άλλων λόγω της πολυπλοκότητας που απαιτεί η κατασκευή των μονάδων, ενώ αντίθετα η αύξηση του βαθμού συμπύκνωσης της συλλεγόμενης ηλιακής ακτινοβολίας που μπορεί να επιτευχθεί προωθεί τους αντίστοιχους κύκλους θερμικής διάσπασης από ηλιακή ενέργεια ([9])

⁸ Στα μεγέθη που παρατίθενται υπάρχει μεγάλος βαθμός αβεβαιότητας που προκύπτει από την προσπάθεια ταξινόμησης δεδομένων για τεχνολογίες που βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης. Στη βιβλιογραφία για τις τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις που οφείλονται και στις υποθέσεις σχετικά με τις οικονομίες κλίμακας των επιμέρους τεχνολογιών. Η αβεβαιότητα και οι αποκλίσεις αυξάνουν ακόμη περισσότερο στα δεδομένα των τεχνολογιών αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου.

⁹ Αναλυτική διερεύνηση των δυνατών συνδυασμών περιέχεται στο [2]

Σχήμα 3.2: Πίνακας ενδεικτικών μεγεθών για τις βασικές τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου

	οριοθέτηση κλίμακας (Nm ³ /h)	απόδοση	συντελεστής διαθεσιμότητας	τεχνολογική επιβίωση	κόστος επένδυσης €/2000/kW _H
ανασηματισμός φυσικού αερίου					
μικρή κλίμακα	~ 1,000	0.65	0.85	25	700
μεγάλη κλίμακα	~100,000	0.75	0.90	25	350
ηλιακός συλλέκτης	~100,000	1.20	0.20	20	380
μερική οξειδωση βαρέων υδρογονανθράκων					
μεγάλη κλίμακα	~100,000	0.77	0.90	25	500
αεριοποίηση άνθρακα					
χωρίς κατακράτηση CO ₂	>100,000	0.60	0.90	25	1000
με κατακράτηση CO ₂	>100,000	0.55	0.90	25	1200
θερμοχημική μετατροπή βιομάζας					
	~10,000	0.77	0.80	25	2500
ηλεκτρόλυση					
μικρή κλίμακα	~1,000	0.75	0.90	20	860
μεγάλη κλίμακα	~100,000	0.75	0.90	20	700

Σχήμα 3.3: Ενεργειακό περιεχόμενο ανά μορφή αποθήκευσης για το υδρογόνο

μορφή αποθήκευσης	κατά μάζα ενεργειακή πυκνότητα [kWh/kg]	κατά όγκο ενεργειακή πυκνότητα [kWh/l]
αέριο (20 MPa)	33.3	0.53
αέριο (24,8 MPa)		0.64
αέριο (30 MPa)		0.75
υγρό (-253°C)		2.36
μεταλλικό υδρίδιο	0.58	3.18

περιεχόμενο του υδρογόνου ανά μορφή αποθήκευσης¹⁰:

- Υγροποιημένο υδρογόνο: Το υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο του υγρού H_2 καθιστά την υγροποίηση του H_2 κατάλληλο ενδιαμέσο στάδιο αν πρόκειται να μεταφερθεί σε μεγάλη απόσταση. Ο κύκλος υγροποίησης του H_2 απαιτεί μεγάλη ποσότητα ενέργειας (ψύξη του H_2 από θερμοκρασία περιβάλλοντος ως το σημείο ζέσης (20,3 βαθμοί πάνω από το απόλυτο μηδέν) ισοδυναμεί με απώλεια περίπου 15% του αρχικού ενεργειακού περιεχομένου). Η αποθήκευση του H_2 σε υγρή μορφή απαιτεί ειδικά μονωμένα (ώστε να μην αυξάνεται η πίεση στο δοχείο λόγω μερικής εξάτμισης (boil-off) του αποθηκευμένου H_2) δοχεία που αυξάνουν το κόστος του συστήματος αποθήκευσης.
- Συμπιεσμένο αέριο¹¹: Το H_2 αποθηκεύεται υπό πίεση (5-200atm) σε δοχεία κατάλληλα

¹⁰ Αναφέρονται μορφές αποθήκευσης που είναι διαθέσιμες στην παρούσα φάση. Η έρευνα στο επίπεδο της αποθήκευσης υδρογόνου επικεντρώνεται στα συστήματα αποθήκευσης σε στερεά μορφή (όπως αυτά που βασίζονται στον άνθρακα και επιτρέπουν την αποθήκευση του H_2 σε υψηλή κατά μάζα ενεργειακή πυκνότητα (έως και 65% του βάρους τους), που εξασφαλίζουν ασφαλή και σταθερή αποδέσμευση του H_2 από το μέσο αποθήκευσης).

¹¹ Υποπερίπτωση αποτελεί η αποθήκευση σε υπόγειες φυσικές δεξαμενές (π.χ. ορυχεία), που εξαρτάται από

είτε αποκλειστικά για μεταφορά είτε για μεταφορά και αποθήκευση. Για τη συμπίεση απαιτείται ενέργεια που αντιστοιχεί σε 6% απώλεια ενεργειακού περιεχομένου για συμπίεση σε 6atm .

3. Μεταλλικό υδρίδιο: Πρόκειται για ενώσεις μετάλλων με υδρογόνο όπου η δέσμευση του υδρογόνου από το μέταλλο είναι ελεγχόμενη αναστρέψιμη σε κατάλληλες συνθήκες πίεσης - θερμοκρασίας.

Οι μέθοδοι αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για στατική αποθήκευση του υδρογόνου, όσο και πάνω σε οχήματα που χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως φορέα ενέργειας. Αν και η επιλογή μιας μεθόδου αποθήκευσης για μια συγκεκριμένη εφαρμογή είναι απλή μέσω τεχνικο-οικονομικής μελέτης, δημιουργείται σημαντική πολυπλοκότητα σε σχέση με την ενσωμάτωση των επιλογών αποθήκευσης στα πλαίσια ενός ενεργειακού συστήματος μεγάλης κλίμακας. Για παράδειγμα, το υγρό υδρογόνο έχει κατά μάζα τη μεγαλύτερο ενεργειακή πυκνότητα, ωστόσο απαιτεί μονωμένο δοχείο για την αποθήκευσή του ενώ η διαδικασία υγροποίησης έχει σημαντικές απώλειες. Απώλειες προκαλούνται και από τη σταδιακή εξάτμιση για μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης (περίπτωση στην οποία είναι ιδανική η αποθήκευση σε μορφή υδριδίου λόγω μηδενικών απωλειών στη διάρκεια της αποθήκευσης). Είναι προφανές ότι για τη μοντελοποίηση του ενεργειακού υποσυστήματος του υδρογόνου πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν γεωγραφικές και χρονικές παράμετροι, όπως επίσης και οι οικονομίες κλίμακας που παρουσιάζονται ιδιαίτερα έντονες στο υποσύστημα του υδρογόνου. Τέλος, για την επιλογή μορφής αποθήκευσης λαμβάνεται υπ' όψιν η μέθοδος παραγωγής από όπου προέκυψε το υδρογόνο (π.χ. σε ορισμένα κύτταρα ηλεκτρόλυσης το H_2 παραγεται σε συμπιεσμένη μορφή.).

Στον πίνακα 3.4 παρατίθενται χαρακτηριστικά προσεγγιστικά μεγέθη των δυνατών επιλογών αποθήκευσης του H_2 .

3.2.1 Επιλογές μεταφοράς H_2 στην τελική κατανάλωση

Βασικές επιλογές μεταφοράς του υδρογόνου στον τελικό καταναλωτή:

1. οδική¹² μεταφορά σε κρυογενικά βυτία (ειδικά μονωμένα δοχεία υγρού H_2)
2. οδική μεταφορά σε δοχεία συμπιεσμένου αερίου
3. οδική μεταφορά στερεών μορφών υδρογόνου
4. μεταφορά μέσω αγωγού¹³: Εκτός της υποδομής αγωγών αποκλειστικά για διανομή υδρογόνου, το υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί μέσω του υπάρχοντος δικτύου φυσικού αερίου. Αναμιγνύοντας το φυσικό αέριο με υδρογόνο (σε δεσμευμένη αναλογία, εξαιτίας της ιδιότητας του υδρογόνου να αντιδρά με τους μεταλλικούς αγωγούς του δικτύου

τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του υπό μελέτη ενεργειακού συστήματος.

¹²ή σιδηροδρομική

¹³Τα δίκτυα αγωγών έχουν μεγάλη χωρητικότητα, ενώ ανά διαστήματα τοποθετούνται σταθμοί ανασυμπίεσης του αερίου. Ρυθμίζοντας την πίεση του αερίου στον αγωγό (και επομένως τη μάζα του αερίου που περιέχεται στο σύστημα), το σύστημα μεταφοράς μπορεί να χρησιμοποιηθεί και ως σύστημα αποθήκευσης.

Σχήμα 3.4: Προσεγγιστικά μεγέθη δυνατών επιλογών αποθήκευσης του H_2

χωρητικότητα συστήματος αποθήκευσης (GJ)	κόστος επένδυσης (€ ₂₀₀₀ /GJ) [χωρητικότητα]	κόστος αποθήκευσης (€ ₂₀₀₀ /GJ)	
συμπιεσμένο αέριο			
βραχυχρόνια αποθήκευση (1-3 ημέρες)			
~100	8000	4.0	
~10,000	2000	1.8	
~100,000	1500	1.5	
μακροχρόνια αποθήκευση (~30 ημέρες)			
~10,000	2800	35.0	
~100,000	800	12.0	
~1,000,000	500	7.0	
βραχυχρόνια αποθήκευση (1-3 ημέρες) - υπόγεια δεξαμενή [προσέγγιση]	100	1.0	
υγρό			
βραχυχρόνια αποθήκευση (1-3 ημέρες)			
~100	35000	17.0	
~10,000	7000	7.0	
~100,000	1800	5.0	
μακροχρόνια αποθήκευση (~30 ημέρες)			
~10,000	1600	22.0	
~100,000	600	25.0	
~1,000,000	150	6.0	
μεταλλικό υδρίδιο			
βραχυχρόνια αποθήκευση (1-3 ημέρες) [προσέγγιση]			
~100,000	10000	4.0	
μακροχρόνια αποθήκευση (~30 ημέρες) [προσέγγιση]	~1,000,000	18000	200.0

παράγοντες για συνδυασμένη επιλογή μεθόδου αποθήκευσης και μεταφοράς
ρυθμός παραγωγής
απόσταση ως τον τελικό καταναλωτή
χρόνος αποθήκευσης (ισοδύναμα, ρυθμός ζήτησης)

Πίνακας 3.1: Παράμετροι επιλογής μεθόδου αποθήκευσης και μεταφοράς

Πίνακας 3.2: Ενδεικτικοί υπολογισμοί κόστους οδικής μεταφοράς H_2 (πηγή: [9])

περίπτωση	απόσταση μεταφοράς	χωρητικότητα δοχείου(kg)	κόστος €/GJ
$H_2(l)$, μικρή απόσταση	100km	3500	2.0
$H_2(g)$, μικρή απόσταση	100km	250	17.0
$H_2(l)$, μεγάλη απόσταση	800km	3500	7.6
$H_2(g)$, μεγάλη απόσταση	800km	250	76.0

υδρογόνου) το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε θερμικές διεργασίες (καύση) στον βιομηχανικό, οικιακό και τριτογενή τομέα, ελαττώνοντας τις εκπομπές που οφείλονται στις αντίστοιχες διεργασίες.

Η κατανάλωση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών απαιτεί την κατασκευή δικτύου σταθμών τροφοδότησης των οχημάτων. Αντίστοιχα με την πολυπλοκότητα των συνδυασμών μεθόδων παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς, οι σταθμοί μπορεί να ανεφοδιάζονται από μονάδες κεντρικής παραγωγής ή να περιλαμβάνουν επιτόπιες μονάδες μικρής κλίμακας. Το επενδυτικό κόστος διαμορφώνεται ανάλογα και αποτελεί αντικείμενο τεχνικο-οικονομικών μελετών. Το κόστος επένδυσης ενός σταθμού ανεφοδιασμού τοποθετείται στην κλίμακα 1500-2000€/ (kg/d).

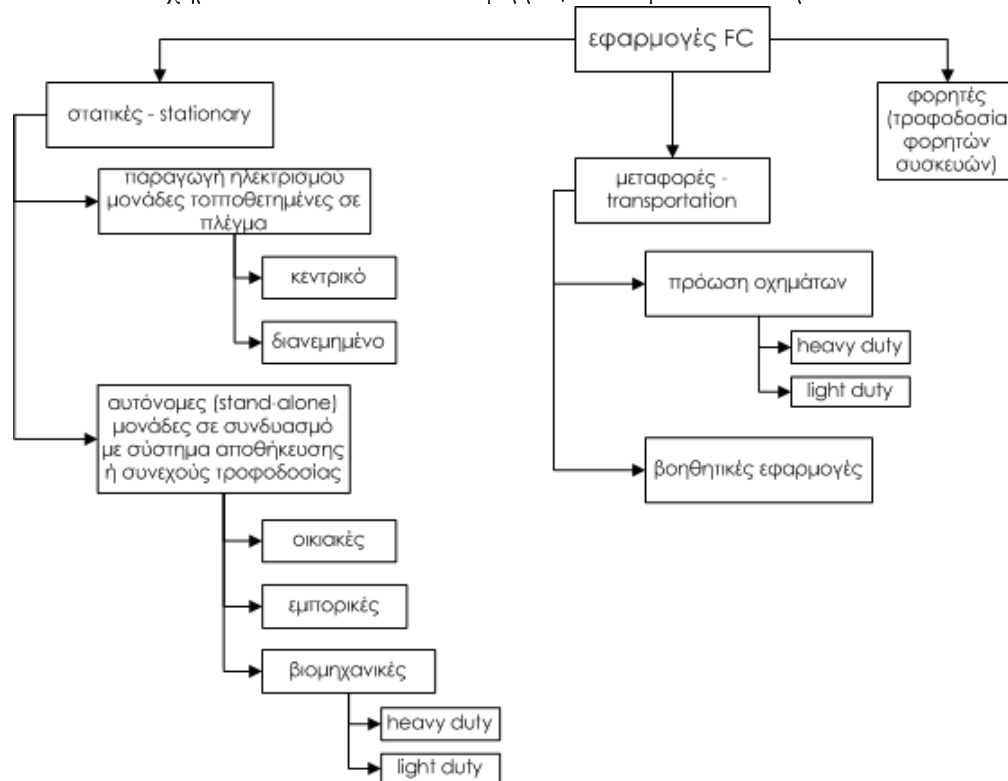
3.3 Τεχνολογίες τελικής χρήσης

Διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες τελικής κατανάλωσης H_2 : στατικές εφαρμογές, σε αντίθεση με τις τεχνολογίες του τομέα μεταφορών, και ηλεκτροχημικές διεργασίες (οι οποίες υλοποιούνται σε κυψέλες καυσίμου), σε αντίθεση με τις διεργασίες που βασίζονται στην καύση του υδρογόνου¹⁴. Οι δυνητικά βιώσιμες εφαρμογές του H_2 μέσω ηλεκτροχημικών διεργασιών (fuel cells) επικεντρώνονται στην πρόωση οχημάτων και την (αποκεντρωμένη) συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας¹⁵.

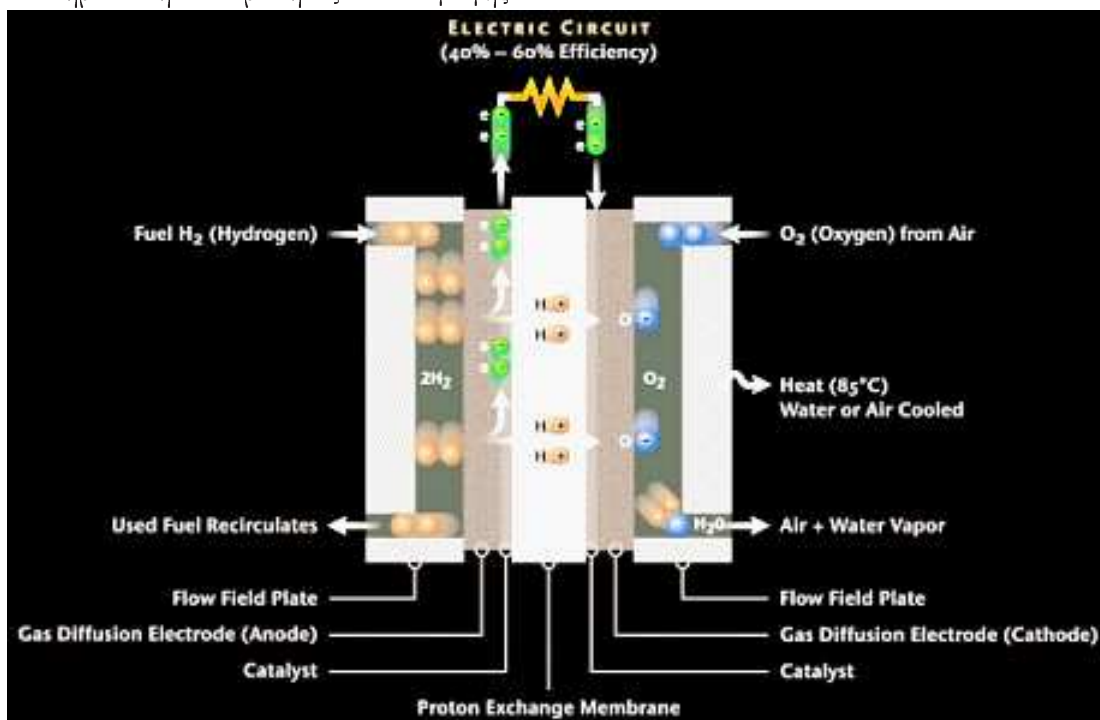
- Στατικές εφαρμογές κυψελών καυσίμου H_2 : Δυνατές τεχνολογίες για τον τομέα αυτό είναι οι εξής κατηγορίες κυψελών: PEM, PAFC, MCFC, SOFC, AFC. Βασίζονται

¹⁴Η αντίδραση καύσης του H_2 ($H_2 + O_2 \rightarrow H_2O + Q$) δίνει μηδενικές εκπομπές CO_2 . Ωστόσο, όταν στην καύση χρησιμοποιείται ατμοσφαιρικός αέρας προκύπτουν επίσης οξείδια του αζώτου NO_x .

¹⁵Η ανάπτυξη των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου ευνοεί τη διανεμημένη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού, διότι η απόδοσή τους ως προς τον παραγόμενο ηλεκτρισμό κυμαίνεται στο 30-40%, ενώ συνυπολογίζοντας την παραγόμενη θερμότητα προσεγγίζει το 85%

Σχήμα 3.5: Δυνατά πεδία εφαρμογών κυψελών καυσίμου H_2 

Σχήμα 3.6: Αρχή λειτουργίας fuel cell - σχηματικό διάγραμμα (πηγή: www.ballard.com): Κυψέλη τύπου PEM όπου τα ιόντα H^+ (πρωτόνια) διέρχονται μέσα από μεμβράνη ώστε να ολοκληρωθεί η αντίδραση οξειδοαναγωγής.



Πίνακας 3.3: Χαρακτηριστικά τεχνικοοικονομικά μεγέθη στατικών εφαρμογών ηλεκτροπαραγωγής από κυψέλες καυσίμου H_2

όρια κλάσης	μικρή κλίμακα 1-5kW _{el}	μεγάλη κλίμακα 0.1-10MW _{el}
απόδοση ως προς την ηλεκτρική ενέργεια	30%	50%
ολική απόδοση	85%	85%
συντελεστής διαθεσιμότητας	90%	90%
χρόνος ζωής	15y	15y
κόστος επένδυσης €/kW _{el}	11000	12000
χρόνος υποδιπλασιασμού κόστους	< 5y	< 5y
σταθερό κόστος λειτουργίας (% κόστους επένδυσης)	5%	3%

στην ίδια αρχή λειτουργίας (σχήμα 3.6) αλλά διαφοροποιούνται ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής (μικρή ή μεγάλη κλίμακα εγκατάστασης, δυνατότητα ταυτοχρονισμένης προσαρμογής στη ζήτηση¹⁶, θερμοκρασία λειτουργίας). Χαρακτηριστικά γενικευμένα μεγέθη για την κλάση αυτή εφαρμογών H_2 παρουσιάζονται στον πίνακα 3.3.

- Στατικές εφαρμογές συμβατικής καύσης H_2 : Το H_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής μικρής κλίμακας εσωτερικής καύσης (το κόστος επένδυσης κυμαίνεται στα €1400/kW_{el} με ηλεκτρική απόδοση 0.45), καθώς και σε κάθε εφαρμογή θερμικής μετατροπής (παραγωγή θερμότητας υψηλής ενθαλπίας στο βιομηχανικό τομέα, θέρμανση στον οικιακό ή τριτογενή τομέα).
- Εφαρμογές κυψελών καυσίμου H_2 στον τομέα των μεταφορών: Η αρχή λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου είναι η ίδια. Η διαφοροποίηση έγκειται στο σχεδιασμό του ολοκληρωμένου συστήματος (το οποίο περιλαμβάνει εκτός της κυψέλης τον ηλεκτρικό κινητήρα, το σύστημα ελέγχου, ψύξης, παροχής αέρα για την πραγματοποίηση της αντίδρασης οξειδοαναγωγής¹⁷ και αποθήκευσης του H_2 επί του οχήματος. Με μέσο κόστος των συμβατικών μηχανών πρόωσης οχημάτων 30€/kW, ο στόχος των 60€/kW για συστήματα H_2 ¹⁸ θεωρείται εφικτός ως το 2015.
- Εφαρμογές H_2 συμβατικής καύσης στον τομέα των μεταφορών: Η χρησιμοποίηση H_2 σε μηχανές εσωτερικής καύσης για πρόωση οχημάτων θεωρείται ενδιάμεσο στάδιο¹⁹ της μετάβασης σε τεχνολογίες FC²⁰.

¹⁶ Ενδεικτικά, τα συστήματα SOFC, MCFC απαιτούν μεγάλο χρονικό διάστημα εκκίνησης, οπότε αποκλείονται από εφαρμογές μικρής κλίμακας.

¹⁷ και πιθανά τον ανασχηματιστή (reformer) του καυσίμου (π.χ. φυσικό αέριο, μεθάνολη), αν το όχημα δεν τροφοδοτείται απευθείας με H_2

¹⁸ <http://www.eere.energy.gov/vehiclesandfuels/>

¹⁹ Οι μηχανές εσωτερικής καύσης μειονεκτούν ως προς την απόδοση και τις εκπομπές αέριων ρύπων (NO_x) σε σχέση με τις κυψέλες καυσίμου.

²⁰ Οχήματα H_2ICE για εμπορική εκμετάλλευση έχουν αναπτυχθεί μεταξύ άλλων από τις εταιρείες www.stuartenergy.com, www.isecorp.com, www.ford.com, τροποιώντας συμβατικούς κινητήρες.

Κεφάλαιο 4

Ανάπτυξη μοντέλου

4.1 Εισαγωγή - Μεθοδολογία

Το μοντέλο που αναπτύσσεται είναι ένα γραμμικό (2.1), διαχρονικό (inter-temporal) ενεργειακό μοντέλο μακροχρόνιου ενεργειακού σχεδιασμού που προσδιορίζει τη διάρθρωση¹ ελάχιστου κόστους του ενεργειακού συστήματος. Η λύση που υπολογίζεται είναι λύση ισορροπίας για τον ενεργειακό τομέα της οικονομίας. Η ισορροπία του ενεργειακού συστήματος περιγράφεται από τις ενεργειακές ροές (ή *ισοδύναμα* από τις τιμές των ενεργειακών αγαθών που υπολογίζονται ενδογενώς από το μοντέλο ως δυαδικές τιμές των εξισώσεων περιορισμών 2.4). Το μοντέλο οδηγείται από την ικανοποίηση των ενεργειακών αναγκών της οικονομίας² για τη διάρκεια του ορίζοντα του μοντέλου. Δεν υπάρχει ρητή διάκριση μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών στο σύστημα. Για κάθε ενεργειακή μορφή οι διεργασίες που τροφοδοτούν τον κόμβο αποτελούν *εικονικούς παραγωγούς* και οι διεργασίες που τροφοδοτούνται *εικονικούς καταναλωτές* του συγκεκριμένου φορέα ενέργειας.

Η ολική ισορροπία της οικονομίας επηρεάζει το ενεργειακό σύστημα όπως αναπαρίσταται στο μοντέλο με τους εξής τρόπους:

- Μέσω της προβλεπόμενης για τον ορίζοντα του μοντέλου ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες. Η ζήτηση ωφέλιμης ενέργειας (*Basic Energy Demand*) είναι εξωγενής μεταβλητή για το μοντέλο ενεργειακού σχεδιασμού και προκύπτει από οικονομετρικά μοντέλα ή μοντέλα ολικής ισορροπίας της οικονομίας. Θεωρείται ότι οι συναρτήσεις ζήτησης ενεργειακών υπηρεσιών είναι σταθερές (δεν υπάρχει ελαστικότητα ως προς το κόστος ικανοποίησης των επιμέρους ενεργειακών αναγκών [σχήμα 4.1]).
- Μέσω του συντελεστή αναγωγής σε παρούσα αξία (4.5.4).
- Εμμέσως, μέσω του κόστους εργασίας και υλικών που επηρεάζουν τα μεταβλητά και επενδυτικά κόστη των ενεργειακών τεχνολογιών.

¹Η διάρθρωση του ενεργειακού συστήματος ορίζεται από τις αποφάσεις του μοντέλου σχετικά με τις επενδύσεις σε τεχνολογίες, τα επίπεδα λειτουργίας των εγκατεστημένων τεχνολογιών και την αναλογία μεταξύ των εναλλακτικών ενεργειακών μορφών τροφοδότησης κάθε διεργασίας.

²σε όρους ωφέλιμης ενέργειας, όπως μηχανικό έργο ή θερμότητα

4.1.1 Ιδιότητες του μοντέλου

Το μοντέλο υπολογίζει τη βέλτιστη λύση σύμφωνα με τις εξής υποθέσεις:

- Υποθέτουμε ότι οι επενδύσεις σε τεχνολογίες που υλοποιούνται στο μοντέλο μπορούν να έχουν οποιοδήποτε μέγεθος (αγνοούνται οι περιορισμοί διακριτότητας). Στο πραγματικό ενεργειακό σύστημα ωστόσο, οι τεχνολογίες ενεργειακών μετατροπών είναι διαθέσιμες σε διακριτά μεγέθη³.
- Η κατάσταση ισορροπίας συνεπάγεται ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους. Το μοντέλο οδηγείται έμμεσα μέσω της ελαχιστοποίησης του ολικού κόστους στις επιμέρους καταστάσεις ισορροπίας για κάθε ενεργειακό φορέα και για τη ζητούμενη ωφέλιμη ενέργεια. Στο σχήμα [4.1] φαίνεται η διάρθρωση της κατάστασης ισορροπίας για τη ζήτηση ωφέλιμης ενέργειας, όπου υποθέτουμε ότι η καμπύλη ζήτησης⁴ είναι σταθερά⁵. Αντίστοιχα στο σχήμα [4.2] φαίνεται η ισορροπία που διαμορφώνεται ενδογενώς στο μοντέλο για κάθε μη τερματικό κόμβο ενεργειακού φορέα (κόμβοι FPRI, INTE, Fxxx σύμφωνα με τον διαχωρισμό των δομικών στοιχείων του μοντέλου σε σύνολα). Κάθε σημείο ασυνέχειας της τμηματικά σταθερής καμπύλης προσφοράς αντιστοιχεί σε εξάντληση της διαθέσιμης ποσότητας ενός πόρου ή της δυναμικότητας μιας τεχνολογίας (γενικά, σε εναλλαγή των περιορισμών που βρίσκονται κάθε στιγμή στη βάση του γραμμικού συστήματος του μοντέλου [παράγραφος 2.2]).
- Το μοντέλο υπολογίζει τη διαχρονική ισορροπία του ενεργειακού τομέα, υποθέτοντας ότι ο παράγοντας λήψης αποφάσεων⁶ έχει a priori πληροφόρηση για τον ορίζοντα του μοντέλου. Η ισορροπία υπολογίζεται σε ένα πέρασμα (pass) για όλες τις περιόδους⁷.

³Για να ενσωματωθεί η διακριτότητα των πραγματικών τεχνολογιών στο μοντέλο πρέπει να εφαρμοστεί μικτός ακέραιος προγραμματισμός.

