



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ - ΣΧΟΛΗ
ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ - ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ
ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΔΙΠΛΩΜΑ ΣΤΑ
ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ

*ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ
ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ
ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Παπαθανασίου Άγγελος-Αναστάσιος

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Γ.ΜΑΤΣΟΠΟΥΛΟΣ

ΕΠΙΚΟΥΡΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

Επιβλέπων: Επίκουρος Καθηγητής Ε.Μ.Π. Γ. Ματσόπουλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή επιτροπή την

.....
Γ. ΜΑΤΣΟΠΟΥΛΟΣ
Επίκουρος Καθηγητής
Ε.Μ.Π.

.....
.....
.....
Αθήνα, Φεβρουάριος 2022

.....

ΠΑΠΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΑΓΓΕΛΟΣ-ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ

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

© 2022 – Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία γράφτηκε στα πλαίσια του ΔΠΜΣ Τεχνοοικονομικά Συστήματα και συμπεριλαμβάνει σε επίπεδο γνωστικού αντικειμένου όλα τα ενεργειακά-οικονομικά μαθήματα του προγράμματος σπουδών. Πιο συγκεκριμένα, πραγματεύεται τα μέτρα που έχουν παρθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Σε πρώτη φάση, γίνεται μια συντονισμένη προσπάθεια να εξεταστούν οι επιρροές που έχουν αυτά τα μέτρα στην παραγωγή ενέργειας, στις τιμές και ειδικότερα στην όλη διάρθρωση της αλυσίδας που ευθύνεται για το ενεργειακό αγαθό που φτάνει στα σπίτια μας. Κατά αυτόν τον τρόπο, αρχικά παραθέτουμε μια θεωρητική οικονομική προσέγγιση των μέτρων και μία διεξοδική ανάλυση των αποτελεσμάτων που μπορούν να επιφέρουν αυτά τα μέτρα στην αγορά ενέργειας. Επιπλέον, επικαλούμενοι ορισμένες πηγές και σχετικούς πίνακες προσπαθούμε να περιγράψουμε αναλυτικά αυτά τα μέτρα στον αναγνώστη, αλλά, κυρίως, το πώς λειτουργεί ένα ενεργειακό-οικονομικό σύστημα, πόσο εύελκτο είναι και πώς ένα νέο μέτρο το διαφοροποιεί.

Ωστόσο, το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας μας εστιάζεται στην ανάλυση και στη μελέτη του ενεργειακού μοντέλου Balmorel. Είναι ένα εκτεταμένο ενεργειακό μοντέλο που έχει εφαρμοστεί στις Σκανδιναβικές χώρες. Στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε όλος ο κώδικάς του και έγινε καταγραφή όλων των συμβόλων και των μεταβλητών κατάστασης του μοντέλου, καθώς επίσης και η προσομοίωση του σε πρωταρχικό στάδιο.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ενεργειακό Μοντέλο, Συντελεστές Εκπομπών CO₂, Ευρωπαϊκό Πλάνο Εκπομπής Ρύπων, Μαθηματικός Προγραμματισμός, Balmorel.

Abstract

This is a thesis written for the master studies program Technology and Economy Systems under the subjects of technology and economy and is specializing at the European scheme of reducing the greenhouse gasses.

At the beginning, we examine the impact of the European scheme at the energy production, its cost and especially to the whole procedure from the energy production units to the consumption units. In this way, we have a theoretical economical approach of the results that this scheme is possible to cause at the energy market. Furthermore, using some external sources and some tables we try to explain this scheme and also, what an energy economy model is and how it works, how flexible it can be and how much it can be influenced by new rules.

We studied thoroughly the Balmorel model, which is an extended energy economy model for the Scandinavian countries and is adjusted to the European scheme. Under this thesis, the whole code of this model has been studied, its symbol and its state variable are noted

KEYWORDS: Energy model, Coefficient Emissions CO₂, European Scheme of Emissions, Linear Programming, Balmorel

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αφιερώνεται στην οικογένεια μου...

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Ματσόπουλο για την τιμή που μου έκανε με την ανάθεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, την πολύτιμη βοήθεια του, τις συμβουλές του όσο και την αμέριστη συμπαράστασή του.

Περιεχόμενα

Περιεχόμενα Πινάκων	11
Περιεχόμενα Σχημάτων	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο	12
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	12
1.1 Πρόλογος.....	13
1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας.....	14
1.3 Δομή	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο	16
Τα ευρωπαϊκά μέτρα για τις εκπομπές ρύπων των αερίων του θερμοκηπίου και οι επιπτώσεις τους σε όλους τους τομείς	16
2.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO ₂	16
2.1.1 Συντελεστής εκπομπών για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας....	17
2.1.2 Συντελεστές εκπομπών για την καύση καυσίμων	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο	22
3.1 Τρόποι επιρροής των ευρωπαϊκών περιορισμών στις εκπομπές CO ₂ και στην οικονομία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	26
3.1.1 Βραχυπρόθεσμη επιρροή κόστους	26
3.1.2 Βραχυπρόθεσμη επιρροή τιμής.....	27
3.1.3 Μακροπρόθεσμες επιρροές στη μίξη καυσίμων και στην επένδυση	27
3.2 Κατανομημένες επιπτώσεις του ευρωπαϊκού πλάνου εκπομπής CO ₂ ..	29
3.2.1 Επιπτώσεις στους παραγωγούς.....	29
3.2.2 Επιπτώσεις στους καταναλωτές	30
3.2.3 Λοιπές επιπτώσεις.....	30
3.3 Ανακεφαλαίωση	30
3.4 Η επιρροή των Ευρωπαϊκών μέτρων στις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος.....	31
3.5 Το πέρασμα από τις τιμές του CO ₂ στις ενιαίες τιμές ενέργειας	31

3.6	Δομή της αγοράς και πώς επηρεάζεται από την εμπορία εκπομπών ρύπων	31
3.7	Οι ευρωπαϊκές απόψεις για την επιρροή των μέτρων εκπομπής ρύπων στη μεταβατική περίοδο	32
3.8	Τα άμεσα-ευκαιριακά οφέλη από την εφαρμογή των μέτρων	33
3.9	Κατηγορίες Ενεργειακών Μοντέλων	36
3.10	Στοιχεία ενός τυπικού οικονομικού - ενεργειακού μοντέλου	38
3.10.1	Είσοδοι	38
3.10.1.1	Ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών	38
3.10.1.2	Διαθεσιμότητα πόρων	39
3.10.1.3	Πολιτική που έχει τεθεί	39
3.10.1.4	Περιγραφές ενός συνόλου τεχνολογιών	39
3.10.2	Έξοδοι	40
3.10.3	Δομή	41
3.10.4	Η θεώρηση Ενεργειακό Σύστημα Αναφοράς (Reference Energy System-RES)	41
3.10.5	Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις διαδικασίες	43
3.10.6	Οι παράμετροι που σχετίζονται με τα προϊόντα	44
3.10.7	Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις ροές προϊόντων	44
3.11	Η οικονομική λογική των μοντέλων μερικής ισορροπίας	45
3.11.1	Γραμμικότητα	45
3.11.2	Η Μεγιστοποίηση του Πλεονάσματος	46
3.12	Ανταγωνιστικές Αγορές Ενέργειας	49
3.13	Αντικειμενική Συνάρτηση: Συνολικό Προεξοφλημένο Κόστος Συστημάτων	49
3.14	Περιορισμοί	50
3.15	Συντήρηση των Επενδύσεων	50
3.16	Χρήση της δυναμικότητας	51
3.17	Εξίσωση ισορροπίας προϊόντος	51
3.18	Καθορισμός των σχέσεων ροής σε μια διαδικασία	51
3.19	Περιορισμοί στα προϊόντα	51
3.20	Περιορισμοί χρήστη	52
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°		53

4.1 Balmorel Model – Θεωρητικό υπόβαθρο	56
4.1.1 Εισαγωγή	56
4.1.2 Το παραγωγικό σύστημα	57
4.1.2.1 Τεχνολογίες παραγωγής.....	57
4.1.2.2 Συνάρτηση προσφοράς	58
4.1.2.3 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά	59
4.1.2.4 Χρόνος	60
4.1.2.4.1 Ζήτηση	61
4.1.2.4.2 Παραγωγή	61
4.1.2.4.3 Αποθήκευση.....	62
4.1.2.5 Μεταφορά και διανομή.....	63
4.1.2.5.1 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας	63
4.1.2.5.2 Συναλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας με τρίτες χώρες	64
4.1.2.5.3 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.....	64
4.1.2.5.4 Διανομή θερμότητας	65
4.1.2.5.5 Επιπτώσεις στις τιμές.....	65
4.1.2.5.6 Επιπτώσεις στην αντικειμενική συνάρτηση	66
4.1.2.6 Φόροι.....	67
4.1.2.6.1 Φόροι καυσίμων	67
4.1.2.6.2 Φόροι εκπομπών.....	67
4.1.2.6.3 Φόροι κατανάλωσης ενέργειας	67
4.1.2.6.4 Επιβάρυνση φόρων	68
4.1.2.7 Ζήτηση	69
4.1.2.7.1 Η Cobb-Douglas συνάρτηση, CD	69
4.1.2.7.2 Συνάρτηση σταθερής ελαστικότητας αντικατάστασης (CES: Constant Elasticity of Substitution function)	71
4.1.2.7.3 Άλλες τυποποιημένες συναρτήσεις	72
4.1.2.7.4 Υλοποίηση.....	73
4.1.2.8 Η αντικειμενική συνάρτηση και οι παράγοντες ισορροπίας.....	73
4.1.2.9 Συνολικό μοντέλο – Ένα έτος.....	75
4.1.2.10 Δυναμικότητα του μοντέλου	78
4.1.2.11 Υλοποίηση γραμμικού προγραμματισμού	78

4.1.2.11.1	Το σύστημα παραγωγής, Μεταφορά και Διανομή	78
4.1.2.11.2	Ζήτηση	78
4.1.2.11.3	Ισορροπία και ΚΚΤ (Karush–Kuhn–Tucker) συνθήκες	80
4.1.2.11.4	Υλοποίηση μοντελοποίησης συστήματος.....	80
4.1.2.11.5	Λύση	81
4.1.2.12	Ερμηνεία	81
4.1.2.12.1	Οριακό κόστος και «σκιασμένες» τιμές	81
4.1.2.12.2	Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας	83
4.1.2.12.3	Η τιμές της θερμότητας.....	84
4.1.2.12.4	Υπόλοιπο παραγωγών και καταναλωτών	84
4.1.2.12.5	Γενικά συμπεράσματα	85
4.1.2.13	Συμπεράσματα.....	86
	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	88

Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1: Εθνικοί και ευρωπαϊκοί συντελεστές εκπομπών CO ₂ για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για το σύνολο των κρατών μελών της ευρωπαϊκής ένωσης.....	19
Πίνακας 2: Συντελεστές εκπομπών για τοπική ηλεκτροπαραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ή για αγορές πιστοποιημένης πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας.....	20
Πίνακας 3: Συντελεστές εκπομπών για την καύση καυσίμων	21
Πίνακας 4: Ποσοστά μετάβασης στην εποχή εφαρμογής της παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO ₂	32
Πίνακας 5: Αύξηση από 1 έως 19€/MWh, έπειτα από την εφαρμογή των ευρωπαϊκών μέτρων παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO ₂	33
Πίνακας 6: Παράμετροι που πρέπει να ερευνηθούν στα πλαίσια του χρηματιστηρίου ρύπων.	35
Πίνακας 7: Κατανομή πηγών παραγωγής ενέργειας σε κάθε χώρα.	36

Περιεχόμενα Σχημάτων

Σχήμα 1: Η Γη στα χέρια του ανθρώπου.	18
Σχήμα 2: Εκπομπές ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	21
Σχήμα 3: Βασικοί παράγοντες επιρροής των ευρωπαϊκών περιορισμών στις εκπομπές CO ₂ και στην οικονομία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.	29
Σχήμα 4: Εναλλακτικές/Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.	40
Σχήμα 5: Παράδειγμα ενεργειακού συστήματος αναφοράς (RES).	43
Σχήμα 6: Ισορροπία στην περίπτωση ενεργειακής μορφής όταν το μοντέλο ενδογενώς κατασκευάζει τόσο την καμπύλη προσφοράς όσο και την καμπύλη ζήτησης.	47
Σχήμα 7: Ισορροπία στην περίπτωση ενεργειακής υπηρεσίας όπου ο χρήστης ρητά παρέχει την καμπύλη ζήτησης.	48
Σχήμα 8: Γεωγραφικά χαρακτηριστικά και συσχέτιση με το μαθηματικό μοντέλο Balmorel.....	60
Σχήμα 9: Συνδέσεις μεταξύ παραγωγής, κατανάλωσης, διανομής και μετάδοσης σε μια περιοχή, με μια ηλεκτρική σύνδεση μεταφοράς σε άλλη περιοχή.	63
Σχήμα 10: Καμπύλες συνήθων αντικαταστάσεων.....	73

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πρόλογος

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

1.3 Δομή της διπλωματικής εργασίας

1.1 Πρόλογος

Η μοντελοποίηση του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας έχει ξεκινήσει εδώ και τέσσερις δεκαετίες, ωστόσο, τα τελευταία χρόνια ο αριθμός των ενεργειακών μοντέλων έχει αυξηθεί αναλογικά με την εξέλιξη και την ευρύτερη εξάπλωση των υπολογιστικών συστημάτων. Πανίσχυροι υπολογιστές είναι σε θέση πλέον να δεχτούν και να συμπεριλάβουν κάθε παράμετρο ενός πολύπλοκου ενεργειακού μοντέλου καθιστώντας απλές τις μαθηματικές πράξεις.

Τα πρώτα χρόνια της μοντελοποίησης η έλλειψη γνώσης γύρω από τα ενεργειακά μοντέλα δυσχέραινε κάθε προσπάθεια μοντελοποίησης τους. Αυτό, σε συνδυασμό με την αδιαφορία για σωστή διαχείριση των ενεργειακών πόρων και την έλλειψη περιβαλλοντικής πολιτικής στάθηκαν εμπόδιο σε κάθε εξέλιξη. Παρόλα αυτά, όταν στις αρχές τις δεκαετίας του '80 ξεκίνησε ο διάλογος και ο προβληματισμός για τη σωστή αξιοποίηση των πόρων και την προστασία του περιβάλλοντος, κρίθηκε αναγκαία η βέλτιστη χρήση των πηγών ενέργειας που μέχρι τότε είχαν ως κύριο εκπρόσωπο την καύση των παραγώγων του άνθρακα. Αυτά τα μοντέλα ενσωμάτωσαν με την πάροδο του χρόνου τις εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα, έγιναν πολυσύνθετα για να καταλήξουν στα ενεργειακά-περιβαλλοντικά-οικονομικά μοντέλα (E³).

Στις μέρες μας, τα ενεργειακά μοντέλα παρουσιάζουν πολλές εφαρμογές και αντιμετωπίζονται ως εργαλεία για την λήψη αποφάσεων (decision models). Κατά αυτόν τον τρόπο, ένα τέτοιο μοντέλο γίνεται πολύτιμος σύμβουλος για ορθή περιβαλλοντική πολιτική, αλλά και ένα εργαλείο για ενδεδειγμένη ανάλυση των αγορών ενέργειας. Ταυτόχρονα, οι εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας οδηγούνται σε εύρωστες αποφάσεις για μεγιστοποίηση των κερδών.

Για κάθε παραγωγό, ένα ενεργειακό-μαθηματικό μοντέλο αποτελεί ένα «μαύρο κουτί» όπου αρχικοποιεί τις παραμέτρους του και λαμβάνει αποτελέσματα. Πολλές εταιρείες έχουν ολόκληρο τμήμα έρευνας και επενδύουν στην περαιτέρω αναβάθμιση αυτών των συστημάτων. Άρα, ένας «στρατός» από ερευνητές-οικονομολόγους-προγραμματιστές-αναλυτές μελετά τις οικονομικές εξελίξεις, προτείνει νέες τεχνολογίες και αφιερώνει άπλετο χρόνο σε χιλιάδες γραμμές κώδικα για να προλάβει και να καθορίσει το επόμενο βήμα της επιχείρησης.

Είναι αδιαμφισβήτητο ότι η ζωή στον πλανήτη μας είναι άμεσα συνυφασμένη με την παραγωγή, τη διανομή και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, αυτό πρέπει να πραγματοποιείται πλέον, με το ελάχιστο περιβαλλοντικό κόστος. Η ορθολογική διαχείριση της ενέργειας και των πόρων είναι επιτακτική όσο ποτέ και τα ενεργειακά μοντέλα καλούνται να πρωτοστατήσουν σε αυτό το εγχείρημα.

Εξάλλου, δεν είναι επιθυμητή η εξαφάνιση αυτού του κολοσσιαίου συστήματος παροχής ενέργειας, αφού δημιουργεί πολλαπλές θέσεις εργασίας και κάνει πιο εύκολη την καθημερινότητά μας. Γι' αυτό τα ενεργειακά μοντέλα καλούνται να βγάλουν αποτελέσματα για οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμες λύσεις ενσωματώνοντας πλήρως τους νέους κανόνες για τις εκπομπές ρύπων. Είναι γνωστό ότι οι στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν είναι υπερβολικά υψηλοί. Επιβάλλεται η άμεση μείωση των

αερίων του θερμοκηπίου και η σταδιακή εισχώρηση σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χωρίς τη μείωση της ενεργειακής απόδοσης.

Στις επόμενες σελίδες γίνεται μια προσπάθεια χωρίς ανάλωση σε μαθηματικούς τύπους να εκθέσουμε τα νέα μέτρα για τη μείωση των ρύπων και πως αυτά ενσωματώνονται σε ένα μαθηματικό-ενεργειακό μοντέλο και ποιες επιπτώσεις θα έχουν τελικά σε όλους τους φορείς.

1.2 Αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματεύεται τη χρησιμότητα ενός σύγχρονου πολυπαραμετρικού μαθηματικού μοντέλου στην επίλυση μεγάλων οικονομικών-επιχειρηματικών προβλημάτων. Αποτελεί μία θεωρητική προσέγγιση επίλυσης οικονομικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Πέρα από τη μαθηματική αφομοίωση των μεθόδων για μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση συναρτήσεων πραγματοποιείται μία εναλλακτική μελέτη με τη μέθοδο των σεναρίων καθώς και μία κλασσική μελέτη πιθανοτήτων όπως σε όλα τα οικονομικά προβλήματα.

Ξεκινώντας, λοιπόν, από τα ευρωπαϊκά μέτρα για τις εκπομπές ρύπων του αερίου του θερμοκηπίου και τις επιπτώσεις τους σε όλους τους τομείς προσπαθούμε να κατανοήσουμε τους τρόπους επιρροής των ευρωπαϊκών περιορισμών στις εκπομπές CO₂ και στην οικονομία αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Για να γίνει όλη αυτή η προσέγγιση πρέπει πρώτα να αναλυθεί εις βάθος η δομή της αγοράς, να απαριθμηθούν όλοι οι κανόνες που τη διέπουν, καθώς και το πόσο την επηρεάζει η εμπορία των ρύπων CO₂. Όλα τα παραπάνω καταλήγουν με κάποιο τρόπο, ο οποίος και αναλύεται, να επηρεάζουν την τελική τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που φτάνει στον καταναλωτή.

Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι ασχοληθήκαμε με ρύπους, δεν είναι δυνατόν να μην εκθέσουμε τις εκπομπές τους από τις σύγχρονες τεχνολογίες. Γι' αυτό περιγράφουμε ένα σύνολο από τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αναλύουμε τις παραμέτρους του σύμφωνα με τις διαδικασίες, τα προϊόντα και τις ροές προϊόντων. Προχωράμε στην οικονομική λογική των μοντέλων μερικής ισορροπίας και ασχολούμαστε με τη μεγιστοποίηση του πλεονάσματος μέσα σε πιο ανταγωνιστικές αγορές ενέργειας.

1.3 Δομή

Στην ενότητα αυτή γίνεται σύντομη αναφορά στα κεφάλαια της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται τα ευρωπαϊκά μέτρα για τις εκπομπές ρύπων των αερίων του θερμοκηπίου και οι επιπτώσεις τους σε όλους τους επιμέρους τομείς. Στο κεφάλαιο 3, γίνεται περιγραφή των ενεργειακών μοντέλων και των τρόπων επιρροής των ευρωπαϊκών περιορισμών στις εκπομπές CO₂ και στην οικονομία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. . Επιπρόσθετα, στο τέταρτο κεφάλαιο αναλύεται η μαθηματική προσέγγιση ενός ενεργειακού συστήματος μέσω του μοντέλου

Balmorel. Η ουσία αυτής της διπλωματικής εργασίας κρύβεται στην λεπτομερή μελέτη του μοντέλου Balmorel και σε θεωρητική άποψη, αλλά και σε πρακτική σημασία. Για το λόγο αυτό, χωρίζεται ένα ενεργειακό σύστημα σε επιμέρους διεργασίες (παραγωγή, μεταφορά, διανομή) και όλα τα μεγέθη του αποτυπώνονται στο χαρτί για να γίνει απόλυτα κατανοητή η λειτουργία αυτού του μοντέλου. Παράλληλα, σημειώνονται και επεξηγούνται οι συναρτήσεις που περιέχει το Balmorel με σκοπό την εξαγωγή οικονομικών συμπερασμάτων έτσι ώστε να γίνει πλέον ένα πανίσχυρο εργαλείο για αποφάσεις που αφορούν μελλοντικές ενεργειακές-οικονομικές πολιτικές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Τα ευρωπαϊκά μέτρα για τις εκπομπές ρύπων των αερίων του θερμοκηπίου και οι επιπτώσεις τους σε όλους τους τομείς

2.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂

2.1.1 Συντελεστής εκπομπών για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

2.1.2 Συντελεστές εκπομπών για την καύση καυσίμων

2.1 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂

2.1.1 Συντελεστής εκπομπών για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

Στοχεύοντας στον υπολογισμό των εκπομπών CO₂ που καταλογίζονται στην κατανάλωση ενέργειας είναι αναγκαίος ο καθορισμός των εκπομπών. Οι εκπομπές CO₂ οι οποίες δημιουργούνται από την κατανάλωση ενέργειας, ποσοτικοποιούνται διαμέσου του συντελεστή εκπομπών CO₂. Ο ίδιος συντελεστής εκπομπών χρησιμοποιείται για παντός είδους κατανάλωση ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ενέργειας που καταναλώνεται στις σιδηροδρομικές μεταφορές. Ως γενική αρχή, επιτρέπεται να χρησιμοποιείται εθνικός ή ευρωπαϊκός συντελεστής εκπομπών CO₂. Επιπλέον, εάν ο οργανισμός τοπικής αυτοδιοίκησης έχει αποφασίσει να συμπεριλάβει στο Σχέδιο Δράσης για την Αειφόρο (Βιώσιμη) Ενέργεια (ΣΔΑΕ) μέτρα σχετικά με την τοπική ηλεκτροπαραγωγή ή εάν αγοράζει πιστοποιημένη πράσινη ηλεκτρική ενέργεια, είναι προτεινόμενος ο υπολογισμός τοπικού συντελεστή εκπομπών CO₂, ο οποίος αντικατοπτρίζει τα οφέλη περιορισμού του CO₂ με αυτά τα μέτρα. Στις περιπτώσεις αυτές επιτρέπεται να χρησιμοποιείται ο ακόλουθος απλός τύπος για τον υπολογισμό του τοπικού συντελεστή εκπομπών CO₂ για την ηλεκτρική ενέργεια:

$$EFE = [(TCE - LPE - GEP) * NEEFE + CO2LPE + CO2GEP] / (TCE) \quad (2.1)$$

όπου,

EFE = τοπικός συντελεστής εκπομπών για την ηλεκτρική ενέργεια [t/MWh]

TCE = συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τον οργανισμό τοπικής αυτοδιοίκησης [MWh]

LPE = τοπική ηλεκτροπαραγωγή [MWh]

GEP = αγορά πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας από τον οργανισμό τοπικής αυτοδιοίκησης [MWh]

NEEFE = εθνικός ή ευρωπαϊκός συντελεστής εκπομπών για την ηλεκτρική ενέργεια (επιλέγεται) [t/MWh]

CO2LPE = εκπομπές CO₂ από την τοπική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [t]

CO2GEP = εκπομπές CO₂ από την παραγωγή πιστοποιημένης πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας [t]

Στον τύπο αυτόν παραλείπονται οι απώλειες μεταφοράς και διανομής στην περιοχή του οργανισμού τοπικής αυτοδιοίκησης, καθώς και η ιδιοκατανάλωση των παραγωγών/διαχειριστών μετατροπής ενέργειας και, σε κάποιο βαθμό, υπολογίζεται διπλά η τοπική παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, σε κλίμακα οργανισμού τοπικής αυτοδιοίκησης, είναι ελάχιστες οι συνέπειες των προσεγγίσεων αυτών στο τοπικό ισοζύγιο CO₂ και μπορεί να θεωρηθεί ότι ο τύπος παρέχει επαρκώς

ακριβή αποτελέσματα για να χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο του Συμφώνου των Δημάρχων.

Στην κατ' εξαίρεση περίπτωση όπου ο οργανισμός τοπικής αυτοδιοίκησης εξάγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια απ' ό, τι εισάγει, ο τύπος υπολογισμού είναι ο εξής:

$$EFE = (CO2LPE + CO2GEP) / (LPE + GEP) \quad (2.2)$$



Σχήμα 1: Η Γη στα χέρια του ανθρώπου.

Στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι εθνικοί και ευρωπαϊκοί συντελεστές εκπομπών CO₂ για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για το σύνολο των κρατών μελών της ευρωπαϊκής ένωσης.

Κράτος μέλος	Πρότυπος συντελεστής εκπομπών (t CO ₂ /MWh _e)	Συντελεστής ΑΚΖ (t CO ₂ -eq/MWh _e)
Αυστρία	0.209	0,310
Βέλγιο	0.285	0,402
Γερμανία	0.624	0,706
Δανία	0.461	0,760
Ισπανία	0.440	0,639
Φινλανδία	0.216	0,418
Γαλλία	0.056	0,146
Ηνωμένο	0.543	0,658
Ελλάδα	1.149	1,167
Ιρλανδία	0.732	0,870
Ιταλία	0.483	0,708
Κάτω Χώρες	0.435	0,716
Πορτογαλία	0.369	0,750
Σουηδία	0.023	0,079
Βουλγαρία	0.819	0,906
Κύπρος	0.874	1,019
Τσεχική Δημοκρατία	0.950	0,802
Εσθονία	0.908	1,593
Ουγγαρία	0.566	0,678
Λιθουανία	0.153	0,174
Λεττονία	0.109	0,563
Πολωνία	1.191	1,185
Ρουμανία	0.701	1,084
Σλοβενία	0.557	0,602
Σλοβακία	0.252	0,353
ΕΕ-27	0.460	0,578

Πίνακας 1: Εθνικοί και ευρωπαϊκοί συντελεστές εκπομπών CO₂ για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για το σύνολο των κρατών μελών της ευρωπαϊκής ένωσης

Επιπρόσθετα, στον ακόλουθο πίνακα παρατίθενται οι συντελεστές εκπομπών για τοπική ηλεκτροπαραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ή για αγορές πιστοποιημένης πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας.

Πηγή ηλεκτρ. ενέργειας	Πρότυπος συντελεστής εκπομπών (t CO ₂ /MWh _e)	Συντελεστής ΑΚΖ (t CO ₂ -eq/MWh _e)
Φωτοβολταϊκά	0	0,020-0,050
Αιολική	0	0,007
Υδροηλεκτρική	0	0,024

Πίνακας 2: Συντελεστές εκπομπών για τοπική ηλεκτροπαραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ή για αγορές πιστοποιημένης πράσινης ηλεκτρικής ενέργειας

Επιπρόσθετα, εκπομπές ρύπων CO₂ προκύπτουν από την κατανάλωση θερμότητας/ψύξης. Συνεπώς, ορίζεται ο αντίστοιχος συντελεστής εκπομπών για την κατανάλωση θερμότητας/ψύξης. Εάν η θέρμανση/ψύξη πωλείται/διανέμεται ως εμπόρευμα στους τελικούς χρήστες στον οργανισμό τοπικής αυτοδιοίκησης, είναι αναγκαίος ο καθορισμός του οικείου συντελεστή εκπομπών. Εάν εξάγεται μέρος της θερμότητας/ψύξης που παράγεται από την οργανισμό τοπικής αυτοδιοίκησης, στον υπολογισμό του συντελεστή εκπομπών για την παραγωγή θερμότητας/ψύξης (EFH) συμπεριλαμβάνεται μόνο το μερίδιο των εκπομπών CO₂ οι οποίες αντιστοιχούν στην θερμότητα/ψύξη που καταναλώνεται στην περιοχή του συγκεκριμένου οργανισμού τοπικής αυτοδιοίκησης. Παρομοίως, εάν μέρος της θερμότητας/ψύξης εισάγεται από μονάδα παραγωγής εκτός της περιοχής του συγκεκριμένου οργανισμού τοπικής αυτοδιοίκησης, πρέπει να συνυπολογίζεται το μερίδιο των εκπομπών CO₂ αυτής της μονάδας παραγωγής που καταναλώνεται στην περιοχή του συγκεκριμένου οργανισμού τοπικής αυτοδιοίκησης.

Επιτρέπεται να εφαρμόζεται ο ακόλουθος τύπος, με τον οποίο συνυπολογίζεται ο συντελεστής εκπομπών για την κατανάλωση θερμότητας/ψύξης:

$$EFH = (CO2LPH + CO2IH - CO2EH) / LHC \quad (2.3)$$

όπου

EFH = συντελεστής εκπομπών για θέρμανση

CO2LPH = εκπομπές CO₂ από την τοπική παραγωγή θερμότητας [t]

CO2IH = εκπομπές CO₂ για τυχόν εισαγωγές θερμότητας παραγόμενης εκτός του συγκεκριμένου οργανισμού τοπικής αυτοδιοίκησης [t]

CO2EH = εκπομπές CO₂ για τυχόν εξαγωγές θερμότητας από τον συγκεκριμένο οργανισμό τοπικής αυτοδιοίκησης [t]

LHC = τοπική κατανάλωση θερμότητας/ψύξης [MWh]

Επιτρέπεται να εφαρμόζεται ανάλογος τύπος για την ψύξη.

2.1.2 Συντελεστές εκπομπών για την καύση καυσίμων

Επιτρέπεται να χρησιμοποιούνται οι ακόλουθοι συντελεστές εκπομπών για την καύση καυσίμων (συμπεριλαμβανομένης της τοπικής παραγωγής θερμότητας ή ηλεκτρικής ενέργειας).

Είδος	Πρότυπος συντελεστής εκπομπών [t CO ₂ /MWh _{fuel}]	Συντελεστής ΑΚΖ (t CO ₂ -eq/MWh _{fuel})
Φυσικό αέριο	0,202	0,237
Υπολείμματα μαζούτ	0,279	0,310
Αστικά απορρίμματα (πλην βιομάζας)	0,330	0,330
Βενζίνη κίνησης	0,249	0,299
Πετρέλαιο εσωτερικής καύσης, ντίζελ	0,267	0,305
Υγροποιημένο φυσικό αέριο	0,231	
Φυτικό έλαιο	0	0,182
Βιοντίζελ	0	0,156
Βιοαιθανόλη	0	0,206
Ανθρακίτης	0,354	0,393
Λουτοί ασφαλτούχοι γαιάνθρακες	0,341	0,380
Υπασφαλτούχοι γαιάνθρακες	0,346	0,385
Λιγνίτης	0,364	0,375

Πίνακας 3: Συντελεστές εκπομπών για την καύση καυσίμων



Σχήμα 2: Εκπομπές ρύπων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Ενεργειακά Μοντέλα

3.1 Τρόποι επιρροής των ευρωπαϊκών περιορισμών στις εκπομπές CO₂ και στην οικονομία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

3.1.1 Βραχυπρόθεσμη επιρροή κόστους

3.1.2 Βραχυπρόθεσμη επιρροή τιμής

3.1.3 Μακροπρόθεσμες επιρροές στη μίξη καυσίμων και στην επένδυση

3.2 Κατανεμημένες επιπτώσεις του ευρωπαϊκού πλάνου εκπομπής CO₂

3.2.1 Επιπτώσεις στους παραγωγούς

3.2.2 Επιπτώσεις στους καταναλωτές

3.2.3 Λοιπές επιπτώσεις

3.3 Ανακεφαλαίωση

3.4 Η επιρροή των Ευρωπαϊκών μέτρων στις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος

3.5 Το πέρασμα από τις τιμές του CO₂ στις ενιαίες τιμές ενέργειας

3.6 Δομή της αγοράς και πώς επηρεάζεται από την εμπορία εκπομπών ρύπων

3.7 Οι Ευρωπαϊκές απόψεις για την επιρροή των μέτρων εκπομπής ρύπων στη μεταβατική περίοδο

3.8 Τα άμεσα-ευκαιριακά οφέλη από την εφαρμογή των μέτρων

3.9 Κατηγορίες Ενεργειακών Μοντέλων

3.10 Στοιχεία ενός τυπικού οικονομικού - ενεργειακού μοντέλου

3.10.1 Είσοδοι

3.10.1.1 Ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών

3.10.1.2 Διαθεσιμότητα πόρων

3.10.1.3 Πολιτική που έχει τεθεί

3.10.1.4 Περιγραφές ενός συνόλου τεχνολογιών

3.10.2 Έξοδοι

3.10.3 Δομή

3.10.4 Η θεώρηση Reference Energy System (RES)

3.10.5 Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις διαδικασίες

3.10.6 Οι παράμετροι που σχετίζονται με τα προϊόντα

3.10.7 Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις ροές προϊόντων

3.11 Η οικονομική λογική των μοντέλων μερικής ισορροπίας

3.11.1 Γραμμικότητα

3.11.2 Η Μεγιστοποίηση του Πλεονάσματος

3.12 Ανταγωνιστικές Αγορές Ενέργειας

3.13 Αντικειμενική Συνάρτηση: Συνολικό Προεξοφλημένο Κόστος Συστημάτων

3.14 Περιορισμοί

3.15 Συντήρηση των Επενδύσεων

3.16 Χρήση της δυναμικότητας

3.17 Εξίσωση ισορροπίας προϊόντος

3.18 Καθορισμός των σχέσεων ροής σε μια διαδικασία

3.19 Περιορισμοί στα προϊόντα

3.20 Περιορισμοί χρήστη

3.1 Τρόποι επιρροής των ευρωπαϊκών περιορισμών στις εκπομπές CO₂ και στην οικονομία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Το ευρωπαϊκό πλάνο για την εκπομπή ρύπων προβλέπει τη μείωση των αερίων θερμοκηπίου έως και 8% για την περίοδο 2008-2012. Αρχικά περιλαμβάνει δύο μεθοδεύσεις:

1. το μέγεθος CO₂ το οποίο οι ενεργειακές εγκαταστάσεις θα εκπέμπουν
2. υποχρεώνει αυτές τις εγκαταστάσεις να υποκύψουν σε περιορισμούς ίσους με τις ολικές εκπομπές για κάθε ημερολογιακό έτος.

Χρονικά χωρίζεται σε δύο φάσεις:

1. 2005 έως 2007: οι περιορισμοί είναι διαπραγματεύσιμοι και αποτελεί ένα μεταβατικό στάδιο.
2. φάσεις διάρκειας 5 ετών (παραδείγματος χάριν 2008-2012) υποχρεωτικής υπακοής στο πρωτόκολλο του Κιότο.

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

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

Οι επιρροές αυτές χωρίζονται σε τρεις μεγάλες κατηγορίες.