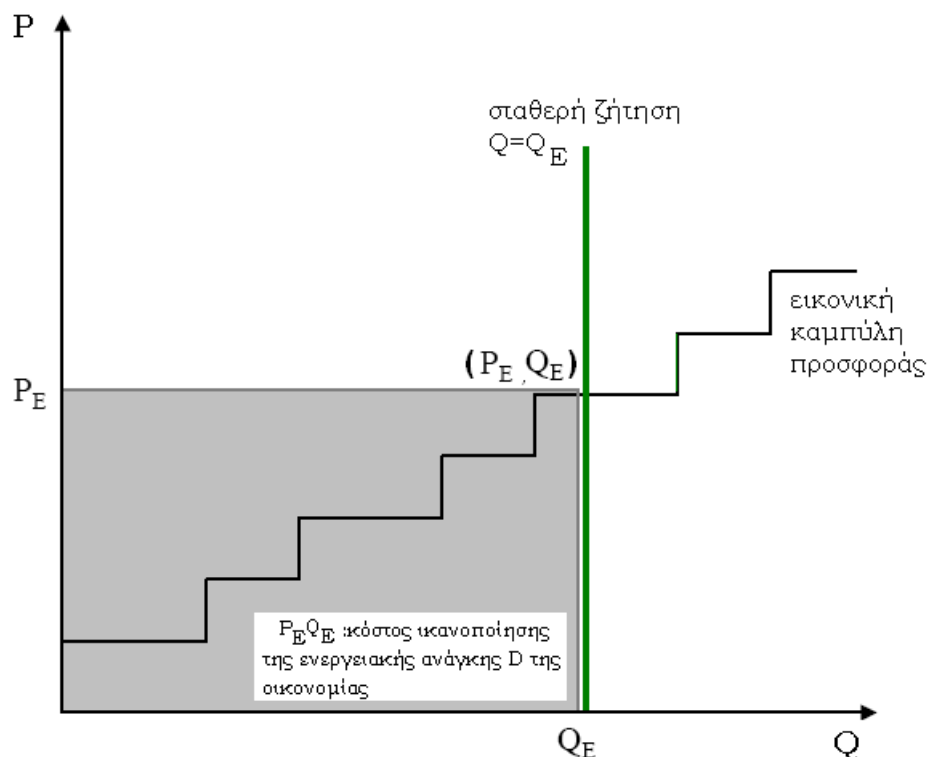
⁴Οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης για τους ενεργειακούς φορείς του μοντέλου δεν εκφράζονται ρητά, αλλά σχηματίζονται ενδογενώς κατά την αριθμητική επίλυση του μοντέλου. Οι εικονικές καμπύλες που προκύπτουν περιγράφουν την κατάσταση μερικής ισορροπίας που υπολογίζει το μοντέλο.

⁵Η τιμή ισορροπίας P_E αντιστοιχεί στη σκιώδη τιμή της εξίσωσης περιορισμού για την ικανοποίηση της αντίστοιχης ζήτησης. Η εικονική καμπύλη προσφοράς $p_D = p_D(q)$ για κάθε ενεργειακή υπηρεσία D δημιουργείται ενδογενώς από το μοντέλο. Το συνολικό κόστος του συστήματος αντιστοιχεί στο άθροισμα των γινομένων της δυαδικής τιμής κάθε εξίσωσης ζήτησης ωφέλιμης ενέργειας επί τις αντίστοιχες ζητούμενες ποσότητες για κάθε D :

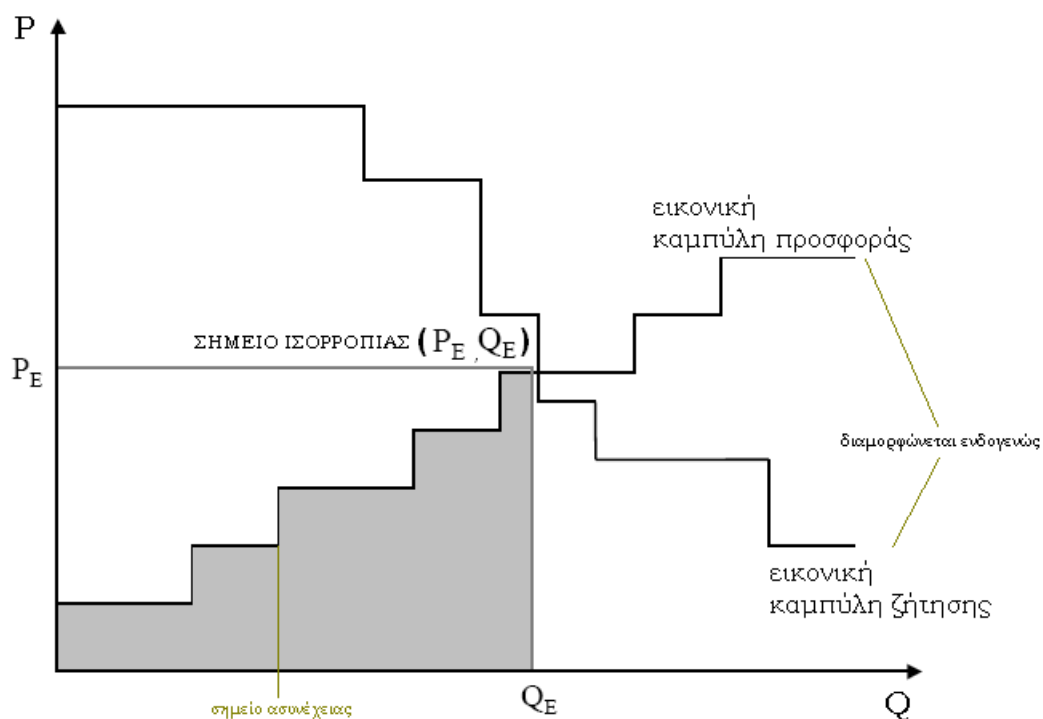
$$\sum_D Q_E(D)p_E(D) \quad (4.1)$$

⁶social planner

⁷Η ισορροπία που υπολογίζεται με την υπόθεση αυτή ονομάζεται και inter-temporal.



Σχήμα 4.1: Κατάσταση ισορροπίας στους κόμβους ωφέλιμης ενέργειας - σταθερή ζήτηση για κάθε ενεργειακή υπηρεσία



Σχήμα 4.2: Κατάσταση ισορροπίας στους ενδιάμεσους κόμβους ενεργειακών φορέων - ενδογενής διαμόρφωση **εικονικών** καμπυλών προσφοράς και ζήτησης

4.2 Παράσταση ενεργειακού συστήματος

4.2.1 Γράφος αναφοράς

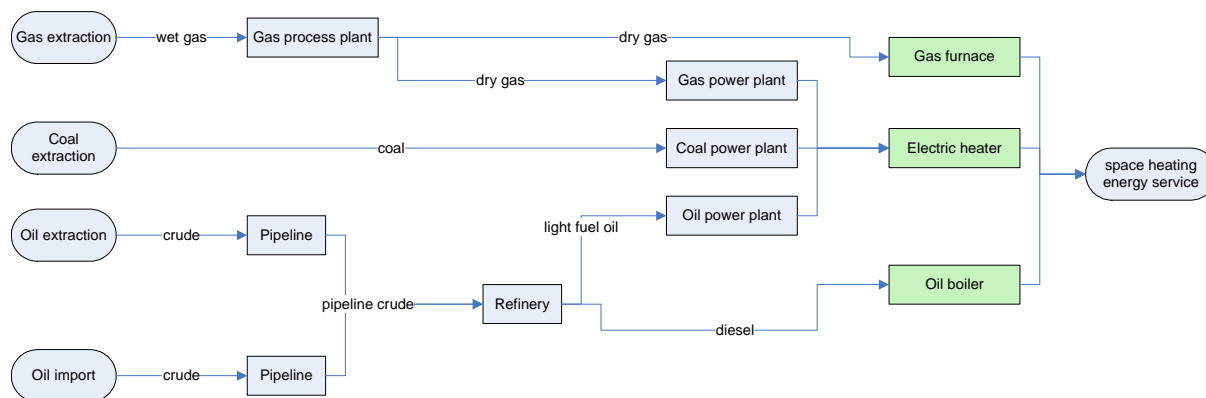
Η συστηματοποιημένη απεικόνιση των ενεργειακών συστημάτων με γράφους αναπτύχθηκε στο *Brookhaven National Laboratory*. Με τον όρο **Γράφος αναφοράς ενεργειακού συστήματος** ή **RES (Reference Energy System)** εννοούμε ένα γραφικό μοντέλο που περιγράφει όλες τις ενεργειακές ροές και μετατροπές σε ένα ενεργειακό σύστημα. Το RES μετασχηματίζεται σε ένα μαθηματικό μοντέλο χρησιμοποιώντας μεθοδολογίες της *Επιχειρησιακής έρευνας*. Αποτελεί ένα σύνθετο διάγραμμα ροής όπου αναπαρίστανται όλες οι ενεργειακές μετατροπές από την εξόρυξη ή τη συλλογή των πρωτογενών πηγών ενέργειας ως την τελική κατανάλωση. Συνήθως ακολουθείται η εξής σύμβαση⁸:

- **κόμβοι:** Αντιστοιχούν σε διεργασίες παραγωγής, κατανάλωσης ή μετατροπής ενέργειας.
- **κλάδοι:** Αντιστοιχούν σε ροές ενέργειας μεταξύ των κόμβων.

Το διάγραμμα ροής σχεδιάζεται με φορά από τα αριστερά προς τα δεξιά, ώστε οι τερματικοί κόμβοι να αντιστοιχούν:

- στις διαθέσιμες πηγές πρωτογενούς ενέργειας (αριστερό άκρο)
- στη ζήτηση για ωφέλιμη ενέργεια σε επίπεδο καταναλωτή (δεξιό άκρο)

Διατρέχοντας ένα διάγραμμα RES [σχήμα 4.3] οριζόντια ακολουθούμε την αλυσίδα ενός ενεργειακού φορέα από την παραγωγή στην τελική κατανάλωση. Διατρέχοντας το ίδιο διάγραμμα κατακόρυφα εντοπίζουμε σύνολα τεχνολογιών που ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την κάλυψη της ανάγκης για κάποια ενεργειακή μετατροπή ή σύνολα ενεργειακών φορέων που ανταγωνίζονται μεταξύ τους για να τροφοδοτήσουν μια τεχνολογία.



Σχήμα 4.3: Παράσταση τμήματος ενεργειακού συστήματος με διάγραμμα RES

⁸ ή η δυαδική της, ή ακόμη υβριδικές μέθοδοι που εξασφαλίζουν συνέπεια στην περιγραφή του συστήματος

Αφού διαμορφωθεί ο γράφος αναφοράς του συστήματος⁹ πρέπει η πληροφορία για την τοπολογία του γράφου να δομηθεί κατάλληλα:

Η τοπολογική περιγραφή του γράφου δίνεται μέσω ενός πίνακα κόμβων-κλάδων [σχήμα 4.4], σύμφωνα με τον ορισμό:

Ορισμός 4.2. Ένας γράφος G ορίζεται ως $\{V, E\}$, όπου V σύνολο των κόμβων και $E \subset V \times V$ το σύνολο των κλάδων που συνδέουν τους κόμβους μεταξύ τους. Ο γράφος ονομάζεται κατευθυνόμενος¹⁰ όταν για κάθε κλάδο $E = \overrightarrow{V_d V_a}$ ορίζεται και η κατεύθυνσή του από τον κόμβο αναχώρησης V_d στον κόμβο άφιξης V_a .

Ο πίνακας κόμβων-κλάδων έχει διαστάσεις $card(V) \times card(E)$ και τα στοιχεία του παίρνουν τιμές $a_{ij} = \pm 1$: $a_{ij} = +1$ αν ο κλάδος $-j$ ξεκινάει από τον κόμβο $-i$, $a_{ij} = -1$ αν ο κλάδος $-j$ καταλήγει στον κόμβο $-i$ και $a_{ij} = 0$ αλλιώς.

Ισοδύναμα, μπορούμε να περιγράψουμε το γράφο με (τετραγωνική, άνω τριγωνική) μήτρα εγγύτητας κόμβων (adjacency matrix), διαστάσεων $card(V) \times card(V)$, όπου $b_{ij} = +1$ αν υπάρχει κλάδος που να κατευθύνεται από τον κόμβο $-i$ στον κόμβο $-j$ και $b_{ij} = -1$ αλλιώς. Η περιγραφή αυτή έχει το μειονέκτημα ότι προκύπτουν αραιοί πίνακες για συστήματα μεγάλων διαστάσεων, δημιουργώντας πρόσθετο υπολογιστικό κόστος.

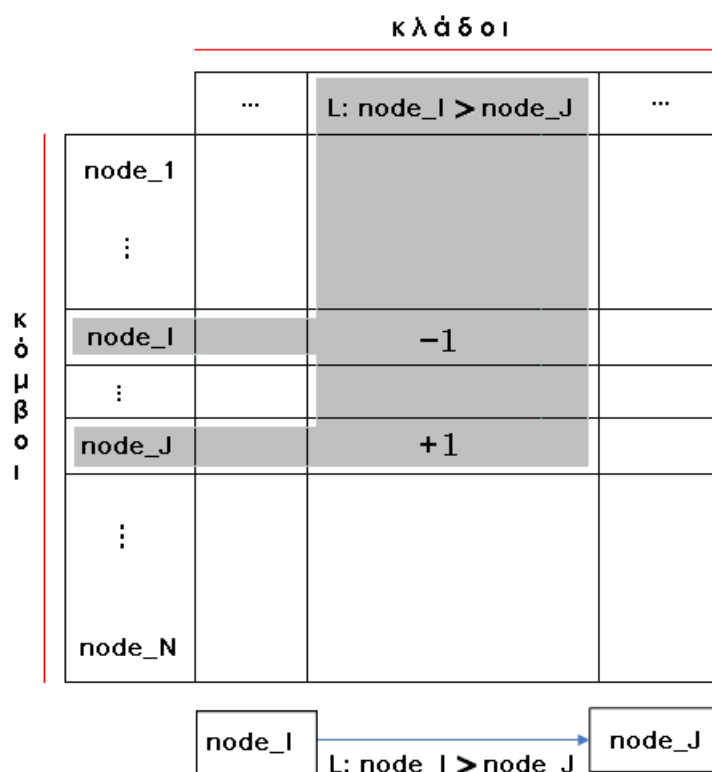
Αφού προσδιοριστεί η τοπολογία του γράφου, πρέπει να οριστούν τα συνδεδεμένα με κάθε δομικό στοιχείο του γράφου δεδομένα σε δομημένη μορφή. Τυπικά, ένας κόμβος ζήτησης χαρακτηρίζεται από τη ζητούμενη ποσότητα ωφέλιμης ενέργειας σε ορισμένο χρονικό διάστημα, ένας κόμβος παροχής πρωτογενούς ενέργειας από τη διαθέσιμη ανακτήσιμη ποσότητα, ενώ οι ενδιάμεσοι κόμβοι ενεργειακών διεργασιών περιγράφονται από ένα συντελεστή απόδοσης και την εγκατεστημένη δυναμικότητα μετατροπής. Αν το μοντέλο λειτουργεί διαχρονικά, λαμβάνοντας αποφάσεις επενδύσεων, τότε κάθε κόμβος διεργασίας χαρακτηρίζεται επίσης από το κόστος επένδυσης και λειτουργίας. Στους κλάδους αντιστοιχεί ένας συντελεστής σχετικής απόδοσης της κάθε μορφής ενέργειας που τροφοδοτεί μια διεργασία.

Ένα μοντέλο ενεργειακού σχεδιασμού (βελτιστοποίησης) βασισμένο στην αναπαράσταση του συστήματος με μορφή γράφου ακολουθεί το γενικότερο πρόβλημα βελτιστοποίησης των ροών μέσω δικτύου (flow network). Το πρόβλημα βελτιστοποίησης του ενεργειακού συστήματος είναι υποπερίπτωση του γενικού προβλήματος βελτιστοποίησης ροών¹¹. Ο αλγόριθμος επίλυσης του μοντέλου επιδιώκει τον εντοπισμό ολικού βελτίστου της αντικειμενικής συνάρτησης (ελαχίστου αν η αντικειμενική συνάρτηση εκφράζει το ολικό κόστος του συστήματος ή μεγίστου αν εκφράζει το ολικό όφελος), διατηρώντας το σύστημα εντός εφικτών ορίων. Αν στις εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών - ροών δεν περιλαμβάνουν μη-γραμμικούς όρους, τότε το μοντέλο είναι γραμμικού προγραμματισμού [2.2, σελ. 10].

⁹Υπάρχουν σύγχρονα συστήματα ενεργειακής μοντελοποίησης όπως το LEAP, <http://forums.seib.org/leap/> (σύστημα κατασκευής μοντέλων ενέργειας - περιβάλλοντος) που περιλαμβάνουν γραφικό περιβάλλον για την ανάπτυξη του γράφου αναφοράς.

¹⁰Όταν ένα ενεργειακό μοντέλο αναπαρίστανται με τη βοήθεια γράφου, οι κλάδοι αντιστοιχούν σε ενεργειακές ροές που έχουν ορισμένη κατεύθυνση.

¹¹Minimum Cost Flow Problem



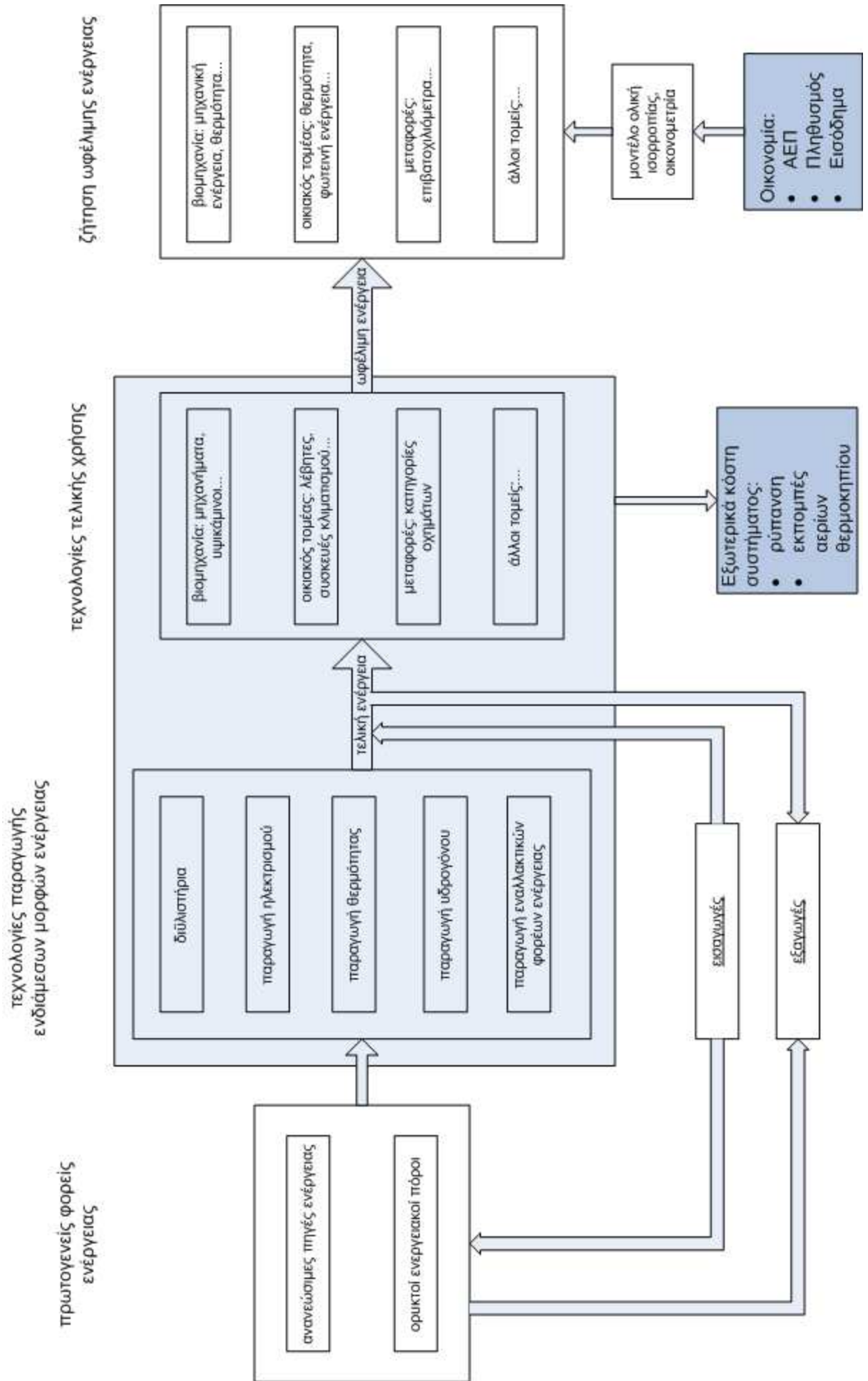
Σχήμα 4.4: Πίνακας κόμβων-κλάδων για την τοπολογική περιγραφή του γράφου αναφοράς

4.3 Δομή

Η δομή ενός μοντέλου διαφοροποιείται από ένα συγκεκριμένο στιγμιότυπο της υλοποίησης του μοντέλου. Η δομή αντιστοιχεί στην προσέγγιση του ενεργειακού συστήματος. Μοντέλα για διαφορετικές περιοχές θα έχουν ακριβώς την ίδια δομή αλλά θα διαφοροποιούνται στα συσχετισμένα με τα δομικά στοιχεία του μοντέλου δεδομένα (τα οποία διαμορφώνουν το στιγμιότυπο για τη συγκεκριμένη περιοχή).

Το ενεργειακό σύστημα όπως απεικονίζεται στο γράφο του μοντέλου αποτελείται από:

- κόμβους ζήτησης ανά τομέα που αντιστοιχούν στις ζητούμενες ενεργειακές υπηρεσίες (λόγου χάρι: θέρμανση χώρων, μεταφορές επιβατών, βιομηχανική παραγωγή) που πρέπει να ικανοποιούνται από το σύστημα
- ενεργειακές πηγές που αντιστοιχούν στην είσοδο ενεργειακών φορέων (μέσω εξόρυξης εγχώριων πόρων ή εισαγωγών)
- ενεργειακές καταβόθρες, που αντιστοιχούν στις εξαγωγές ενεργειακών αγαθών
- τεχνολογίες (ή διεργασίες) που είτε μετασχηματίζουν τους φορείς ενέργειας σε άλλη μορφή είτε σε ωφέλιμη ενέργεια
- ενεργειακά αγαθά (*commodities*) που παράγονται ή καταναλώνονται στο σύστημα και



Σχήμα 4.5: Βασικό διάγραμμα ροής ενεργειακού συστήματος

διασυνδέουν τους κόμβους διεργασιών μεταξύ τους. Τα ενεργειακά αγαθά αντιστοιχούν σε εικονικούς κόμβους χωρίς συνδεδεμένα (associated) δεδομένα.

- συστήματα μεταφοράς και αποθήκευσης ενεργειακών φορέων

Οι οντότητες που αποτελούν το γράφο του συστήματος διακρίνονται σε:

1. Κόμβους τύπου A: Αντιστοιχούν σε ενεργειακές διεργασίες και χαρακτηρίζονται από τα εξής μεγέθη:
 - Δυναμικότητα μετατροπής (σε μονάδες ισχύος). Σε ένα δυναμικό μοντέλο γνωστή είναι η δυναμικότητα του έτους βάσης.
 - Συντελεστή απόδοσης.
 - Τεχνικο-οικονομικά χαρακτηριστικά, όπως κόστος επένδυσης και αναμενόμενος χρόνος ζωής.
2. Κόμβους τύπου B: Αντιστοιχούν σε ενεργειακά αγαθά. Πρόκειται για ψευδοκόμβους χωρίς συνδεδεμένα δεδομένα ή περιορισμούς (εκτός από την εξίσωση ισορροπίας του κόμβου)¹².
3. Κλάδους τύπου A: Παριστούν μεταφορά κάποιου ενεργειακού αγαθού. Χαρακτηρίζονται από:
 - Μοναδιαίο κόστος μεταφοράς ή
 - Το σύνολο των μεγεθών που ισχύουν για τους κόμβους τύπου A, όταν η μεταφορά του συγκεκριμένου αγαθού πραγματοποιείται μέσω δικτύου (π.χ. κλάδος διανομής ηλεκτρισμού μέσω δίκτυου).
4. Κλάδους τύπου B: Εικονικοί κλάδοι που αντιστοιχούν σε λογιστική ενεργειακή ροή, χωρίς συνδεδεμένα δεδομένα (6).
5. Δίκτυα: Αντιστοιχούν σε ομαδοποιημένους κλάδους για τους οποίους ισχύει αθροιστικά περιορισμός ικανότητας μεταφοράς.

Κάθε κόμβος, κλάδος ή δίκτυο του συστήματος όπου υπάρχουν περιορισμοί δυναμικότητας και όπου η αύξηση της δυναμικότητας γίνεται μέσω επενδύσεων ανήκει στο σύνολο A .

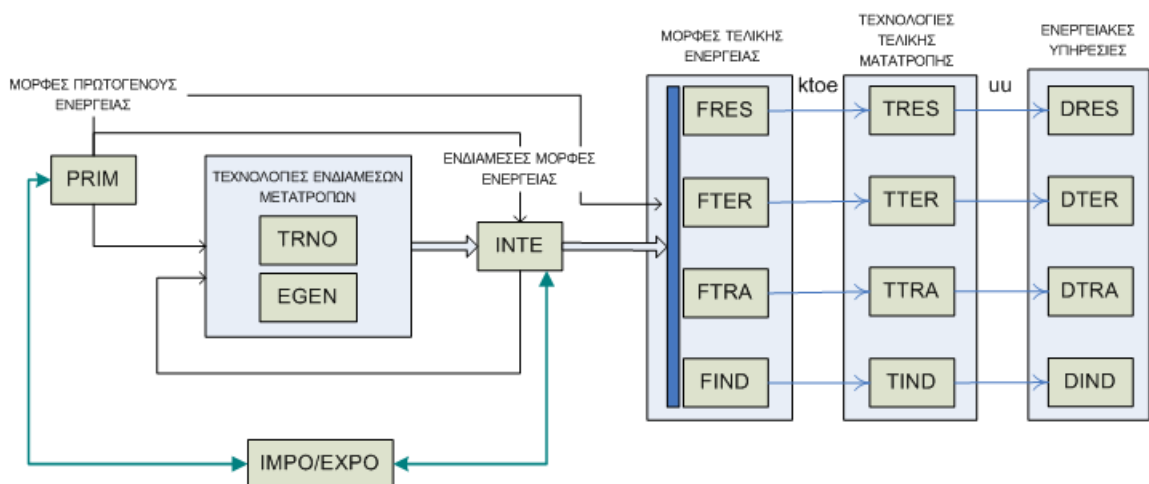
Οι κομβοί N του μοντέλου ομαδοποιούνται σε σύνολα $N_i \subset N$. Η ταξινόμηση γίνεται σύμφωνα με την ενότητα του ενεργειακού συστήματος στην οποία ανήκουν (οπότε όλοι οι τερματικοί κόμβοι ζήτησης ομαδοποιούνται στο σύνολο D) ή σύμφωνα με τις χαρακτηριστικές ποσότητες κάθε κόμβου (για παράδειγμα, οι κόμβοι των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής διαχωρίζονται από τους άλλους κόμβους δευτερογενών μετατροπών ενέργειας, διότι τα δεδομένα που σχετίζονται με τις μονάδες ηλεκτροπαραγωγής είναι διαφορετικά δομημένα).

Η κατηγοριοποίηση των κόμβων N φαίνεται στον πίνακα [4.1] και η διασύνδεση μεταξύ των συνόλων στο σχήμα [4.6].

¹² Αν για κάποιο κόμβο ενεργειακού φορέα υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης, τότε στον κόμβο προσαρτούνται τα αντίστοιχα δεδομένα δυναμικότητας και αποθήκευσης καθώς και η εξίσωση που περιγράφει την ισορροπία αποθήκευσης (6).

Πίνακας 4.1: κατηγοριοποίηση κόμβων N σε σύνολα

σύνολο	περιγραφή
DIND, DTRA, DRES, DTER	κόμβοι ζήτησης ωφέλιμης ενέργειας
TIND, TTRA, TRES, TTER	κόμβοι μετατροπής τελικής ενέργειας σε ωφέλιμη
FIND, FTRA, FRES, FTER	τελικές μορφές ενέργειας που καταναλώνονται ανά τομέα
EGEN	τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας χαμηλής ενθαλπίας (ατμού) (διαχωρίζονται στα υποσύνολα EGE1 και EGE2 για υπάρχουσες και μελλοντικές τεχνολογίες αντίστοιχα)
TRNO	τεχνολογίες δευτερογενών μετατροπών ενέργειας (όπου περιλαμβάνονται τα διύλιστήρια) και λοιπές ενεργειακές διεργασίες
INTE	κόμβοι ενδιάμεσων ενεργειακών μορφών (π.χ. ηλεκτρισμός στην έξοδο των σταθμού παραγωγής)
PRIM	πρωτογενείς φορείς ενέργειας (διαχωρίζονται στα υποσύνολα FPRI και NPRI για ορυκτά ενεργειακά αγαθά και μη-ορυκτά, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας)
EXTR	δραστηριότητες εξόρυξης που τροφοδοτούν τους κόμβους FPRI
RSRC	κόμβοι διαθέσιμων προς εξόρυξη ορυκτών ενεργειακών φορέων (τροφοδοτούν τους κόμβους EXTR)
IMPO, EXPO	κόμβοι εισαγωγών και εξαγωγών



Σχήμα 4.6: Διάρθρωση του γράφου αναφοράς, με σχέσεις διασύνδεσης μεταξύ των συνόλων

Η τοπολογία του RES [4.2] περιγράφεται μέσω της μήτρας $iNet(L, I)$, όπου L το σύνολο των κλάδων και I το σύνολο των κόμβων. Υπάρχει κλάδος μεταξύ των κόμβων I^*, J^* με φορά από τον κόμβο I^* στον κόμβο J^* αν πάρχει L^* τέτοιο ώστε $iNet(L^*, I^*) = -1$ και $iNet(L^*, J^*) = +1$.

Για τα δίκτυα F που ορίζονται ως σύνολα ομαδοποιημένων κλάδων για τους οποίους ισχύει αθροιστικά ένας περιορισμός ικανότητας μεταφοράς ισχύει $F_i \subset LV_i$.

Το ολικό ενεργειακό σύστημα μπορεί να θεωρηθεί ένωση δύο υποσυστημάτων (προσφοράς και ζήτησης τελικής ενέργειας). Το επίπεδο διαχωρισμού στο γράφο του ολικού συστήματος είναι το σύνολο τελικών ενεργειακών μορφών F_{xxx} :

4.3.1 Υποσύστημα τελικής ενεργειακής ζήτησης

Το μοντέλο κατευθύνεται από τη ζήτηση (5) για ενεργειακές υπηρεσίες (ή ωφέλιμη ενέργεια)¹³ που κατανέμεται στους εξής τομείς¹⁴:

- **Βιομηχανικός τομέας** [5.2]: Κάθε τομέας δραστηριότητας της βιομηχανίας D_{IND}^i (τερματικός κόμβος) τροφοδοτείται από **συμπληρωματικές** τεχνικές διεργασίες $T_{IND}^{j(i)}$ (π.χ. θερμικές ή μηχανικές διεργασίες, συμπίεση αέρα). Οι διεργασίες τροφοδοτούνται από ενεργειακές μορφές $F_{IND}^k(j(i))$ ανταγωνιστικές μεταξύ τους (π.χ. φυσικό αέριο, ηλεκτρισμός, προϊόντα πετρελαίου). Κατά την επίλυση του μοντέλου, υπολογίζεται με βάση την αρχή ελαχιστοποίησης του ολικού κόστους η ζήτηση για τις ανταγωνιστικές μορφές τελικής ενέργειας, που ανάγεται προς το αμέσως προηγούμενο επίπεδο του γράφου. Αντίστοιχη είναι η ιεραρχία στους άλλους τομείς τελικής ενεργειακής ζήτησης, εξαιρώντας το γεγονός ότι μόνο στη βιομηχανία οι κόμβοι τεχνολογιών είναι συμπληρωματικοί και όχι υποκαταστάσιμοι (κεφάλαιο 5):
- **Τομέας μεταφορών** [5.1]: Οι δραστηριότητες του τομέα μεταφορών κατανέμονται σε:
 - μεταφορές **επιβατών** (με μονάδα μέτρησης τα επιβατο-χιλιόμετρα ή p-km)
 - μεταφορές **εμπορευμάτων** (με μονάδα μέτρησης τα τονο-χιλιόμετρα ή t-km)

Η ζήτηση για την ικανοποίηση των αναγκών αυτών καλύπτεται από τους υποτομείς δραστηριότητας του τομέα μεταφορών D_{TRA}^i , που είναι μερικώς υποκαταστάσιμοι μεταξύ τους. Κάθε τομέας D_{TRA}^i καλύπτεται από ανταγωνιστικές τεχνολογίες $T_{TRA}^{j(i)}$ (π.χ. επιβατικά οχήματα συμβατικής τεχνολογίας εσωτερικής καύσης ή υβριδικά οχήματα), οι οποίες με τη σειρά τους τροφοδοτούνται από ανταγωνιστικές ενεργειακές μορφές $F_{TRA}^k(j(i))$.

¹³Η ζήτηση για το διάλυμα D_{xxx} των ζητούμενων ενεργειακών υπηρεσιών $D = D_{IND} \cup D_{RES} \cup D_{TER} \cup D_{TRA}$ υπολογίζεται από οικονομετρικά μοντέλα ή βάση δημογραφικών και οικονομικών προβλέψεων.

¹⁴Τα δεδομένα σχετικά με τη ζήτηση ωφέλιμης ενέργειας προέρχονται από το μοντέλο PRIMES. Εφ' όσον ο ορίζοντας του μοντέλου υπερβαίνει τον ορίζοντα του PRIMES, εφαρμόζουμε γραμμική προεκβολή για τη συμπλήρωση των αντίστοιχων χρονοσειρών.

- **Τομέας οικιακών χρήσεων:** Διαιρείται σε N_{RES} υποτομείς ενεργειακών υπηρεσιών (π.χ. θέρμανση, ψύξη, φωτισμός). Αντιστοιχεί στο σύνολο κόμβων DRES. Η ζητούμενη ωφέλιμη ενέργεια εκφράζεται σε 'ωφέλιμα' toe ή άλλες μονάδες έκφρασης της ζητούμενης ενεργειακής υπηρεσίας. Για κάθε ενεργειακή υπηρεσία ορίζονται σύνολα TRES παραγωγής της υπηρεσίας (π.χ. ηλιακός θερμοσίφωνας ή καυστήρας φυσικού αερίου για την παραγωγή ωφέλιμης θερμότητας) και αντίστοιχες ανταγωνιστικές ενεργειακές μορφές FRES τροφοδότησης των τεχνολογιών.
- **Τομέας εμπορικών και άλλων χρήσεων:** Αντίστοιχα με τον οικιακό τομέα.

Το μοντέλο σχεδιασμού που υλοποιείται καλείται να αποφασίσει σχετικά με το πώς θα καλυφθεί η ζήτηση, αποφασίζοντας λόγου χάρη μεταξύ της επένδυσης σε πιο αποδοτικές τεχνολογίες ώστε να παραμείνει σταθερή η καταναλισκόμενη τελική ενέργεια, ή καταλώνοντας μεγαλύτερη ποσότητα τελικής ενέργειας χωρίς να επενδύει σε προηγμένες τεχνολογίες.

Κάθε κόμβος ενεργειακής υπηρεσίας [σχήμα 4.7] έχει ορισμένα συσχετισμένα δεδομένα που περιγράφουν:

- τη ζητούμενη ωφέλιμη ενέργεια στη διάρκεια μιας περιόδου
- την καμπύλη φορτίου του συγκεκριμένου κόμβου ¹⁵.

4.3.2 Υποσύστημα προσφοράς τελικής ενέργειας

Η ενότητα προσφοράς (κεφάλαιο 6) καλύπτει τη ροή της ενέργειας μέχρι το επίπεδο του τελικού καταναλωτή (κόμβοι Fxxx τελικών ενεργειακών μορφών), περιλαμβάνοντας τα τμήματα πρωτογενών ενεργειακών πόρων, μετατροπών σε δευτερογενείς μορφές, μεταφοράς, διανομής και αποθήκευσης. Οι κόμβοι RSRC αντιστοιχούν στα ανακτήσιμα αποθέματα εγχώριων πόρων που τροφοδοτούν τις αντίστοιχες διεργασίες εξόρυξης EXTR. Τα εξορυσσόμενα ενεργειακά προϊόντα FPRI αντιστοιχούν σε ένα υποσύνολο του συνόλου πρωτογενών ενεργειακών μορφών PRIM, ενώ τα υπόλοιπα στοιχεία του PRIM αποτελούν το υποσύνολο NPRI. Από τις πρωτογενείς ενεργειακές μορφές PRIM τροφοδοτούνται οι διεργασίες μετασχηματισμού EGEX και TRNO, ενώ ορισμένες πρωτογενείς μορφές κατευθύνονται απευθείας στο διάλυμα τελικών ενεργειακών μορφών Fxxx. Τα ενεργειακά προϊόντα που προκύπτουν από μετασχηματισμό πρωτογενών μορφών (π.χ. ηλεκτρισμός) ανήκουν στο σύνολο INTE, που τροφοδοτεί τόσο το σύνολο Fxxx όσο και δευτεροβάθμιες μετατροπές των EGEX και TRNO. Τέλος, οι εγχώριοι πόροι συμπληρώνονται από τις εισαγωγές IMPO που κατευθύνονται είτε στο σύνολο FPRI είτε στο INTE.

D_IND	ISINT_	iron steel >>integrated
	ISELE_	iron steel >>electric arc
	NFALP_	non ferrous >>primary aluminium
	NFALS_	non ferrous >>secondary aluminium
	NFCOP_	non ferrous >>copper
	NFZIN_	non ferrous >>zinc
	NFLEA_	non ferrous >>lead
	NFNFO_	non ferrous >>other
	CHFER_	chemicals >>fertilisers
	CHPCH_	chemicals >>petrochemicals
	CHINO_	chemicals >>inorganic chemicals
	CHLEC_	chemicals >>low enthalpy chemicals
	BMCEM_	building materials >>cement dry
	BMCER_	building materials >>ceramics bricks
	BMGLB_	building materials >>glass basic
	BMGLR_	building materials >>glass recycled
	BMOBM_	building materials >>other building materials
	PPCHP_	paper pulp >>chemical paper
	PPMPP_	paper pulp >>mechanical pulp paper
	FDT	food drink tobacco
	ENG	engineering
	TEX	textiles
	OTH	other industrial sectors
NEY	non energy industrial sectors	

(α') DIND - βιομηχανικός τομέας

D_TRA	TRAPC_	passenger cars
	TRABU_	buses - coaches
	TRATW_	powered two wheelers
	TRATR_	light - heavy duty trucks
	TRAPT_	passenger trains
	TRAPS_	passenger ships
	TRAAC_	aircrafts
	TRACT_	cargo trains
TRACS_	cargo ships	

(β') DTRA - τομέας μεταφορών

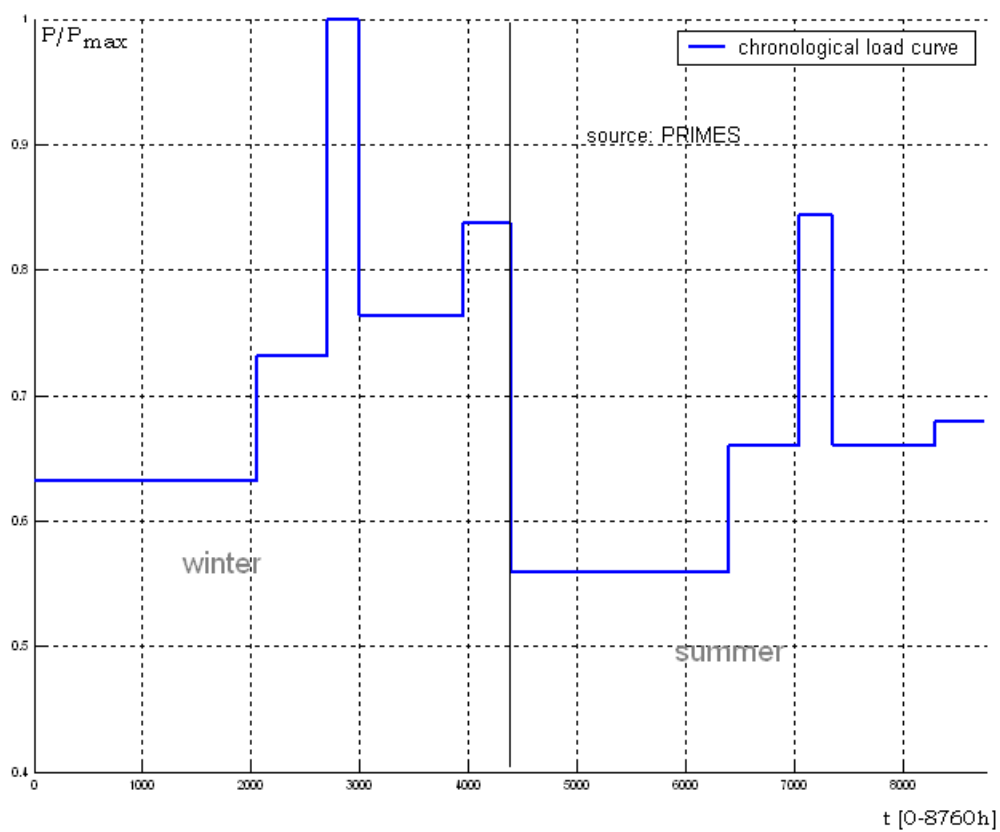
D_RES	RESSH_	residential >>space heating
	RESCO_	residential >>cooking
	RESWH_	residential >>water heating
	RESAC_	residential >>air conditioning
	RESWM_	residential >>washing machines
	RESDW_	residential >>dish washing
	RESDR_	residential >>drying
	RESLI_	residential >>lighting
	RESRF_	residential >>refrigeration
RESTV_	residential >>electronics	

(γ') DRES - οικιακός τομέας

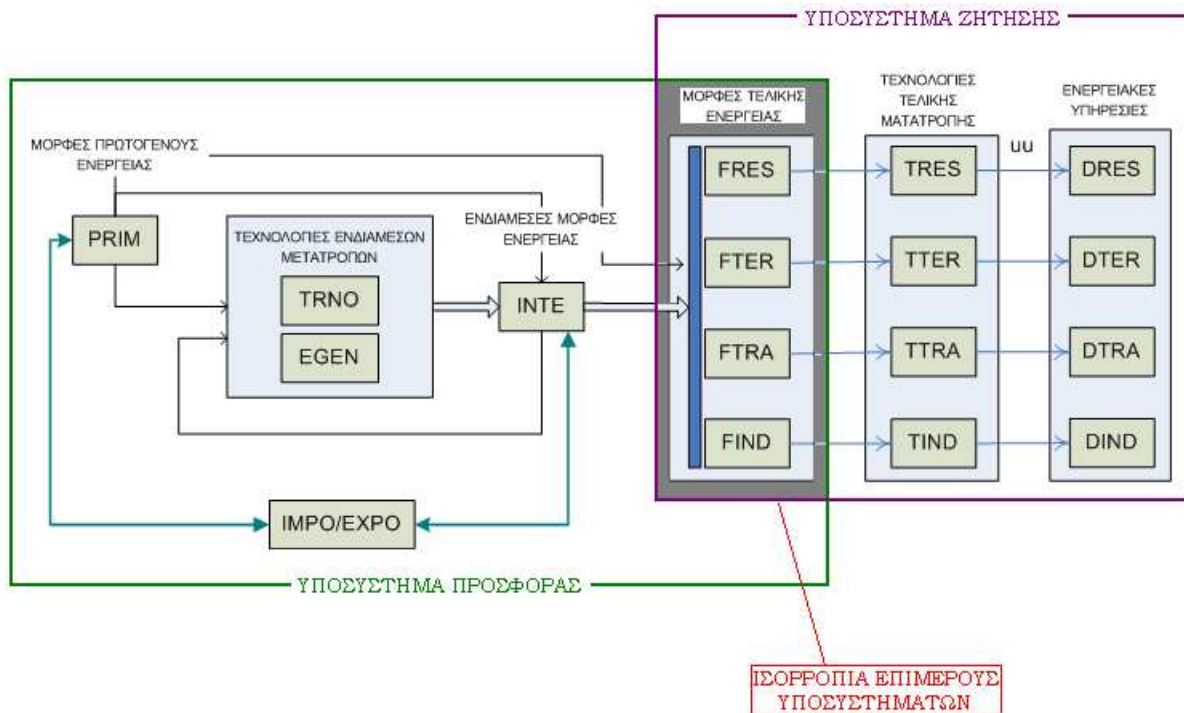
D_TER	TERLI_	tertiary >>lighting
	TERSH_	tertiary >>space heating
	TEREU_	tertiary >>electrical uses
	TERPU_	tertiary >>pumping
	TERMO_	tertiary >>motor energy
	TERAC_	tertiary >>air conditioning
	TERWH_	tertiary >>water heating
TERSU_	tertiary >>steam uses	

(δ') DTER - τριτογενής τομέας

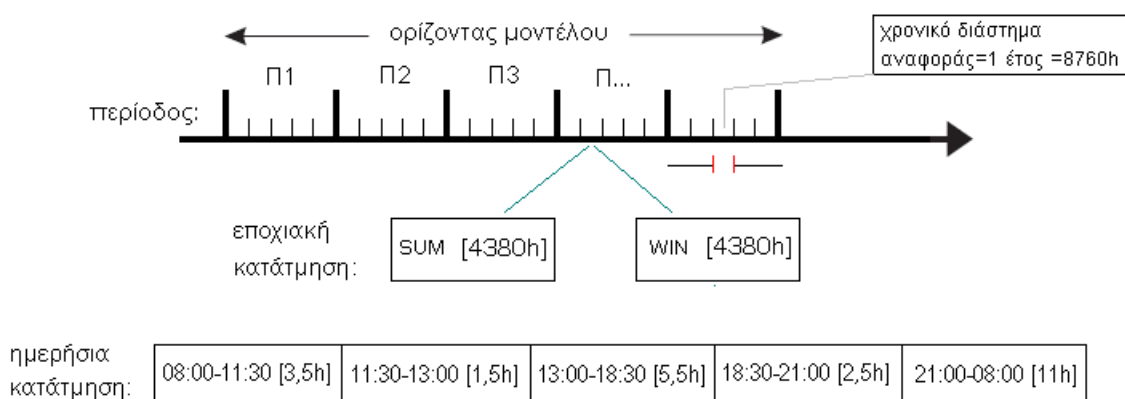
Σχήμα 4.7: Κόμβοι ζήτησης ενεργειακών υπηρεσιών D=DINDUDTRAUDRESUDTER



Σχήμα 4.8: Χρονολογική καμπύλη ηλεκτρικού φορτίου συστήματος για τη Γερμανία στο έτος βάσης: Με βάση τα ποσοστά συμμετοχής του ηλεκτρισμού στην κάλυψη κάθε ενεργειακής ανάγκης επαληθεύεται η καμπύλη φορτίου όπως έχει διαμορφωθεί για τις επιμέρους υπηρεσίες.



Σχήμα 4.9: Ισορροπία υποσυστημάτων προσφοράς και ζήτησης στο επίπεδο τελικής ενέργειας



Σχήμα 4.10: Κατάτμηση του έτους σε περιόδους για τη διαμόρφωση των καμπυλών φορτίου

4.4 Χρονικές και χωρικές διαστάσεις

4.4.1 Χρονικές διαστάσεις

Ο γράφος αποτελεί μια στατική απεικόνιση του ενεργειακού συστήματος. Τα δυναμικά στοιχεία ενσωματώνονται στο μοντέλο σε δύο επίπεδα:

1. Εντός μιας περιόδου (**intra-period**). Αυτή η δυναμική διάσταση επιβάλλεται από τις καμπύλες φορτίου που παρατηρούνται σε επίπεδο ζήτησης για ενεργειακές υπηρεσίες (end-user). Οι καμπύλες φορτίου ορίζονται για κάθε ενεργειακή υπηρεσία στο τερματικό δεξιό άκρο του γράφου. Μέσω των εξισώσεων και ανισώσεων περιορισμών, η πληροφορία για τη χρονική κατανομή του φορτίου ζήτησης μεταβιβάζεται στους υπόλοιπους κόμβους με κατεύθυνση προς τα αριστερά¹⁶. Οι αιχμές ζήτησης έχουν μεγάλη σημασία για το σύστημα, εφ' όσον μεγάλο μέρος των επενδύσεων, κυρίως στην ηλεκτροπαραγωγή, πραγματοποιείται για να καλύψει αυτές τις αιχμές (εξίσωση 4.5). Οι ενεργειακοί φορείς που μπορούν να αποθηκευτούν (π.χ. υδρογονάνθρακες ή στερεά καύσιμα) παρουσιάζουν διακυμάνσεις στη ζήτησή τους στο εποχικό επίπεδο χρονικής κατάτμησης. Η κατάτμηση της χρονικής περιόδου των 8760 ωρών γίνεται σύμφωνα με το σχήμα [4.10]. Διακρίνουμε 2 εποχές στη διάρκεια ενός έτους και 5 τμήματα στη διάρκεια κάθε ημέρας. Το καρτεσιανό γινόμενο των συνόλων αυτών δίνει 10 κλάσματα S του έτους, διάρκειας d_S . Για κάθε κόμβο ζήτησης D , αν Q η ζητούμενη ωφέλιμη ενέργεια στη διάρκεια ολόκληρου του έτους, ορίζουμε τη μέση ισχύ $\overline{P^D} = Q/8760$ και το συντελεστή $a_S^D = P_S^D/\overline{P^D}$ (λόγος της ζητούμενης ισχύος στο συγκεκριμένο χρονικό κλάσμα προς τη μέση ζητούμενη ισχύ), οπότε ισχύει:

$$\sum_S a_S^D \frac{d_S}{8760} = 1 \quad \forall D \quad (4.2)$$

Αντίστοιχα ορίζουμε και την καμπύλη διαθεσιμότητας των πρωτογενών πηγών ενέργειας. Η εποχικότητα για τις πρωτογενείς πηγές ενέργειας περιορίζεται στις ανανεώσιμες πηγές διακοπτόμενης παροχής (ηλιακή ή αιολική).

2. Διαμέσου των περιόδων (**inter-period**). Οι προβλέψεις για την εξέλιξη των εξωγενών μεταβλητών

(α') ζήτηση ωφέλιμης ενέργειας $\Omega(D, T)$

(β') διαθέσιμες τεχνολογίες και τα αντίστοιχα τεχνικο-οικονομικά δεδομένα

¹⁵Οι χρονολογικές καμπύλες φορτίου των επιμέρους ενεργειακών υπηρεσιών έχουν προκύψει από εύλογες υποθέσεις σχετικά με τη συμπεριφορά των καταναλωτών ανά τομέα, χρησιμοποιώντας για επαλήθευση τις καμπύλες ηλεκτρικού φορτίου (γράφημα 4.3.1) που είναι γνωστές με ακρίβεια.

¹⁶Κάθε κόμβος τύπου Β λειτουργεί ως φίλτρο για την καμπύλη φορτίου που μεταβιβάζεται στο σύστημα στα αριστερά του (σύμφωνα με την κατεύθυνση ενεργειακών ροών). Αν ο κόμβος ενός ενεργειακού φορέα δεν έχει δυνατότητα αποθήκευσης (π.χ. ηλεκτρισμός) τότε η καμπύλη φορτίου παραμένει αναλλοίωτη καθώς διέρχεται από τον κόμβο. Αν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης ποσότητας του ενεργειακού φορέα (κεφάλαιο 6), τότε ο κόμβος τροποποιεί την καμπύλη φορτίου, εξομαλύνοντάς την.

(γ') τιμή εισαγόμενων φορέων ενέργειας και επίπεδα εγώριων διαθέσιμων πόρων καθώς και οι περιορισμοί που σχετίζονται με τα διερευνητικά σενάρια εκφράζουν τη δυναμική διάσταση του μοντέλου διαμέσου των περιόδων.

Τα δύο στοιχεία που καθορίζουν την inter-period διάσταση του μοντέλου είναι:

- η **έκταση** του χρονικού ορίζοντα που εξαρτάται από τους σκοπούς της ανάλυσης, και
- η **πυκνότητα** στιγμιτύπων εντός του χρονικού ορίζοντα που εξαρτάται από τη ζητούμενη ακρίβεια ανάλυσης και τη διαθέσιμη υπολογιστική ισχύ.

Στο μοντέλο ενεργειακού σχεδιασμού μελετούμε το ενεργειακό δίκτυο για ορισμένο χρονικό ορίζοντα¹⁷ κατά τη διάρκεια του οποίου απομονώνουμε N περιόδους. Η επίλυση του μοντέλου (διαχρονική ισορροπία) δίνει μια σειρά στιγμιτύπων του ενεργειακού συστήματος. Οι περίοδοι που εξετάζονται έχουν αφετηρία τα έτη $T_i^\alpha, i = 1, \dots, 11, T_1^\alpha = 2000$ και διάρκεια $\Delta T_i = 5$. Το έτος αναφοράς για κάθε περίοδο είναι το πρώτο έτος του διαστήματος $[T_i^\alpha \dots T_i^\alpha + \Delta T_i]$. Τα έτη που ανήκουν στην ίδια περίοδο θεωρούνται όμοια. Στα αποτελέσματα, οι ενεργειακές ροές και τα επίπεδα εκπομπών που αναφέρονται για μια περίοδο αντιστοιχούν και στα $\Delta T_i = 5$ έτη που ανήκουν στην περίοδο αυτή. Ωστόσο, για τις επενδύσεις που πραγματοποιούνται σε μία περίοδο, υποθέτουμε ότι αυτές υλοποιούνται στιγμιαία στην αρχή του πρώτου έτους της περιόδου και είναι διαθέσιμες για ολόκληρη την περίοδο.

4.4.2 Χωρικές διαστάσεις

Όταν το μοντέλο επιλύεται για μία μεμονωμένη γεωγραφική περιοχή, θεωρούμε ότι αλληλεπιδρά με ένα "απειρο σύστημα". Τότε ο γράφος αναφοράς είναι επίπεδος και περιγράφεται από τη μήτρα $iNet(L, I)$. Αν προστεθούν επιπλέον χώρες CY στο μοντέλο, τότε η μήτρα του γράφου αναφοράς γίνεται $iNet^*(L^*, I^*)$, όπου $L^* = LCY_1 \cup LCY_2$ και $I^* = ICY_1 \cup ICY_2$. Για κάθε χώρα αναπαράγεται ο ίδιος γράφος¹⁸ και ορίζονται επιπλέον οι δυνατότητες εισαγωγών - εξαγωγών από - προς τις υπόλοιπες χώρες του μοντέλου και το "απειρο σύστημα".

$$iNet^*(L^*, I^*) = \left(\begin{array}{c|cc|c} & LCY_1 & LCY_2 & LCY_1CY_2 \\ \hline ICY_1 & iNet(CY_1) & \emptyset & \dots \\ \hline ICY_2 & \emptyset & iNet(CY_2) & \dots \end{array} \right)$$

4.5 Μεταβλητές - Εξισώσεις

Σημείωση 1. Στη γλώσσα αλγεβρικής μοντελοποίησης GAMS, αν X είναι ένα σύνολο τότε το i -στοιχείο του συνόλου είναι επίσης προσπελάσιμο με αναφορά στο X (αντί για $Q[i]$). Στην περιγραφή των εξισώσεων διατηρούμε αυτή την παραδοχή.

¹⁷Όταν ισχύει $H > \max_i \tau_i$, όπου H ο ορίζοντας του μοντέλου και τ_i η διάρκεια ζωής του ήδη υπάρχοντος εξοπλισμού, τότε εξασφαλίζουμε ότι η τελική διάρθρωση του συστήματος εξαρτάται αποκλειστικά από τις αποφάσεις του μοντέλου.

¹⁸Αν κάποιος κόμβος (τεχνολογία ή φυσικός πόρος) δεν έχει εφαρμογή στη συγκεκριμένη χώρα, τότε μετατρέπεται σε ανενεργό κόμβο.

4.5.1 Μεταβλητές

Οι μεταβλητές απόφασης του συστήματος είναι:

- $x(L, CY, P, S)$: εκφράζει σε ktoe τη ροή ενέργειας για ένα (οποιοδήποτε) έτος της περιόδου P κατά τη διάρκεια της χρονικής υποδιαίρεσης S επί του κλάδου L για τη χώρα CY . Αναφέρεται και ως x_L^S , παραλείποντας τους δείκτες CY, P .
- $y(L, CY, P)$: εκφράζει ενεργειακή ροή, όπως η μεταβλητή x , παραλείποντας από τα ορίσματά της το χρονικό κλάσμα S . Οι μεταβλητές x και y είναι συμπληρωματικές: Για κάθε L , αν $x \neq 0$ τότε $y = 0$ και αντίστροφα.
- $K_I(A, CY, P)$: εκφράζει σε ktoe/y την επένδυση που πραγματοποιείται για επέκταση της δυναμικότητας της οντότητας A του συστήματος στην περίοδο P για τη χώρα CY . Αναφέρεται και ως K_{IA} .
- Για κάθε κόμβο N ενεργειακού φορέα με δυνατότητα αποθήκευσης ορίζονται επιπλέον οι μεταβλητές $xIn(N, S_{in}(N))$ και $xOut(N, S_{out}(N))$ που εκφράζουν την αποταμιευόμενη και εκταμιευόμενη ενέργεια στον κόμβο κατά τη διάρκεια των αντίστοιχων χρονικών κλασμάτων (βλέπε 6.5). Οι μεταβλητές αυτές συμβάλλουν στη διαμόρφωση του ολικού κόστους του συστήματος μέσω του μεταβλητού κόστους για κάθε μονάδα ενέργειας που αποταμιεύεται.

Η εγκατεστημένη δυναμικότητα της περιόδου P για το δομικό στοιχείο A εκφράζεται ως $K_P(A, CY, P)$ και προκύπτει άμεσα αν είναι γνωστή η αρχική δυναμικότητα του έτους βάσης $K_0(A, CY)$ και οι επενδύσεις που έχουν πραγματοποιηθεί στις περιόδους $P' \leq P$. Γνωρίζοντας τις τιμές των μεταβλητών x, K_I προσδιορίζουμε κάθε παράμετρο λειτουργίας του συστήματος (ενεργειακές ροές ανά τύπο φορέα, επίπεδα χρησιμοποίησης εγκατεστημένων τεχνολογιών, εκπομπές αερίων, εισαγωγές ή εξαγωγές).