3.1.1 Βραχυπρόθεσμη επιρροή κόστους

Οι παραγωγοί αποφεύγουν να παράγουν πλεονάζον ηλεκτρικό ρεύμα, διότι δεν μπορούν να ανταποκριθούν στο βραχυπρόθεσμο αυξανόμενο κόστος παραγωγής. Ωστόσο όμως, από την κατηγορία αυτή εξαιρούνται οι εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας, διότι δεν παράγουν CO₂. Επιπρόσθετα, παρατηρείται ότι οι εγκαταστάσεις γαιάνθρακα είναι οικονομικά ασύμφορες σε σχέση με τις εγκαταστάσεις αερίου. Υπολογίζεται ότι εάν η εκπομπή CO₂ κοστολογηθεί με 20€/τόνο CO₂, το

βραχυπρόθεσμο οριακό κόστος (short-term marginal cost, STMC) των εγκαταστάσεων γαιάνθρακα θα υπερβεί το αντίστοιχο βραχυπρόθεσμο οριακό κόστος των εγκαταστάσεων αερίου. Η παραπάνω κοστολόγηση CO₂ έχει ως αντίκτυπο την αύξηση των τιμών καυσίμων, την αύξηση των δεικτών απόδοσης των εγκαταστάσεων, καθώς και περαιτέρω περιβαλλοντολογικούς περιορισμούς. Τέλος, καλλιεργείται μία τάση για νέες τεχνολογίες στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

3.1.2 Βραχυπρόθεσμη επιρροή τιμής

Η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος παρουσιάζει μία αύξηση, η οποία έχει άμεσο αντίκτυπο στον καταναλωτή. Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής παίζουν και οι συνθήκες της αγοράς (ελευθερία, συγκέντρωση αγοράς, ενεργειακά αποθέματα, μίξη καυσίμων, μέθοδος καταμερισμού των περιορισμών της αγοράς). Κυρίαρχο πρόβλημα είναι το πόσο επηρεάζει την *ενεργειακή σειρά αγοράς* (merit order) η κοστολόγηση του CO₂. Σε πρώτη φάση, η αύξηση της τιμής είναι οριακά υψηλότερη σε σχέση με το εάν η κοστολόγηση δε λάμβανε χώρα. Βέβαια, εάν δεν υπήρχε μεταβολή στην ενεργειακή σειρά κοστολόγησης και υπήρχε ταυτόχρονα τέλειος ανταγωνισμός, τότε η αύξηση του κόστους λόγω εκπομπής CO₂, θα υπεισερχόταν πλήρως στην τιμή του ηλεκτρισμού. Όλα αυτά έχουν αντίκρισμα στη χρονική περίοδο 2005-2007, ενώ ο μελλοντικός καταμερισμός κοστολόγησης CO₂ θα γίνει με μία διαδικασία «αναβάθμισης» των τρεχουσών συνθηκών. Εάν λάβουμε υπόψη όλους τους περιορισμούς για την εκπομπή CO₂ τότε είναι σαν να επανατοποθετούμε την τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος σε άλλη βάση. Προφανώς, κατά αυτόν τον τρόπο επηρεάζεται άμεσα η αγοραστική δύναμη του καθενός και η συγκέντρωση της αγοράς. Επομένως, κάποιιοι παραγωγοί θα επιδιώξουν να επηρεάσουν την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, σε αντίθεση με το εάν είχαμε τέλειο ανταγωνισμό. Το κατεστημένο οικοδόμημα αγοράς, λοιπόν, πλήττεται και πλέον οι εταιρίες διαπραγματεύονται μεταξύ ισχυρών και αδύναμων πελατών. Το γεγονός αυτό καθιστά τις αδύναμες επιχειρήσεις περισσότερο ανταγωνιστικές. Συμπερασματικά, η ελεύθερη αγορά ηλεκτρικού ρεύματος στην Ε.Ε. αναιρείται, ενώ οι περιορισμοί διέπουν ενεργά τις οικονομίες των κρατών μελών και τα μακροχρόνια «ηλεκτρικά» συμβόλαια αμφισβητούνται.

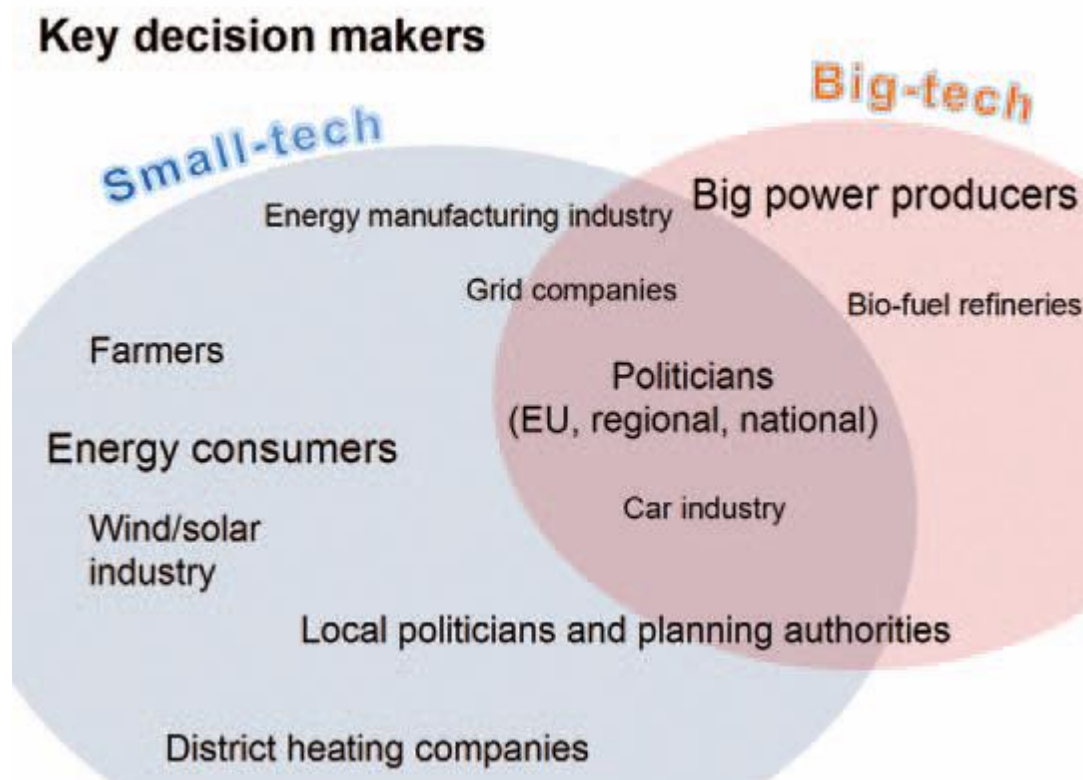
3.1.3 Μακροπρόθεσμες επιρροές στη μίξη καυσίμων και στην επένδυση

Αρχικά, είναι γνωστό ότι το βραχυπρόθεσμο οριακό κόστος μίας μονάδας καθορίζει εάν ο παραγωγός επιθυμεί να δημιουργήσει επιπλέον MWh ηλεκτρικής ενέργειας για τη διαμόρφωση μίας ενιαίας τιμής ηλεκτρικού ρεύματος. Εάν σε αυτή την τιμή υπάρχει ένα άνω όριο, τότε επαναπροσδιορίζεται το μακροπρόθεσμο οριακό κόστος. Με άλλα λόγια, η κοστολόγηση του CO₂ επηρεάζει τις αποφάσεις για επένδυση στον ενεργειακό τομέα (κατασκευή, λειτουργία και συντήρηση νέων μονάδων ηλεκτρικής ενέργειας). Παραδείγματος χάριν, εάν υπήρχε απουσία κοστολόγησης CO₂, οι εγκαταστάσεις γαιάνθρακα θα ήταν η πιο συμφέρουσα επιλογή,

παρουσία κοστολόγησης τα δεδομένα αλλάζουν και οι πυρηνικές καθώς και οι αιολικές εγκαταστάσεις εμφανίζονται ως οι ιδανικές επιλογές. Επίσης, η μακροπρόθεσμη τιμή ηλεκτρικού ρεύματος αυξάνει και επηρεάζει τη ζήτηση, σύμφωνα με τους νόμους της αγοράς. Εάν η αύξηση είναι περιορισμένη, η ζήτηση παραμένει ανεπηρέαστη. Παράλληλα, οι μακροπρόθεσμες επενδύσεις απομακρύνονται πλέον από τις εγκαταστάσεις γαιάνθρακα και αυτές του συνδυασμένου κύκλου αερίου (CCGT), με αποτέλεσμα να αναδύεται η ιδέα για περισσότερες εγκαταστάσεις φυσικού αερίου. Εν κατακλείδι, ο καταμερισμός των περιορισμών θα μειώσει μακροπρόθεσμα τις τιμές ηλεκτρικού ρεύματος.

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

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



Σχήμα 3: Βασικοί παράγοντες επιρροής των ευρωπαϊκών περιορισμών στις εκπομπές CO₂ και στην οικονομία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

3.2 Κατανομημένες επιπτώσεις του ευρωπαϊκού πλάνου εκπομπής CO₂

Σε πρώτη φάση γίνεται μία προσέγγιση για τον τρόπο κατά τον οποίο οι μεταβολές στις ποσότητες και στις τιμές αντικατοπτρίζονται στους καταναλωτές και στους παραγωγούς. Οι παραπάνω μεταβολές είναι προϊόν της κοστολόγησης των εκπομπών του CO₂, η οποία δημιουργεί κόστη και οφέλη από μία ενιαία παραγωγή χαμηλής εκπομπής.

3.2.1 Επιπτώσεις στους παραγωγούς

Το πλεονάζον κόστος παραγωγής καλύπτεται από το κεφάλαιο ή από άλλα καθορισμένα έξοδα. Καμία μεταβολή δεν εμφανίζεται στην ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος που παράγεται. Οι εγκαταστάσεις γαιάνθρακα και αερίου παρουσιάζουν αύξηση και στο κόστος παραγωγής, καθώς επίσης και στην τιμή πώλησης, ενώ οι πυρηνικές εγκαταστάσεις παρουσιάζουν αύξηση στην τιμή πώλησης, με σταθερό κόστος παραγωγής. Οι εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με πυκνότητα εκπομπών CO₂ υψηλότερη από την οριακή στάθμη πρόκειται να χάσουν το επιπλέον κέρδος, το οποίο θα είχαν χωρίς την κοστολόγηση της εκπομπής του CO₂, ενώ αυτές που παράγουν χαμηλότερα από την οριακή στάθμη αναμένεται να κερδίσουν. Συγκεκριμένα, οι υπάρχουσες εγκαταστάσεις με χαμηλές εκπομπές CO₂ θα υποστούν

μακροπρόθεσμες αυξήσεις στο πλεονάζον κέρδος παραγωγής, ενώ παράλληλα ο ανταγωνισμός θα εξαλείψει τα διαθέσιμα κέρδη στις νέες εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Συνοπτικά, καθώς αυξάνεται η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος, η ζήτηση μειώνεται και έχει ως αποτέλεσμα μία γενική μείωση της παραγωγής, καθώς επίσης και μείωση στο πλεονάζον κέρδος παραγωγής.

3.2.2 Επιπτώσεις στους καταναλωτές

Μία αύξηση στο οριακό κόστος συνεπάγεται αύξηση στην τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας, με προφανή μείωση της ζήτησης και τελικό συνεπακόλουθο τη μείωση του πλεονάζοντος κέρδους παραγωγής. Αυτή η διαδραστική ακολουθία γεγονότων φαίνεται άμεσα στο καταναλωτικό κοινό.

3.2.3 Λοιπές επιπτώσεις

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

3.3 Ανακεφαλαίωση

Τα περιοριστικά μέτρα για την εκπομπή CO₂ παρουσιάζουν πολυπρισματικές πτυχές για την ενεργειακή οικονομία ηλεκτρικού ρεύματος. Βέβαια, κάθε επίπτωση είναι χωροχρονικά προσδιορισμένη και άρρηκτα συνδεδεμένη με τις συνθήκες της αγοράς και τα όρια μεταβολής του κόστους. Καθώς αναφέρθηκε προηγουμένως, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και η τιμή πώλησης συνδέονται μακροπρόθεσμα και βραχυπρόθεσμα με την τιμολόγηση των εκπομπών CO₂. Επιπλέον, πρέπει να λάβουμε υπόψη τα αποθέματα ηλεκτρικής ενέργειας και τα όρια χωρητικότητας-ανεκτικότητας σε ηλεκτρικό ρεύμα της συνολικής αγοράς της Ε.Ε. Επιπρόσθετα, ανάλογα με την τεχνολογία παραγωγής για τις υπάρχουσες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι επιλογές ποικίλουν. Παρόλα αυτά, είναι σαφές ότι οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες εκπέμπουν μεγάλες ποσότητες CO₂ τείνουν να ζημιωθούν, ενώ αυτές που εκπέμπουν μικρές ποσότητες CO₂ τείνουν να κερδίσουν. Ταυτόχρονα, τα επιβληθέντα από την Ε.Ε. περιοριστικά μέτρα προκαλούν όφελος για τον καταναλωτή. Εν κατακλείδι, δεν πρέπει να αμεληθούν παράγοντες όπως τα όρια ελευθερίας της αγοράς ηλεκτρισμού, το εμπορικό περιοριστικό καθεστώς, ο βαθμός του διεθνούς ανταγωνισμού, η μεθοδολογία καταμερισμού αδειών εκπομπής CO₂ και το περιβάλλον ανταγωνισμού.

3.4 Η επιρροή των Ευρωπαϊκών μέτρων στις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος

Στην παρούσα ενότητα θα αναπτυχθεί και θα αναλυθεί το θέμα της επιρροής που ασκούν τα ευρωπαϊκά μέτρα στις τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος. Αρχικά, θα παρουσιασθεί το θέμα της μετάβασης από τις τιμές του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στις ενιαίες τιμές ενέργειας, καθώς επίσης και η δομή της αγοράς ενέργειας και τον τρόπο με τον οποίο αυτή επηρεάζεται από την εμπορία εκπομπών ρύπων. Στη συνέχεια, θα γίνει αναφορά στις ευρωπαϊκές απόψεις για την επιρροή των μέτρων εκπομπής ρύπων κατά τη μεταβατική περίοδο και θα παρουσιασθούν τα άμεσα/ευκαιριακά οφέλη από την εφαρμογή των μέτρων αυτών στην ευρωπαϊκή αγορά ενέργειας.

3.5 Το πέρασμα από τις τιμές του CO₂ στις ενιαίες τιμές ενέργειας

Σε πρώτη φάση, οι παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας προσκολλημένοι σε παραδοσιακές μορφές οικονομίας αδιαφορούν για τις ευκαιρίες που μπορεί να δημιουργηθούν μέσω της κατανομής δικαιωμάτων εκπομπής CO₂. Κατά αυτόν τον τρόπο, παρόλο που αρχικά δεν παρατηρείται κάποια μεταβολή στις τιμές ενέργειας, με την πάροδο του χρόνου όλοι αυτοί οι μηχανισμοί που προάγονται από τη διάθεση πρόνοιας της Ευρωπαϊκής Ένωσης θα επηρεάσουν αναπόφευκτα τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Αξίζει να τονισθεί ότι αν τα μέτρα παροχής δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ εφαρμοστούν με διαφορετικές συνθήκες κατά μήκος των χωρών της ευρωπαϊκής ηπείρου, υφίσταται πάντα ο κίνδυνος να ευνοηθούν κάποιες οικονομίες ενέργειας περισσότερο από τις υπόλοιπες. Το ίδιο, ωστόσο, είναι πιθανό να συμβεί αν τα μέτρα παροχής δικαιωμάτων εκπομπής CO₂ διαφοροποιηθούν σε κάθε εμπορική περίοδο.

Με βάση την προηγούμενη ανάλυση συνεπάγεται άμεσα ότι δεν είναι εφικτή η μη επιρροή των τιμών του ηλεκτρικού ρεύματος, δεδομένου του αυξημένου κόστους των μέτρων στις εκπομπές CO₂. Η ενεργειακή οικονομική πολιτική, η οποία στηρίζεται στην παροχή δικαιωμάτων εκπομπής CO₂, έχει ως άμεση επίπτωση την πρόκληση πιέσεων στις τιμές ενέργειας, δεδομένου ότι το πέρασμα από μία οικονομία με «ελεύθερη» κατανομή των ρύπων CO₂ σε ένα καθεστώς «πλειστηριασμού» δικαιωμάτων ρύπων προκαλεί ανακατατάξεις στον τρόπο σκέψης των παραγωγών. Η πλήρης αφομοίωση σε ένα τέτοιου είδους ανταγωνισμό δεν θα αργήσει να γίνει πραγματικότητα στις σύγχρονες ευρωπαϊκές ενεργειακές αγορές.

3.6 Δομή της αγοράς και πώς επηρεάζεται από την εμπορία εκπομπών ρύπων

Η δομή της ευρωπαϊκής ενεργειακής αγοράς και, ως συνέπεια, ο τρόπος αντίδρασής της υπάγεται σε τρία βασικά στοιχεία:

1. Ο αριθμός των βασικών «παιχτών» της ενεργειακής αγοράς, δεδομένο το οποίο υποδηλώνει τον ανταγωνισμό και την συγκέντρωση της ενεργειακής αγοράς.
2. Η μορφή της καμπύλης ζήτησης, ειδικότερα στις περιπτώσεις κατά τις οποίες είναι γραμμική και ίσο-ελαστική.
3. Η μορφή της καμπύλης παραγωγής, με έμφαση στο οριακό κόστος, το οποίο παρέμενε σταθερό πριν την εφαρμογή των μέτρων εκπομπών.

3.7 Οι ευρωπαϊκές απόψεις για την επιρροή των μέτρων εκπομπής ρύπων στη μεταβατική περίοδο

Στην παρούσα ενότητα, παρατίθενται βασικές μελέτες, οι οποίες έχουν πραγματοποιηθεί με σκοπό τη μελέτη της επιρροής παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO₂ στις ευρωπαϊκές αγορές ενέργειας κατά τη μεταβατική περίοδο καθολικής εφαρμογής των μέτρων.

Study	Country	Market	Period	'Pass-through rate'
Bauer and Zink (2005)	Germany	Forward	Jan.-June 2005	1.0
Bunn and Fezzi (2007)	UK	Spot	2005	0.42
Chernyavs'ka and Gulli (2007)	Italy	Spot	2005	0
			2006	-0.5 to 2.0
Frontier Economics (2006a)	Netherlands	Forward	2005	0.04 to 1.08
Frontier Economics (2006b)	UK,	Forward	2005	0.89-0.98
	Netherlands			0.91-0.96
	Scandinavian countries			0.97-0.98
Honkatukia et al. (2006)	Finland	Spot	Feb. 2005 - May 2006	0.75 to 0.95
Levy (2005)	France	Forward	January-June 2005	0.56
	Germany			0.48
	UK			1.84
	France	Spot	April-June 2005	2.21
	Germany			3.33
	Italy			2.04
	Spain			3.53
	UK			2.19
Sijm et al. (2005, 2006a and 2006b)	Germany	Forward	2005	0.60-1.17
	Netherlands			0.78-0.80
	Germany			Spot

Πίνακας 4: Ποσοστά μετάβασης στην εποχή εφαρμογής της παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO₂.

Στον ανωτέρω πίνακα συνοψίζονται τα ποσοστά μετάβασης στην εποχή εφαρμογής της παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO₂, τα οποία εκφράζονται δια μέσω του ρυθμού μετάβασης (pass-through-rate). Καθώς παρατηρείται από τον πίνακα αυτό, είναι δύσκολο να εξαχθούν αξιόπιστα και ασφαλή συμπεράσματα για την καθολική εφαρμογή σε όλη την έκταση της Ευρώπης, της μεθόδου παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO₂. Παρόλα αυτά, είναι προφανές ότι η εφαρμογή μέτρων στην εκπομπή ρύπων CO₂ έχει αντίκτυπο στις τιμές ενέργειας σε όλη την Ευρώπη.

Επιπρόσθετα, αξίζει να επισημανθεί ότι όλες οι μελέτες, των οποίων τα συμπεράσματα συμπεριλαμβάνονται στον ανωτέρω πίνακα, έχουν διεξαχθεί σε απελευθερωμένες οικονομίες και όχι σε ανταγωνιστικές της Δυτικής Ευρώπης. Η διακύμανση, η οποία παρατηρείται στις τιμές πηγάζει από τη διαφορετική διείσδυση των επιμέρους τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας μεταξύ των χωρών που αναφέρονται στον πίνακα και, επιπλέον, από τη διαφορετική αποδοτικότητα των παρωχημένων τεχνολογιών άνθρακα.