Σημείωση 2. Το πλήθος των κόμβων του μοντέλου είναι της τάξης του 10^3 (για κάθε χώρα CY), ενώ ο πίνακας $NET(I, J)$ (*adjacency matrix* του γράφου) έχει συντελεστή πυκνότητας (το ποσοστό των μη-μηδενικών στοιχείων) περίπου 0.3%. Ορίζοντας τις μεταβλητές x, y επί του συνόλου L αντί του καρτεσιανού γινομένου $I \times J$ εξοικονομούμε υπολογιστικούς πόρους.

Σημείωση 3. Η μεταβλητή $K_I(A, CY, P)$ ορίζεται για τους κόμβους του γράφου που αντιστοιχούν σε ενεργειακές διεργασίες (δηλαδή για ένα υποσύνολο του N), και για τις σύνθετες οντότητες F που αντιστοιχούν σε μεταφορά ενεργειακών φορέων μέσω δικτύου, που υπακούουν σε περιορισμούς δυναμικότητας. Το σύνολο οντοτήτων A έχει οριστεί ως $A = N \cup F$.

Η αρχική περίοδος του συστήματος αποτελεί το έτος βάσης, για το οποίο υπάρχουν ήδη δεδομένα καταγεγραμμένα σε ισοζύγια. Οι χαρακτηριστικές ποσότητες του μοντέλου (ενεργειακές ροές, υπάρχουσες δυναμικότητες τεχνολογιών) είναι προκαθορισμένες. Η αρχικοποίηση για το έτος βάσης επηρεάζει το σύστημα για τις ακόλουθες περιόδους, διότι τμήμα των ήδη υλοποιημένων επενδύσεων εξακολουθεί να είναι διαθέσιμο στις επόμενες περιόδους.

4.5.2 Εξισώσεις

Οι εξισώσεις ή ανισώσεις που αντιστοιχούν στους περιορισμούς του συστήματος αποτελούν τις σειρές (προσθέτοντας τον ορισμό της αντικειμενικής συνάρτησης) [παράρτημα 2.2] του μοντέλου γραμμικού προγραμματισμού¹⁹ και προσδιορίζουν την περιοχή εφικτής λειτουργίας του συστήματος:

- Ικανοποίηση ζήτησης: Για κάθε κόμβο ενεργειακής υπηρεσίας D , περίοδο P , χρονικό κλάσμα S , η ροή προς τον κόμβο πρέπει να καλύπτει την προβλεπόμενη ζήτηση.

$$\underbrace{\sum_{L, iNet(L,D)=+1} x_L^{P,S}}_{\substack{\text{άθροισμα ενεργειακών ροών} \\ \text{που κατευθύνονται προς τον κόμβο D}}} \geq \Omega(D, P) \frac{d_S}{8760} a_S(D) \quad \forall (D, P, S) \quad (4.3)$$

- Περιορισμοί διαθέσιμων πρωτογενών πηγών ενέργειας: Αν SY οι κόμβοι πρωτογενών πηγών ενέργειας, τότε οι εξισώσεις που ισχύουν έχουν τη μορφή:

$$\sum_S \sum_{L, iNet(L,SY)=-1} x_L^{P,S} \leq Q_{SY}(SY, P) \quad \forall (P, SY)$$

ή

$$\sum_P \sum_S \sum_{L, iNet(L,SY)=-1} x_L^{P,S} \leq Q_{SY_P}(SY) \quad \forall SY \quad (4.4)$$

Για παράδειγμα, για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας υπάρχει πρόβλεψη του ετήσιου ποσού ενέργειας που μπορούμε να εκμεταλλευτούμε, οπότε εφαρμόζεται η πρώτη εξίσωση (όπου $SY=NPRI$). Αντίστοιχα, για τους ορυκτούς πόρους (όπου $SY=RSRC$), υπάρχει εκτίμηση των συνολικών ποσοτήτων που μπορούμε να ανακτήσουμε συνολικά για τον ορίζοντα του συστήματος, και ο αντίστοιχος περιορισμός δίνεται από τη δεύτερη εξίσωση.

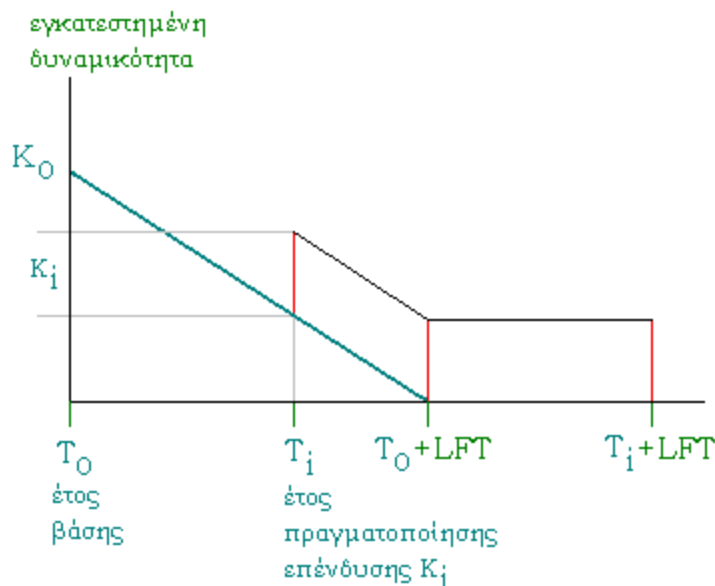
- Περιορισμός ενεργειακής ροής σύμφωνα με την τρέχουσα εγκατεστημένη δυναμικότητα.

$$\sum_{L:L(A)} x_L^{P,S} \leq \underbrace{AF(A)K_P(A, P) \frac{d_S}{8760}}_{\substack{\text{ktoe που μπορούν να μετασχηματιστούν} \\ \text{από τη διεργασία A στη διάρκεια του κλάσματος S}}} \quad \forall (A, P, S) \quad (4.5)$$

Ο συμβολισμός $L : L(A)$ σημαίνει ότι η ενεργειακή ροή στον κλάδο L περιορίζεται από τη δυναμικότητα του στοιχείου A . Ο συντελεστής διαθεσιμότητας του εξοπλισμού είναι $AF(A)$.

Σημείωση 4. Τα μεγέθη x και K_P αντιστοιχούν σε ροή ενέργειας (ktoe) με χρόνο αναφοράς το ένα έτος (ή 8760h), οπότε το δεξί μέλος της εξίσωσης (4.5) εκφράζει σε μονάδες ενέργειας τη μέγιστη δυνατή έξοδο από τον κόμβο διεργασίας A .

¹⁹Οι εξισώσεις δίνονται στην πιο γενική μορφή τους, ενώ οι ειδικές περιπτώσεις παρουσιάζονται στις αντίστοιχες παραγράφους.



Σχήμα 4.11: Μεταφορά δυναμικότητας και προσθήκη νέων επενδύσεων

Σημείωση 5. Η εξίσωση (4.5) θα είναι περιοριστική για κάθε A μόνο για μία από τις εξισώσεις που ορίζονται για τα τμήματα χρονολογικής κατάτμησης S . Η απαιτούμενη επένδυση θα καθορίζεται από το χρονικό τμήμα της περιόδου αναφοράς (έτος) όπου δημιουργείται ζήτηση αιχμής για τον συγκεκριμένο κόμβο.

- Μεταφορά απομένουσας δυναμικότητας στους κόμβους διεργασιών στην επόμενη περίοδο και προσθήκη νέων επενδύσεων: Για κάθε στοιχείο του δικτύου A όπου υπάρχει περιορισμός δυναμικότητας υλοποιημένης επένδυσης, η δυναμικότητα για την περίοδο P δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned}
 K_P(A, P) = & \underbrace{K_0(A) \left(1 - \frac{(P-1)PLEN}{LFT(A)} \right)}_{\text{[απομένουσα δυναμικότητα από την ήδη εγκατεστημένη στο έτος βάσης]}} \\
 & + \underbrace{\sum_{\substack{PP \leq P \\ (P-PP)PLEN \leq LFT(A)}} KI(A, PP)}_{\text{[άθροισμα πρόσθετων επενδύσεων που έχουν υλοποιηθεί μετά το έτος βάσης]}} \quad (4.6)
 \end{aligned}$$

Υποθέτουμε δηλαδή ότι η απομένουσα δυναμικότητα από τον ήδη εγκατεστημένο εξοπλισμό του έτους βάσης μειώνεται γραμμικά με το χρόνο, ενώ οι νέες επενδύσεις είναι λειτουργικές για το σύνολο του μεγέθους της αρχικής επένδυσης για χρονικό διάστημα $LFT(A)$ (σχήμα 4.11).

- Ισορροπία στους μη-τερματικούς κόμβους: Για τον τυπικό κόμβο I που δεν ανήκει στις περιπτώσεις εξαιρέσεων (κόμβοι πολλαπλών εισόδων με δεσμευμένη αναλογία, ή πολλαπλών εξόδων με δεσμευμένη αναλογία, όπως ο κόμβος που αναπαριστά τη διύλιση

του αργού πετρελαίου) ισχύει η ακόλουθη εξίσωση ισορροπίας της ροής που διέρχεται από τον κόμβο:

1. Για κόμβο I τύπου B:

$$\sum_L iNet(L, I)x(L, CY, P, S) = 0 \quad \forall(CY, P, S) \quad (4.7)$$

Η εξίσωση 4.7 γράφεται αλλιώς:

$$\underbrace{\sum_{L:iNet(L,I)=+1} x(L, CY, P, S)}_{\text{ροή που αφίκνυται στον κόμβο } I} = - \underbrace{\sum_{L:iNet(L,I)=-1} x(L, CY, P, S)}_{\text{ροή που απομακρύνεται από τον κόμβο } I} \quad (4.8)$$

2. Για κόμβο τύπου A (που χαρακτηρίζεται από συντελεστή απόδοσης):

$$EF(I, T) \sum_{L:iNet(L,I)=+1} x(L, CY, P, S) = \sum_{L:iNet(L,I)=-1} x(L, CY, P, S) \quad (4.9)$$

- Τερματικός περιορισμός επάρκειας εγκατεστημένων επενδύσεων²⁰: Το μοντέλο βελτιστοποιεί τη διάρθρωση του συστήματος για τον ορίζοντα αναφοράς, αγνοώντας την περαιτέρω εξέλιξη του συστήματος. Αυτό έχει ως συνέπεια να προγραμματίζει τις επενδύσεις επιτρέποντας τη μαζική απόσυρση των τελευταίων επενδύσεων μετά την τελευταία περίοδο του ορίζοντα. Αυτή η συμπεριφορά του γραμμικού μοντέλου ελαχιστοποιεί το ολικό κόστος του συστήματος για τον ορίζοντα αναφοράς, αλλά αποτελεί κακή εξομείωση των πραγματικών συνθηκών λειτουργίας ενός ενεργειακού συστήματος. Για τη δημιουργία ομαλών τερματικών συνθηκών προστίθεται μια εξίσωση της μορφής:

$$g(K_P(A, P)) \geq 0 \quad \text{αν η περίοδος } P \text{ είναι η τελευταία περίοδος του ορίζοντα} \quad (4.10)$$

- Πρόσθετοι περιορισμοί για την ικανοποίηση συμπληρωματικών στόχων, όπως η ελάττωση των εκπομπών αερίων (κεφάλαιο 7), της μορφής:

$$h \left(\sum_L x(L, CY, P) \right) \geq 0 \quad \forall(CY, P) \quad (4.11)$$

ή

$$h \left(\sum_L x(L, CY) \right) \geq 0 \quad \forall CY \quad (4.12)$$

²⁰Ο περιορισμός αυτός μπορεί να υποκατασταθεί από την επιμήκυνση του ορίζοντα H του μοντέλου, πέρα από τις περιόδους που μας ενδιαφέρει να μελετήσουμε. Τα μεγέθη των περιόδων $P' : P' \geq H$ θεωρούνται όμοια με τα μεγέθη της τελευταίας περιόδου του πραγματικού ορίζοντα. Έτσι οι ανώμαλες συνθήκες τερματισμού του ορίζοντα μελέτης μεταφέρονται στο τέλος του πλασματικού ορίζοντα H' .

4.5.3 Δυαδικές μεταβλητές

Για κάθε περιορισμό του συστήματος ορίζεται η αντίστοιχη δυαδική μεταβλητή (2.4). Για παράδειγμα, σε κάθε εξίσωση της μορφής (4.3) αντιστοιχεί μια σκιάδης μεταβλητή $\lambda_D(D, P, S)$ που εκφράζει την αύξηση της αντικειμενικής συνάρτησης ολικού κόστους του συστήματος για μοναδιαία αύξηση της ζήτησης $\Omega(D, P, S)$. Προφανώς όλες οι εξισώσεις (4.3) είναι περιοριστικές για το σύστημα, οπότε αντίστοιχα οι δυϊκές τιμές τους είναι μη-μηδενικές²¹. Αντίθετα, για τις δυϊκές μεταβλητές $\lambda_C(A, P, S)$ που αντιστοιχούν στις εξισώσεις (4.5), για κάθε κόμβο A και περίοδο P θα υπάρχει μόνο ένα $S^* \in S$ τέτοιο ώστε $\lambda_C(A, P, S) \neq 0$, εφ' όσον η εγκατεστημένη δυναμικότητα για κάθε διεργασία εξαρτάται από το χρονικό κλάσμα αιχμής.

Η εξέταση των δυαδικών τιμών είναι χρήσιμο εργαλείο για την επιβεβαίωση της σωστής τοπολογικής δομής του γράφου και για τον εντοπισμό εξισώσεων που καθιστούν την εύρεση λύσης ανέφικτη (infeasible).

4.5.4 Αντικειμενική συνάρτηση

Η αντικειμενική συνάρτηση, την οποία ελαχιστοποιεί το μοντέλο μαθηματικού προγραμματισμού του ενεργειακού συστήματος, εκφράζει το συνολικό κόστος για τον ορίζοντα μελέτης ανηγμένο στο έτος βάσης. Θεωρούμε ότι όλες οι επενδυτικές αποφάσεις λαμβάνονται έχοντας γνώση των μελλοντικών συνθηκών για όλη τη διάρκεια του ορίζοντα (full-foresight).

Το κόστος επενδύσεων εισάγεται με τη μορφή ισόποσων ετήσιων τοκοχρεωλυτικών δόσεων πληρωμών στη διάρκεια του τεχνολογικού χρόνου ζωής της επένδυσης. Η παρούσα αξία της σειράς πληρωμών, ανηγμένη στο έτος πραγματοποίησης της επένδυσης ισούται με το πραγματικό κόστος σε όρους μελλοντικής αξίας της επένδυσης που αποφασίζει το μοντέλο. Η αναγωγή σε σειρά πληρωμών γίνεται σύμφωνα με τον τύπο:

$$R_i = K \frac{re^{rn}}{e^{rn} - 1} \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (4.13)$$

όπου K το κόστος της επένδυσης στο έτος βάσης (έτος πραγματοποίησης επένδυσης), r ο συντελεστής αναγωγής²², n ο χρόνος ζωής της επένδυσης.

²¹Το ολικό κόστος του συστήματος στην κατάσταση ισορροπίας είναι $\sum_{D,P,S} \lambda_D(D, P, S) \Omega(D, P, S)$.

²²Η επιλογή του συντελεστή r αποτελεί μείζον θέμα στο μακροχρόνιο σχεδιασμό:

- Αρχική προσέγγιση: Για προβλήματα μακροχρόνιου σχεδιασμού (υποθέτοντας ότι η οικονομία παρουσιάζει θετική ανάπτυξη για χρονικό ορίζοντα που τείνει στο άπειρο) ως συντελεστής αναγωγής χρησιμοποιούνταν το social discount rate (άθροισμα δύο συνιστωσών που εκφράζουν τη δημογραφική εξέλιξη και την τεχνολογική ανάπτυξη αντίστοιχα) προσαυξημένο κατά ένα συντελεστή επενδυτικού κινδύνου r_R . Ο συντελεστής αναγωγής ορισμένος κατά τον τρόπο αυτό αντιπροσωπεύει το συμβατό με την μακροχρόνια οικονομική ανάπτυξη επιτόκιο.
- Στα σύγχρονα μοντέλα ενεργειακού σχεδιασμού η παραπάνω προσέγγιση καταρρίπτεται ([1]δεν ισχύει η υπόθεση άπειρου χρονικού ορίζοντα ανάπτυξης, εφ' όσον ο ορίζοντας του μοντέλου είναι πεπερασμένος, [2]το ενεργειακό σύστημα αποτελεί μέρος της ολικής οικονομίας). Ως συντελεστής αναγωγής χρησιμοποιείται η βέβαια απόδοση κεφαλαίων r_K (επιτόκια κρατικών ομολόγων) προσαυξημένη κατά το συντελεστή r_R . Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι στο ενεργειακό σύστημα οι επενδύσεις πραγματοποιούνται από ιδιώτες, προστίθεται η συνιστώσα r_P . Τελικά ο συντελεστής αναγωγής διαμορφώνεται ως $r = r_K + r_R + r_P$.

Οι υπόλοιπες συνιστώσες του κόστους του συστήματος (μεταβλητό κόστος λειτουργίας) αναφέρονται σε ετήσια βάση, οπότε για κάθε περίοδο i του ορίζοντα προκύπτει το ετήσιο κόστος C_i .

Το κόστος C_i που αναφέρονται στην i -στή περίοδο ανάγεται στο έτος βάσης με βάση το συντελεστή αναγωγής r :

$$C_i^0 = C_i \frac{1}{(1+r)^i} \quad (4.14)$$

Τότε:

$$obj = \sum_{CY} \sum_i C_i^{CY} \frac{1}{(1+r^{CY})^i} \quad (4.15)$$

Σημείωση 6. Σύμφωνα με την παραπάνω εξίσωση, στην αντικειμενική συνάρτηση περιλαμβάνεται το κόστος που αντιστοιχεί μόνο σε ένα έτος για κάθε περίοδο του ορίζοντα. Εφόσον όλες οι συνιστώσες αναφέρονται σε ετήσια βάση, η ελαχιστοποίηση της συνάρτησης obj δίνει το ίδιο αποτέλεσμα με την ελαχιστοποίηση της $obj^* = PLEN\ obj^{23}$.

Το κόστος λειτουργίας C_i για την περίοδο i του συστήματος περιλαμβάνει:

- Κόστη επενδύσεων σε τεχνολογίες, ανηγμένα σε ισόποσες σειρές πληρωμών.
- Ετήσια (σταθερά και μεταβλητά) κόστη λειτουργίας και συντήρησης των υλοποιημένων επενδύσεων.
- Κόστη εισαγωγών (μείον έσοδα από εξαγωγές) ενεργειακών αγαθών.
- Κόστη εγχώριας εξόρυξης πρωτογενών μορφών ενέργειας.
- Κόστη μεταφοράς και διανομής ενεργειακών φορέων.

Η γενική έκφραση C_i του κόστους για κάθε CY είναι (θεωρώντας ότι A είναι κάθε στοιχείο [κόμβος διεργασίας N , κλάδος L ή αθροιστικό δίκτυο F] που συμβάλλει στο ολικό κόστος του συστήματος):

$$\begin{aligned} C_i &= \sum_A R_i^A \quad [\text{ετήσιο κόστος αποπληρωμής επένδυσης (4.13)}] \\ &+ \sum_A KPA^i f_{FC}^A \quad [\text{σταθερό κόστος λειτουργίας}] \\ &+ \sum_A \sum_{L=L(A)} x_L^i f_{VC}^A \quad [\text{μεταβλητό κόστος λειτουργίας}] \\ &+ \sum_I x_{IP} \quad [\text{εισαγωγές}] \quad - \sum_E x_{EP} \quad [\text{εξαγωγές}] \end{aligned} \quad (4.16)$$

Για παράδειγμα, το κόστος μεταφοράς ενεργειακών αγαθών όταν αυτή δεν πραγματοποιείται μέσω δικτύου (π.χ. μεταφορά πετρελαιοειδών με βυτιοφόρα) αποδίδεται στον αντίστοιχο κλάδο

²³Ο γραμμικός προγραμματισμός έχει την ιδιότητα να δίνει την ίδια λύση για την αρχική συνάρτηση π και κάθε μετασχηματισμό $\alpha\pi + \beta$.

L , που θεωρείται ότι έχει μόνο μεταβλητό κόστος f_{VC}^L (μοναδιαίο κόστος μεταφοράς ανά μονάδα ενέργειας). Για τον προσδιορισμό των τιμών f_{VC}^L έχει γίνει η προσεγγιστική παραδοχή ότι αγνοούμε τη χωρική διάσταση του προβλήματος. Απλοποιητικά, θεωρούμε ότι το κόστος μεταφοράς των ενεργειακών φορέων αποτελεί ένα ορισμένο ποσοστό της τελικής τιμής στον καταναλωτή.

Κεφάλαιο 5

Υποσύστημα χρήσης ενέργειας

Το υποσύστημα χρήσης ενέργειας περιγράφει την κατανάλωση των μορφών τελικής ενέργειας (που προκύπτουν ως προϊόντα των υποσυστημάτων προσφοράς) για την ικανοποίηση των αναγκών της οικονομίας σε ενεργειακές υπηρεσίες. Η μετατροπή της τελικής ενέργειας (F_{xxx}) σε ωφέλιμη ενέργεια D_{xxx} πραγματοποιείται μέσω των τεχνολογιών χρήσης (T_{xxx}), όπου xxx οι τομείς στους οποίους διαχωρίζεται η ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών της οικονομίας:

5.1 Τομέας μεταφορών

Η ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών στον τομέα μεταφορών [πίνακας 4.7] διαχωρίζεται στους υπερ-τομείς επιβατικών και εμπορευματικών μετακινήσεων ($MTRA^1$). Οι υποτομείς $DTRA \in MTRA$ ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την κάλυψη των αναγκών για μεταφορές, υπό περιορισμούς: Με δεδομένη την αρχικά προβλεπόμενη² κατανομή $\lambda_{DTRA}^0 = d_{DTRA}^*/d_{MTRA}^*$ στους υποτομείς $DTRA$ της ζήτησης για επιβατικές/ εμπορευματικές μεταφορές, το μοντέλο επιτρέπει τη χαλάρωση αυτών των κατανομών εκατέρωθεν των ποσοστών που προβλέπει το PRIMES (προσθέτοντας επιπλέον βαθμούς ελευθερίας στη διαμόρφωση της ισορροπίας του συστήματος, εφόσον είναι δυνατόν τα ζητούμενα pkm ή tkm να πραγματοποιηθούν με οποιαδήποτε τεχνολογία της κατηγορίας $DTRA$):

$$\sum_{L:iNet(L,DTRA)=-1} x_{I,DTRA} \leq (\lambda_{DTRA}^0 + \sigma_+) d_{MTRA}^* \quad (5.1)$$

$$\sum_{L:iNet(L,DTRA)=-1} x_{I,DTRA} \geq (\lambda_{DTRA}^0 - \sigma_-) d_{MTRA}^* \quad (5.2)$$

Η δυνατότητα υποκατάστασης μεταξύ των κλάσεων ζήτησης $DTRA$ περιορίζεται από τους συντελεστές σ_+, σ_- .

Οι τεχνολογίες τελικής χρήσης (σύνολο $TTRA$) τροφοδοτούνται από τις υποκαταστάσιμες

¹Οι υπερ-τομείς στον τομέα των μεταφορών είναι εικονικοί και δεν απεικονίζονται στο γράφο του συστήματος.

²με βάση τα δεδομένα του PRIMES

Πίνακας 5.1: πεδία δεδομένων για το σύνολο τεχνολογιών μεταφοράς TTRA

πεδίο	περιγραφή
K_0	διαθέσιμη ικανότητα τεχνολογίας το έτος βάσης (σε αριθμό km που διανύθηκαν)
CC_0	κόστος επένδυσης το έτος βάσης (σε € ανά όχημα)
EF_0	απόδοση τεχνολογίας (σε 10^6 pkm ή tkm ανά toe τελικής ενέργειας) για τα τεχνολογικά δεδομένα του έτους βάσης
LFT	χρόνος τεχνολογικής ζωής
FIXOM	σταθερό κόστος συντήρησης εξοπλισμού (σε € ανά όχημα)
SLOPECC, FLOORCC	παράμετροι καμπύλης μείωσης κόστους επένδυσης
SLOPEEF, FLOOREF	παράμετροι καμπύλης βελτίωσης απόδοσης
TAV	τεχνολογική διαθεσιμότητα: δυαδική παράμετρος

μορφές τελικής ενέργειας του τομέα μεταφορών (σύνολο FTRA)³.

$$FTRA \xrightarrow{toe} TTRA \xrightarrow{vkm} DTRA$$

Η βάση δεδομένων του μοντέλου περιέχει για το σύνολο TTRA τα πεδία του πίνακα [5.1].

Για την αναγωγή της ζητούμενης ενεργειακής υπηρεσίας σε αριθμό οχημάτων έχουν χρησιμοποιηθεί οι συντελεστές ALF(DTRA) και VKMY(DTRA), ορισμένοι επί του συνόλου υποτομέων DTRA, όπου ALF εκφράζει το λόγο pkm ή tkm προς τα αντίστοιχα οχηματοχιλιόμετρα (vkm) και VKMY το μέσο αριθμό οχηματοχιλιόμετρων που πραγματοποιεί σε ετήσια βάση κάθε όχημα⁴.

Στον πίνακα ;; φαίνεται ένα τμήμα του σχήματος δεδομένων για τις τεχνολογίες του τομέα μεταφορών. Ανάλογα έχουν δομηθεί τα δεδομένα για τους υπόλοιπους τομείς ζήτησης.

Σημείωση 7. Για ορισμένες από τις τεχνολογίες ενεργειακών μετατροπών του μοντέλου δίνονται εκτός από το κόστος επένδυσης και την απόδοση στο έτος βάσης και οι παράμετροι ($s[lope], f[loor]$) που ορίζουν την αναμενόμενη τεχνολογική τους πρόοδο. Για την προσαρμογή του κόστους επένδυσης ισχύει η εξίσωση:

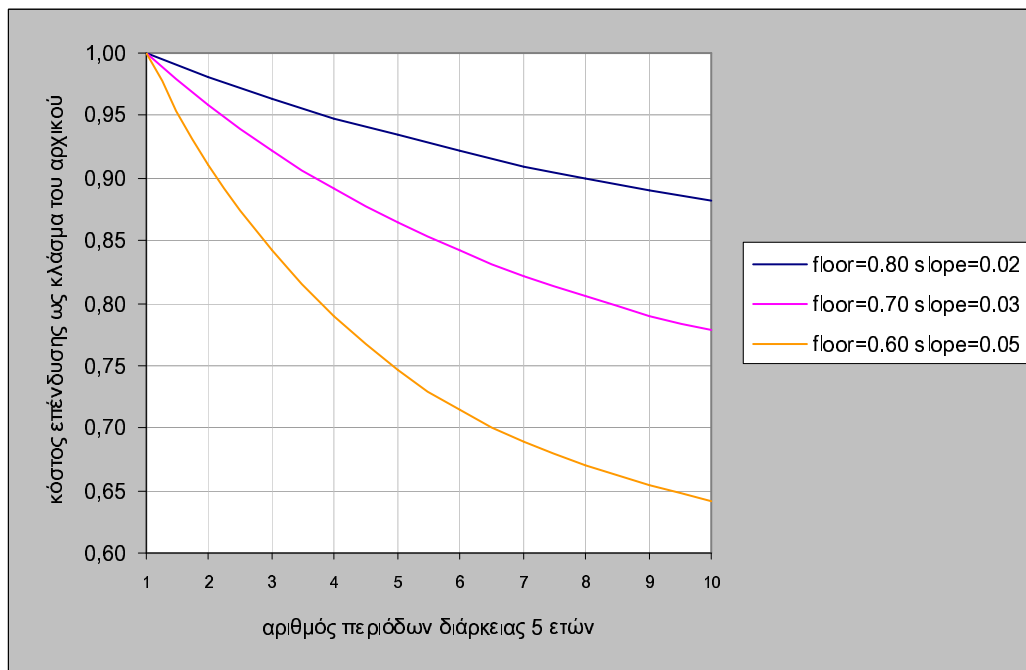
$$CC_t = CC_0[(1 - f)e^{-s(t-1)} + f] \quad (5.3)$$

Αντίστοιχα, για την προσαρμογή της απόδοσης μιας τεχνολογίας ισχύει η εξίσωση:

$$\frac{1}{EF_t} = \frac{1}{EF_0}[(1 - f)e^{-s(t-1)} + f] \quad (5.4)$$

³Το υδρογόνο ως μορφή τελικής ενέργειας για τον τομέα μεταφορών, αντιστοιχεί στον κόμβο τύπου B TRHDG∈FTRA. Δε γίνεται διάκριση μεταξύ των τεχνολογιών υδρογόνου με βάση τη φυσική μορφή του υδρογόνου που μπορεί να καταναλώσει (υγροποιημένο, συμπιεσμένο αέριο, σε στερεά μορφή μεταλλικού υδριδίου). Η αβεβαιότητα στα προσεγγιστικά κόστη των τεχνολογιών υδρογόνου υπερβαίνει την ανακρίβεια που δημιουργεί αυτή η παραδοχή.

⁴Παράδειγμα προσεγγιστικού υπολογισμού στόλου βενζινοκίνητων επιβατικών αυτοκινήτων το έτος βάσης: Από στατιστικά στοιχεία γνωρίζουμε ότι στη Γερμανία διανύθηκαν το έτος βάσης $780 \cdot 10^9$ επιβατοχιλιόμετρα σε επιβατικά, εκ των οποίων το 76% με βενζινοκίνητα οχήματα. Λαμβάνοντας υπ' όψιν τους συντελεστές $VKMY = 1.3$ (που σημαίνει ότι κατά μέσο όρο αντιστοιχούν 1.3 επιβάτες σε κάθε όχημα) και $ALF = 13000$ (μέσος συντελεστής φορτίου οχήματος), προκύπτει $\frac{780 \cdot 10^9}{1.3 \cdot 13000} \simeq 46 \cdot 10^6$ οχήματα.



Σχήμα 5.1: Η τεχνολογική πρόοδος ως εξωγενής παράμετρος του μοντέλου: Καμπύλη μείωσης του κόστους επένδυσης, εξίσωση [5.3]

Η γραφική παράσταση του κόστους επένδυσης σε συνάρτηση του χρόνου για διάφορες τιμές των παραμέτρων όταν η τεχνολογική πρόοδος είναι δεδομένη φαίνεται στο σχήμα [5.1].

Αντίστοιχα ορίζονται οι καμπύλες τεχνολογικής πρόοδου και για άλλες τεχνολογίες χρήσης του συστήματος, θεωρώντας την τεχνολογική πρόοδο εξωγενές δεδομένο με μοναδική παράμετρο το χρόνο⁵.

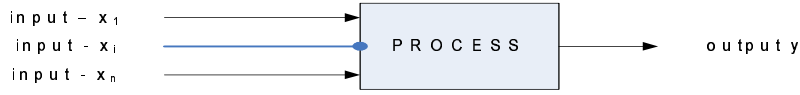
Για ορισμένους συνδυασμούς μορφών τελικής ενέργειας και τεχνολογιών τελικής χρήσης τίθενται άνω (ή κάτω) όρια στη δυνατότητα υποκατάστασης μεταξύ των ενεργειακών μορφών⁶. Για παράδειγμα, οι συμβατικοί κινητήρες diesel μπορούν να χρησιμοποιήσουν βιο-καύσιμα μέχρι ένα όριο ανάμιξής του στο συμβατικό καύσιμο. Ο περιορισμός αυτός (σχήμα 5.2), που

⁵ Η παραδοχή σχετικά με την προκαθορισμένη αναμενόμενη τεχνολογική πρόοδο εισάγει επιπλέον αβεβαιότητα στο μοντέλο του συστήματος. Οι υποθέσεις που γίνονται για την τεχνολογικά χαρακτηριστικά ορισμένων διεργασιών είναι κρίσιμες για τα αποτελέσματα του μοντέλου. Αυτό επιτείνεται από το γεγονός ότι το μοντέλο έχει υλοποιηθεί με μεθόδους γραμμικού προγραμματισμού, που τείνουν να δημιουργούν ακραίες συμπεριφορές του συστήματος που εξομοιώνεται. Σε σύγχρονα μοντέλα τύπου bottom-up([;], [;]) η τεχνολογική πρόοδος αποτελεί ενδογενή παράμετρο. Η απλούστερη μορφή της μοντελοποίησης της σχέσης μεταξύ του κόστους επένδυσης CC μιας τεχνολογίας και της ήδη υλοποιημένης δυναμικότητας K της τεχνολογίας είναι η καμπύλη μάθησης ενός παράγοντα:

$$CC(K) = \alpha K^{-b} \quad (5.5)$$

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, το κόστος της τεχνολογίας μειώνεται κατά $1 - 2^{-b}$ όταν διπλασιαστεί η εγκατεστημένη δυναμικότητα της τεχνολογίας.

⁶ Αυτός ο περιορισμός είναι στιγμιότυπο των περιορισμών που ισχύουν για κόμβους πολλαπλών εισόδων με φραγμένη δυνατότητα υποκατάστασης μεταξύ των εισόδων.



Σχήμα 5.2: Περιορισμός αναλογίας ενεργειακών μορφών που εισέρχονται σε έναν κόμβο ενεργειακής διεργασίας

ισχύει και σε άλλους συνδυασμούς τεχνολογιών και ενεργειακών μορφών περιγράφεται από την εξίσωση:

$$l_i \sum_j x_j \leq x_i \leq u_i \sum_j x_j \quad (5.6)$$

5.2 Βιομηχανικός τομέας

Η ιεραρχία της αναπαράστασης του βιομηχανικού τομέα στο μοντέλο φαίνεται στο σχήμα 5.4. Οι επιμέρους διεργασίες $TIND_i$ ⁷ (για κάθε διεργασία υπάρχουν τρεις κλάσεις διαθέσιμων τεχνολογικών επιλογών $TIND [ORD,IMP,ADV]$) κάθε τομέα βιομηχανικής παραγωγής $DIND$ είναι **συμπληρωματικές** μεταξύ τους, δηλαδή για την παραγωγή μιας μονάδας κάποιου βιομηχανικού προϊόντος απαιτείται συμμετοχή όλων των διεργασιών σε προκαθορισμένη αναλογία. Οι εισροές από κάθε διεργασία $TIND_i$ ($DIND$) στον αντίστοιχο τομέα βιομηχανικής παραγωγής $DIND$ έχουν μεταξύ τους δεσμευμένη αναλογία, και οι αντίστοιχοι περιορισμοί είναι (σ_u, σ_l συντελεστές ευελιξίας του περιορισμού συμπληρωματικών διεργασιών):

$$\forall TIND_i : \begin{aligned} \sum_{\substack{TIND(TIND_i) \\ L:iNet(L,TIND)=-1}} x(L) &\leq (1 + \sigma_u) \sum_{\substack{DIND(TIND_i) \\ L:iNet(L,DIND)=+1}} x(L) \\ \sum_{\substack{TIND(TIND_i) \\ L:iNet(L,TIND)=-1}} x(L) &\geq (1 - \sigma_l) \sum_{\substack{DIND(TIND_i) \\ L:iNet(L,DIND)=+1}} x(L) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Οι διεργασίες $TIND$ τροφοδοτούνται από το σύνολο υποκαταστάσιμων μορφών τελικής ενέργειας του τομέα $FIND$ ⁸.

Σημείωση 8. Ορίζεται ένα υποσύνολο $bP \subset TIND$ των κόμβων βιομηχανικών διεργασιών που παράγει παραπροϊόντα (αέριο υψικαμίνων ή σιδηρουργιών) που ανακυκλώνονται στο ενεργειακό σύστημα (σχήμα 5.6). Οι κλάδοι $bPL \subset L$ συνδέουν τους κόμβους bP με τους κόμβους τύπου B των παραπροϊόντων. Για την προσφορά παραπροϊόντων ισχύει ο περιορισμός:

$$\forall bP \sum_{bPL:iNet(bPL,bP)=-1} x(bPL) \leq a^u(bP) \sum_{L:iNet(L,bP)=+1} x(L) \quad (5.8)$$

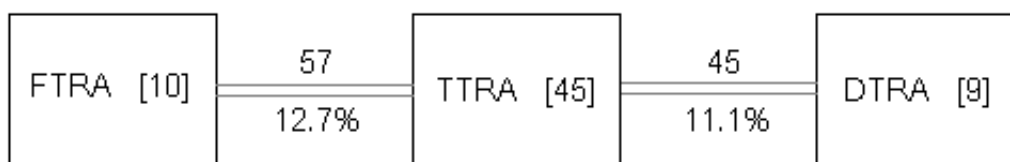
⁷ Οι διεργασίες μοντελοποιούνται έμμεσα στο σύστημα μέσω των τριών κλάσεων (vintages) τεχνολογιών που υλοποιούν την κάθε διεργασία.

⁸ Το υδρογόνο ως μορφή τελικής ενέργειας του βιομηχανικού τομέα αντιστοιχεί στους κόμβους $INH DG$ και $INNGH$ (φυσικό αέριο σε ανάμιξη με υδρογόνο). Και οι δύο ενεργειακές μορφές κατευθύνονται αποκλειστικά σε θερμικές ή χημικές διεργασίες, εφόσον η κατανομημένη ηλεκτροπαραγωγή των βιομηχανιών εντάσσεται στην ενότητα προσφοράς ενέργειας (6).

		TRGSL	TRGDO	TRHFO	TRLBF	TRCNG			[y]	[Mpkm Mtkm exec baseyear - baseload assumption]	[€/average vehicle]	[€/average vehicle]	[€/toe] [tax]	[Gpkm Gtkm per ktoe]
		PCGSH1	1											
		PCGSI2	1											
		PCGSH1	1											
		PCGSH2	1											
p		PCDOI		1			ss_1	PCGSH1	10.00	554000	1.35E+04	5.00E+02		18.80
p		PCDOH		1		1	ss_2	PCGSI2	10.00	0	1.58E+04	5.20E+02		21.30
p		PCNGI				1	id - class_1	PCGSH1	10.00	0	2.20E+04	5.30E+02		27.00
p		PCNGF				1	id - class_2	PCGSH2	10.00	0	2.20E+04	5.30E+02		26.00
p		PCCEL					IC	PCDOI	10.00	172000				
		passenger cars [diesel - biofuel] fuelled average IC hybrid						PCDOH	10.00	0				
		passenger cars compressed natural gas fuelled average IC						PCNGI	10.00	0				
		passenger cars natural gas fuelled FC						PCNGF	10.00	0				
		passenger cars electric						PCELC	10.00	0				
		passenger cars methanol fuelled FC [on-board reforming]						PCMTF	10.00	0				
		passenger cars ethanol fuelled IC						PCETI	10.00	0				
		passenger cars hydrogen fuelled IC						PCHGI	10.00	0				
		passenger cars hydrogen fuelled FC - class_1						PCHGF1	10.00	0	6.00E+04	6.10E+02		29.70
		passenger cars hydrogen fuelled FC - class_2						PCHGF2	10.00	0	7.00E+04	6.20E+02		36.20
		buses - coaches diesel fuelled IC - class_1						BUDO11	15.00	70000	1.10E+05	2.80E+03		87.20
		buses - coaches [diesel- biofuel] fuelled IC - class_2						BUDO12	15.00	0	1.20E+05	3.05E+03		98.00
		buses - coaches [diesel- biofuel] fuelled IC hybrid - class_1						BUDOH1	15.00	0	1.25E+05	3.10E+03		120.00
		buses - coaches [diesel- biofuel] fuelled IC hybrid - class_2						BUDOH2	15.00	0	1.40E+05	3.20E+03		128.00

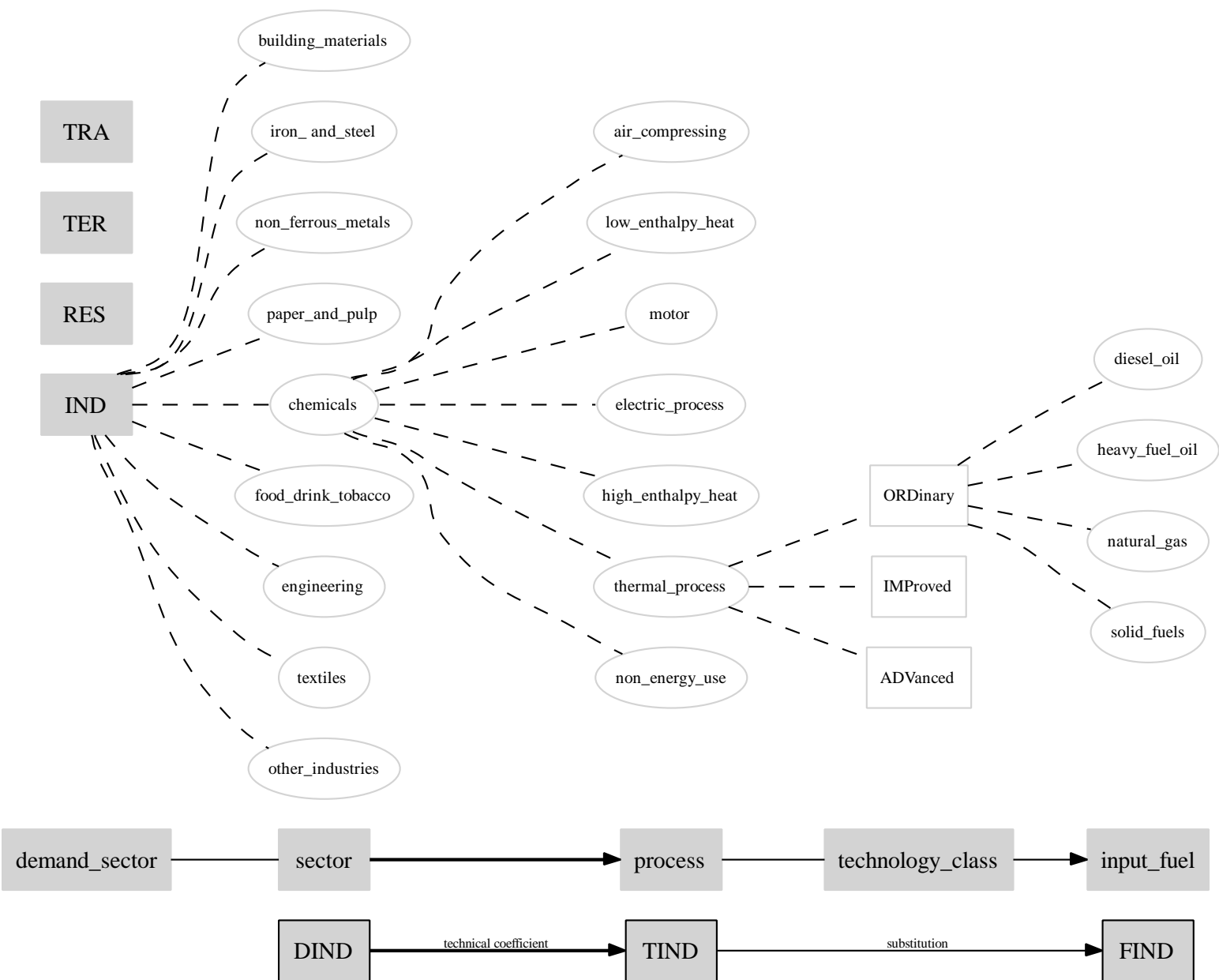
	TRAPC_	TRABU_	TRATW_	TRATR_	TRAPT_	TRAPS_	TRAAC_	TRACT_	TRACS_
DPKM	1	1	1		1	1	1		
DTKM				1				1	1
VKMY	12990	42228	3222	29233	30370	80000	650000	20346	85000
ALF	1	19	1	5	140	200	100	391	1200

(α) Τμήμα του πίνακα δεδομένων για τις τεχνολογίες του τομέα μεταφοράς, όπως έχει αναπτυχθεί σε EXCEL. Όλα τα δεδομένα (τοπολογική περιγραφή και τεχνικο-οικονομικά χαρακτηριστικά) του συστήματος έχουν αναπτυχθεί σε λογιστικά φύλλα, ανεξάρτητα από την τυποποιημένη περιγραφή των εξισώσεων του μοντέλου.

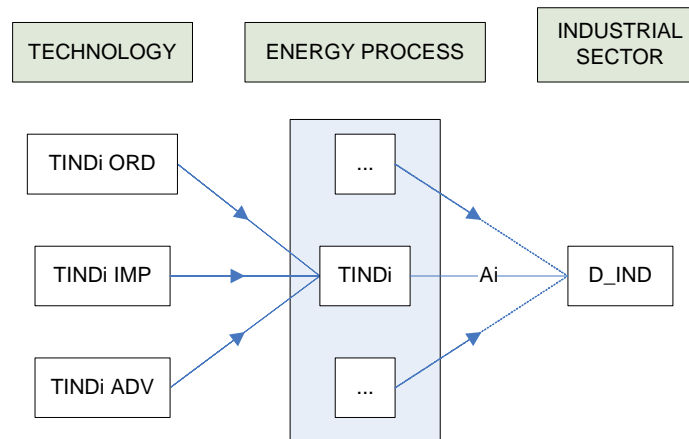


(β') Τοπολογία του γράφου αναφοράς για τον τομέα μεταφορών: Τα στοιχεία του συνόλου FTRA συνδέονται με τα στοιχεία του TTRA με 57 κλάδους, οπότε ο συντελεστής πυκνότητας του τμήματος αυτού του πίνακα net(FTRA, TTRA) αντιστοιχεί σε 12.7%.

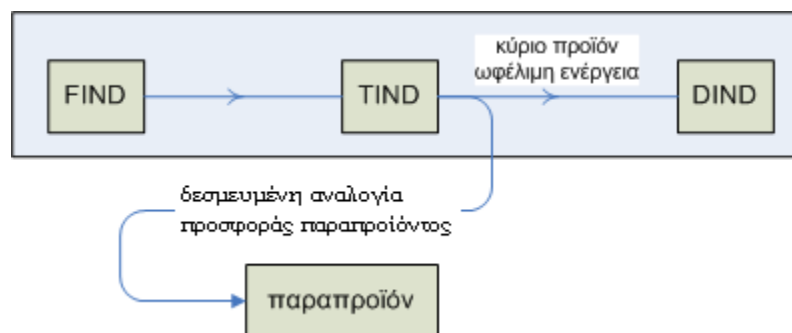
Σχήμα 5.3: Δεδομένα για τον τομέα μεταφορών



Σχήμα 5.4: Ιεραρχία της μοντελοποίησης στο βιομηχανικό τομέα



Σχήμα 5.5: Καθορισμένος λόγος εισροών ανά τομέα βιομηχανικής παραγωγής



Σχήμα 5.6: Προσφορά παραπροϊόντων βιομηχανικών διεργασιών: Αντιστοιχούν στον κόμβο τύπου B ενεργειακής μορφής BYG που ανακυκλώνεται στο σύστημα ως καύσιμο θερμικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.

Η ενεργειακή ροή προς το παραπροϊόν δε συμπεριλαμβάνεται στην εξίσωση ισορροπίας του κόμβου.

Στο βιομηχανικό υποσύστημα ζήτησης η μεταβλητή που περιγράφει τις ενεργειακές ροές ως το επίπεδο τελικής ενέργειας είναι η y , η οποία δεν έχει ως όρισμα τα χρονικά κλάσματα S . Η καμπύλη φορτίου της βιομηχανικής ζήτησης εφαρμόζεται μόνο στο επίπεδο τελικής ενέργειας, απαλλάσσοντας το μοντέλο από την επιπλέον πολυπλοκότητα του υπογράφου βιομηχανικής ζήτησης.

5.3 Οικιακός και τριτογενής τομέας

Οι τεχνολογίες τελικής χρήσης (σύνολα TRES και TTER) ανταγωνίζονται μεταξύ τους για την κάλυψη των αντίστοιχων ενεργειακών υπηρεσιών και τροφοδοτούνται από τις υποκαταστάσιμες μορφές τελικής ενέργειας του οικιακού και τριτογενούς τομέα (σύνολα FRES και FTER). Οι καταναλωτές των τομέων αυτών χρησιμοποιούν υδρογόνο άμεσα (σε θερμικές διεργασίες με δυνατότητα ανάμιξης με φυσικό αέριο), οπότε τροφοδοτούνται από τους κόμβους τελικής

Πίνακας 5.2: πεδία δεδομένων για τα σύνολο τεχνολογιών χρησιμοποίησης τελικής ενέργειας TIND, TRES, TTER

πεδίο	περιγραφή
K_0	διαθέσιμη ικανότητα τεχνολογίας το έτος βάσης (σε ωφέλιμα toe στην έξοδο του συστήματος μετατροπής)
$CC_{ORD}, CC_{IMP}, CC_{ADV}$	κόστος επένδυσης (σε € ανά δυνατότητα μετατροπής 1 ωφέλιμου toe ανά έτος)
$EF_{ORD}, EF_{IMP}, EF_{ADV}$	απόδοση τεχνολογίας ανά κλάση
LFT	χρόνος τεχνολογικής ζωής
FIXOM, VAROM	σταθερό και μεταβλητό κόστος συντήρησης εξοπλισμού (σε € ανά όχημα)
TAV	περίοδος από την οποία και μετά μία τεχνολογία είναι διαθέσιμη

ενέργειας RENGH, TENGH (H_2 σε ανάμιξη με φυσικό αέριο) και REHDG, TEHDG (καθαρό H_2 για χρήση σε διεργασίες απευθείας καύσης), ή έμμεσα, μέσω μονάδων ηλεκτροπαραγωγής με είσοδο υδρογόνο, οπότε η αντίστοιχη τελική ενέργεια καταγράφεται ως τελική ζήτηση για ηλεκτρισμό (και θερμότητα).

Η απομόνωση δεδομένων (τυπικά: κόστος επένδυσης, σταθερό και μεταβλητό κόστος λειτουργίας, διαθέσιμες κλάσεις τεχνολογιών και αντίστοιχα κόστη και αποδόσεις [πίνακας 5.3]) για τις τεχνολογίες τελικής μετατροπής ενέργειας στους τομείς αυτούς (όπως επίσης και στο βιομηχανικό τομέα) παρουσιάζει δυσχέρειες. Αυτές προκύπτουν από το ότι (σε αντίθεση με τον τομέα μεταφορών, όπου οι τεχνολογίες είναι ανεξάρτητες stand-alone), στους τομείς RES, TER, IND αποτελούν μέρος μιας ευρύτερης εγκατάστασης που δημιουργεί επιπλέον αδράνεια για την υποκατάσταση μεταξύ τεχνολογιών ή καυσίμων.

Για τους τρεις αυτούς τομείς έχει προστεθεί ένας επιπλέον περιορισμός που εκφράζει την αδράνεια στην υποκατάσταση των τεχνολογιών ή μορφών τελικών χρήσεων. Ο περιορισμός είναι δεσμευτικός στις πρώτες περιόδους και εξασθενεί στις επόμενες.

$$FRES \xrightarrow{toe} TRES \xrightarrow{utoe} DRES$$

$$FTER \xrightarrow{toe} TTER \xrightarrow{utoe} DTER$$

Σημείωση 9. Η διαδικασία λήψης αποφάσεων του μοντέλου σχετικά με τις επενδύσεις σε τεχνολογίες χρησιμοποίησης σε επίπεδο καταναλωτή παρουσιάζει αδυναμία. Επειδή το μοντέλο επιδιώκει την ελαχιστοποίηση του ολικού κόστους του συστήματος, αγνοεί τη διαδικασία λήψης αποφάσεων από επιμέρους παράγοντες (agents), όπως οι οικιακοί καταναλωτές. Σε τμηματικά (modular) μοντέλα του ενεργειακού συστήματος όπως το NEMS[;] ή το PRIMES λαμβάνονται υπ' όψιν οι μη οικονομικές παράμετροι της συνάρτησης χρησιμότητας των επιμέρους κατηγοριών καταναλωτών.

Κεφάλαιο 6

Ενότητα προσφοράς ενέργειας

Η ενότητα παραγωγής του συστήματος αναφέρεται στην εξόρυξη (ή συλλογή, όταν αναφερόμαστε στις ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές) εγχώριων ενεργειακών πρωτογενών πόρων, εισαγωγή και εξαγωγή πρωτογενών και δευτερογενών ενεργειακών φορέων και διεργασίες μετατροπής σε τελικές μορφές ενέργειας (π.χ. διύλιση πετρελαίου, παραγωγή ηλεκτρισμού, παραγωγή H_2). Περιλαμβάνει επίσης τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής των ενεργειακών φορέων μέχρι το επίπεδο τελικής χρήσης.

6.1 Εξόρυξη πρωτογενών ορυκτών πόρων και συλλογή μη ορυκτών πόρων

Τα ανακτήσιμα αποθέματα πρωτογενών ορυκτών πόρων αποτελούν το σύνολο $RSRC$, οι διεργασίες εξόρυξης το σύνολο $EXTR$, ενώ τα ενεργειακά αγαθά που προκύπτουν από την εξόρυξη το σύνολο $FPRI$. Ο περιορισμός που ισχύει για τους κόμβους $RSRC$ εκφράζεται ως:

$$\forall EXTR: \sum_P \sum_{L, iNet(L, RSRC)=-1} y_L^P \leq \underbrace{\overline{Q}(RSRC)}_{[\text{διαθέσιμα αποθέματα}]} \quad (6.1)$$

Ισχύει επίσης η περιοριστική συνθήκη ότι η εξορυσσόμενη ποσότητα σε κάθε περίοδο δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ, αντίστοιχα με κάθε κόμβο ενεργειακής διεργασίας:

$$\forall (P, EXTR): \sum_{L, iNet(L, RSRC)=-1} y_L^P \leq \overline{Kp^T}(EXTR) \quad (6.2)$$

Σημείωση 10. Για το σύνολο των μη-εξαντλήσιμων πόρων $NPRI$ (ανανεώσιμες πηγές και πυρηνική ενέργεια¹) ορίζουμε έναν περιορισμό ετήσιας ανακτήσιμης ποσότητας:

$$\forall (NPRI, P, S): \sum_{L, iNet(L, NPRI)=-1} x_L^{P,S} \leq Q(NPRI, P) \frac{d_S}{8760} a_S(NPRI) \quad (6.3)$$

¹Η πυρηνική ενέργεια εντάσσεται καταχρηστικά στην κατηγορία των μη-εξαντλήσιμων πόρων γιατί η εξάντληση των κοιτασμάτων ουρανού τοποθετείται στο μακροπρόθεσμο μέλλον, σε σχέση με τον ορίζοντα του μοντέλου. Οι περιορισμοί σχετικά με τη χρήση πυρηνικής ενέργειας επικεντρώνονται σε ζητήματα πολιτικών και περιβαλλοντικών προτεραιοτήτων και είναι εξωγενείς για το μοντέλο.

Στον περιορισμό αυτό λαμβάνεται υπ' όψιν η εποχικότητα (σύμφωνα με την κατάτμηση του έτους σε χρονικές ζώνες) ορισμένων ανανεώσιμων πηγών (ηλιακή και αιολική ενέργεια). Η εκμετάλλευση των μη-εξαντλήσιμων πόρων αυξάνει το κόστος του συστήματος μόνο στην περίπτωση της βιομάζας και των οργανικών αποβλήτων BMW και της πυρηνικής ενέργειας NUC.

Στο σχήμα 6.1 φαίνεται συγκεντρωτικά η δομή του γράφου μέχρι το επίπεδο της στήλης πρωτογενών μορφών ενέργειας PRIM, όπως αυτή εισάγεται σε ένα ενεργειακό ισοζύγιο.

Σημείωση 11. Τα κόστη επένδυσης για τις εγκαταστάσεις εξόρυξης υπολογίζονται έμμεσα με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο του έτους βάσης ως εξής: Αν n ο χρόνος ζωής της εγκατάστασης, r το επιτόκιο επιστροφής κεφαλαίου, K το εγκατεστημένο κεφαλαιουχικό κόστος το έτος αναφοράς σε €, $Q = P/\alpha$ η υποθετική ποσότητα που θα είχε παραχθεί στο έτος αναφοράς αν είχαν εξαντληθεί τα περιθώρια δυναμικότητας του εξοπλισμού, α ο συντελεστής χρησιμοποίησης, VC και FC το μεταβλητό και σταθερό κόστος λειτουργίας αντίστοιχα, $\frac{re^{rn}}{e^{rn}-1}$ ο συντελεστής υπολογισμού της ετήσιας σειράς πληρωμών για την αποπληρωμή της επένδυσης και p η τιμή του εξορυσσόμενου ενεργειακού αγαθού, προκύπτει, υποθέτοντας τιμολόγηση στο μέσο ολικό κόστος:

$$p = \frac{K \frac{re^{rn}}{e^{rn}-1} + FC K + VC \alpha Q}{\alpha Q}$$

Από τη σχέση αυτή υπολογίζεται το K , που συνδέεται με το κόστος επένδυσης CC (σε $\frac{€}{ktoe/y}$) με τη σχέση $K = CC\alpha Q$.