Study	Country	Model	CO ₂ price	ETS-induced increase in power price [€/MWh]
IPA (2005)	UK	Dynamic	15-25	5-16
Kara et al. (2007)	Finland	Static	20	15
Linares et al. (2006)	Spain	Dynamic	7-15	3-5
Oranen (2006) ^a	Nordic area	Static	20	1-8
Sijm et al. (2005) ^a	Belgium	Static	20	7-4
	France			2-5
	Germany			10-19
	The Netherlands			5-11

Πίνακας 5: Αύξηση από 1 έως 19€/MWh, έπειτα από την εφαρμογή των ευρωπαϊκών μέτρων παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO₂.

Με βάση την προαναφερθείσα ανάλυση καθώς επίσης και την παράλληλη ανάλυση των οικονομιών, εξάγονται τα ακόλουθα βασικά συμπεράσματα, σχετικά με την επιρροή της εφαρμογής της παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO₂ στις ευρωπαϊκές αγορές ενέργειας.

1. Σε γενικές γραμμές οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας που συμμετείχαν στην ανάλυση έχουν αυξηθεί από τις αρχές του 2005 μέχρι τα μέσα του 2006. Στις επονομαζόμενες «spot» αγορές αυτές οι τιμές είναι αρκετά ευμετάβλητες.
2. Αυτές οι επικείμενες αυξήσεις θα έχουν ως συνέπεια την αύξηση της τιμής των καυσίμων ειδικότερα σε οικονομίες παραγωγής ενέργειας μέσω καυσίμων (όπως είναι και η ελληνική).
3. Τέλος, πρέπει να τονισθεί ότι έπειτα από την κατάρρευση της τιμής του άνθρακα, η επιρροή των επιταγών της Ευρωπαϊκής Ένωσης δεν είναι εμφανής στις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας

3.8 Τα άμεσα-ευκαιριακά οφέλη από την εφαρμογή των μέτρων

Για πολλούς από τους παραγωγούς ενέργειας η εφαρμογή των νέων αυτών μέτρων παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO₂ από την Ευρωπαϊκή Ένωση λειτούργησε ως πηγή επιπλέον, σίγουρων και χωρίς επιπρόσθετο παραγωγικό κόπο εσόδων (“windfall profits”). Η παραπάνω παρατήρηση αποτελεί μία σύγχρονη πραγματικότητα, δεδομένου ότι πολλοί ενεργειακοί παραγωγοί είναι στη ευτυχή θέση να καρπωθούν επιπλέον κέρδη διαπραγματευόμενοι τις εκπομπές τους σε διοξείδιο του

άνθρακα CO₂ κατάλληλα. Ένα συγκεκριμένο παράδειγμα, επιπρόσθετης πηγής εσόδων των παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας έπειτα από την εφαρμογή των μέτρων παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO₂, αποτελούν οι παραγωγοί ενέργειας, οι οποίοι επένδυσαν σε νέες τεχνολογίες πριν εφαρμοσθούν τα μέτρα (περίοδος 2005-2012), οι οποίοι προφανώς έχουν ήδη πλεονέκτημα σε αυτό το «χρηματιστήριο» αγοράς και πώλησης ρύπων και δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων.

Κατά αυτόν τον τρόπο, οι παραγωγοί ενέργειας είναι δυνατόν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες, με βάση τα οφέλη που δημιουργούνται για αυτούς:

1. Επιβεβλημένα οφέλη που αντικατοπτρίζονται στο κόστος παραγωγής, στις τιμές ενέργειας και στον όγκο πωλήσεων (**‘windfall A’**). Σε αυτήν την περίπτωση τίθεται το δίλημμα: Να αγοράσω και να διαπραγματευτώ τα δικαιώματα εκπομπών μου εξ’ ολοκλήρου ή να επενδύσω σε νέες τεχνολογίες και κατά συνέπεια να αποκτήσω μόνος μου δωρεάν τις εκπομπές μου; Προφανώς, τα δευτερεύοντα οφέλη από αυτό το δίλημμα είναι αδιαμφισβήτητα. Συνεπώς, οι παραγωγοί στρέφονται σε νέες τεχνολογίες, επενδύουν, ευνοούν και ευνοούνται.
2. Υποχρεωτικά οφέλη που πηγάζουν από την ελεύθερη αγορά, πώληση και διακίνηση των δικαιωμάτων εκπομπών μεταξύ κρατών, μεγάλων παραγωγών και μικρών παραγωγών (**‘windfall B’**).

Η «διαμάχη» ανάμεσα στις δύο παραπάνω κατηγορίες έχει σχέση με το είδος του παραγωγού ενέργειας είναι ο υπό μελέτη παραγωγός. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν η Σουηδία και η Γαλλία, οι οποίες έχουν επενδύσει χρόνια σε νέες μη ρυπογόνες τεχνολογίες και κατά συνέπεια καρπώνονται άμεσα τα οφέλη της πρώτης κατηγορίας.

Ανακεφαλαιώνοντας την παρούσα ενότητα, αξίζει να αναφερθεί ότι οι ενεργειακοί-οικονομικοί αναλυτές με σκοπό την επίτευξη της μελέτης και της κατανόησης εις βάθος των αλλαγών στην ευρωπαϊκή αγορά ενέργειας έπειτα από την εφαρμογή των μέτρων παροχής δικαιωμάτων εκπομπής ρύπων CO₂ έχουν προτείνει μια σειρά θεμάτων ανάλυσης. Οι παρακάτω κατηγορίες αξίζει να ερευνηθούν στα πλαίσια του χρηματιστηρίου ρύπων:

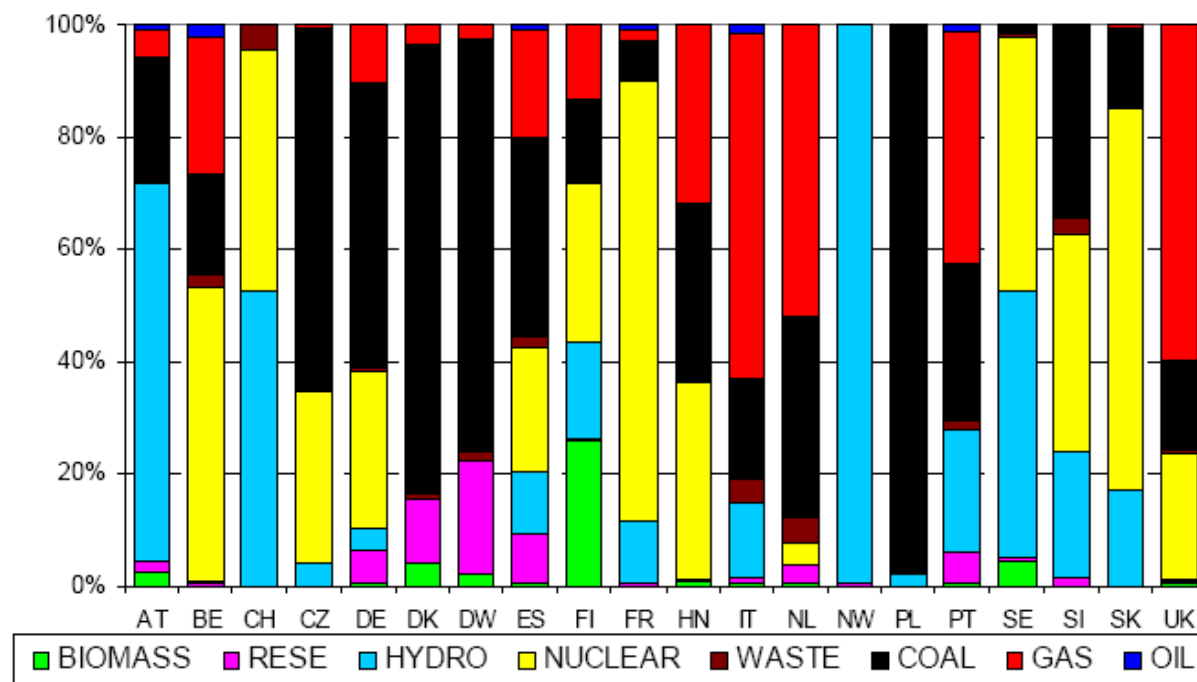
1. Πλειστηριασμοί- Δημοπρασίες (Auctioning)
2. Έμμεση απόδοση επιτρεπτόν ορίων εκπομπών σε καταναλωτές (Allocation to power consumers)
3. Εφαρμογή ενός μέτρου αναφοράς για την ελεύθερη κατανομή των ρύπων (Benchmarking)
4. Προτάσεις για να απαλύνουν τις τιμές άνθρακα (Reducing)
5. Έλεγχος και κανονικοποίηση των τιμών ενέργειας (Regulating)
6. «Τόνωση» ανταγωνιστικών αγορών ενέργειας (Encouraging)
7. Φορολογία των κερδών από την εμπορία των ρύπων (Taxing)

Ο παρακάτω πίνακας αποτελεί μία περιληπτική παρουσίαση των προηγούμενων θεμάτων και προσπαθεί να δείξει τις επιρροές τους, όπου με το σύμβολο + αντιπροσωπεύεται η θετική επιρροή, με το σύμβολο – η αρνητική επιρροή και με το σύμβολο ? υποδηλώνεται η ελλιπής γνώση για την προκαλούμενη επιρροή.

Option	Impact on power prices	Impact on windfall profits	
		Type A	Type B
1. Auctioning	0/+?	0/+?	-
2. Allocation to power consumers	0/+?	0/+?	-
3. Benchmarking:			
• <i>Fixed (ex-ante) cap</i>	0	0	0
• <i>Variable (ex-post) cap</i>	-/0?	-/0?	-
4. Reducing EUA price by:			
• <i>Increasing JI/CDM credits</i>	-	-	-
• <i>Other carbon reducing policies</i>	-	-	-
• <i>Encouraging carbon saving technologies</i>	-	-	-
5. Regulating power prices	-	-	-
6. Encouraging market competition	-/+?	-/+?	-/+?
• <i>By free allocation to new entrants</i>	-/0?	-/0?	-/0?
7. Taxing windfall profits	0	-	-

Πίνακας 6: Παράμετροι που πρέπει να ερευνηθούν στα πλαίσια του χρηματιστηρίου ρύπων.

Το γενικό ερώτημα που προκύπτει από την ανωτέρω ανάλυση είναι ποιες χώρες θα ευνοηθούν τελικά, ποιοι παραγωγοί θα συνεχίσουν τις εκπομπές τους με τον ίδιο ρυθμό και ποιοί όχι. Κάποια ενεργειακά μοντέλα προσπαθούν να δώσουν απαντήσεις σε αυτό το μήκος κύματος, ωστόσο, είναι ακόμα αρκετά νωρίς για να εξαχθούν εποικοδομητικά συμπεράσματα. Με στόχο την απάντηση, ως ένα βαθμό αυτού του προβληματισμού, παρατίθεται ο ακόλουθος πίνακας με την κατανομή πηγών παραγωγής ενέργειας σε κάθε χώρα.



Πίνακας 7: Κατανομή πηγών παραγωγής ενέργειας σε κάθε χώρα.

Από τον παραπάνω πίνακα παρατηρείται ότι κύριες πηγές παραγωγής ενέργειας παραμένουν ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Ωστόσο όμως είναι προφανές ότι το κατεστημένο αυτό πρέπει να αλλάξει. Βέβαια, εξαίρεση αποτελούν χώρες όπως η Γαλλία και «ο παράδεισος της υδροηλεκτρικής ενέργειας», η Νορβηγία. Με δεδομένο αυτό το χάρτη τεχνολογιών είναι σαφές ότι κάθε χώρα θα επηρεαστεί διαφορετικά από την εφαρμογή των μέτρων της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

3.9 Κατηγορίες Ενεργειακών Μοντέλων

Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν αναπτυχθεί και αναφέρονται αναλυτικά στη βιβλιογραφία, αρκετά μοντέλα που αφορούν το στρατηγικό σχεδιασμό και τη χάραξη πολιτικών στον ενεργειακό τομέα. Τα περισσότερα από τα μοντέλα αυτά έχουν αναπτυχθεί για το σχεδιασμό βάση σεναρίου, όπως στην περίπτωση του μοντέλου που αναπτύσσεται στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τα μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό βάση σεναρίου μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με βάση διαφορετικά κριτήρια. Η πρώτη βασική κατηγοριοποίηση είναι ανάμεσα σε μοντέλα βελτιστοποίησης και προσομοίωσης. Με σκοπό την κάλυψη μίας δοσμένης ζήτησης ενέργειας μέσα από συνδυασμούς πηγών ενέργειας χρησιμοποιούνται τα μοντέλα βελτιστοποίησης, τα οποία στοχεύουν είτε στην ελαχιστοποίηση του κόστους είτε στην ελαχιστοποίηση των εκπομπών ρύπων, παραδείγματος χάριν των εκπομπών CO₂, είτε στην ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση και των δύο παραμέτρων. Σε αντίθεση τα μοντέλα προσομοίωσης δεν στοχεύουν στη βελτιστοποίηση κάποιας συγκεκριμένης παραμέτρου του προτεινόμενου μοντέλου, παρόλο που συμπεριλαμβάνουν αλγόριθμους βελτιστοποίησης, αλλά επιτρέπουν στους

σχεδιαστές να δοκιμάσουν την ευρωστία μιας πολιτικής ή στρατηγικής, δεδομένων κάποιων προκαθορισμένων συνθηκών. Οι σχεδιαστές είναι σε θέση μέσω των μοντέλων προσομοίωσης να καταλήξουν σε κάποια εύρωστη πολιτική ή στρατηγική, η οποία ωστόσο δεν είναι απαραίτητα η βέλτιστη. Παρόλα ταύτα, μελετώντας το σχεδιασμό βάση σεναρίων σε βάθος χρόνου (μακροπρόθεσμο διάστημα), όπου η αντιμετώπιση της αβεβαιότητας είναι το κύριο ζητούμενο, τα μοντέλα προσομοίωσης είναι καταλληλότερα διότι οδηγούν σε μια εύρωστη (robust) πολιτική, δηλαδή μια πολιτική που αποδίδει καλύτερα για τα περισσότερα δυνατά σενάρια.

Ορισμένα από τα πιο γνωστά μοντέλα βελτιστοποίησης είναι το MARKAL και το TIMES, τα οποία δημιουργούν τεχνο-οικονομικά μοντέλα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να παράγουν σενάρια για την ανάλυση του μέλλοντος σε ένα συγκεκριμένο ενεργειακό τομέα ή ολόκληρο τον ενεργειακό τομέα. Τα απαραίτητα δεδομένα τα οποία στοιχειοθετούν ένα σενάριο είναι οι καμπύλες ζήτησης και προσφοράς, οι βασικές υποθέσεις για τις πολιτικές, η διαθεσιμότητα των τεχνολογιών και τα αποθέματα. Το μοντέλο MARKAL εξετάζεται για ένα σύνολο διαφορετικών πιθανών χαρακτηριστικών της ζήτησης ενέργειας και από αυτά προσδιορίζεται ο όσο δυνατόν λιγότερο ακριβός συνδυασμός για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών.

Επιπρόσθετα, εκτός από την προηγούμενη διάκριση των μοντέλων σε μοντέλα βελτιστοποίησης και προσομοίωσης, τα μοντέλα είναι δυνατόν να κατηγοριοποιηθούν σε ντετερμινιστικά ή στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης. Ένα μοντέλο προσομοίωσης χαρακτηρίζεται ως ντετερμινιστικό, εάν δεν περιλαμβάνει πιθανολογικά (δηλαδή "τυχαία") τμήματα. Βασικό χαρακτηριστικό των ντετερμινιστικών μοντέλων είναι η καθορισμένη έξοδος τους, δεδομένου του συνόλου των ποσοτήτων και σχέσεων εισόδου του μοντέλου. Σε αντίθεση με τα ντετερμινιστικά μοντέλα, τα στοχαστικά μοντέλα προσομοίωσης χαρακτηρίζονται από τυχαιότητα ως προς τις εισόδους τους και αντίστοιχα ως προς την προκύπτουσα έξοδό τους.

Ανακεφαλαιώνοντας αξίζει να τονισθεί ότι τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν πειραματική μέθοδο προσέγγισης των μοντελοποιημένων προβλημάτων βελτιστοποίησης και έχουν ως στόχο τη βελτιστοποίηση του συστήματος, τη μελέτη της λειτουργίας του και την ανάλυση της ευαισθησίας του. Σε πολλά προτεινόμενα προβλήματα στη βιβλιογραφία είναι αδύνατη η αναλυτική μαθηματική τους επίλυση και για το λόγο αυτό τα μοντέλα προσομοίωσης αποτελούν τη μόνη καλή προσέγγιση για την επίλυση αυτού του είδους των προβλημάτων. Επιπρόσθετα, τα πλεονεκτήματα της χρήσης των μοντέλων προσομοίωσης είναι πολυάριθμα. Βασικά πλεονεκτήματα των μοντέλων προσομοίωσης είναι η μείωση του κόστους για την αντιμετώπιση του προτεινόμενου προβλήματος, η μεγαλύτερη ευαισθησία στην αντίληψη των σχέσεων μεταξύ των προβλημάτων, η δυνατότητα επανάληψης του ίδιου φαινομένου για οποιοδήποτε πλήθος επαναλήψεων επιθυμεί ο χρήστης του μοντέλου, η δυνατότητα πλήρους ενόρασης του συστήματος που εξετάζεται από όλες τις πλευρές και η ασφάλεια ως προς τα αποτελέσματα της μεθόδου χρήσης των μοντέλων προσομοίωσης.

Το σύνολο των ενεργειακών μοντέλων παρουσιάζουν ορισμένα βασικά κοινά χαρακτηριστικά, όπως οι είσοδοι, οι έξοδοι, η δομή του, η οικονομική λογική, η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί πάνω στα οποία βασίζεται η ανάλυση του μοντέλου, η μελέτη του και η εξαγωγή αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων από αυτό. Τα κοινά αυτά χαρακτηριστικά των ενεργειακών μοντέλων χαρακτηρίζουν το μοντέλο ανεξάρτητα εάν αυτό αποτελεί μοντέλο βελτιστοποίησης ή μοντέλο προσομοίωσης ή ντετερμινιστικό ή στοχαστικό μοντέλο. Στην ανάλυση που ακολουθεί παρουσιάζονται και επεξηγούνται τα κοινά χαρακτηριστικά των ενεργειακών μοντέλων, τα οποία προαναφέρθηκαν.

3.10 Στοιχεία ενός τυπικού οικονομικού - ενεργειακού μοντέλου

3.10.1 Είσοδοι

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

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

Στη συνέχεια αναλύεται διεξοδικά καθένας από τους τέσσερις τύπους δεδομένων, οι οποίοι αποτελούν το προτεινόμενο σενάριο, το οποίο θα αποτελέσει την είσοδο στο υπό μελέτη ενεργειακό μοντέλο.