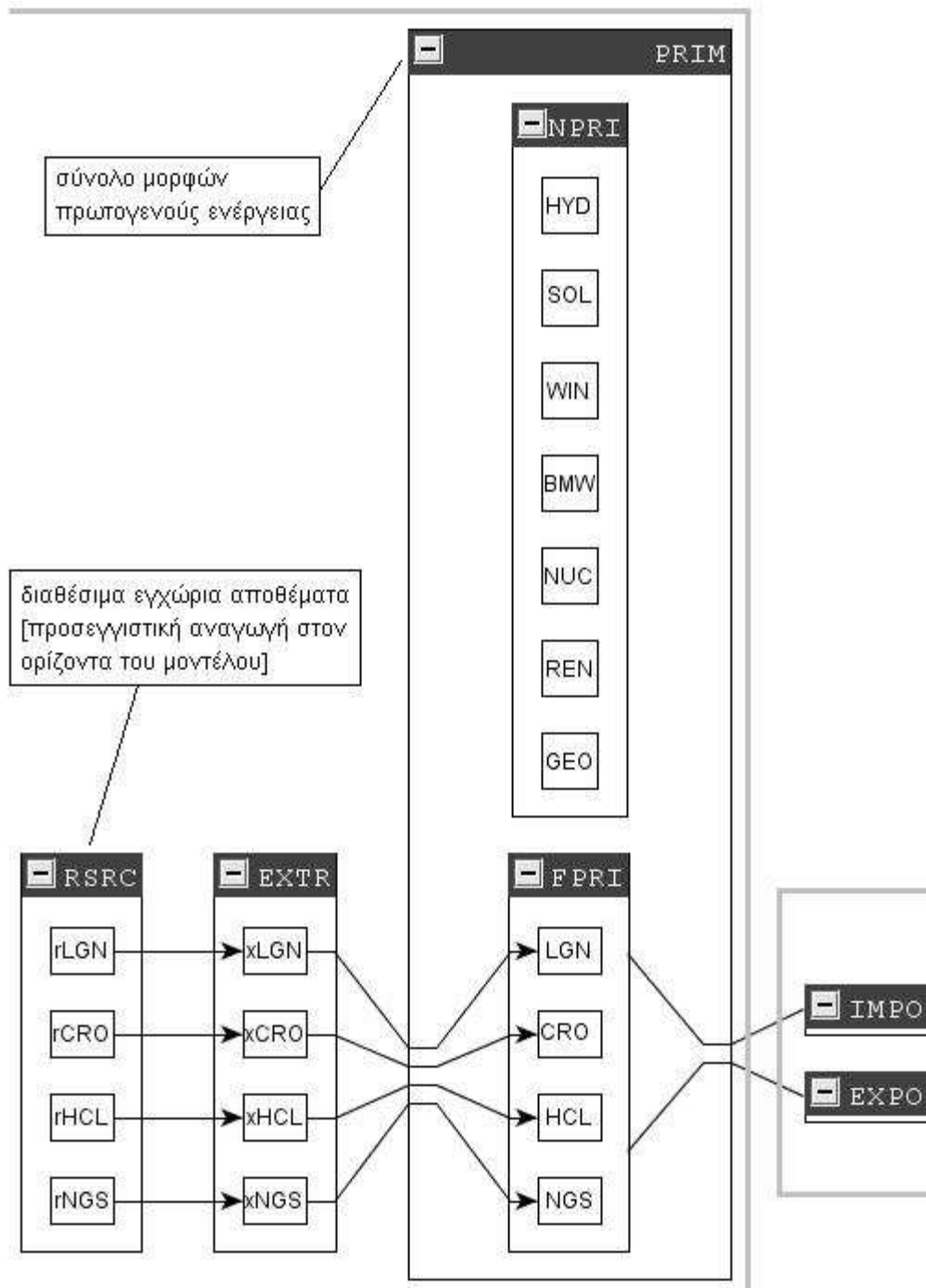
Η ίδια μέθοδος ακολουθείται για την τροφοδότηση του μοντέλου με δεδομένα κόστους επένδυσης και χρησιμοποίησης για τα διυλιστήρια και τα δίκτυα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου. Με την παραδοχή ότι η διανομή μέσω δικτύου τιμολογείται στο μέσο ολικό κόστος εισάγεται σημαντική ανακρίβεια στο μοντέλο, εφ' όσον αγνοούνται οι παράμετροι τοπολογίας των δικτύων, ενώ παραβιάζεται η υπόθεση ότι η οικονομία λειτουργεί σε πλήρη ανταγωνισμό, οπότε τα ενεργειακά προϊόντα τιμολογούνται στο οριακό κόστος. Ειδικά για τις τεχνολογίες εξόρυξης, υποθέτουμε επιπλέον ότι για όλη την ποσότητα που αναφέρεται ως διαθέσιμη (κόμβοι RSRC) το επενδυτικό κόστος επέκτασης των εγκαταστάσεων εξόρυξης είναι σταθερό (η πραγματική καμπύλη προσφοράς είναι αύξουσα [σχήμα 2.1.1]).

6.2 Εισαγωγές - Εξαγωγές

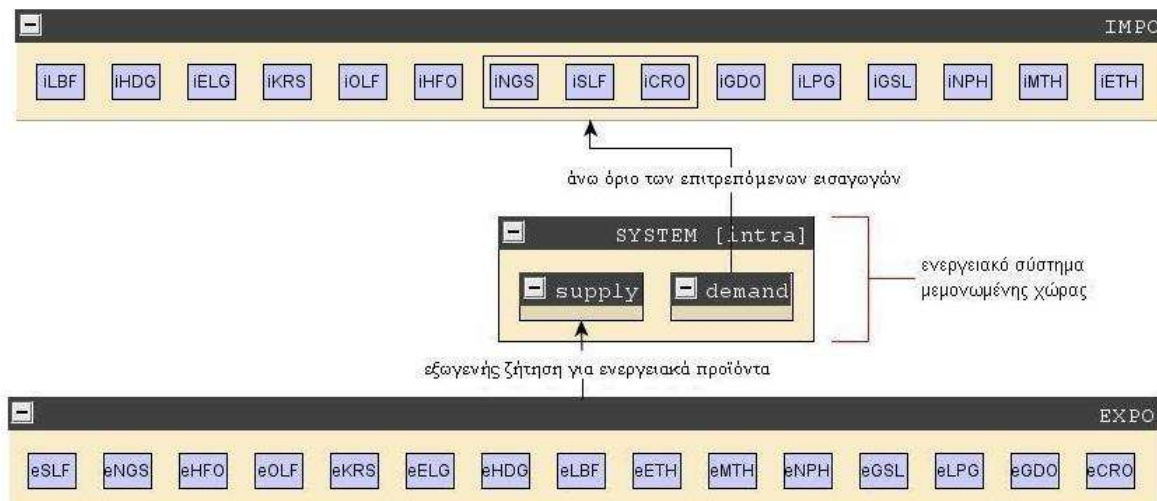
Οι εμπορεύσιμοι ενεργειακοί φορείς IMPO, EXPO αντιστοιχούν είτε στο σύνολο PRIM (πρωτογενείς φορείς) είτε στο INTE (δευτερογενείς φορείς). Για την εύρεση της ισορροπίας στην ενεργειακή αγορά μιας μεμονωμένης χώρας θεωρούμε τους εξής περιορισμούς:

- Για τους πρωτογενείς ενεργειακούς φορείς (φυσικό αέριο, αργό πετρέλαιο, στερεά καύσιμα), τίθεται ένα ανώτατο όριο εισαγωγών για κάθε περίοδο P του ορίζοντα:

$$\forall (\underbrace{IMPO}_{\tau.\omega..net(IMPO,FPRI)=1}, P) : y(L_{IMPO}, P) \leq Q_{(IMPO,P)} \quad (6.4)$$



Σχήμα 6.1: Τμήμα πρωτογενούς παροχής ενέργειας στο σύστημα



Σχήμα 6.2: Επιβολή περιορισμών στις εισαγωγές και εξαγωγές του συστήματος (επίλυση για μεμονωμένη χώρα)

- Για τα προϊόντα πετρελαίου (δευτερογενείς ενεργειακοί φορείς), το ανώτατο όριο εισαγωγών τίθεται ως ποσοστό της ολικής ζήτησης που δημιουργείται ενδογενώς στο μοντέλο (σε συνδυασμό με τον προηγούμενο περιορισμό το μοντέλο εξαναγκάζεται να πραγματοποιεί επενδύσεις στα διυλιστήρια για να εξασφαλίζεται αυτάρκεια του συστήματος):

$$\forall (\underbrace{IMPO}_{\text{τ.ω.:net(IMPO,INTE(OIL-PROD))}}, P) : \quad y(L_{IMPO}, P) \leq U(IMPO, P) \quad \underbrace{y(L_{IMPO}^{dem}, P)}_{\substack{\text{ζήτηση για δευτερογενείς} \\ \text{ενεργειακούς φορείς}}} \quad (6.5)$$

όπου $0 < U(IMPO) < 1$.

- Το σύστημα πρέπει επίσης να ικανοποιεί την εξωγενή ζήτηση για εξαγωγές ενεργειακών φορέων:

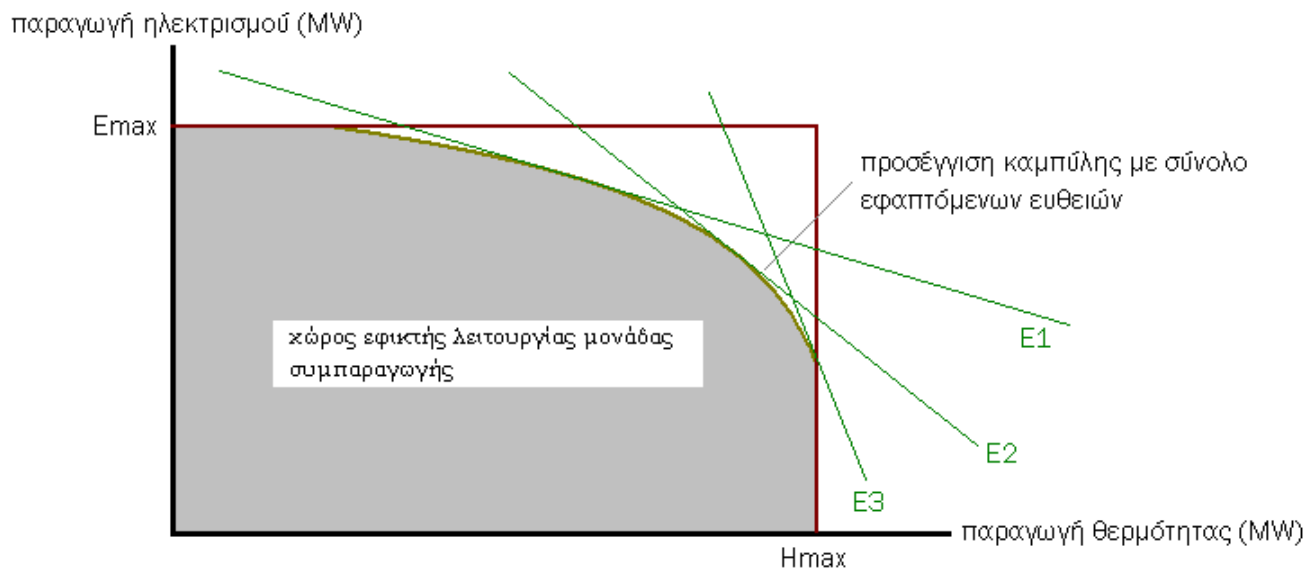
$$\forall (EXPO, P) : y(L_{EXPO}, P) \geq Q_{(EXPO, P)} \quad (6.6)$$

6.3 Διεργασίες μετασχηματισμού ενεργειακών φορέων

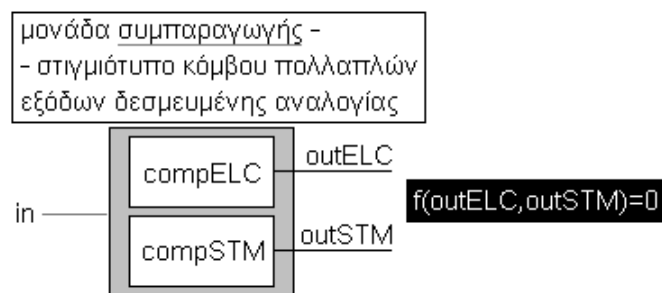
6.3.1 Μετατροπή προς ηλεκτρισμό - θερμότητα

Οι κόμβοι EHGX, EHGf της κατηγορίας αυτής διακρίνονται σε κόμβους παραγωγής αποκλειστικά ηλεκτρισμού, αποκλειστικά θερμότητας (boilers) και συμπαραγωγής².

² Η ενότητα τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρισμού προέρχεται από απλοποίηση του ηλεκτρικού υπομοντέλου του μοντέλου PRIMES, όπως αυτό αναπτύσσεται στο *e³mlab*.



Σχήμα 6.3: Εφικτή περιοχή λειτουργίας των τεχνολογιών συμπαραγωγής



Σχήμα 6.4: Στιγμιότυπο κόμβων πολλαπλών εξόδων με δεσμευμένη αναλογία

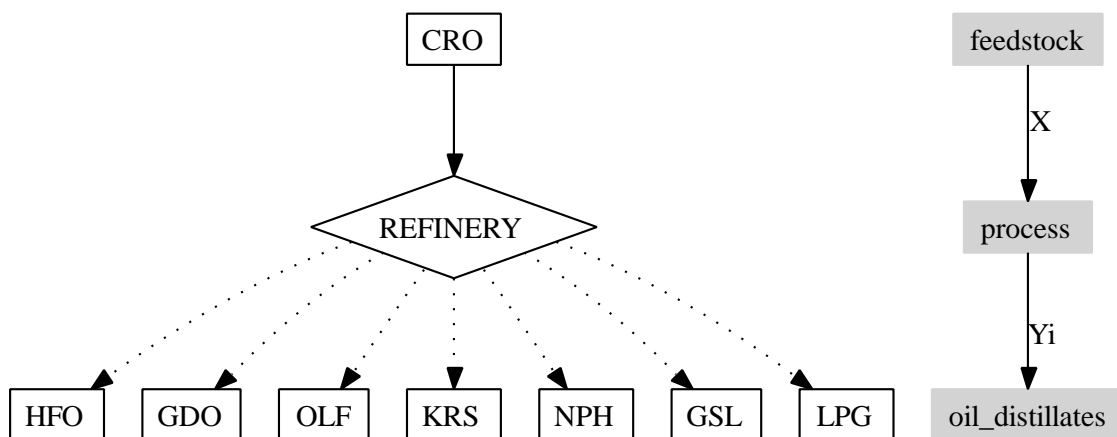
Για τις τεχνολογίες συμπαραγωγής³ ισχύουν περιορισμοί σε ότι αφορά την περιοχή εφικτής λειτουργίας (σχήμα [6.3]). Η περιοχή εφικτής λειτουργίας είναι κυρτή. Για να εισαχθεί η καμπύλη περιορισμού λειτουργίας στο γραμμικό μοντέλο, θεωρείται ότι είναι κατά τμήματα γραμμική. Υποθέτουμε ότι όλοι οι κόμβοι συμπαραγωγής χαρακτηρίζονται από τον ίδιο συντελεστή συνδυασμένης απόδοσης:

$$n_{CHP} = \frac{Q_H^{out} + W_E^{out}}{Q^{in}}$$

οπότε εκτός από τον περιορισμό ηλεκτρικής απόδοσης ισχύει και περιορισμός συνδυασμένης απόδοσης για της μονάδες αυτές.

Η διάκριση μεταξύ κεντρικών μονάδων παραγωγής που συνδέονται στο δίκτυο και μονάδων διανεμημένης παραγωγής που συνδέονται σε τοπικά δίκτυα διανομής γίνεται έμμεσα,

³Για τις μελλοντικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής και παραγωγής θερμότητας (που είναι διαθέσιμες μετά το έτος βάσης), το ηλεκτρικό υπο-μοντέλο του PRIMES συνδυάζει τα διαθέσιμα στοιχεία παραγωγής ηλεκτρισμού (compELC) με τα στοιχεία παραγωγής θερμότητας (compSTM), δημιουργώντας το σύνολο των συμβατών συνδυασμών [compELC,compSTM].



Σχήμα 6.5: Απλοποιημένη παράσταση διύλιστηρίου

μέσω της μήτρας $iNet$ ορισμού του γράφου. Οι κεντρικές μονάδες παραγωγής συνδέονται στον συγκεντρωτικό κόμβο ELG (αθροιστικός κόμβος ηλεκτρισμού δικτύου στην έξοδο των μονάδων παραγωγής), από όπου το δίκτυο μεταφοράς και διανομής προμηθεύει τον τελικό καταναλωτή, ενώ οι επιτόπιες μονάδες καταναλωμένης παραγωγής συνδέονται απευθείας στους κόμβους INELC, TEELC, REELC(6.4).

6.3.2 Μετατροπή προς άλλους ενεργειακούς φορείς

Οι τεχνολογίες μετασχηματισμού ενεργειακών φορέων πλην της ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνουν τις εξής κατηγορίες:

- Διύλιστήρια: Οι μονάδες διύλιστηρίων παριστάνονται ως ένας κόμβος με μία είσοδο (το αργό πετρέλαιο ως πρώτη ύλη) και περισσότερες από μία εξόδους (τις κλάσεις των παραγόμενων καυσίμων, που εδώ ομαδοποιούνται σε 7 κατηγορίες⁴). Για κόμβους τέτοιου τύπου (σχήμα 6.5) ισχύει:

$$x = \alpha \sum_i y_i \quad l_i x \leq y_i \leq u_i x$$

- Τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου: Αποτελούν το σύνολο $H2TEK \subset TRNO$. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σύμφωνα με τον τρόπο σύνδεσής τους στο δίκτυο του υποσυστήματος H_2 (παράγραφος 6.6): μονάδες παραγωγής μεγάλης (CEN(H2TEK)) ή μικρής κλίμακας (DCN(H2TEK))
- Τεχνολογίες παραγωγής άλλων φορέων: μεθανόλη, αιθανόλη, βιοκαύσιμα, μορφές H_2 . Το υποσύστημα προσφοράς ενέργειας περιλαμβάνει τους ενεργειακούς φορείς MTH, ETH,

⁴Σε σειρά φθίνοντος μεταβλητού κόστους ή ισοδύναμα φθίνουσας θερμοκρασίας απόσταξης τα προϊόντα πετρελαίου όπως κατηγοριοποιούνται είναι: LPG, GSL, NPH, KRS, OLF, GDO, HFO.

Πίνακας 6.1: Κατηγοριοποίηση κλάδων του δικτύου

κατηγορία κλάδου L groupID	από	προς	μεγέθη καθορίζονται από:
100	διεργασία	φορέα	-
101	φορέα	διεργασία	L
111	φορέα	διεργασία	F: iFLINK(L,F)

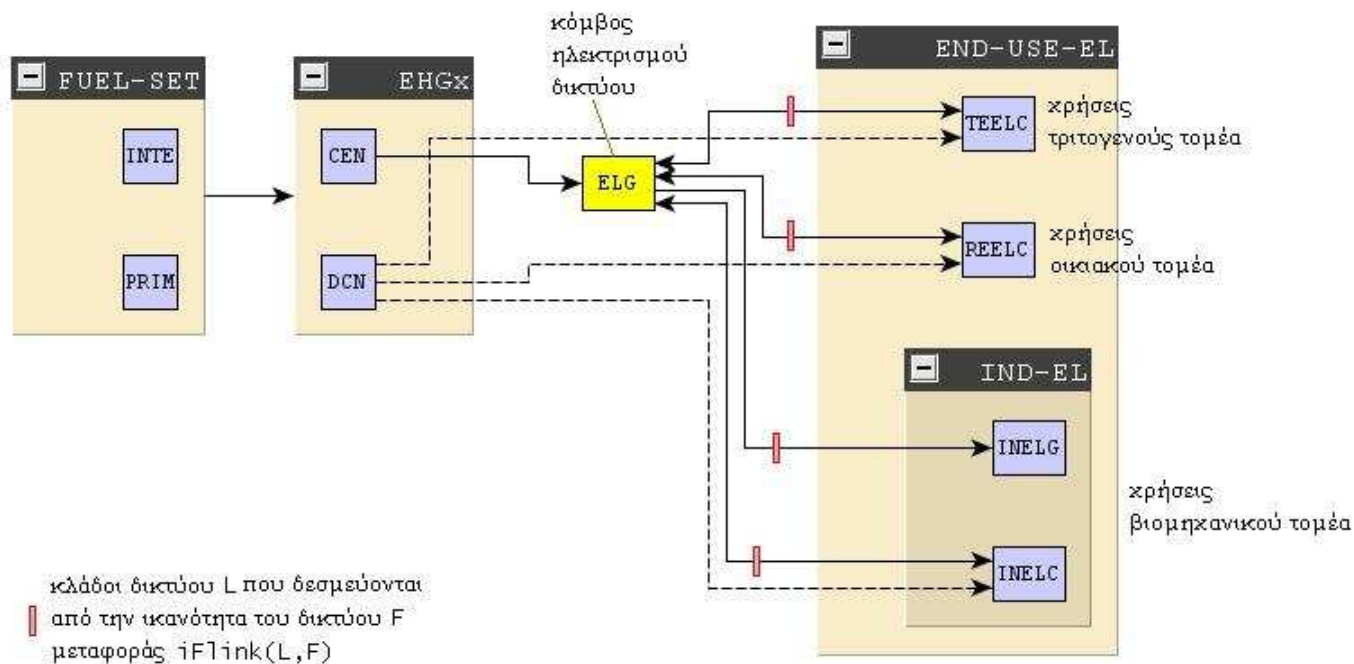
LBF, GBF \in INTE (μεθανόλη, αιθανόλη, υγρά και αέρια βιοκαύσιμα αντίστοιχα). Αποτελούν προϊόντα του ενεργειακού κύκλου της βιομάζας (για τη μεθανόλη υπάρχει επίσης η δυνατότητα να παραχθεί με ανασχηματισμό φυσικού αερίου ή άνθρακα). Στο μοντέλο που αναπτύσσεται θεωρούμε τις διαφορετικές μορφές του H_2 (συμπιεσμένο αέριο, υγρό, αέριο σε ανάμιξη με φυσικό αέριο) διακριτές ενεργειακές μορφές. Οι διεργασίες μετατροπής μεταξύ των μορφών H_2 (συμπίεση, υγροποίηση) ανήκουν επίσης στο σύνολο TRNO.

6.4 Μεταφορά και διανομή ενεργειακών φορέων

Οι κλάδοι του δικτύου που αναπαριστά το ενεργειακό σύστημα ανήκουν σε τρεις κατηγορίες (πίνακας 6.1):

1. Κλάδοι που κατευθύνονται από κόμβους τύπου A σε κόμβους τύπου B (π.χ. κλάδος από κεντρική μονάδα παραγωγής ηλεκτρισμού στον κόμβο του ηλεκτρισμού δικτύου). Οι κλάδοι αυτοί είναι εικονικοί, οπότε τα αντίστοιχα συνδεδεμένα δεδομένα (συντελεστής απωλειών και μεταβλητό κόστος) είναι μηδενικά.
2. Κλάδοι που κατευθύνονται από κόμβους τύπου B σε κόμβους τύπου A και δεν αποτελούν τμήματα δικτύου (π.χ. κλάδος τροφοδοσίας βιομηχανικής τεχνολογίας χρήσης από άνθρακα). Οι απώλειες και το μεταβλητό κόστος αποτελούν χαρακτηριστικά μεγέθη του συγκεκριμένου κλάδου.
3. Κλάδοι που κατευθύνονται από κόμβους τύπου B σε κόμβους τύπου A και αποτελούν τμήματα δικτύου (π.χ. κλάδος τροφοδοσίας οικιακού καταναλωτή με ηλεκτρισμό δικτύου). Οι απώλειες και το μεταβλητό κόστος καθορίζονται από το δίκτυο F στο οποίο είναι προσαρτημένος ο κλάδος (παράμετρος iFLINK(L,F)).

Το δίκτυο μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού απεικονίζεται στο μοντέλο σύμφωνα με το σχήμα 6.6. Αντίστοιχα (με υποδιαίρεση σε τμήμα μεταφοράς μεγάλης κλίμακας και διανομής μικρής κλίμακας) έχει αναπαρασταθεί το δίκτυο φυσικού αερίου.



Σχήμα 6.6: Απεικόνιση δικτύου ηλεκτρισμού

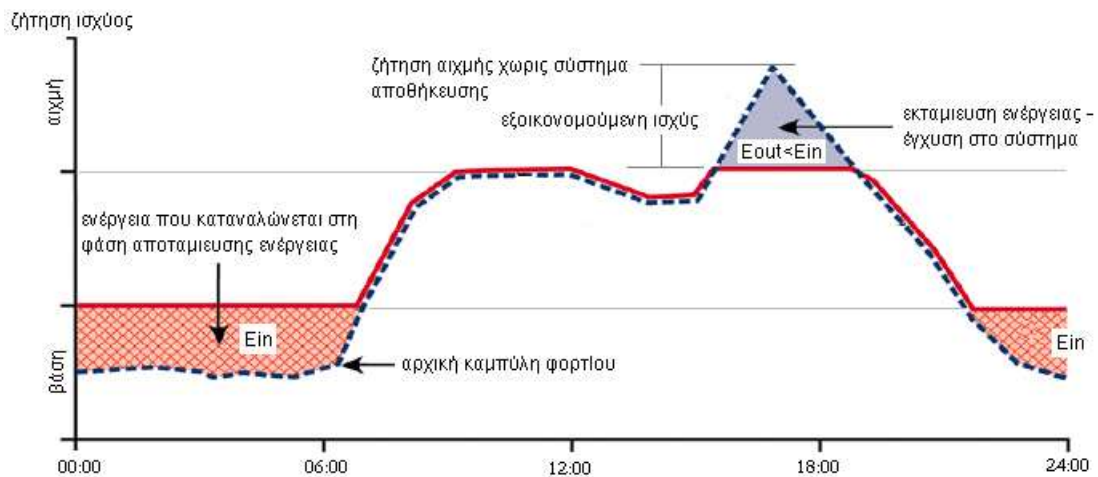
6.5 Αποθήκευση ενεργειακών φορέων

Η αποθήκευση δίνει τη δυνατότητα στον τομέα παραγωγής του συστήματος να ικανοποιεί τη χρονικά μεταβλητή ζήτηση ενεργειακών φορέων που δημιουργείται από τον τομέα κατανάλωσης. Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας αποταμιεύουν ενέργεια στα χρονικά κλάσματα χαμηλής ζήτησης για κάθε ενεργειακό φορέα, και αντίστροφα εγχύουν τα διαθέσιμα αποθέματα στο σύστημα στα χρονικά κλάσματα αυξημένης ζήτησης.

Ειδικά στον τομέα ηλεκτροπαραγωγής, η πιο διαδεδομένη μέθοδος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας⁵ είναι η άντληση υδάτινων μαζών χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια τις ώρες χαμηλής ζήτησης (λόγου χάρη από πλεονάζουσα παραγωγή των μονάδων βάσης), και παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια τις ώρες αιχμής. Ο ολικός κύκλος οδηγεί σε απώλεια ενέργειας (εξίσωση ;;), αλλά η απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς για την ικανοποίηση της ζήτησης μειώνεται.

Για τη μοντελοποίηση της αποθήκευσης ενεργειακών φορέων στο σύστημα χρησιμοποιούμε τις μεταβλητές (4.5.1) $xIn(N, S_{in}(N))$ και $xOut(N, S_{out}(N))$. Οι εξισώσεις που περιγράφουν

⁵Άλλες μέθοδοι που αναφέρονται για μικρής κλίμακας αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενδιάμεσης μετατροπής σε άλλες μορφές είναι (;;): ο κύκλος συμπίεσης και αποσυμπίεσης αέρα και οι στρεφόμενοι τροχοί υψηλών ταχυτήτων (flywheels) (ενδιάμεση μετατροπή σε δυναμική ενέργεια), κυψέλες οξειδοαναγωγής ή μπαταρίες (ενδιάμεση μετατροπή σε χημική ενέργεια). Η χρησιμοποίηση ηλεκτρικής ενέργειας για παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης κατά τη διάρκεια των κλασμάτων χαμηλής ζήτησης μπορεί επίσης να θεωρηθεί μέσο αποθήκευσης ηλεκτρισμού. Στο συγκεκριμένο μοντέλο ωστόσο θεωρείται τμήμα της ενεργειακής αλυσίδας του υδρογόνου.



Σχήμα 6.7: Εξομάλυνση των αιχμών ενεργειακής ζήτησης στο σύστημα μέσω των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας. Η ημερήσια διακύμανση που απεικονίζεται στο γράφημα αντιστοιχεί σε μια τυπική καμπύλη ηλεκτρικού φορτίου. Για ενεργειακούς φορείς όπως το φυσικό αέριο, όπου η ημερήσια διακύμανση εξυπηρετείται από την ποσότητα που ρέει στους αγωγούς, τα συστήματα αποθήκευσης είναι σχεδιασμένα για να ικανοποιούν εποχικές διακυμάνσεις.

φουν την αποθήκευση στο ενεργειακό σύστημα είναι⁶:

$$\sum_{S:Sin(S)} xIn(S) = r \sum_{S:Sin(S)} xIn(S) \quad r > 1, \forall P \quad (6.7)$$

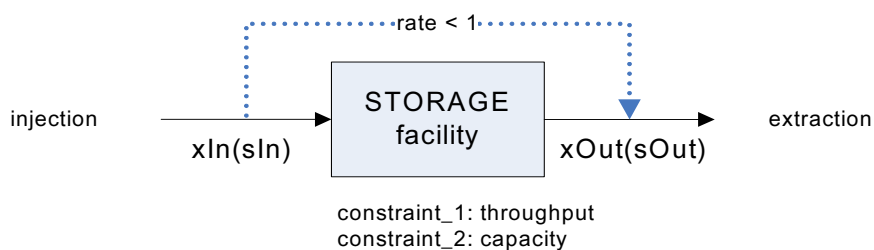
$$\sum_{S:Sin(S)} xIn(S, P) \leq C^{volume}(P) \quad (6.8)$$

$$\sum_{S:Sin(S)} xIn(S, P) \leq C^{throughput}(P) \frac{\delta(S)}{8760} \quad (6.9)$$

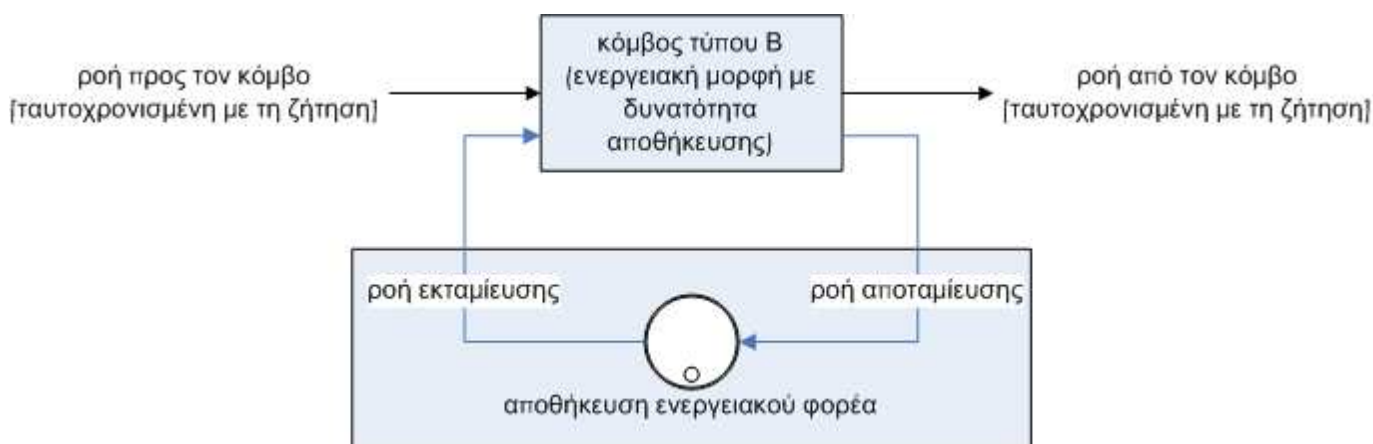
$$\sum_{S:Sout(S)} xOut(S, P) \leq C^{throughput}(P) \frac{\delta(S)}{8760} \quad (6.10)$$

Οι εξισώσεις αυτές ισχύουν για τον κόμβο που αντιστοιχεί στον ηλεκτρισμό δικτύου (ELG) (όπου τα κλάσματα Sin , $Sout$ είναι προκαθορισμένα), και για ένα υποσύνολο $STOR \subset INTEUFPRI$, όπου η επιλογή των χρονικών κλασμάτων αποταμίευσης - εκταμίευσης είναι απόφαση του μοντέλου. Για τους ενεργειακούς κόμβους με δυνατότητα αποθήκευσης μπορεί να γίνει επένδυση για επέκταση της δυναμικότητάς τους [σε όρους χωρητικότητας της εγκατάστασης αποθήκευσης C^{volume} ή σε όρους ροής προς και από την εγκατάσταση αποθήκευσης $C^{throughput}$]. Οι αντίστοιχοι όροι επενδυτικού κόστους για επέκταση της δυναμικότητας καθώς και τα κόστη λειτουργίας που αντιστοιχούν στις υποδομές αποθήκευσης συμπεριλαμβάνονται στην αντικει-

⁶Έχει γίνει η παραδοχή ότι οι δυνατοί κύκλοι αποθήκευσης στο ενεργειακό σύστημα έχουν μέγιστη περίοδο το ένα έτος. Ωστόσο, για ενεργειακούς φορείς όπως ο άνθρακας ή το πετρέλαιο, τα συστήματα αποθήκευσης και η δημιουργία αποθεμάτων μπορεί να έχουν περίοδο αποταμίευσης-εκταμίευσης μεγαλύτερη από ένα έτος.



Σχήμα 6.8: Ισορροπία μεταξύ αποταμιευόμενων και εκταμιευόμενων ποσοτήτων ενεργειακών φορέων.



Σχήμα 6.9: Εξίσωση ισορροπίας στους κόμβους ενεργειακών φορέων με δυνατότητα αποθήκευσης.

μενική συνάρτηση (οι κόμβοι *STOR* αποθηκεύσιμων ενεργειακών φορέων ανήκουν στο σύνολο *A* [εξίσωση 4.16]), όπως και το μεταβλητό κόστος αποθήκευσης ανά μονάδα αποταμιευόμενης ενέργειας.

Για τους κόμβους *STOR* η εξίσωση ισορροπίας τροποποιείται (σχήμα 6.6):

$$\forall (N \in \text{STOR}(N), S) : \sum_{L: i\text{Net}(L,N)=+1} x(L, S) + \underbrace{x\text{Out}(N, S)}_{S\text{out}(S)} = \sum_{L: i\text{Net}(L,N)=-1} x(L, S) + \underbrace{x\text{In}(N, S)}_{S\text{in}(S)} \quad (6.11)$$

Σημείωση 12. Για ενεργειακούς φορείς όπως τα υγρά (πετρελαιοειδή) και στερεά καύσιμα η περιοδικότητα των κύκλων αποθήκευσης είναι προκαθορισμένη. Για τη μοντελοποίηση της αποθήκευσης του υδρογόνου σε διάφορες μορφές (συμπιεσμένο αέριο, μεταλλικό υδρίδιο, υγρό) οι κρίσιμοι παράγοντες που προσδιορίζουν την επιλογή αποθηκευτικού μέσου είναι:

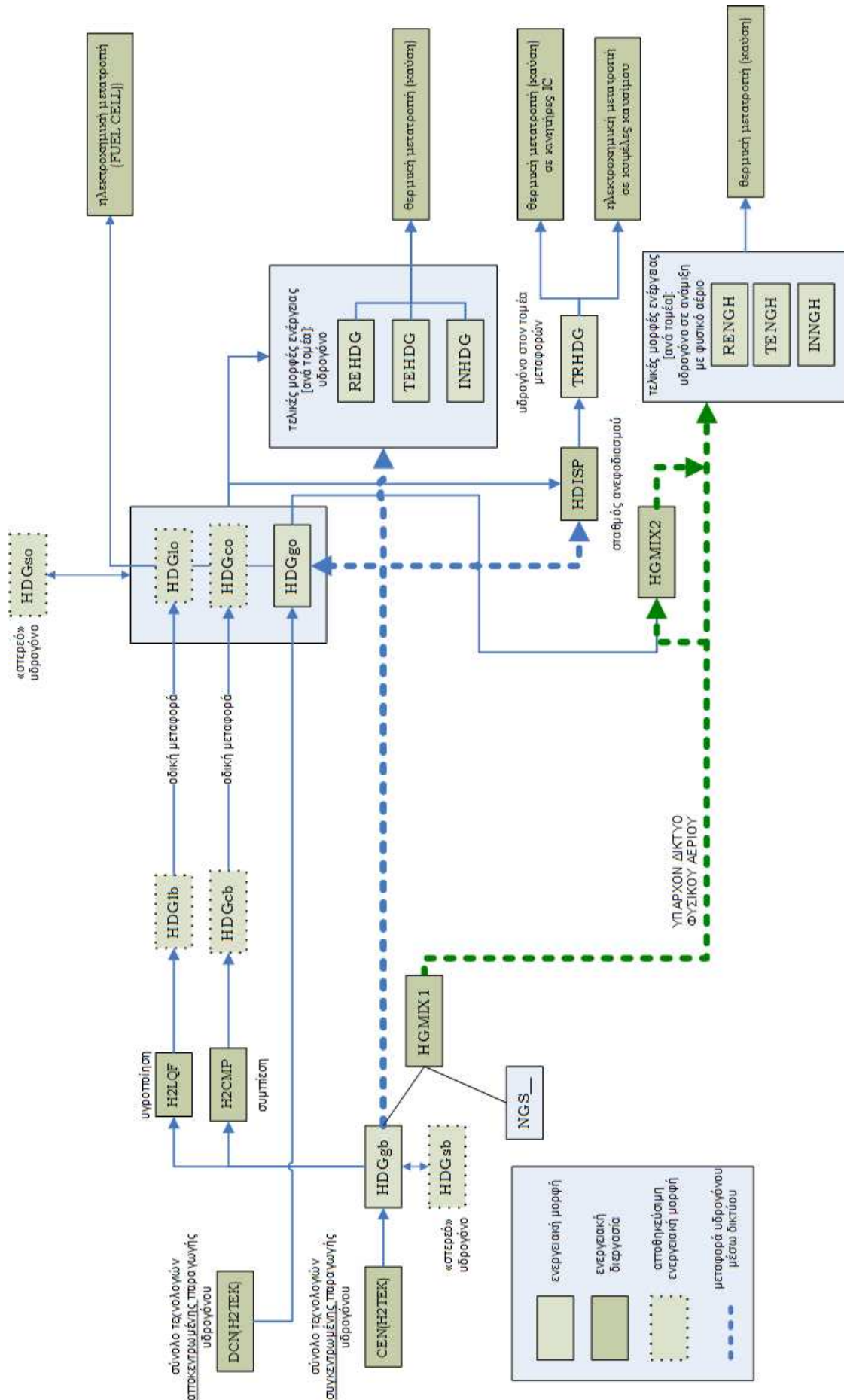
- Διάρκεια χρονικού διαστήματος αποθήκευσης Δt : Δεν μπορεί να προσδιοριστεί στο μοντέλο με βάση την κατάτμηση του έτους αναφοράς σε χρονικά κλάσματα.

- Ποσότητα προς αποθήκευση Q : Με βάση την παραδοχή συνεχών ποσοτήτων στο μοντέλο, αυτή η παράμετρος δεν μπορεί να ληφθεί υπόψη.
- Τοπολογία του συστήματος παραγωγής και ζήτησης υδρογόνου Δr .

Οι μελέτες για τα οικονομικά δεδομένα συστημάτων αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου ([14]) θεωρούν διάφορες περιπτώσεις συνδυασμών $(\Delta\tau, Q, \Delta r)$ (που προσδιορίζονται εξωγενώς σε πιο λεπτομερειακή κλίμακα ανάλυσης από τους σκοπούς του συγκεκριμένου μοντέλου) για να εξάγουν, σε συνδυασμό με το κόστος παραγωγής, την τελική τιμή του H_2 στον καταναλωτή. Για τη μοντελοποίηση της αποθήκευσης του υδρογόνου χωρίς γνώση των παραμέτρων $(\Delta\tau, Q, \Delta r)$, έχουμε θεωρήσει ένα ισοδύναμο προσεγγιστικό μεταβλητό κόστος ανά μονάδα αποθηκευμένου προϊόντος.

6.6 Συγκεντρωτικά: Αλυσίδα τεχνολογιών υδρογόνου όπως απεικονίζεται στο μοντέλο

Το σχήμα 6.6 απεικονίζει το υποσύστημα H_2 . Οι διάφορες μορφές του H_2 (ασυμπίεστο αέριο, συμπιεσμένο αέριο, υγρό, στερεό [σε μικρή ή μεγάλη κλίμακα]) θεωρούνται διακριτοί ενεργειακοί φορείς. Διακρίνονται σε αποθηκεύσιμους και μη αποθηκεύσιμους (για παράδειγμα, το H_2 στην έξοδο της μονάδας παραγωγής HDGgb ή HDGgo) δεν μπορεί να αποθηκευθεί, ενώ αν διέλθει από το μετασχηματισμό συμπίεσης αποτελεί πλέον την αποθηκεύσιμη μορφή HDGcb ή HDGco.



Σχήμα 6.10: Ενεργειακό υποσύστημα H_2 όπως απεικονίστηκε στο μοντέλο με έμφαση στους δυνατούς συνδυασμούς μεταφοράς και αποθήκευσης

Κεφάλαιο 7

Εξέταση εναλλακτικών σεναρίων

Το μοντέλο μακροχρόνιου σχεδιασμού μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πραγματοποίηση ανάλυσης κόστους - οφέλους ενεργειακών πολιτικών που σχετίζονται με πολιτικές μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

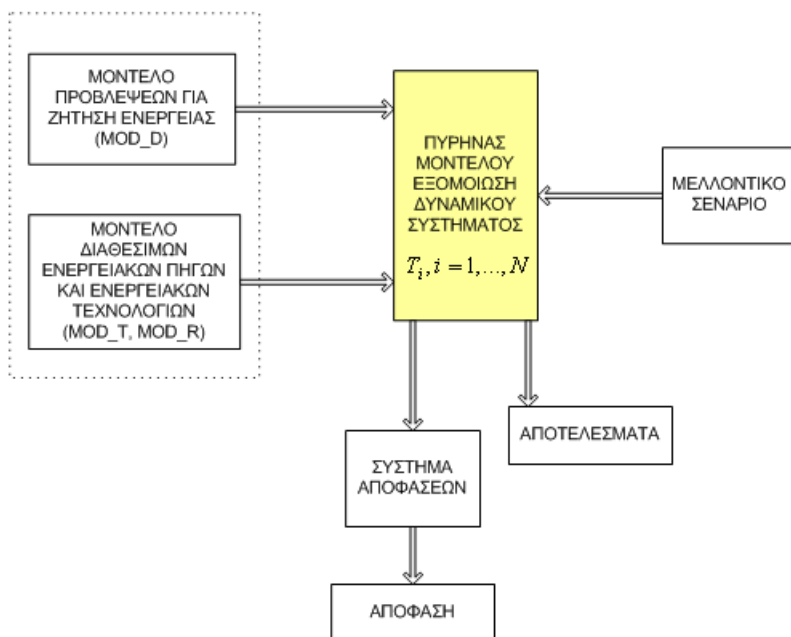
Για κάθε σενάριο που εξετάζεται (σύνολο SCN σύμφωνα με το συμβολισμό του μοντέλου) πραγματοποιείται μια σειρά επιλύσεων με επιλογές OPT(SCN).

Σημείωση 13. Οι συνολικές εκπομπές αερίων E του συστήματος υπολογίζονται από το συντελεστή $\text{emf}(L, E)$ με πεδίο ορισμού το σύνολο των κλάδων L του συστήματος και τις κατηγορίες E των αερίων εκπομπών¹. Σε κάθε κλάδο που κατευθύνεται από ενεργειακή μορφή (κόμβος τύπου B) προς διεργασία (κόμβος τύπου A) μη-μηδενική τιμή του συντελεστή αντιστοιχεί στην ποσότητα αερίων που εκπέπονται κατά τη διεργασία που απεικονίζεται στον κόμβο άφιξης. Ειδικά για το ενεργειακό υποσύστημα της βιομάζας, σε κλάδους που κατευθύνονται προς την πρωτοβάθμια μετατροπή της βιομάζας (π.χ. προς παραγωγή μεθανόλης) αποδίδεται αρνητικός συντελεστής (αν και οι πραγματικές εκπομπές είναι μηδενικές), όταν ο παραγόμενος φορέας (π.χ. μεθανόλη) δημιουργεί εκπομπές κατά την περαιτέρω μετατροπή του (σχήμα 7.3).

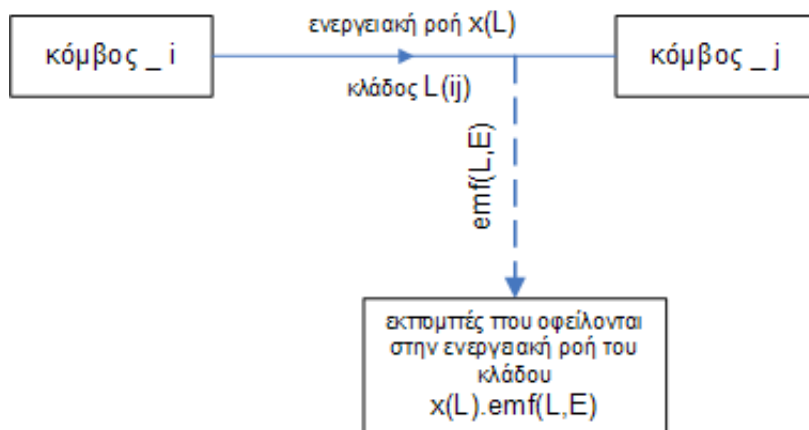
7.1 Σενάριο αναφοράς - baseline

Το σενάριο αναφοράς SCN_0 είναι η πρώτη αριθμητική επίλυση υπολογισμού της ισορροπίας του συστήματος που πραγματοποιείται. Χρησιμεύει ως βάση σύγκρισης για τα αποτελέσματα των επιλύσεων σύμφωνα με τα σενάρια $SCN_i, i = 1 \dots n$. Δε λαμβάνονται υπ' όψιν πρόσθετοι περιορισμοί. Για τη διαμόρφωση του σεναρίου αναφοράς έχουν γίνει απλουστευτικές παραδοχές (π.χ. σχετικά με τα διαθέσιμα αποθέματα ορυκτών πόρων, τις τιμές των εισαγόμενων πρώτων υλών ή τους περιορισμούς στις εισαγωγές και εξαγωγές ενεργειακών φορέων). Επίσης θεωρούμε δεδομένη τη διαθεσιμότητα των τεχνολογιών μετατροπής και χρησιμοποίησης ενέργειας, καθώς και την αναμενόμενη τεχνολογική πρόοδο.

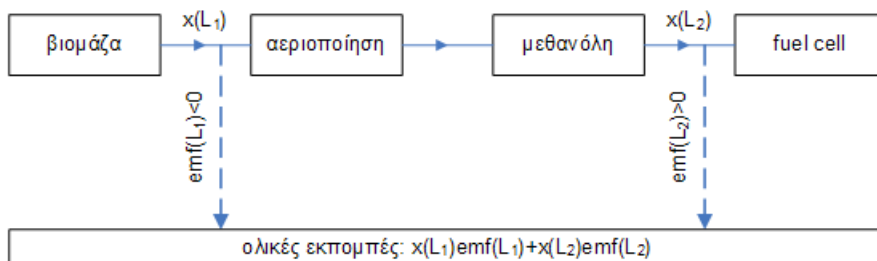
¹Το μοντέλο εξετάζει μόνο τις εκπομπές CO_2 .



Σχήμα 7.1: Διερεύνηση σεναρίων σε ένα ενεργειακό μοντέλο



Σχήμα 7.2: Υπολογισμός εκπομπών αερίων με βάση τις ενεργειακές ροές κατά μήκος των κλάδων.



Σχήμα 7.3: Ειδική περίπτωση αρνητικού συντελεστή εκπομπών στο ενεργειακό υποσύστημα της βιομάζας.

7.2 Σενάριο αθροιστικού περιορισμού εκπομπών για τη συνολική διάρκεια του ορίζοντα

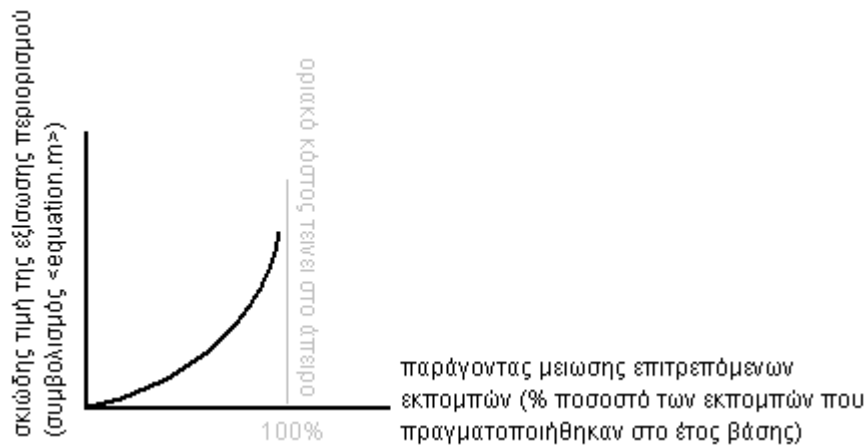
Το σενάριο ολικού περιορισμού θέτει το ανώτατο όριο εκπομπών για το συνολικό εύρος του ορίζοντα σχεδιασμού ως επί τοις εκατό ποσοστό των υποθετικών εκπομπών αν αυτές παρέμεναν σταθερές στα επίπεδα του έτους βάσης. Οι εκπομπές υπολογίζονται στο ολικό ενεργειακό σύστημα κάθε χώρας (χωρίς κατανομή της απαιτούμενης μείωσης ανά τομέα [ηλεκτροπαραγωγή, βιομηχανία, μεταφορές] όπως προβλέπεται από τους μηχανισμούς του πρωτοκόλλου του Κιότο). Εξετάζονται τρεις επιλογές του σεναρίου, με τάση κλιμάκωσης προς την κατεύθυνση της βιωσιμότητας (sustainability) του ενεργειακού συστήματος.

Η εξίσωση περιορισμού λαμβάνει τη μορφή:

$$\forall(CY, E) : \sum_P \sum_L x(L, P) emf(L, E) \leq uLim \sum_P \sum_L x(L, P^0) emf(L, E) \quad (7.1)$$

όπου $0 < uLim < 1$. Όταν $uLim \rightarrow 0$, τότε η δυαδική μεταβλητή του περιορισμού 7.1 τείνει στο ∞ (σχήμα 7.4).

Η δυαδική τιμή του περιορισμού 7.1 αντιστοιχεί στο επιπλέον κόστος του συστήματος για μοναδιαία επί τοις εκατό ελάττωση των επιτρεπόμενων εκπομπών (αλλιώς, αντιστοιχεί στο *κόστος αποφυγής της τελευταίας* επί τοις εκατό μονάδας εκπομπών). Η γραφική παράσταση του οριακού κόστους αποφυγής εκπομπών σε συνάρτηση των εκπομπών το σύστημα εμποδίζεται να πραγματοποιήσει, έχει τη μορφή:



Σχήμα 7.4: Καμπύλη οριακού κόστους αποφυγής εκπομπών

Κεφάλαιο 8

Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται επιλεγμένα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης του μοντέλου μακροχρόνιου σχεδιασμού για τη Γερμανία¹. Τα αποτελέσματα του σεναρίου αναφοράς **BASELINE** (όπου οι περιορισμοί περιβαλλοντικής πολιτικής είναι ανενεργοί) συγκρίνονται με μία σειρά επιλύσεων **SCENARIO1a-c** για το σενάριο αθροιστικών περιορισμών εκπομπών (με κλιμακούμενο συντελεστή μείωσης εκπομπών $uLim$).

Οι πίνακες 8.1 και 8.2 δείχνουν τα αποτελέσματα της αριθμητικής επίλυσης του μοντέλου για το σενάριο αναφοράς και το σενάριο ολικού περιορισμού των εκπομπών κατά 40% ($uLim=0.6$) στη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα αναφοράς. Από τη σύγκριση παρατηρούμε ότι στην περίπτωση εφαρμογής του περιορισμού των αέριων εκπομπών αφ' ενός πραγματοποιούνται επενδύσεις σε τεχνολογίες με μεγαλύτερη απόδοση (οπότε η ζήτηση τελικής ενέργειας μειώνεται και ισοδύναμα αυξάνεται η ολική απόδοση του συστήματος) (σχήμα 8.3) και αφ' ετέρου μεταβάλλεται η κατανομή σε μορφές τελικής ενέργειας (παρατηρείται αύξηση της συμμετοχής του φυσικού αερίου και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας). Στο σχήμα 8.4 απεικονίζεται η κατανομή τελικής ενέργειας στις διάφορες μορφές ανά εκδοχή του σεναρίου αναφοράς. Παρατηρούμε ενδεικτικά ότι όσο αυξάνει το ποσοστό ελάττωσης των εκπομπών τόσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό συμμετοχής του H_2 και των λοιπών εναλλακτικών καυσίμων, και αντίστοιχα τόσο νωρίτερα μηδενίζεται το ποσοστό των -ρυπογόνων- στερεών καυσίμων. Αντίστοιχες μεταβολές παρατηρούνται στο υποσύστημα προσφοράς ενέργειας, όπου παρατηρείται (1) σταδιακή διεύδυση στις τεχνολογίες μετατροπής ενεργειακών φορέων (π.χ. ηλεκτροπαραγωγή) τεχνολογιών με υψηλότερο βαθμό απόδοσης ή συμβατικών τεχνολογιών με δυνατότητα κατακράτησης των αέριων ρύπων και (2) παράλληλα σταδιακή υποκατάσταση των ρυπογόνων πρωτογενών φορέων από μη-ρυπογόνους.

Στο γράφημα 8.5 παρατηρούμε την κλιμακούμενη με το χρόνο ανά εκδοχή του σεναρίου μείωση των εκπομπών, όπως προκύπτει από την ισορροπία του συστήματος, ενώ το γράφημα 8.6 απεικονίζει την καμπύλη οριακού κόστους μείωσης των εκπομπών CO_2 . Το οριακό κόστος ανά tCO_2 που ταυτίζεται με τη δυαδική τιμή της αντίστοιχης εξίσωσης περιορισμού εκπομπών φαίνεται στον πίνακα 8.1.

¹Τα αποτελέσματα του μοντέλου PRIMES (με ορίζοντα ως το 2030) είναι προσβάσιμα στο [;].

περιορισμός εκπομπών CO_2 κατά:	οριακή τιμή αποφυγής εκπομπών (€/(tCO_2))
30%	8
40%	10
55%	23

Πίνακας 8.1: Οριακό κόστος αποφυγής εκπομπών CO_2

8.1 Υποσύστημα H_2

Στο σενάριο αναφοράς το H_2 εμφανίζεται αποκλειστικά ως καύσιμο στον τομέα των μεταφορών το 2025, με ποσοστό $< 1\%$ της τελικής κατανάλωσης που αυξάνεται ως το 1.5% το 2050. Το H_2 προέρχεται από κεντρική παραγωγή μέσω ανασχηματισμού φυσικού αερίου.

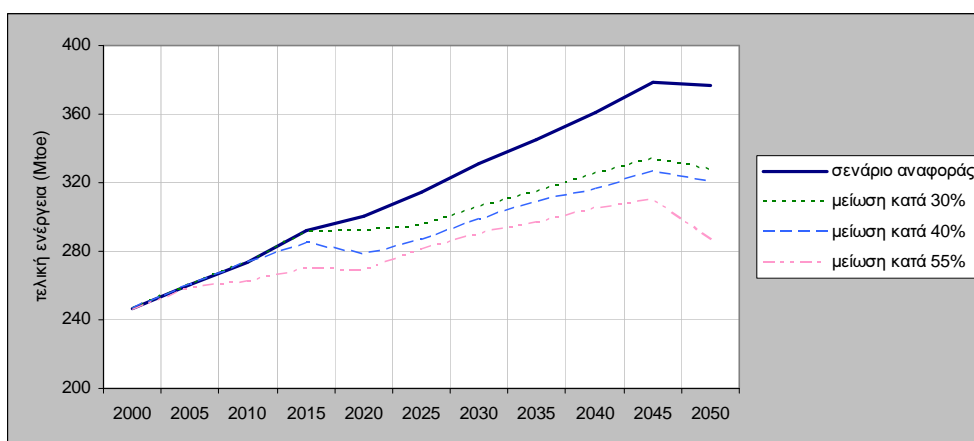
Η επιβολή του περιορισμού εκπομπών CO_2 αυξάνει σημαντικά τη συμμετοχή του H_2 στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών και μετατοπίζει χρονικά την εισαγωγή του στο σύστημα. Στο γράφημα 8.7 φαίνεται η συνολική παραγωγή H_2 στον ορίζοντα του μοντέλου και στο 8.8 το ποσοστό συμμετοχής του H_2 στη ζητούμενη τελική ενέργεια ανά τομέα (χωρίς να συμπεριλαμβάνεται η έμμεση -μέσω παραγωγής ηλεκτρισμού- κατανάλωση, η οποία ωστόσο παραμένει σε όλη τη διάρκεια του ορίζοντα σε πολύ χαμηλά επίπεδα, λόγω του υψηλού κόστους των εφαρμογών κυψελών καυσίμου για την ηλεκτροπαραγωγή). Το H_2 προέρχεται σχεδόν αποκλειστικά από κεντρική παραγωγή και φτάνει στην τελική κατανάλωση μέσω δικτύου (είτε ως καθαρό H_2 είτε σε ανάμιξη με φυσικό αέριο μέσω του δικτύου φυσικού αερίου). Παρατηρούμε (σχήμα 8.8) ότι το H_2 από τη χρονική στιγμή της εμφάνισής του στον τομέα μεταφορών παρουσιάζει σταθερά άνοδο (καταλήγοντας να κατέχει σημαντικό μερίδιο της ολικής ζήτησης), ενώ στους υπόλοιπους τομείς ζήτησης (βιομηχανικό, οικιακό και τριτογενή) η συμμετοχή του H_2 στην κάλυψη της αντίστοιχης ζητούμενης τελικής ενέργειας παρουσιάζει απότομη άνοδο και στη συνέχεια βαθμιαία πτώση, καθώς το μοντέλο επιλέγει να επιτύχει τη ζητούμενη μείωση των εκπομπών αποκλειστικά μέσω του τομέα των μεταφορών.