3.10.1.1 Ζήτηση ενεργειακών υπηρεσιών

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

Στην περίπτωση της οργάνωσης του μοντέλου για εναλλακτικά σενάρια, κάθε μοντέλο έχει την ικανότητα του υπολογισμού της μεταβολής της ζήτησης ως προς τους μεταβαλλόμενους όρους ενός εναλλακτικού σεναρίου. Με στόχο αυτόν τον υπολογισμό, το μοντέλο απαιτεί ακόμη ένα σύνολο μεταβλητών εισόδου που είναι οι ελαστικότητες της τιμής για διαφορετικές τιμές της ζήτησης (elasticities of the demands to their own prices). Στην πραγματικότητα όμως, κάθε μοντέλο εξελίσσεται και αναπτύσσεται όχι με μοναδικό γνώμονα την απόλυτη ζήτηση, αλλά από τις καμπύλες ζήτησης σε σχέση με την τιμή της ενέργειας (demand curves).

3.10.1.2 Διαθεσιμότητα πόρων

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

3.10.1.3 Πολιτική που έχει τεθεί

Στο μέτρο που μια πολιτική επηρεάζει το ενεργειακό σύστημα, μπορεί να αποτελέσει αναπόσπαστο τμήμα του καθορισμού ενός σεναρίου. Παραδείγματος χάριν, ένα σενάριο που δε λαμβάνει υπόψη πολιτικές (no-policy scenario) μπορεί να αγνοήσει εντελώς τις εκπομπές των διάφορων ρύπων, ενώ σενάρια εναλλακτικών πολιτικών (alternate policy scenarios) μπορεί να επιβάλουν περιορισμούς εκπομπών ή φόρους εκπομπής. Η λεπτομερής αποτύπωση των διαθέσιμων τεχνολογιών στα ενεργειακά μοντέλα επιτρέπει την προσομοίωση μιας ευρείας ποικιλίας τόσο στοχευμένων μέτρων (micromeasures) όπως είναι τα τεχνολογικά χαρτοφυλάκια (technology portfolios) και οι στοχοθετημένες επιχορηγήσεις σε ομάδες τεχνολογίας (targeted subsidies to groups of technologies) όσο και ευρύτερων πολιτικών όπως είναι ο γενικός φόρος άνθρακα (general carbon tax) ή το σύστημα εμπορικών συναλλαγών δικαιωμάτων εκπομπών αερίου. Απλούστερα παραδείγματα πολιτικής αποτελούν ο περιορισμός της μελλοντικής επέκτασης των πυρηνικών εγκαταστάσεων, η επιβολή φόρων στα καύσιμα ή η χορήγηση βιομηχανικών επιχορηγήσεων.

3.10.1.4 Περιγραφές ενός συνόλου τεχνολογιών

Το τέταρτο και τελευταίο συστατικό ενός πλήρους σεναρίου είναι το σύνολο των τεχνικών και οικονομικών παραμέτρων που λαμβάνονται υπόψη για το μετασχηματισμό των αρχικών πόρων σε ενεργειακές υπηρεσίες. Οι σχετικές τεχνοοικονομικές παράμετροι περιγράφονται με τη μορφή τεχνολογιών που

μετασχηματίζουν μερικά προϊόντα σε άλλα (καύσιμα, υλικά, ενεργειακές υπηρεσίες, εκπομπές). Επιπρόσθετα, μερικές τεχνολογίες μπορούν να επιβληθούν ενώ άλλες μπορούν απλά να είναι διαθέσιμες στους επενδυτές και καταναλωτές ενέργειας.



Σχήμα 4: Εναλλακτικές/Ανανεώσιμες μορφές ενέργειας.

3.10.2 Έξοδοι

Χρησιμοποιώντας τα προαναφερόμενα, το μοντέλο δίνει ως έξοδο την παροχή ενεργειακών υπηρεσιών με το ελάχιστο συνολικό κόστος (minimum global cost) ή ακριβέστερα με την ελάχιστη απώλεια συνολικού πλεονάσματος (minimum loss of total surplus), λαμβάνοντας ταυτόχρονα αποφάσεις σχετικές με την επένδυση σε εξοπλισμό (equipment investment), τη λειτουργία του εξοπλισμού (equipment operation) και την προσφορά ενέργειας και το ενεργειακό εμπόριο (energy trade).

Ειδικότερα, για κάθε δεδομένο πλήρες σενάριο, το οποίο αποτελεί είσοδο στο μοντέλο, η λύση του γραμμικού προγράμματος του μοντέλου, για κάθε χρονική περίοδο και σε κάθε περιοχή, προσδιορίζει τις ακόλουθες εξόδους:

- Το σύνολο των επενδύσεων σε όλες τις τεχνολογίες.
- Τα επίπεδα λειτουργίας όλων των τεχνολογιών (operating levels of all technologies).
- Τις εισαγωγές και τις εξαγωγές κάθε τύπου εμπορεύσιμων ενεργειακών μορφών και υλικών.
- Τις παραγόμενες ροές (ηλεκτρισμού και μη) από κάθε τεχνολογία.
- Τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου κάθε ουσίας από κάθε τεχνολογία, κάθε τομέα και σύνολο.

3.10.3 Δομή

Η δομή ενός ενεργειακού μοντέλου καθορίζεται και προσδιορίζεται από τις εξισώσεις και τις μεταβλητές, οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζονται από τα δεδομένα που παρέχονται από το χρήστη. Επιπλέον, με σκοπό την εύρυθμη λειτουργία του μοντέλου, απαιτείται μία βάση δεδομένων, η οποία περιέχει τόσο ποιοτικά (qualitative data) όσο και ποσοτικά δεδομένα (quantitative data).

Τα ποιοτικά δεδομένα είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν τους καταλόγους πηγών ενέργειας (lists of energy carriers), τους καταλόγους των τεχνολογιών που ο δημιουργός του μοντέλου πιστεύει ότι ισχύουν σε κάθε περιοχή κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα που μελετάται, καθώς επίσης και τις εκπομπές αερίων που πρόκειται να υπολογιστούν. Στη συνέχεια, οι πληροφορίες αυτές μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε υποομάδες. Παραδείγματος χάριν, οι πηγές ενέργειας μπορούν να ομαδοποιηθούν σύμφωνα με τον τύπο τους σε ορυκτά καύσιμα, σε πυρηνική ενέργεια, σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τα λοιπά.

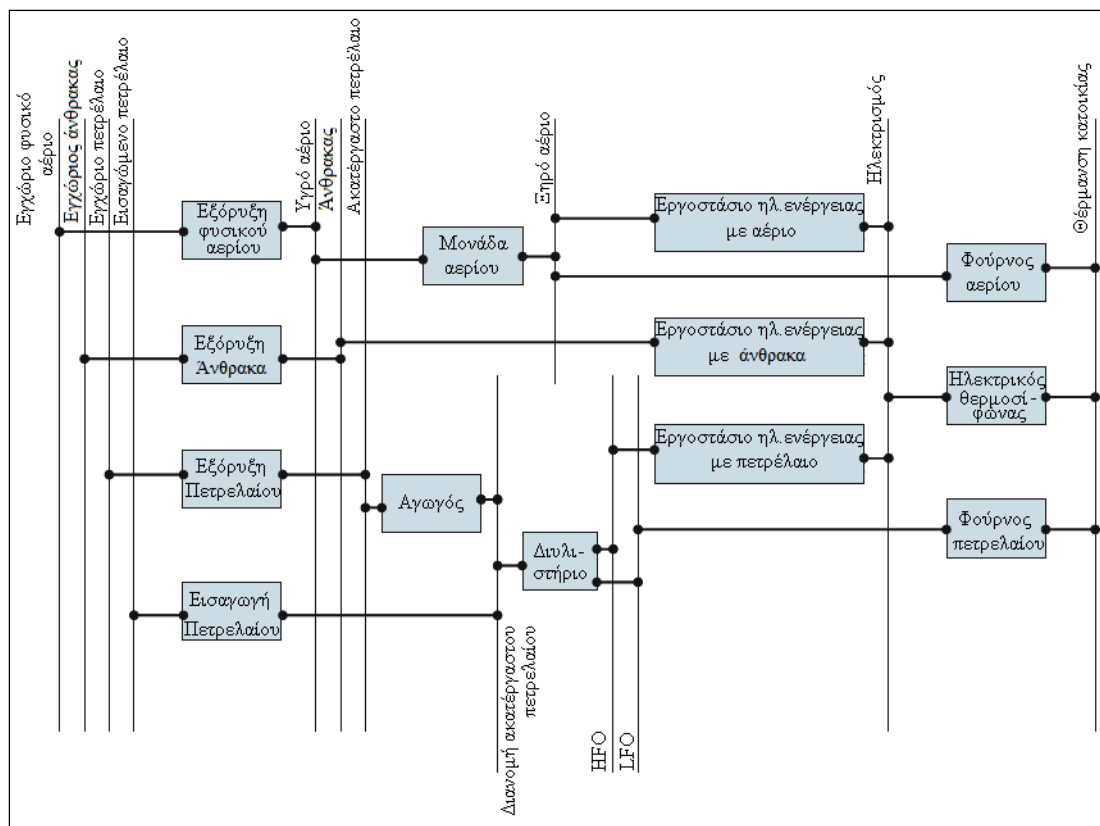
Τα ποσοτικά δεδομένα, αντίθετα, περιγράφουν τις τεχνολογικές και οικονομικές τιμές των παραμέτρων για κάθε τεχνολογία, κάθε περιοχή και κάθε χρονικό διάστημα. Κατά τη διαμόρφωση ενεργειακών μοντέλων πολλών περιοχών είναι συχνή η περίπτωση μιας τεχνολογίας που μπορεί να είναι διαθέσιμη για χρήση σε δύο διακριτές περιοχές εντούτοις, οι υποθέσεις δαπανών και απόδοσης μπορούν να είναι διαφορετικές.

3.10.4 Η θεώρηση Ενεργειακό Σύστημα Αναφοράς (Reference Energy System-RES)

Κάθε ενεργειακό μοντέλο περιλαμβάνει τρεις τύπους οντοτήτων:

- Οι *τεχνολογίες*, επίσης αποκαλούμενες και συναρτήσεις ή διαδικασίες, είναι αναπαραστάσεις φυσικών συσκευών που μετασχηματίζουν αγαθά σε άλλα αγαθά. Οι διαδικασίες μπορούν να είναι αρχικές πηγές αγαθών, όπως είναι οι διαδικασίες εξόρυξης (mining processes), οι διαδικασίες εισαγωγών (import processes), ή δραστηριότητες μετασχηματισμού (transformation activities) όπως είναι οι εγκαταστάσεις μετατροπής οι οποίες παράγουν ηλεκτρική ενέργεια, οι εγκαταστάσεις επεξεργασίας ενέργειας (energy-processing plants) όπως είναι τα διυλιστήρια και οι συσκευές ζήτησης τελικής χρήσης (end-use demand devices) όπως είναι τα αυτοκίνητα ή συστήματα θέρμανσης.
- Τα *προϊόντα ή αγαθά* που παράγονται με κάποια διαδικασία ή διαδικασίες ή/και καταναλώνονται με κάποια άλλη διαδικασία ή διαδικασίες.
- Οι *ροές προϊόντων* είναι οι συνδέσεις μεταξύ των διαδικασιών και των προϊόντων. Μια ροή προϊόντων είναι της ίδιας φύσης με τα προϊόντα αλλά είναι συνδεδεμένη με μια συγκεκριμένη διαδικασία και περιγράφει μια είσοδο ή μια έξοδο διαδικασίας. Παραδείγματος χάριν, το πετρέλαιο θέρμανσης είναι προϊόν, ενώ το πετρέλαιο θέρμανσης για οικιακή κατανάλωση είναι μια ροή προϊόντος.

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



Σχήμα 5: Παράδειγμα ενεργειακού συστήματος αναφοράς (RES).

3.10.5 Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις διαδικασίες

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

- Τεχνικές παράμετροι.** Οι τεχνικές παράμετροι περιλαμβάνουν την αποδοτικότητα (efficiency), τον παράγοντα διαθεσιμότητας (availability factor), τις καταναλώσεις προϊόντων ανά μονάδα δραστηριότητας, την λειτουργική διάρκεια ζωής μιας διαδικασίας, τη χρονική διάρκεια κατασκευής και τη χρονική διάρκεια αποσυρμού (dismantling lead-time).
- Οικονομικές και πολιτικές παράμετροι.** Οι οικονομικές και πολιτικές παράμετροι περιλαμβάνουν τις δαπάνες που συνδέονται με την επένδυση, την αποσυρμού και τη συντήρηση και τη λειτουργία μιας διαδικασίας. Επιπλέον, περιλαμβάνονται οι φόροι και οι επιχορηγήσεις, καθώς και η οικονομική ζωή μιας διαδικασίας (economic life of a process), που είναι ο χρόνος κατά τη διάρκεια του οποίου το κόστος επένδυσης μιας διαδικασίας αποσβένεται.
- Άνω και κάτω όρια.** Τα άνω και κάτω όρια μπορούν να επιβληθούν στην επένδυση, καθώς επίσης στην ικανότητα και στη δραστηριότητα μιας διαδικασίας.

3.10.6 Οι παράμετροι που σχετίζονται με τα προϊόντα

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

- Τεχνικές παράμετροι. Στις τεχνικές παραμέτρους ανήκουν η γενική αποδοτικότητα, παραδείγματος χάριν αποδοτικότητα δικτύου μεταφοράς και οι ετήσιες καμπύλες ζήτησης και φορτίων.
- Οικονομικές παράμετροι. Οι οικονομικές παράμετροι περιλαμβάνουν τις συμπληρωματικές δαπάνες, τους φόρους και τις επιχορηγήσεις στην παραγωγή προϊόντων. Στην περίπτωση μιας υπηρεσίας ζήτησης, οι πρόσθετες παράμετροι είναι η ελαστικότητα τιμών-ζήτησης (demand's own-price elasticity), το συνολικό επιτρεπόμενο εύρος της διακύμανσης της τιμής από τη ζήτηση και ο αριθμός των βημάτων (steps) για τη διακριτή προσέγγιση (discrete approximation) της καμπύλης.
- Παράμετροι βασισμένες στην ακολουθούμενη πολιτική. Οι παράμετροι αυτές περιλαμβάνουν τα όρια ζήτησης των προϊόντων, την παραγωγή προϊόντων, τις εισαγωγές και τις εξαγωγές προϊόντων από μια περιοχή.

3.10.7 Οι παράμετροι που σχετίζονται με τις ροές προϊόντων

Μια ροή προϊόντων (commodity flow) ή απλούστερα μια ροή (flow) είναι μια ποσότητα προϊόντων που παράγεται ή που καταναλώνεται σε μια δεδομένη διαδικασία. Κάθε διαδικασία χαρακτηρίζεται από ροές προϊόντων που εισάγονται και από ροές προϊόντων που εξάγονται, οι οποίες είναι διαφορετικού τύπου μεταξύ τους (καύσιμα, υλικά, ζήτηση ή εκπομπές).

- Οι τεχνικές παράμετροι επιτρέπουν τον πλήρη έλεγχο του μέγιστου ή/και του ελάχιστου μεριδίου μιας δεδομένης εισαγωγής ή της ροής παραγωγής που μπορεί να ληφθεί στην ίδια ομάδα προϊόντων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί μια ευέλικτη τουρμπίνα, η οποία μπορεί να δεχτεί πετρέλαιο ή φυσικό αέριο ως ροή εισαγωγής και ο υπεύθυνος μοντελοποίησης μπορεί να χρησιμοποιήσει μια παράμετρο για να περιορίσει το μερίδιο του πετρελαίου το πολύ στο 40% της συνολικής εισαγωγής καυσίμων στην τουρμπίνα.
- Άλλες παράμετροι και σύνολα τα οποία καθορίζουν το ποσό ορισμένων εκροών προϊόντων σε σχέση με συγκεκριμένες εισροές είναι η αποδοτικότητα και το ποσοστό εκπομπής από καύσιμα. Παραδείγματος χάριν, σε εγκαταστάσεις καθαρισμού πετρελαίου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία παράμετρος η οποία να καθορίζει το συνολικό ποσό καθαρισμένου προϊόντος ίσο με το 92% του συνολικού ποσού εισαγωγών στις εγκαταστάσεις καθαρισμού.

- Τέλος, οι οικονομικές παράμετροι περιλαμβάνουν φόρους, επιχορηγήσεις και άλλες δαπάνες που συνδέονται με μια μεμονωμένη ροή διαδικασίας.

3.11 Η οικονομική λογική των μοντέλων μερικής ισορροπίας

Το σύνολο των μοντέλων μερικής ισορροπίας (partial equilibrium models) έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό γνώρισμα, το οποίο είναι η ταυτόχρονη διαμόρφωση της παραγωγής προϊόντων, της κατανάλωσής τους και του προσδιορισμού των τιμών τους. Στα μοντέλα μερικής ισορροπίας, τα προϊόντα τα οποία συνήθως μελετώνται είναι τα καύσιμα και οι υπηρεσίες ενέργειας. Επιπρόσθετα, η τιμή της παραγωγής προϊόντων έχει επιπτώσεις στη ζήτηση των προϊόντων, αλλά και αντιστρόφως η ζήτηση έχει επιπτώσεις στην τιμή τους. Με σκοπό τον χαρακτηρισμό της κατάστασης μίας αγοράς σε κατάσταση ισορροπίας (equilibrium), ικανή και αναγκαία συνθήκη είναι οι τιμές p^* και οι ποσότητες q^* των προϊόντων να είναι τέτοιες ώστε κανένας καταναλωτής να μην επιθυμεί να αγοράσει ποσότητα μικρότερη από q^* σε τιμή p^* , αλλά και κανένας παραγωγός να μην επιθυμεί να παράγει ποσότητα μεγαλύτερη από q^* σε τιμή p^* . Οι μεταβλητές p^* και q^* είναι διανύσματα των οποίων η διάσταση είναι ίση με τον αριθμό των διαφορετικών προϊόντων που πρόκειται να μοντελοποιηθούν.

Στη συνέχεια αναλύονται οι βασικές ιδιότητες, οι οποίες διέπουν την κατάσταση ισορροπίας του ενεργειακού μοντέλου. Η κατάσταση ισορροπίας χαρακτηρίζεται από τρεις θεμελιώδεις ιδιότητες, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- η γραμμικότητα (linearity),
- η μεγιστοποίηση του πλεονάσματος (maximization of surplus) και
- η ανταγωνιστικότητα των αγορών ενέργειας (competitiveness of energy markets).

Οι ιδιότητες αυτές οδηγούν σε δύο πρόσθετα χαρακτηριστικά γνωρίσματα, τα οποία είναι η τιμολόγηση βάσει του οριακού κόστους (marginal cost pricing) και η ιδιωτική συμπεριφορά μεγιστοποίησης κέρδους.