Γερμανία: Σενάριο Αναφοράς		2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
	[Mtoe]											
πρωτογενής εγχώρια παραγωγή		122.5	149.1	132.3	104.6	42.7	19.6	25.1	29.1	34.3	33.5	36.2
στερεά καύσιμα		60.0	66.3	60.3	45.8	22.0	5.3	9.3	10.4	11.9	10.8	9.2
πετρέλαιο			4.9	1.1								
φυσικό αέριο		15.8	25.9	23.3	20.5							
πυρηνική ενέργεια		43.8	44.0	37.9	28.0	8.7						
ανανεώσιμες μορφές ενέργειας		2.9	8.0	9.7	10.4	12.0	14.3	15.8	18.8	22.4	22.7	26.9
	υδροηλεκτρική	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6
	βιομάζα / καύσιμα απορρίμματα	4.6	5.6	5.2	5.2	5.5	6.2	5.4	5.1	6.1	4.8	7.0
	αιολική	0.8	1.0	1.3	1.7	2.1	2.7	3.5	4.4	5.7	7.2	9.2
	ηλιακή, λοιπές ανανεώσιμες	0.1	0.2	0.6	1.3	2.0	3.0	4.5	6.8	8.1	8.1	8.1
εισαγωγές - εξαγωγές		203.2	167.4	193.5	229.7	285.2	314.7	327.1	338.1	351.2	366.1	364.6
στερεά καύσιμα		20.0	27.0	35.9	46.7	59.8	64.8	57.5	56.0	53.4	55.9	53.2
πετρέλαιο		118.6	72.4	81.7	91.1	98.0	104.8	117.1	125.1	134.9	144.3	144.2
	αργό πετρέλαιο	110.0	90.6	99.5	108.6	115.1	121.6	133.5	141.3	151.2	159.7	157.8
	προϊόντα πετρελαίου	8.6	-18.2	-17.8	-17.5	-17.1	-16.8	-16.4	-16.1	-16.3	-15.5	-13.6
φυσικό αέριο		68.0	71.4	79.1	95.1	130.4	147.8	155.2	159.5	165.3	168.2	169.3
ηλεκτρισμός		-3.4	-3.4	-3.3	-3.1	-2.9	-2.8	-2.7	-2.5	-2.4	-2.3	-2.2
ολική εγχώρια κατανάλωση		325.7	316.4	325.7	334.4	327.9	334.3	352.2	367.3	385.5	399.6	400.7
στερεά καύσιμα		80.0	93.3	96.2	92.5	81.8	70.2	66.8	66.4	65.3	66.7	62.4
πετρέλαιο		118.6	77.3	82.8	91.1	98.0	104.8	117.1	125.1	134.9	144.3	144.2
φυσικό αέριο		83.8	97.2	102.4	115.5	130.4	147.8	155.2	159.5	165.3	168.2	169.3
πυρηνική ενέργεια		43.8	44.0	37.9	28.0	8.7						
ηλεκτρισμός		-3.4	-3.4	-3.3	-3.1	-2.9	-2.8	-2.7	-2.5	-2.4	-2.3	-2.2
ανανεώσιμες μορφές ενέργειας		2.9	8.0	9.7	10.4	12.0	14.3	15.8	18.8	22.4	22.7	26.9
ως % ποσοστό της ολικής εγχώριας κατανάλωσης												
στερεά καύσιμα		24.6	29.5	29.5	27.6	24.9	21.0	19.0	18.1	16.9	16.7	15.6
πετρέλαιο		36.4	24.4	25.4	27.2	29.9	31.3	33.2	34.1	35.0	36.1	36.0
φυσικό αέριο		25.7	30.7	31.4	34.6	39.8	44.2	44.1	43.4	42.9	42.1	42.3
πυρηνική ενέργεια		13.4	13.9	11.6	8.4	2.7						
ηλεκτρισμός		-1.0	-1.1	-1.0	-0.9	-0.9	-0.8	-0.8	-0.7	-0.6	-0.6	-0.5
ανανεώσιμες μορφές ενέργειας		0.9	2.5	3.0	3.1	3.7	4.3	4.5	5.1	5.8	5.7	6.7
% ποσοστό εισαγωγών στην ολική εγχώρια κατανάλωση		0.62	0.53	0.59	0.69	0.87	0.94	0.93	0.92	0.91	0.92	0.91
παραγωγή ηλεκτρισμού [TWh/e]		449.2	465.9	463.2	485.0	506.9	542.7	580.9	609.6	644.2	668.8	668.6
από μονάδες θερμικής παραγωγής		247.0	259.0	275.4	330.8	421.5	483.6	512.6	529.8	552.1	556.6	536.4
από μονάδες μη-θερμικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας		32.6	36.4	40.7	45.7	51.6	59.0	68.3	79.8	92.0	112.3	132.2
από μονάδες πυρηνικής ενέργειας		169.6	170.6	147.1	108.5	33.8						
καύσιμα στην ηλεκτροπαραγωγή από θερμικές μονάδες		64.3	68.9	71.1	73.6	76.9	77.2	77.1	78.2	82.0	79.8	80.1
στερεά καύσιμα		41.6	50.0	51.7	40.2	28.4	12.0	1.9				0.1
πετρέλαιο (προϊόντα)		4.2										
φυσικό αέριο		15.9	16.2	16.9	30.6	47.5	65.1	75.0	78.0	81.7	79.5	79.8
βιομάζα / καύσιμα απορρίμματα		2.7	2.7	2.5	2.8	0.9						
άλλα καύσιμα			0.0		0.0	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2
είσοδος σε άλλους ενεργειακούς μετασχηματισμούς		110.2	100.3	106.4	113.8	124.7	135.3	147.2	156.3	166.9	177.1	175.7
διύλιση		110.0	95.5	100.6	108.6	115.1	121.6	133.5	141.3	151.2	159.7	157.8
παραγωγή θερμότητας χαμηλής ενθαλπίας		0.0	0.1	0.1	0.5	0.2	2.3	9.8	10.7	12.1	10.8	9.2
άλλες διεργασίες (παραγωγή υδρογόνου - βιοκαυσίμων - μεθανόλης - αιθανόλης)		0.2	4.8	5.9	5.2	9.6	13.7	13.6	15.1	15.7	17.4	17.9
τελική κατανάλωση ανά τομέα		246.7	260.8	273.3	292.0	300.7	314.7	331.5	345.3	360.8	378.3	377.0
	βιομηχανία	82.9	85.5	88.5	92.9	94.7	98.3	100.2	102.4	104.1	107.4	106.4
	οικιακός τομέας	63.9	65.9	64.2	66.2	66.0	68.7	70.8	73.1	75.6	78.4	78.0
	τριτογενής τομέας	33.8	36.0	36.7	38.8	38.9	39.6	41.9	43.6	45.7	47.9	48.0
	μεταφορές	66.1	73.4	83.9	94.0	101.1	108.1	118.5	126.2	135.4	144.7	144.7
τελική κατανάλωση ανά καύσιμο												
στερεά καύσιμα		38.4	43.2	44.5	51.9	53.1	55.4	54.9	54.2	50.8	53.1	50.3
προϊόντα πετρελαίου		86.4	75.2	80.5	88.7	95.5	102.1	114.2	122.0	131.6	140.7	140.7
φυσικό αέριο		72.6	85.3	89.4	88.8	86.8	86.7	84.2	85.2	87.3	92.2	93.0
ηλεκτρισμός		34.1	35.3	35.4	37.4	39.3	42.5	46.1	48.7	52.0	54.5	54.7
ατμός		13.9	15.8	15.9	17.7	16.2	15.9	20.5	21.6	23.1	21.9	19.6
υδρογόνο, βιοκαύσιμα, αιθανόλη, μεθανόλη		1.3	6.0	7.5	7.5	9.8	12.0	11.7	13.5	16.0	15.9	18.6
εκπομπές CO₂ [Mt]		797.6	833.3	871.4	909.0	919.5	932.3	972.1	1003.4	1040.9	1079.9	1065.0
δείκτης εκπομπών CO₂ ως προς το έτος βάσης		100.0	104.5	109.2	114.0	115.3	116.9	121.9	125.8	130.5	135.4	133.5

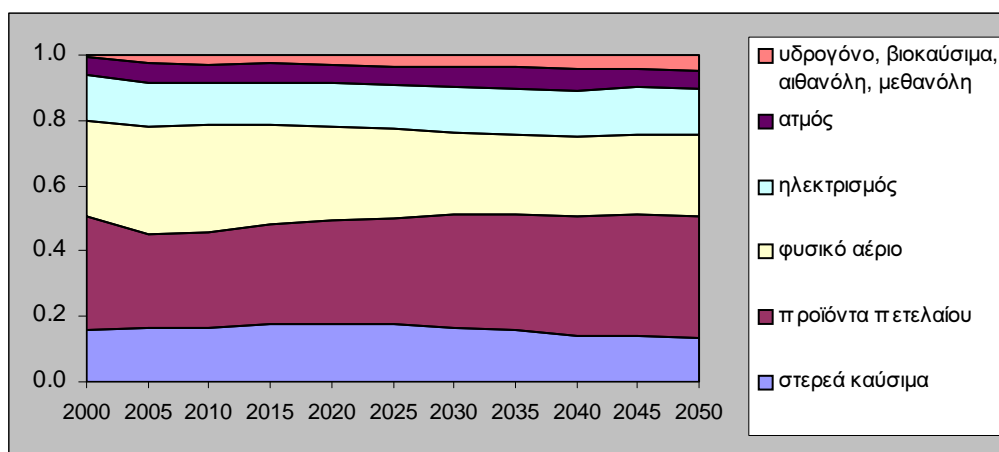
Σχήμα 8.1: Πίνακας βασικών ενεργειακών ροών και δεικτών για το σενάριο αναφοράς

Γερμανία: Σενάριο Μείωσης κατά 40% των εκπομπών CO₂ στη διάρκεια του ορίζοντα											
[Mtoe]											
	2000	2005	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
πρωτογενής εγχώρια παραγωγή	122.5	149.1	108.8	85.5	43.2	28.8	32.5	66.4	129.0	172.3	231.2
στερεά καύσιμα	60.0	66.3	36.5	24.9	19.7	10.5					
πετρέλαιο		4.9	1.4								
φυσικό αέριο	15.8	25.9	23.3	20.5							
πυρηνική ενέργεια	43.8	44.0	37.9	28.0	8.7						
ανανεώσιμες μορφές ενέργειας	2.9	8.0	9.7	12.0	14.8	18.3	32.5	66.4	129.0	172.3	231.2
υδροηλεκτρική	2.0	2.1	2.2	2.2	2.3	2.4	2.4	2.5	2.5	2.6	2.6
βιομάζα / καύσιμα απορρίμματα	0.0	4.6	5.6	6.8	8.3	10.1	12.3	15.0	18.2	22.2	27.0
αιολική	0.8	1.0	1.3	1.7	2.1	2.7	3.5	4.4	5.7	7.2	9.2
ηλιακή, λοιπές ανανεώσιμες	0.1	0.2	0.6	1.3	2.0	3.0	14.2	44.5	102.6	140.3	192.4
εισαγωγές - εξαγωγές	203.1	167.2	204.6	229.3	262.0	287.5	308.4	281.4	215.7	181.7	113.6
στερεά καύσιμα	20.0	27.0	35.9	21.4	6.4	-10.4					
πετρέλαιο	118.5	72.4	81.4	90.6	94.4	99.8	108.2	113.0	103.5	93.2	77.3
αργό πετρέλαιο	110.0	90.6	99.2	108.1	111.5	116.6	122.4	129.2	119.3	108.1	92.5
προϊόντα πετρελαίου	8.5	-18.2	-17.8	-17.5	-17.1	-16.8	-14.2	-16.1	-15.8	-14.9	-15.2
φυσικό αέριο	68.0	71.2	90.6	120.4	164.1	200.9	202.8	170.8	114.6	90.8	38.4
ηλεκτρισμός	-3.4	-3.4	-3.3	-3.1	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.3	-2.1
ολική εγχώρια κατανάλωση	325.6	316.2	313.4	314.8	305.1	316.3	340.9	347.8	344.8	354.0	344.8
στερεά καύσιμα	80.0	93.3	72.4	46.3	26.1	0.0					
πετρέλαιο	118.5	77.3	82.8	90.6	94.4	99.8	108.2	113.0	103.5	93.2	77.3
φυσικό αέριο	83.8	97.0	113.8	140.9	164.1	200.9	202.8	170.8	114.6	90.8	38.4
πυρηνική ενέργεια	43.8	44.0	37.9	28.0	8.7						
ηλεκτρισμός	-3.4	-3.4	-3.3	-3.1	-2.9	-2.7	-2.6	-2.4	-2.3	-2.3	-2.1
ανανεώσιμες μορφές ενέργειας	2.9	8.0	9.7	12.0	14.8	18.3	32.5	66.4	129.0	172.3	231.2
ως % ποσοστό της ολικής εγχώριας κατανάλωσης											
στερεά καύσιμα	24.6	29.5	23.1	14.7	8.6	0.0					
πετρέλαιο	36.4	24.5	26.4	28.8	30.9	31.6	31.7	32.5	30.0	26.3	22.4
φυσικό αέριο	25.7	30.7	36.3	44.8	53.8	63.5	59.5	49.1	33.2	25.6	11.1
πυρηνική ενέργεια	13.4	13.9	12.1	8.9	2.9						
ηλεκτρισμός	-1.0	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.7	-0.6	-0.6
ανανεώσιμες μορφές ενέργειας	0.9	2.5	3.1	3.8	4.9	5.8	9.5	19.1	37.4	48.7	67.0
% ποσοστό εισαγωγών στην ολική εγχώρια κατανάλωση	0.62	0.53	0.65	0.73	0.86	0.91	0.90	0.81	0.63	0.51	0.33
παραγωγή ηλεκτρισμού [TWhε]	449.4	464.8	459.9	518.4	699.0	861.0	1009.2	1132.4	1357.2	1664.3	2192.4
από μονάδες θερμικής παραγωγής	247.3	257.9	272.2	364.2	613.7	802.0	832.8	632.4	210.7	88.6	1.9
από μονάδες μη-θερμικών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	32.6	36.4	40.7	45.7	51.6	59.0	176.3	499.9	1146.6	1575.7	2190.5
από μονάδες πυρηνικής ενέργειας	169.6	170.6	147.1	108.5	33.8						
καύσιμα στην ηλεκτροπαραγωγή από θερμικές μονάδες	65.4	68.2	64.0	67.8	100.9	129.8	132.8	104.4	49.4	32.1	21.4
στερεά καύσιμα	42.1	49.5	24.6	8.0	0.8	0.0					
πετρέλαιο (προϊόντα)	4.2				0.0						
φυσικό αέριο	16.4	16.2	36.6	58.4	100.1	129.7	132.7	104.3	49.3	32.1	21.4
βιομάζα / καύσιμα απορρίμματα	2.7	2.5	2.8	1.3	0.0					0.0	0.0
άλλα καύσιμα		0.0		0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
είσοδος σε άλλους ενεργειακούς μετασχηματισμούς	110.2	100.4	106.5	113.9	120.7	129.4	180.8	189.8	184.4	191.3	179.9
διύλιστήρια	110.0	95.5	100.6	108.1	111.5	116.6	122.4	129.2	119.3	108.1	92.5
παραγωγή θερμότητας χαμηλής ενθαλπίας	0.0	0.1	0.0			0.0				0.0	0.1
άλλες διεργασίες (παραγωγή υδρογόνου - βιοκαυσίμων - μεθανόλης - αιθανόλης)	0.2	4.8	5.9	5.8	9.2	12.8	58.4	60.7	65.1	83.2	87.3
τελική κατανάλωση ανά τομέα	246.6	260.8	274.0	284.5	278.5	286.8	298.7	308.5	316.0	326.4	319.9
βιομηχανία	82.9	85.5	89.1	90.0	85.5	87.3	89.7	90.6	93.4	96.6	96.1
οικιακός τομέας	63.8	66.0	64.5	64.6	60.5	59.9	57.4	58.6	56.6	56.8	55.0
τριτογενής τομέας	33.8	35.9	36.4	35.9	31.6	31.9	33.3	33.6	35.0	36.8	36.4
μεταφορές	66.1	73.4	83.9	94.0	100.8	107.8	118.1	125.7	130.9	136.1	132.4
τελική κατανάλωση ανά καύσιμο											
στερεά καύσιμα	37.9	43.7	47.8	38.3	25.3						
προϊόντα πετρελαίου	86.1	75.2	80.6	88.3	91.9	97.3	105.5	110.2	100.9	90.8	75.3
φυσικό αέριο	72.0	85.0	81.4	86.4	67.4	72.5	28.2	24.2	23.4	23.8	20.3
ηλεκτρισμός	34.1	35.3	35.1	40.2	54.7	68.0	80.0	90.3	108.6	115.6	123.8
ατμός	15.1	15.4	21.8	20.8	24.8	31.0	30.6	25.9	19.6	16.9	16.1
υδρογόνο, βιοκαύσιμα, αιθανόλη, μεθανόλη	1.3	6.2	7.3	10.6	14.3	18.1	54.4	57.9	63.4	79.2	84.4
εκπομπές CO₂ [Mt]	796.9	832.9	758.8	677.9	566.2	495.8	434.3	431.8	387.7	351.2	278.5
δείκτης εκπομπών CO₂ ως προς το έτος βάσης	100.0	104.5	95.2	85.1	71.0	62.2	54.5	54.2	48.6	44.1	34.9

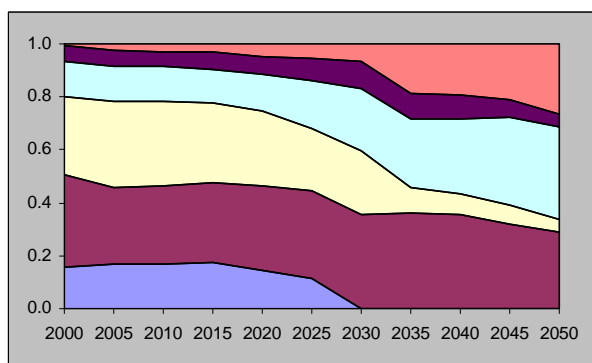
Σχήμα 8.2: Πίνακας βασικών ενεργειακών ροών και δεικτών για το σενάριο περιορισμού CO₂ κατά 40%



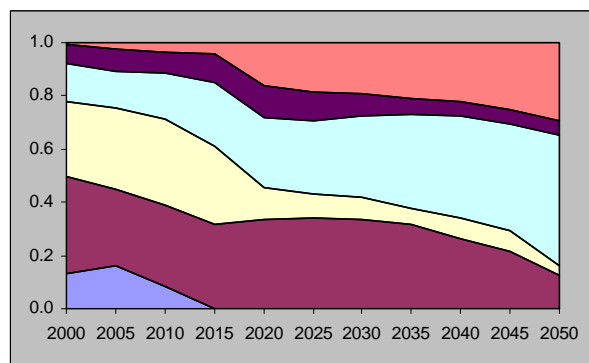
Σχήμα 8.3: Τελική ζήτηση ενέργειας



(α') τελική ενέργεια ανά μορφή ενέργειας - για το σενάριο αναφοράς

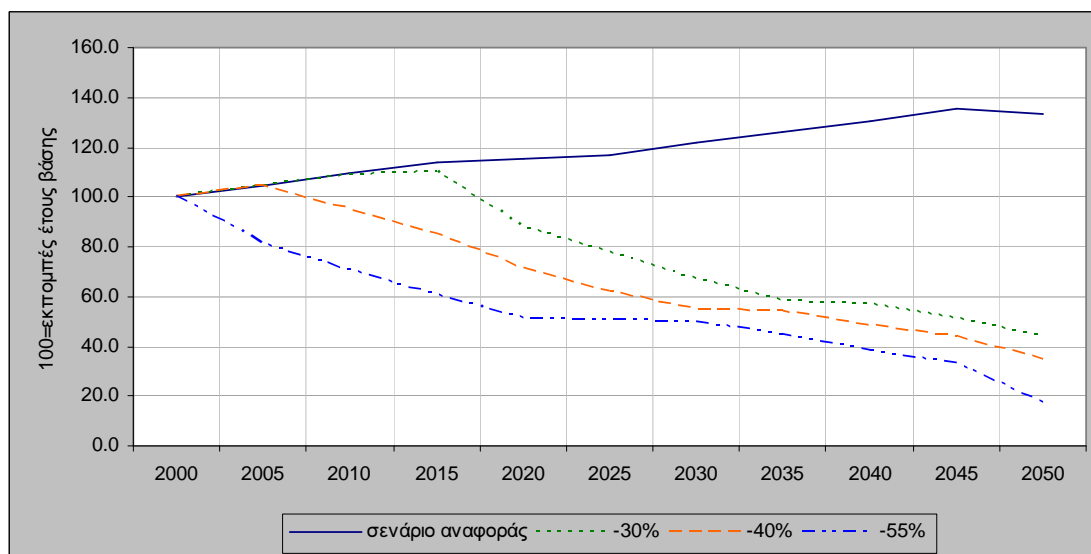


(β') για το σενάριο περιορισμού εκπομπών κατά 30%

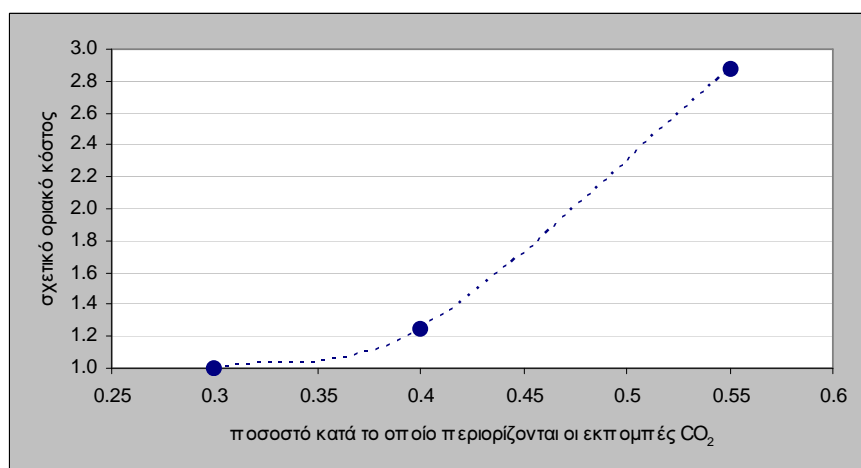


(γ') για το σενάριο περιορισμού εκπομπών κατά 55%

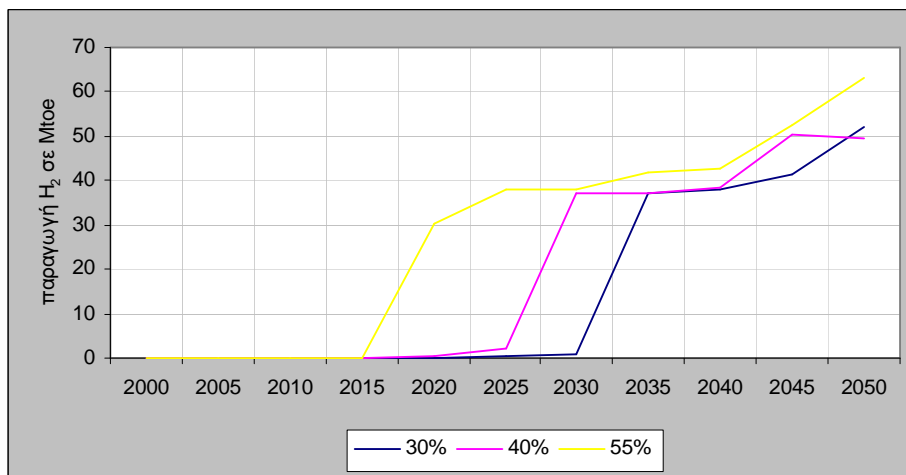
Σχήμα 8.4: Κόμβοι ζήτησης ενεργειακών υπηρεσιών D=DINDUDTRAUDRESUDTER



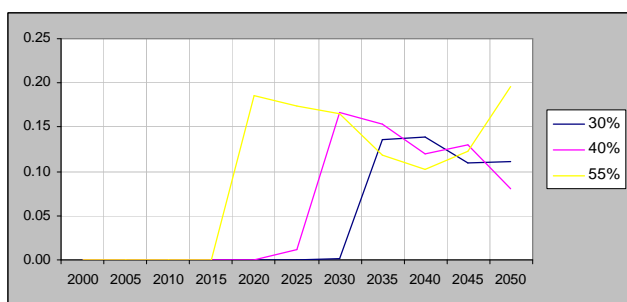
Σχήμα 8.5: Καμπύλη εκπομπών CO_2 ως προς τις εκπομπές του έτους βάσης



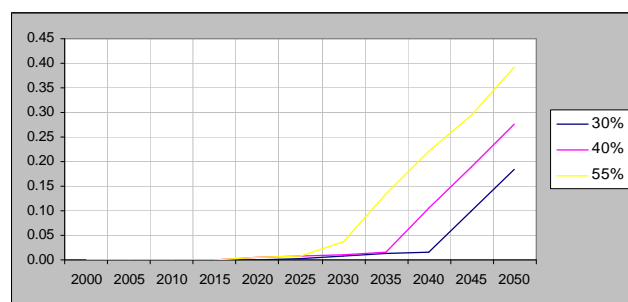
Σχήμα 8.6: Καμπύλη οριακού κόστους περιορισμού εκπομπών CO_2 . Η μορφή της καμπύλης προσεγγίζει την 7.4.



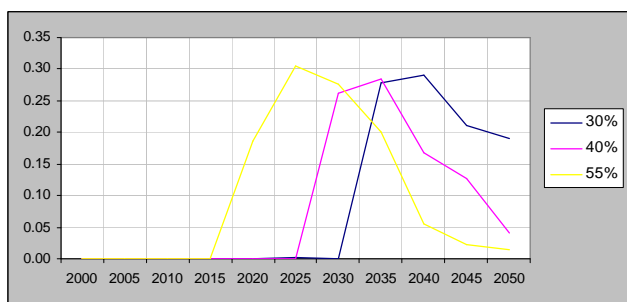
Σχήμα 8.7: Παραγωγή H_2 για κάθε εκδοχή του σεναρίου - $(1 - uLim)$ στον κατακόρυφο άξονα



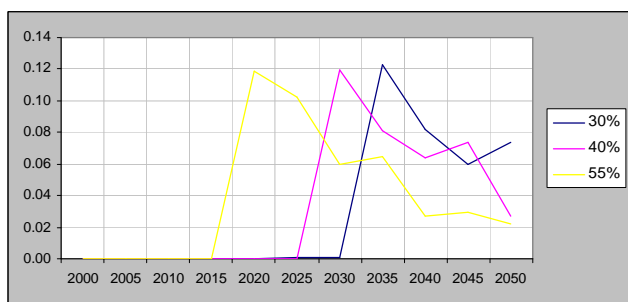
(α') βιομηχανικός τομέας



(β') τομέας μεταφορών



(γ') οικιακός τομέας



(δ') τριτογενής τομέας

Σχήμα 8.8: Ποσοστό H_2 στην κάλυψη της ζήτησης τελικής ενέργειας ανά τομέα

Βιβλιογραφία

- [1] Π Κάπρος. *Βοήθημα για το μάθημα Ενεργειακή Οικονομία*. ΕΜΠ, 1998.
- [2] W Amos. Costs of storing and transporting hydrogen. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ. NREL-TP-570-25106, National Renewable Energy Laboratory, 1998.
- [3] Kenneth Arrow. The economic implications of learning by doing. *Review of Economic Studies*, 29, 1962.
- [4] R Dorfman, P A Samuelson και R Solow. *Linear Programming and Economic Analysis*. McGraw-Hill, 1958. Τυρνπικε Τηεορεμ.
- [5] S Dunn. Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 27, 2002.
- [6] European Commission Joule-III Programme. The PRIMES Energy System Model Reference Manual. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ., National Technical University of Athens, 1997.
- [7] P Grohnheit. Economic interpretation of the EFOM model. *Energy Economics*, 13, 1991.
- [8] A Hugo, P Ruttera, S Pistikopoulos, A Amorelli και G Zoia. Hydrogen infrastructure strategic planning using multi-objective optimization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2005.
- [9] W Krewitt και S Schmid. Fuel cell technologies and hydrogen production/ distribution options. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ. WP 1.5 - D 1.1 , DLR - CASCADE Mints, 2004.
- [10] R Loulou, G Goldstein και K Noble. Documentation for the MARKAL Family of Models. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ., Energy Technology Systems Analysis Programme, 2004.
- [11] W Marcuse, L Bodin, E Cherniavsky και Y Sanborn. A dynamic time dependent model for the analysis of alternative energy policies. *Operational Research 1975*, 1976.
- [12] P Meier. *Energy System Analysis for Developing Countries*. Αριθμός 222 στο Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems. Springer-Verlag, 1984.

-
- [13] T Milne, C Elam και R Evans. Hydrogen from Biomass State of the Art and Research Challenges. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ. IEA/H2/TR-02/001, National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [14] Padrò και Putsche. Survey of the Economics of Hydrogen Technologies. NREL/TP-570-27079, National Renewable Energy Laboratory, 1999.
- [15] D Simbeck και E Chang. Hydrogen Supply: Cost Estimate for Hydrogen Pathways, Scoping Analysis. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ. NREL/SR-540-32525, National Renewable Energy Laboratory, 2002.