3.11.1 Γραμμικότητα

Σε μια πραγματική οικονομία, μια δεδομένη τεχνολογία είναι συνήθως διαθέσιμη σε διακριτά μεγέθη, παρά σε συνεχή. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι εγκαταστάσεις πυρηνικής ενέργειας ή ένα υδροηλεκτρικό πρόγραμμα. Το γεγονός ότι οι εξισώσεις των ενεργειακών μοντέλων είναι γραμμικές, δε συνεπάγεται ότι οι λειτουργίες παραγωγής του μοντέλου συμπεριφέρονται γραμμικά. Στην πράξη, οι καμπύλες παραγωγής είναι συνήθως ιδιαίτερα μη γραμμικές και συγκεκριμένα κυρτές. Για το λόγο αυτό, οι μη γραμμικές καμπύλες αντιπροσωπεύονται ως βαθμωτή ακολουθία γραμμικών καμπύλων (stepped sequence of linear functions). Ένα απλό

παράδειγμα για την κατανόηση της αντιπροσώπευσης των μη γραμμικών καμπυλών ως μία βαθμωτή ακολουθία γραμμικών καμπυλών, είναι ο ανεφοδιασμός κάποιου πόρου, ο οποίος μπορεί να απεικονισθεί ως ακολουθία γραμμικών τμημάτων, όπου κάθε γραμμικό τμήμα χαρακτηρίζεται από ένα αυξανόμενο κόστος μονάδας (rising unit cost).

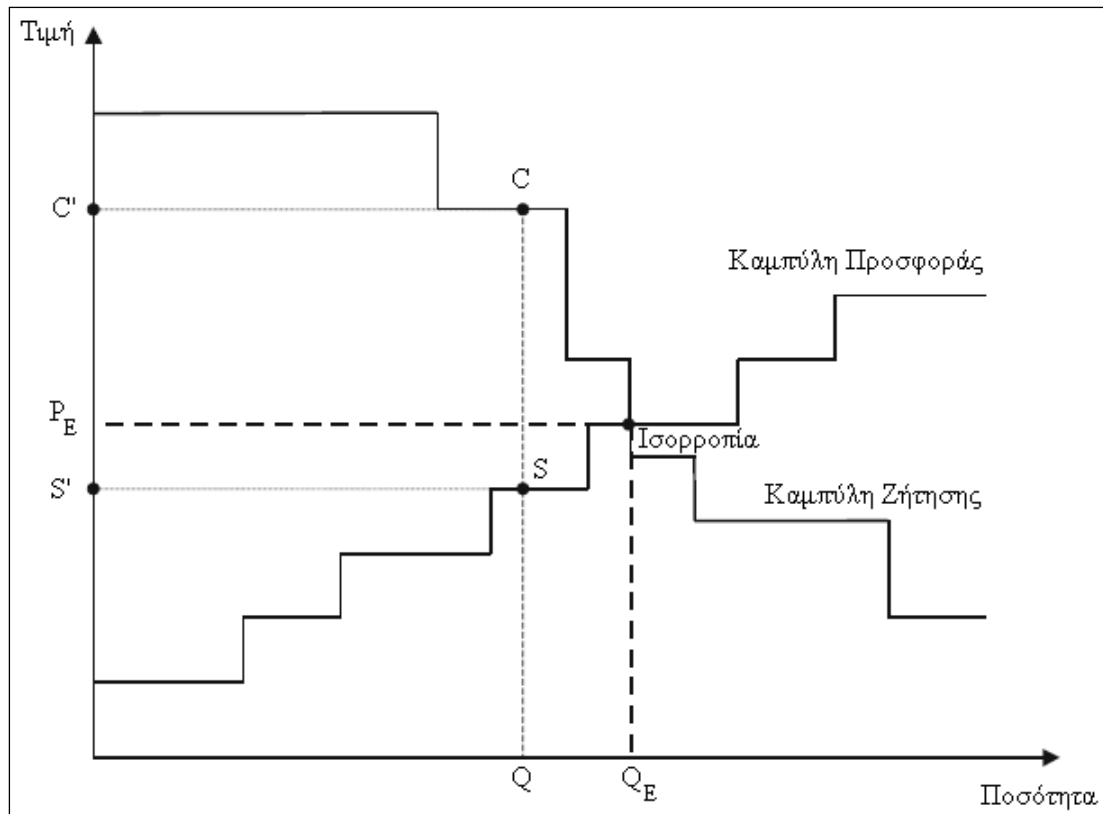
3.11.2 Η Μεγιστοποίηση του Πλεονάσματος

Το συνολικό πλεόνασμα μιας οικονομίας είναι το άθροισμα των πλεονασμάτων του συνόλου των προμηθευτών και των καταναλωτών. Οι προμηθευτές προϊόντων είναι τεχνολογίες που προμηθεύουν προϊόντα και οι καταναλωτές προϊόντων είναι τεχνολογίες ή ζήτηση υπηρεσιών που καταναλώνουν προϊόντα. Πολλές τεχνολογίες είναι ταυτόχρονα και προμηθευτές και καταναλωτές, αλλά όχι των ίδιων προϊόντων, διότι μια τεχνολογία δεν έχει ποτέ τα ίδια προϊόντα με την είσοδο και την έξοδό της, με εξαίρεση τις τεχνολογίες αποθήκευσης.

Επομένως, για κάθε προϊόν το ενεργειακό σύστημα αναφοράς (RES) καθορίζει ένα σύνολο προμηθευτών και ένα σύνολο καταναλωτών. Το σύνολο προμηθευτών προϊόντων χαρακτηρίζεται από μια καμπύλη προσφοράς (supply curve), η οποία προκύπτει σχεδιάζοντας το οριακό κόστος παραγωγής των προϊόντων (marginal production cost) ως συνάρτηση της παρεχόμενης ποσότητας. Αξίζει να σημειωθεί ότι η καμπύλη προσφοράς προϊόντων δεν διευκρινίζεται ρητά, αλλά παράγεται ενδογενώς από το ίδιο το μοντέλο.

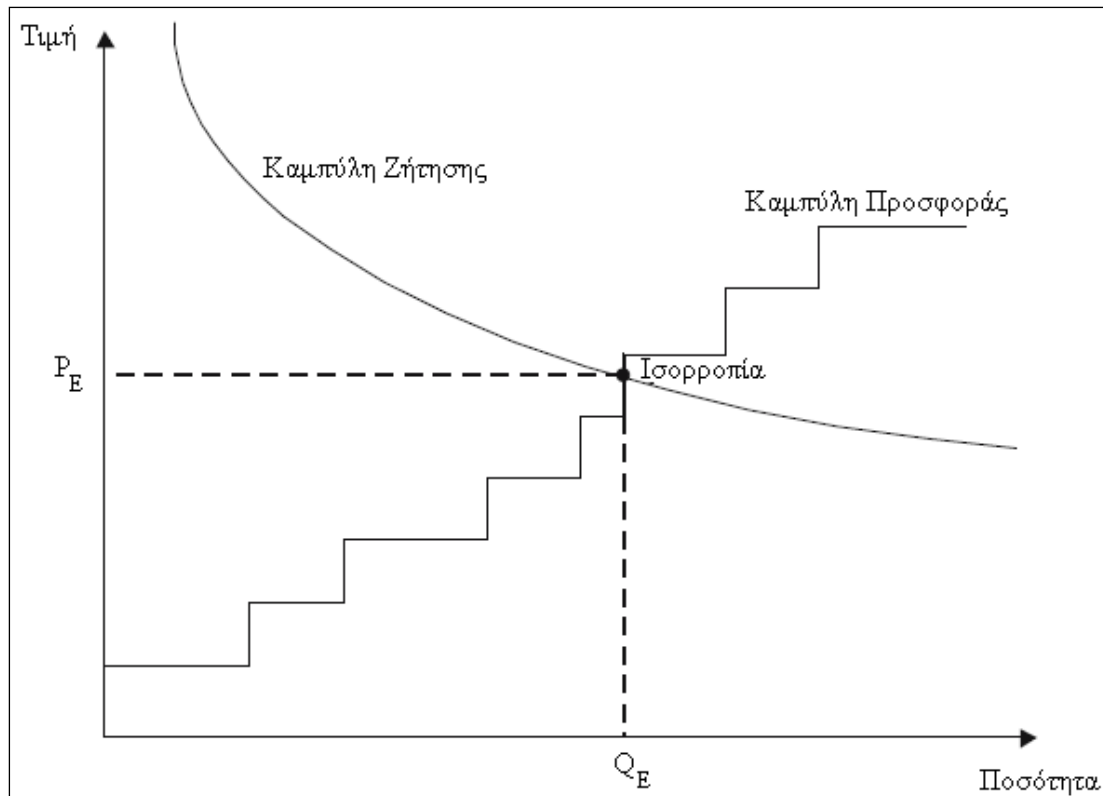
Ένα βασικό συμπέρασμα της θεωρίας του γραμμικού προγραμματισμού είναι ότι η αντίστροφη καμπύλη προσφοράς είναι βηματική. Στην αντίστροφη καμπύλη προσφοράς, κάθε οριζόντιο βήμα δείχνει ότι τα προϊόντα παράγονται από ένα ορισμένο σύνολο τεχνολογιών. Επιπρόσθετα, δεδομένου ότι οι παραχθείσες ποσότητες του προϊόντος αυξάνονται, ένας ή περισσότεροι πόροι από το σύνολο των πόρων εξαντλούνται. Κατά συνέπεια, το σύστημα πρέπει να καταφύγει σε ένα διαφορετικό σύνολο τεχνολογιών. Άμεσο συμπέρασμα αυτής της στρατηγικής είναι ότι κάθε αλλαγή στο σύνολο της παραγωγής δημιουργεί ένα βήμα στην καμπύλη παραγωγής, το οποίο έχει κόστος υψηλότερο από αυτό του προηγούμενου βήματος.

Κατά αντιστοιχία με τις καμπύλες προσφοράς προκύπτουν και οι καμπύλες ζήτησης. Ένα ενεργειακό μοντέλο καθορίζει μια σειρά καμπύλων ζήτησης (demand curves) με συμμετρικό τρόπο σε σχέση με τις καμπύλες προσφοράς. Μελετώντας τη ζήτηση ενός προϊόντος σε ένα ενεργειακό μοντέλο είναι δυνατόν να γίνει η διάκριση μεταξύ δύο βασικών περιπτώσεων. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση κατά την οποία η παραγωγή και η κατανάλωση ενός προϊόντος είναι ενδογενής του ενεργειακού μοντέλου, τότε η καμπύλη ζήτησης κατασκευάζεται ενδογενώς ως μια βηματικά ελαττούμενη συνάρτηση της ποσότητας που απαιτείται.



Σχήμα 6: Ισορροπία στην περίπτωση ενεργειακής μορφής όταν το μοντέλο ενδογενώς κατασκευάζει τόσο την καμπύλη προσφοράς όσο και την καμπύλη ζήτησης.

Αντίθετα, στην περίπτωση κατά την οποία, το προϊόν αποτελεί ζήτηση για μια συγκεκριμένη ενεργειακή υπηρεσία, τότε η καμπύλη ζήτησης καθορίζεται εξωγενώς από το χρήστη μέσω της ελαστικότητας της τιμής και της ζήτησης. Η καμπύλη ζήτησης είναι σε αυτήν την περίπτωση μια ομαλά μειούμενη καμπύλη όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα



Σχήμα 7: Ισορροπία στην περίπτωση ενεργειακής υπηρεσίας όπου ο χρήστης ρητά παρέχει την καμπύλη ζήτησης.

Η ισορροπία προσφοράς-ζήτησης βρίσκεται στο σημείο τομής της συνάρτησης προσφοράς και της συνάρτησης ζήτησης και αντιστοιχεί σε μια ποσότητα ισορροπίας Q_E και σε μια τιμή ισορροπίας P_E . Στην τιμή P_E , οι προμηθευτές είναι πρόθυμοι να παρέχουν την ποσότητα Q_E και οι καταναλωτές είναι πρόθυμοι να αγοράσουν αυτήν την ποσότητα Q_E . Η ισορροπία αφορά σε πολλά προϊόντα και, ως εκ τούτου, είναι ένα πολυδιάστατο μέγεθος ανάλογο των προαναφερόμενων, όπου Q_E και το P_E είναι διανυσματικά και όχι βαθμωτά μεγέθη.

Μελετώντας και αναλύοντας τα εξαγόμενα του σχήματος 6, ο καθορισμός του πλεονάσματος των προμηθευτών που αντιστοιχεί σε ένα ορισμένο σημείο S στην αντίστροφη καμπύλη προσφοράς είναι το καθαρό εισόδημα (net revenue) που συνδέεται με τα προϊόντα, δηλαδή η περιοχή μεταξύ του οριζόντιου τμήματος SS' και της αντίστροφης καμπύλης προσφοράς. Ομοίως, το πλεόνασμα καταναλωτή για ένα σημείο C στην αντίστροφη καμπύλη ζήτησης, ορίζεται ως η περιοχή μεταξύ του τμήματος CC' και της αντίστροφης καμπύλης ζήτησης. Αυτή η περιοχή ορίζει την ευκαιρία κέρδους (opportunity gain) του καταναλωτή που αγοράζει το προϊόν σε μια τιμή χαμηλότερη από την τιμή που είναι πρόθυμος να πληρώσει.

Για μια δεδομένη ποσότητα Q , το συνολικό πλεόνασμα των προμηθευτών καθώς επίσης και των καταναλωτών είναι η περιοχή που αποτελείται μεταξύ των δύο αντίστροφων καμπύλων στο αριστερό μέρος του Q . Καθώς παρουσιάζεται στο σχήμα 7, το συνολικό πλεόνασμα μεγιστοποιείται ακριβώς όταν το Q είναι ίσο με την

ποσότητα ισορροπίας Q_E . Επομένως, η ισορροπία προσφοράς-ζήτησης επιτυγχάνεται όταν το συνολικό πλεόνασμα μεγιστοποιείται.

3.12 Ανταγωνιστικές Αγορές Ενέργειας

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

3.13 Αντικειμενική Συνάρτηση: Συνολικό Προεξοφλημένο Κόστος Συστημάτων

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

Γενικά, κάθε έτος, το συνολικό κόστος περιλαμβάνει τα ακόλουθα στοιχεία:

- Κύριες δαπάνες (Capital Costs) που αναλαμβάνονται για την επένδυση ή/και την αποσυναρμολόγηση των διαδικασιών.
- Σταθερές και μεταβλητές ετήσιες δαπάνες λειτουργίας και συντήρησης (Operation and Maintenance Costs) και άλλες ετήσιες δαπάνες που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της αποσυναρμολόγησης των τεχνολογιών.
- Δαπάνες που απαιτούνται για τις εξωγενείς εισαγωγές (exogenous imports) και για την εσωτερική παραγωγή των πόρων (domestic resource production).
- Εισοδήματα από τις εξωγενείς εξαγωγές.

- Δαπάνες παράδοσης (delivery costs) για τα απαραίτητα προϊόντα που καταναλώνονται στις διαδικασίες.
- Φόροι και επιχορηγήσεις που συνδέονται με τις ροές προϊόντων και τις δραστηριότητες ή τις επενδύσεις.
- Εισοδήματα από την ανάκτηση ενσωματωμένων προϊόντων (revenues from recuperation of embedded commodities). Τα εισοδήματα αυτά προέρχονται από την αποσυναρμολόγηση μιας διαδικασίας.
- Υπολλειματική αξία (Salvage value) των διαδικασιών και των ενσωματωμένων προϊόντων στο τέλος του ορίζοντα προγραμματισμού.
- Απώλεια ευημερίας (Welfare loss) ως αποτέλεσμα των μειωμένων απαιτήσεων τελικής χρήσης.

3.14 Περιορισμοί

Ελαχιστοποιώντας το συνολικό προεξοφλημένο κόστος, το μοντέλο πρέπει να ικανοποιήσει έναν αριθμό περιορισμών (αποκαλούμενες εξισώσεις του μοντέλου) που εκφράζουν τις φυσικές και λογικές σχέσεις που πρέπει να ικανοποιηθούν προκειμένου να απεικονιστεί κατάλληλα το σχετικό ενεργειακό σύστημα. Στη συνέχεια απεικονίζονται και παρουσιάζονται εν συντομία οι κυριότεροι τύποι περιορισμών.

3.15 Συντήρηση των Επενδύσεων

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

Ανακεφαλαιώνοντας, η συνολική διαθέσιμη δυναμικότητα (total available capacity) για κάθε τεχνολογία p , στην περίοδο t , είναι ίση με το ποσό των επενδύσεων που γίνονται από το μοντέλο στις προηγούμενες και τρέχουσες περιόδους και των οποίων η φυσική ζωή δεν έχει τελειώσει ακόμα συν την αρχική δυναμικότητα (σε ισχύ πριν από την έναρξη του ορίζοντα μοντελοποίησης) που είναι ακόμα διαθέσιμη.

3.16 Χρήση της δυναμικότητας

Σε κάθε χρονική περίοδο το ενεργειακό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα μέρος ή το σύνολο της εγκατεστημένης δυναμικότητας σύμφωνα με τον παράγοντα διαθεσιμότητας της τεχνολογίας (availability factor). Αξίζει να σημειωθεί ότι το ενεργειακό μοντέλο μπορεί να αποφασίσει να χρησιμοποιήσει λιγότερη από τη διαθέσιμη δυναμικότητα κατά τη διάρκεια μιας ή περισσότερων περιόδων, εάν μια τέτοια απόφαση συμβάλλει στην ελαχιστοποίηση του γενικού κόστους. Επιπλέον, για κάθε τεχνολογία p και περίοδο t , η δραστηριότητα της τεχνολογίας δεν μπορεί να υπερβεί τη διαθέσιμη δυναμικότητά της.

3.17 Εξίσωση ισορροπίας προϊόντος

Σε κάθε χρονική περίοδο, πρέπει η παραγωγή από μια περιοχή συν τις εισαγωγές από άλλες περιοχές κάθε προϊόντος να ισορροπεί με το ποσό που καταναλώνεται στην περιοχή συν αυτό που εξάγεται σε άλλες περιοχές.

3.18 Καθορισμός των σχέσεων ροής σε μια διαδικασία

Μια διαδικασία με μια ή περισσότερες ροές ετερογενών προϊόντων καθορίζεται ουσιαστικά από μια ή περισσότερες ανεξάρτητες μεταβλητές ροής εισόδου και εξόδου. Ελλείψει των σχέσεων μεταξύ αυτών των ροών, η διαδικασία θα ήταν απολύτως ακαθόριστη, δηλαδή οι εξόδοι θα ήταν ανεξάρτητοι από τις εισόδους. Επομένως χρειάζονται ένας ή περισσότεροι περιορισμοί που να δηλώνουν ότι η αναλογία των ροών εξόδου προς τις ροές εισόδου είναι ίση με μια σταθερά που είναι συγγενής έννοια με την αποδοτικότητα (efficiency).

3.19 Περιορισμοί στα προϊόντα

Είναι δυνατό να επιβληθούν συσσωρευτικά όρια (cumulative bounds) στα προϊόντα κατά τη διάρκεια περισσότερων από μιας περιόδου, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα χρήσιμο στην περίπτωση οριοθέτησης των εκπομπών ή της εξόρυξης ορυκτών καυσίμων. Με την εισαγωγή κατάλληλων συμβάσεων για τις εκπομπές, ο χρήστης μπορεί να περιορίσει τις εκπομπές σε συγκεκριμένους τομείς. Επιπλέον, ο χρήστης μπορεί να επιβάλει περιορισμούς εκπομπής που ισχύουν για διάφορες περιοχές λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη το εμπόριο των αδειών εκπομπής. Εναλλακτικά ή ταυτόχρονα, ένας φόρος ή μια ποινική ρήτρα μπορεί να εφαρμοστεί σε κάθε παραχθείσα (ή καταναλωθείσα) μονάδα προϊόντος (ενεργειακή μορφή, εκπομπή), μέσω συγκεκριμένων παραμέτρων.

3.20 Περιορισμοί χρήστη

Εκτός από τους τυποποιημένους περιορισμούς, ο χρήστης μπορεί να εισάγει πρόσθετους περιορισμούς για να εκφράσει ειδικούς όρους. Παραδείγματος χάριν, μπορεί να υπάρξει περιορισμός στην επένδυση σε νέο δυναμικό πυρηνικής ενέργειας (ανεξάρτητα από τον τύπο αντιδραστήρα) ή που να υπαγορεύει ένα ορισμένο ποσοστό νέου δυναμικού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Η μαθηματική προσέγγιση ενός ενεργειακού συστήματος μέσω του μοντέλου Balmorel

4.1 Balmorel Model – Θεωρητικό υπόβαθρο

4.1.1 Εισαγωγή

4.1.2 Το παραγωγικό σύστημα

4.1.2.1 Τεχνολογίες παραγωγής

4.1.2.2 Συνάρτηση προσφοράς

4.1.2.3 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά

4.1.2.4 Χρόνος

4.1.2.4.1 Ζήτηση

4.1.2.4.2 Παραγωγή

4.1.2.4.3 Αποθήκευση

4.1.2.5 Μεταφορά και διανομή

4.1.2.5.1 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

4.1.2.5.2 Συναλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας με τρίτες χώρες

4.1.2.5.3 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

4.1.2.5.4 Διανομή θερμότητας

4.1.2.5.5 Επιπτώσεις στις τιμές

4.1.2.5.6 Επιπτώσεις στην αντικειμενική συνάρτηση

4.1.2.6 Φόροι

4.1.2.6.1 Φόροι καυσίμων

4.1.2.6.2 Φόροι εκπομπών

4.1.2.6.3 Φόροι κατανάλωσης ενέργειας

4.1.2.6.4 Επιβάρυνση φόρων

4.1.2.7 Ζήτηση

4.1.2.7.1 Η Cobb-Douglas συνάρτηση, CD

4.1.2.7.2 Συνάρτηση σταθερής ελαστικότητας αντικατάστασης (CES= Constant Elasticity of Substitution function)

4.1.2.7.3 Άλλες τυποποιημένες συναρτήσεις

4.1.2.7.4 Υλοποίηση

4.1.2.8 Η αντικειμενική συνάρτηση και οι παράγοντες ισορροπίας

4.1.2.9 Συνολικό μοντέλο – Ένα έτος

4.1.2.10 Δυναμικότητα του μοντέλου

4.1.2.11 Υλοποίηση γραμμικού προγραμματισμού

4.1.2.11.1 Το σύστημα παραγωγής, Μεταφορά και Διανομή

4.1.2.11.2 Ζήτηση

4.1.2.11.3 Ισορροπία και ΚΚΤ (Karush–Kuhn–Tucker) συνθήκες

4.1.2.11.4 Υλοποίηση μοντελοποίησης συστήματος

4.1.2.11.5 Λύση

4.1.2.12 Ερμηνεία

4.1.2.12.1 Οριακό κόστος και «σκιασμένες» τιμές

4.1.2.12.2 Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας

4.1.2.12.3 Η τιμές της θερμότητας

4.1.2.12.4 Υπόλοιπο παραγωγών και καταναλωτών

4.1.2.12.5 Γενικά συμπεράσματα

4.1.2.13 Συμπεράσματα

4.1 Baltimore Model – Θεωρητικό υπόβαθρο

4.1.1 Εισαγωγή

Ο στόχος του έργου Balmorel είναι η δημιουργία ενός μοντέλου μερικού ισοζυγίου ηλεκτρικής ενέργειας που θα καλύπτει και τους ενοποιημένους τομείς θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας στις χώρες γύρω από την Βαλτική θάλασσα κατάλληλο να αναλύσει τις σχετικές πολιτικές στην έκταση που αυτές περιέχουν ουσιώδη διεθνή ζητήματα.

Στην παρούσα ενότητα θα αναλυθεί το θεωρητικό υπόβαθρο του μοντέλου Balmorel. Η περιγραφή σκοπεύει να παρουσιάσει μερικές από τις βασικές ιδέες και ιδιότητες του μοντέλου. Περιέχει μια συνοπτική περιγραφή των σχέσεων μεταξύ των θεωρητικών εξισώσεων που περιγράφουν το μοντέλο και της πραγματικής υλοποίησης. Η ανάλυση αυτή είναι επιθυμητή και απαραίτητη, διότι ο προσανατολισμός της παρούσας παρουσίασης έγκειται κυρίως στην πιο γενική και μαθηματική ανάλυση, η οποία δεν συμφωνεί απόλυτα με τα ονομαστικά πρότυπα και τις λεπτομέρειες της δομής όπως έχουν χρησιμοποιηθεί στη γλώσσα GAMS, στην οποία έχει υλοποιηθεί το μοντέλο Balmorel.

Για περισσότερες λεπτομέρειες, περιλαμβάνοντας και παραδείγματα εφαρμογών, μπορείτε να ανατρέξετε στην ιστοσελίδα του έργου www.balmorel.com, η οποία αποτελεί τη βασική πηγή πληροφόρησης σχετικά με το έργο.

4.1.2 Το παραγωγικό σύστημα

4.1.2.1 Τεχνολογίες παραγωγής

Η παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, παραδείγματος χάριν με μετατροπή από άλλη μορφή ενέργειας σε θερμότητα και ηλεκτρισμό, πραγματοποιείται σε μονάδες παραγωγής. Μια μονάδα παραγωγής προσδιορίζεται από ένα σύνολο από βασικά χαρακτηριστικά, τα οποία συνοψίζονται ακολούθως.

- Ένα σύνολο από εφικτούς συνδυασμούς παραγωγής θερμότητας (h) και ηλεκτρισμού (e).
- Μια αποδοτικότητα, που αναφέρεται στο ποσό της χρήσιμης ενέργειας σε μορφή ηλεκτρισμού ή θερμότητας μπορεί να παραχθεί για κάθε μονάδα εισερχόμενης πρώτης ύλης παραγωγής ενέργειας.
- Το είδος των καυσίμων πρώτης ύλης, τα οποία χρησιμοποιεί η μονάδα.
- Η περιβαλλοντική όψη της παραγωγικής μονάδας, σύμφωνα με την οποία καθορίζεται το ποσό της εκπομπής ρύπων που απελευθερώνεται για κάθε μονάδα εισερχόμενης πρώτης ύλης παραγωγής ενέργειας.
- Η οικονομική όψη της παραγωγικής μονάδας, η οποία συμπεριλαμβάνει συγκεκριμένα κόστη λειτουργίας και συντήρησης, καθώς επίσης και κόστη επένδυσης για αύξηση της παραγωγής.

Επιπρόσθετα λαμβάνεται υπόψη η τεχνολογική ανάπτυξη που μπορεί να υπάρξει σε μία μονάδα παραγωγής. Η συγκεκριμένη παράμετρος αντιπροσωπεύεται από το γεγονός ότι κάποιες τεχνολογίες είναι διαθέσιμες μόνο για συγκεκριμένα πεπερασμένα χρόνια.

Το σύνολο των χαρακτηριστικών μιας μονάδας περιγράφονται από ένα σύνολο γραμμικών σχέσεων. Παραδείγματος χάριν, για την μονάδα παραγωγής i το σύνολο των εφικτών συνδυασμών παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να δοθεί ως ακολούθως.

$$g^i(e^i, h^i) \leq 0 \quad (4.1)$$

όπου g^i για κάθε i παριστάνει ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων και e^i και h^i είναι η παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας αντίστοιχα.

Τα χαρακτηριστικά των εκπομπών σε ρύπους μπορούν να εκφραστούν σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας εξαρτώμενα, παραδείγματος χάριν από την κάθε συγκεκριμένη μονάδα ή τον τύπο του καυσίμου ή τον συνδυασμό και των δύο παραμέτρων. Κατά αυτόν τον τρόπο, οι εκπομπές ρύπων ενός συγκεκριμένου τύπου ρύπων m (π.χ. CO₂ ή SO₂) στη μονάδα παραγωγής i μπορεί να αναπαρασταθεί από μία γραμμική συνάρτηση ως

$$\Phi^m(e^i, h^i) \quad (4.2)$$

Παρόμοιες γραμμικές σχέσεις μπορούν να προσδιοριστούν για τα άλλα χαρακτηριστικά, τα οποία αναφέρθηκαν προηγουμένως.

4.1.2.2 Συνάρτηση προσφοράς

Εν γένει στη βιβλιογραφία γίνεται η υπόθεση ότι η συνάρτηση κόστους παραγωγής C (συνάρτηση προσφοράς) είναι αυστηρώς προδιαγεγραμμένη. Παρόλα αυτά, αυτό δεν είναι αληθές και με βάση αυτή την παρατήρηση θα αναπτύξουμε την ακόλουθη ανάλυση, στην οποία η συνάρτηση κόστους παραγωγής δεν είναι σαφώς προδιαγεγραμμένη.

Στην κατάσταση κατά την οποία υπάρχουν πολλές τεχνολογίες παραγωγής, πολλοί παραγωγοί, καθώς επίσης και τέλειος ανταγωνισμός μεταξύ αυτών, η συνάρτηση προσφοράς C μπορεί να προδιαγραφεί με ορισμένες προφανείς και λογικές παραδοχές. Η υπόθεση του τέλειου ανταγωνισμού μεταξύ των παραγωγών υποδηλώνει ότι για κάθε συνολική έξοδο ηλεκτρισμού και θερμότητας (e, h) , η παραγωγή γίνεται με τον φθηνότερο δυνατό τρόπο και με τον ίδιο τρόπο όπως είχε κεντρικά σχεδιαστεί. Με αυτό τον τρόπο για κάθε ζεύγος παραγόμενου ηλεκτρισμού και θερμότητας (e, h) το συνολικό κόστος C είναι δυνατόν να προσδιορισθεί ως ακολούθως.

$$C(e, h) = \min_{e^i, h^i} \left[\sum_{i=1}^I C^i(e^i, h^i) \right] \quad (4.3)$$

$$g^i(e^i, h^i) \leq 0, \forall i \quad (4.4)$$

$$\sum_{i=1}^I e^i = e \quad (4.5)$$

$$\sum_{i=1}^I h^i = h \quad (4.6)$$

Στην παραπάνω σχέση έχει γίνει η υπόθεση ότι συνολικά υπάρχουν I τεχνολογίες διαθέσιμες για την παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, κάθε μια ορισμένη στο αντίστοιχο πεδίο ορισμού της υπακούοντας στον αντίστοιχο περιορισμό (4.4) (όμοιο με τη σχέση (4.1)). Επιπρόσθετα, κάθε μία τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας συσχετίζεται με μια συνάρτηση κόστους C^i . Σε συνδυασμό, οι τεχνολογίες αυτές παράγουν ποσότητες ηλεκτρισμού e και θερμότητας h , όπως απαιτείται σύμφωνα με τις (4.5) και (4.6).

Επιπλέον, αν υποθεθεί ότι όλες οι συναρτήσεις g^i και οι C^i είναι κυρτές ως προς τις ποσότητες του ηλεκτρισμού (e) και της θερμότητας (h) τότε το συνολικό κόστος C , όπως ορίζεται στις σχέσεις (4.3) – (4.6) είναι επίσης κυρτή συνάρτηση των ίδιων μεταβλητών, και είναι προφανές ότι το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να ορισθεί.

$$\max_{e, h, e^i, h^i} [U^e(e) + U^h(h) - \sum_{i=1}^I C^i(e^i, h^i)] \quad (4.7)$$

όπου η βελτιστοποίηση είναι αντικείμενο και απότοκος των περιορισμών (4.4)-(4.6) και συσχετίζεται με της παραγόμενες ποσότητες ηλεκτρισμού και θερμότητας e, h και $e^i, h^i, i=2, \dots, I$.

Επιπρόσθετα, αξίζει να τονισθεί ότι ενώ οι υποθέσεις που έγιναν σχετικά με τις συναρτήσεις g^i και C^i , στην πραγματικότητα διαβεβαιώνουν ότι η συνάρτηση συνολικού κόστους C , η οποία έχει οριστεί στις σχέσεις (4.3)-(4.6) είναι κυρτή, παρόλα αυτά η συνάρτηση συνολικού κόστους C δεν είναι απαραίτητα συνεχώς διαφορίσιμη. Παρόλα αυτά, η παρατήρηση αυτή δεν ακυρώνει την επιθυμητή ιδέα των ισορροπημένων οριακών τιμών, αλλά απαιτεί μόνο την εφαρμογή ενός πιο γενικού ορισμού του προβλήματος και της αντιμετώπισής του.

4.1.2.3 Γεωγραφικά χαρακτηριστικά

Το μοντέλο του Balmorel επιτρέπει τον προσδιορισμό των γεωγραφικών χαρακτηριστικών ενός μέρους. Μελετώντας την πλευρά της προσφοράς ενέργειας, ο κύριος λόγος για τον προσδιορισμό των γεωγραφικών χαρακτηριστικών ενός μέρους είναι για να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί σε τεχνολογίες παραγωγής και σε πόρους, οι περιορισμοί στη μετάδοση και στη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας, το κόστος διανομής και τα διαφορετικά εθνικά χαρακτηριστικά. Παράλληλα, μελετώντας την πλευρά της ζήτησης, ο λόγος για τον προσδιορισμό των γεωγραφικών χαρακτηριστικών ενός μέρους είναι η ανάγκη να εντοπισθούν διαφορετικές τροχιές και ελαστικότητες, σύμφωνα με τα διαφορετικά γεωγραφικά χαρακτηριστικά των καταναλωτών.

Οι τρεις βασικοί τύποι γεωγραφικών μονάδων είναι οι περιοχές, οι περιφέρειες και οι χώρες, και διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς το ότι οι περιφέρειες περιέχουν

περιοχές, ενώ οι χώρες περιέχουν περιφέρειες. Σαν αποτέλεσμα αυτού, οι περισσότερες εξωγενείς μεταβλητές θα προσδιοριστούν μεμονωμένα σύμφωνα με τη γεωγραφική οντότητα στην οποία ανήκουν. Πιο συγκεκριμένα, αυτή η παρατήρηση αφορά τη ζήτηση, τις τεχνολογίες παραγωγής, προσδιοριζόμενες για κάθε περιοχή, τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ περιφερειών και τη διανομή (η διανομή ηλεκτρικής ενέργειας προσδιορίζεται ανά περιφέρεια ενώ η διανομή θερμότητας προσδιορίζεται ανά περιοχή).

Επιπρόσθετα, και οι ενδογενείς μεταβλητές προσδιορίζονται ανάλογα με τις γεωγραφικές οντότητες. Συγκεκριμένα, αυτό αφορά την παραγωγή, τη μεταφορά και την κατανάλωση ηλεκτρισμού και θερμότητας.



Σχήμα 8: Γεωγραφικά χαρακτηριστικά και συσχέτιση με το μαθηματικό μοντέλο Balmorel.

4.1.2.4 Χρόνος

Το μοντέλο Balmorel λειτουργεί για διαφορετικές χρονικές περιόδους. Είναι δυνατόν να διακριθούν οι χρονικές περίοδοι μέσα στο έτος (π.χ. μια υποδιαίρεση του

έτους) και μεταξύ διαφορετικών ετών. Στη συνέχεια γίνεται η υπόθεση ότι το έτος χωρίζεται σε T χρονικές περιόδους με $t=1, \dots, T$. Η υπόθεση αυτή προϋποθέτει ότι οι περισσότερες εξωγενείς και ενδογενείς μεταβλητές θα πρέπει να προσδιοριστούν με ένα δείκτη t , και πιο συγκεκριμένα σε σχέση με την παραγωγή, τη μεταφορά και την κατανάλωση ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Για την βασική ανάλυση η ακολουθία των χρονικών τμημάτων μέσα σε ένα έτος δεν έχει βαρύτητα. Για το λόγο αυτό, η αναπαράσταση των χρονικών τμημάτων μπορεί να γίνει το ίδιο επιτυχημένα είτε με μία καμπύλη διάρκειας είτε με μία χρονολογική καμπύλη. Η καμπύλη διάρκειας έχει πλεονεκτήματα από άποψη υπολογιστικής ισχύος στην επίλυση του μοντέλου. Παρόλα αυτά μια χρονολογική αναπαράσταση του χρόνου μερικές φορές είναι απαραίτητη για συγκεκριμένα στοιχεία, όπως η διαχρονική αποθήκευση.

4.1.2.4.1 Ζήτηση

Μελετώντας τη ζήτηση, θα υποθεθεί ότι για κάθε χρονική περίοδο μια τιμή ζήτησης μπορεί να προσδιοριστεί όπως θα συζητηθεί και σε επόμενη παράγραφο. Η παρατήρηση αυτή συνεπάγεται ότι δεν υπάρχει αντικατάσταση μεταξύ ζήτησης σε διαφορετικές χρονικές περιόδους και μεταξύ διαφορετικών γεωγραφικών μονάδων ή μεταξύ ζήτησης ηλεκτρισμού και θερμότητας. Επιπρόσθετα, η κατανάλωση θα προσδιοριστεί για κάθε χρονική περίοδο t .

4.1.2.4.2 Παραγωγή

Οι συναρτήσεις κόστους παραγωγής πρέπει να προσδιοριστούν για κάθε χρονική περίοδο t , καθώς επίσης και οι παραγόμενες ποσότητες. Όσον αφορά τις επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες παραγωγής η ακόλουθη υπόθεση έχει πραγματοποιηθεί. Στην αρχή κάθε χρόνου είναι δυνατό να γίνουν επενδύσεις σε νέα παραγωγή φορτίων ηλεκτρισμού e και θερμότητας h . Τα φορτία αυτά είναι διαθέσιμα από την αρχή του χρόνου. Η συνολική παραγωγή φορτίων δηλαδή αποτελείται από τα παλιά φορτία που είναι διαθέσιμα στην αρχή του χρόνου και τα νέα.

Το συνολικό κόστος παραγωγής παλιών και νέων τεχνολογιών σε μία χρονική περίοδο t δίνεται από τις συναρτήσεις C_t^{old} και C_t^{new} , αντίστοιχα. Τα επενδυτικά κόστη για τις νέες τεχνολογίες δίνονται από την C^{inv} . Οι ποσότητες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας στις παλιές και νέες τεχνολογίες είναι e^{old} , h^{old} , e^{new} και h^{new} . Συνεπώς, τα συνολικά κόστη σε παραγωγή και επενδύσεις δίνονται από την ακόλουθη σχέση.

$$C^{inv}(\bar{e}, \bar{h}) + \sum_{t=1}^T C_t^{old}(e_t^{old}, h_t^{old}) + \sum_{t=1}^T C_t^{new}(e_t^{new}, h_t^{new}) \quad (4.8)$$

Καθώς επίσης, οι περιορισμοί για την παραγωγή κάθε διαφορετικής μονάδας δίνονται ως ακολούθως.

$$g_t^{old}(e_t^{old}, h_t^{old}) \leq 0, \quad \forall t \quad (4.9)$$

$$g_t^{\text{new}}(e_t^{\text{new}}, h_t^{\text{new}}) \leq 0, \forall t \quad (4.10)$$

$$e_t^{\text{new}} \leq \bar{e}, \forall t \quad (4.11)$$

$$h_t^{\text{new}} \leq \bar{h}, \forall t \quad (4.12)$$

Η βελτιστοποίηση γίνεται επίσης αναφορικά με τις \bar{e} και \bar{h} . Οι μεταβλητές αυτές μπορούν να είναι άνω και κάτω φραγμένες, για παράδειγμα λόγω των περιορισμένων αποθεμάτων ή των προαποφασισμένων πολιτικών. Επιπλέον, η επέκταση των φορτίων από νέες τεχνολογίες παραγωγής μπορούν να είναι λίγο ή πολύ περιορισμένες. Για το λόγο αυτό, αξίζει να παρατηρηθεί ότι και στη μεταφορά έχουν χρησιμοποιηθεί ίδιες προσεγγίσεις, δηλαδή στη αρχή κάθε έτους είναι δυνατόν να γίνουν επενδύσεις σε ένα φορτίο μεταφοράς.

4.1.2.4.3 Αποθήκευση

Πέραν του ό,τι έχει είδη διατυπωθεί έως σήμερα στη σχετική βιβλιογραφία, η αναπαράσταση παραπάνω από μιας χρονικής περιόδου ανά έτος είναι απαραίτητη για να μπορούν να αναπαρασταθούν οι συναρτήσεις ορισμένων τεχνολογιών παραγωγής όπως εκείνων που έχουν διαχρονική αποθήκευση π.χ. η υδροηλεκτρική ενέργεια. Δεδομένης της υπόθεσης ότι ένα συγκεκριμένο μέγεθος \bar{w} υδρο-ενέργειας είναι διαθέσιμο στην αρχή του χρόνου και e_t^w είναι η παραγωγή υδροηλεκτρικής ενέργειας κατά την υπό μελέτη περίοδο t , η εξίσωση ισοζυγίου των αποθεμάτων υδρο-παραγωγικής τεχνολογίας ορίζεται ως ακολούθως.

$$\sum_{t=1}^T e_t^w \leq \bar{w} \quad (4.13)$$

Η προαναφερθείσα μοντελοποίηση είναι σωστή υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπάρχουν όρια στο ποσό της αποθηκευόμενης ενέργειας, καθώς επίσης και στα μεγέθη που εισέρχονται ή εξέρχονται από την αποθήκη και τα κόστη δεν εξαρτώνται ούτε από το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας, ούτε από τα ποσά ενέργειας που εισέρχονται ή εξέρχονται από την αποθήκη. Στην περίπτωση όμως κατά την οποία αυτοί οι παράμετροι πρέπει να ληφθούν υπόψη τότε απαιτείται τροποποίηση της μοντελοποίησης, ως ακολούθως.

$$u_{t+1} = au_t + \beta^{\text{in}} e_t^{\text{in}} - \beta^{\text{out}} e_t^{\text{out}} - \gamma + w_t \quad (4.14)$$

$$\underline{u} \leq u_t \leq \bar{u} \quad (4.15)$$

$$\underline{e}^{\text{in}} \leq e_t^{\text{in}} \leq \bar{e}^{\text{in}} \quad (4.16)$$

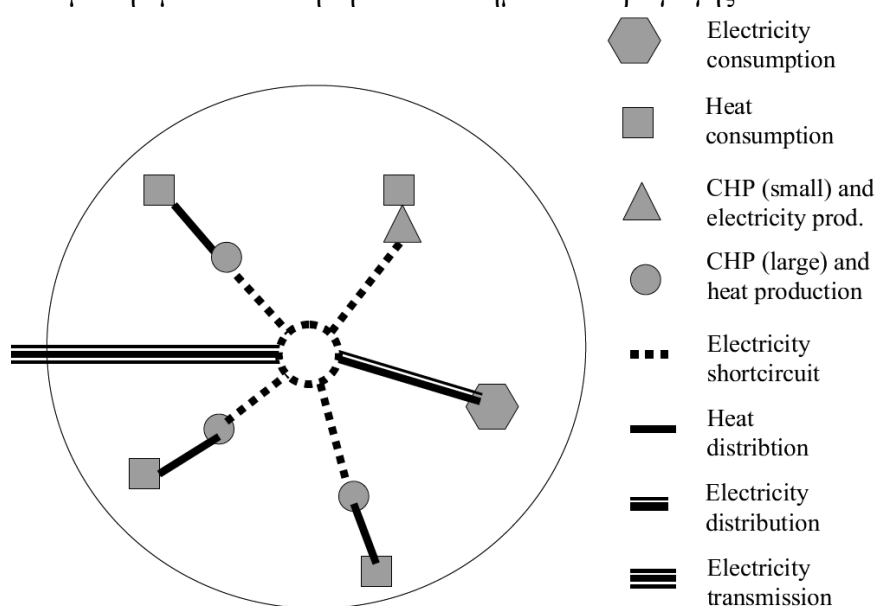
$$\underline{e}^{\text{out}} \leq e_t^{\text{out}} \leq \bar{e}^{\text{out}} \quad (4.17)$$

$$\text{Αρχικές και τελικές συνθήκες στο } u \quad (4.18)$$

4.1.2.5 Μεταφορά και διανομή

Στην ενότητα αυτή γίνεται μελέτη των χαρακτηριστικών της μεταφοράς και διανομής ενέργειας. Η μελέτη αυτή καταλήγει στην παρατήρηση της εξάρτησης των χαρακτηριστικών αυτών με το παραγόμενο προϊόν, δηλαδή την ηλεκτρική ενέργεια ή τη θερμότητα. Τα δύο είδη προϊόντων αντιμετωπίζονται διαφορετικά, κυρίως επειδή για ένα μοντέλο που καλύπτει μια μεγάλη γεωγραφική περιοχή όπως η Βαλτική, η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί εφικτή, ενώ η μεταφορά θερμότητας όχι. Μία αναλυτική σχηματική παρουσίαση παρατίθεται στο ακόλουθο σχήμα.

Η μοντελοποίηση της μεταφοράς και της διανομής είναι σχετικά απλοποιημένη, σύμφωνα και με την μοντελοποίηση των συστημάτων παραγωγής.



Σχήμα 9: Συνδέσεις μεταξύ παραγωγής, κατανάλωσης, διανομής και μετάδοσής σε μια περιοχή, με μια ηλεκτρική σύνδεση μεταφοράς σε άλλη περιοχή.

4.1.2.5.1 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

Με σκοπό την αναπαράσταση των χαρακτηριστικών μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας το μοντέλο λειτουργεί με περιφέρειες. Σε κάθε περιφέρεια το δίκτυο μεταφοράς θεωρείται τόσο καλά ανεπτυγμένο ώστε να μην υπάρχουν περιορισμοί στην ηλεκτρική ροή. Για το λόγο αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι εντός μιας περιφέρειας η ενέργεια παράγεται σε ένα σημείο και καταναλώνεται σε κάποιο άλλο. Επιπλέον γίνεται η θεώρηση ότι μεταξύ των σημείων παραγωγής και κατανάλωσης δεν υπάρχουν περιορισμοί παρόλο που υπάρχουν απώλειες στην ηλεκτρική ροή μεταξύ των δύο αυτών σημείων.

Επιπρόσθετα, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μεταφέρεται μεταξύ περιφερειών ή πιο συγκεκριμένα μεταξύ των σημείων παραγωγής σε κάθε περιφέρεια. Η μεταφορά ενέργειας υπονοεί και απώλεια ανάλογη του μεγέθους της ηλεκτρικής ενέργειας που

μεταφέρεται, τέτοια ώστε η περιφέρεια που εισάγει ενέργεια να λαμβάνει λιγότερη ενέργεια από την εξαγόμενη ενέργεια της περιοχής που εξάγει.

Στη συνέχεια υποθέτουμε ότι η παράμετρος $x^{(a,b)}$ δηλώνει το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που εξάγεται από την περιφέρεια j προς μια περιφέρεια i , και η παράμετρος $e^{x^{(j,i)}}$ δηλώνει τις απώλειες της μεταφοράς. Με βάση τους προαναφερθέντες συμβολισμούς το συνολικό ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που εισάγεται στην περιοχή i είναι

$$x^{(i,i)}(1 - e^{x^{(j,i)}}) \quad (4.19)$$

όπου οι απώλειες δίνονται ως ένας πραγματικός αριθμός μέσα στο διάστημα $[0,1)$. Επιπρόσθετα, η μεταφορά ενέργειας δεν μπορεί να υπερβεί την χωρητικότητα μεταφοράς. Για το λόγο αυτό, το ποσό που μεταφέρεται θεωρείται ως εκείνο που στέλνεται έξω από την περιφέρεια. Συνεπώς ο περιορισμός για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας δίνεται ως ακολούθως.

$$x^{(j,i)} \leq \hat{x}^{(j,i)} \quad (4.20)$$

με $x^{(j,i)}$ να είναι η ηλεκτρική ενέργεια που εξήρθε από την περιφέρεια και $\hat{x}^{(j,i)}$ το άνω όριο της ποσότητας αυτής.

Τέλος, η μεταφορά ενέργειας εισάγει ένα κόστος το οποίο προσδιορίζεται από την συνιστώσα $\beta^{x^{(j,i)}}$ τέτοια ώστε το κόστος μεταφοράς να είναι $\beta^{x^{(j,i)}}x^{(j,i)}$ για ποσό μεταφερόμενης ενέργειας $x^{(j,i)}$ από το j προς το i .

4.1.2.5.2 Συναλλαγή ηλεκτρικής ενέργειας με τρίτες χώρες

Ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να ανταλλαχθεί με τρίτες χώρες (π.χ. χώρες ή περιφέρειες οι οποίες δεν έχουν μοντελοποιηθεί). Το μεταφερόμενο ποσό ενέργειας αντιμετωπίζεται ως σταθερή ποσότητα (εξωτερικά δοσμένη). Τα στοιχεία του μεταφερόμενου ποσού ενέργειας του μοντέλου μπορούν να θεωρηθούν ως μοτίβα παραγωγής τα οποία βρίσκονται σε περιφέρειες τρίτων χωρών, αν αυτές εμπεριέχονται στο μοντέλο. Για το λόγο αυτό δεν απαιτούνται τροποποιήσεις στο μοντέλο στα όσα έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα.

4.1.2.5.3 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Σε κάθε περιφέρεια υπάρχουν απώλειες λόγω της διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας από τους παραγωγούς προς τους καταναλωτές. Οι απώλειες αυτές είναι ανάλογες του ποσού της ηλεκτρικής ενέργειας που εισέρχεται στο δίκτυο διανομής και αναπαριστάται με τον παράγοντα e^e . Επιπρόσθετα, περιορισμοί ως προς τη διανομή δεν υπάρχουν. Με βάση τις απώλειες ως προς την ηλεκτρική ενέργεια κατά τη διανομή της, εισάγεται η ακόλουθη σχέση.

$$e_d = e_s(1 - e^e) \quad (4.21)$$

όπου e_s και e_d είναι τα ποσά ηλεκτρικής ενέργειας που φθάνουν στους καταναλωτές και εισέρχονται στο δίκτυο διανομής αντίστοιχα. Από την παραπάνω σχέση γίνεται αντιληπτό ότι λόγω της πιθανότητας μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που εισέρχεται στο δίκτυο διανομής μιας περιφέρειας δεν είναι απαραίτητα ίσο με την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην περιφέρεια αυτή. Η διανομή εισάγει επίσης και ένα κόστος β^e τέτοιο ώστε το κόστος διανομής να είναι ίσο με $\beta^e e_s$ ή σύμφωνα με την παραπάνω σχέση $\beta^e e_d/(1-e^e)$.

4.1.2.5.4 Διανομή θερμότητας

Η προσφορά και η ζήτηση θερμότητας καθορίζονται μεμονωμένα για κάθε περιφέρεια, καθώς επίσης στο μοντέλο δεν επιτρέπεται η μεταφορά θερμότητας μεταξύ περιφερειών. Η διανομή θερμότητας πραγματοποιείται με δίκτυα διανομής θερμότητας μέσα σε κάθε περιφέρεια. Η διανομή της θερμότητας δεν έχει περιορισμούς δηλαδή υποθέτεται ότι υπάρχει ένα ισχυρό δίκτυο διανομής σε κάθε περιφέρεια, όπως υποτέθηκε και στην περίπτωση της ηλεκτρικής ενέργειας. Για το λόγο αυτό υπάρχουν απώλειες ανάλογες της παραγωγής θερμότητας.

Παρόμοια με την ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα εισάγει την ακόλουθη σχέση.

$$h_d = h_s(1 - e^h) \quad (4.22)$$

όπου h_d και h_s είναι τα ποσά θερμότητας που φθάνουν στους καταναλωτές και εξέρχονται από την παραγωγή αντίστοιχα. Η διανομή θερμότητας εισάγει επίσης ένα κόστος β^h τέτοιο ώστε το κόστος διανομής να ισούται με $\beta^h h_s$ ή σύμφωνα με την παραπάνω σχέση $\beta^h h_d/(1 - e^h)$.

4.1.2.5.5 Επιπτώσεις στις τιμές

Τα κόστη και οι απώλειες στη διανομή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας έχουν σαν αποτέλεσμα οι τιμές ή πιο συγκεκριμένα τα οριακά κόστη, ηλεκτρισμού και θερμότητας να διαφέρουν μεταξύ του σημείου παραγωγής και του σημείου κατανάλωσης μέσα σε μια περιφέρεια. Παράλληλα, τα κόστη μεταφοράς και οι απώλειες μεταφοράς θα έχουν ως άμεσο αποτέλεσμα οι τιμές ηλεκτρισμού να διαφέρουν στα σημεία παραγωγής σε διαφορετικές περιφέρειες.

Με βάση την παραπάνω παρατήρηση, γίνεται η υπόθεση ότι π_d^e και π_d^h είναι οι τιμές ηλεκτρισμού και θερμότητας όπως αυτές παρατηρούνται στην πλευρά της ζήτησης (αγνοώντας του φόρους) και επίσης με την ίδια λογική υποθέτεται ότι π_s^e και π_s^h είναι οι τιμές ηλεκτρισμού και θερμότητας όπως αυτές παρατηρούνται στην πλευρά της προσφοράς. Επιπρόσθετα, οι παράγοντες β^e και β^h είναι τα κόστη διανομής ηλεκτρισμού και θερμότητας αντίστοιχα και β^x το κόστος μεταφοράς του ηλεκτρισμού. Όλα τα κόστη αναφέρονται ανά μονάδα ενέργειας στο σημείο παραγωγής.

Λαμβάνοντας υπόψη τους παραπάνω συμβολισμούς των μεγεθών, οι επόμενες σχέσεις δείχνουν τη σχέση τιμών μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας στην ίδια περιφέρεια

$$\pi_d^e = \left(\frac{1}{1-e^e} \right) (\pi_s^e + \beta^e) \quad (4.23)$$

Όμοια για την θερμότητα

$$\pi_d^h = \left(\frac{1}{1-e^h} \right) (\pi_s^h + \beta^h) \quad (4.24)$$

Όσον αφορά τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας οι επιπτώσεις προσδιορίζονται μεταξύ δυο κόμβων παραγωγής όπου ο ένας εισάγει ενέργεια από τον άλλο. Σε αυτό το σενάριο, οι τιμές θα είναι υψηλότερες στον κόμβο που εισάγει ενέργεια, σε σχέση με αυτόν που εξάγει. Αν δεν υπάρχει περιορισμός μεταφοράς μεταξύ των δυο κόμβων τότε η σχέση τιμών δίνεται από

$$\pi_i^e = \left(\frac{1}{1-e^{x(i,i)}} \right) (\pi_j^e + \beta^{x(i,i)}) \quad (4.25)$$

όπου i και j είναι οι δείκτες που δηλώνουν τους κόμβους εισαγωγής και εξαγωγής αντίστοιχα.

Σε αντίθετη περίπτωση, εάν υπάρχει περιορισμός μεταφοράς ενέργειας τότε ισχύει ο παρακάτω σχέση τιμών

$$\pi_i^e \geq \left(\frac{1}{1-e^{x(i,i)}} \right) (\pi_j^e + \beta^{x(i,i)}) \quad (4.26)$$

Επιπρόσθετα, πρέπει να τονισθεί ότι η μεταφορά εισάγει ένα κόστος. Για το λόγο αυτό, εάν x είναι το διάνυσμα των μεταφερόμενων ποσοτήτων, που ορίζονται στους κόμβους εξαγωγής τότε το σχετικό κόστος θα είναι $C^x(x)$. Η C^x θα είναι μία κυρτή συνάρτηση ως προς τις μεταφερόμενες ποσότητες x .

4.1.2.5.6 Επιπτώσεις στην αντικειμενική συνάρτηση

Με την εισαγωγή του κόστους μεταφοράς και του κόστους διανομής η αντικειμενική συνάρτηση του υπό μελέτη προβλήματος πρέπει να τροποποιηθεί. Τα κόστη μεταφοράς και διανομής πρέπει να θεωρηθούν ως μέρος του ολικού κόστους. Με βάση αυτή την παρατήρηση, η συνάρτηση C πρέπει να αποτελείται από τρία συστατικά στοιχεία, αντίστοιχα με την παραγωγή, τη διανομή και τη μεταφορά. Συνοψίζοντας τις προηγούμενες παρατηρήσεις η συνάρτηση του ολικού κόστους C δίνεται από

$$C(e_s, h_s, x) = C^g(e_s, h_s) + C^d(e_s, h_s) + C^x(x) \quad (4.27)$$

Συνεπώς το πρόβλημα βελτιστοποίησης τροποποιείται αντίστοιχα, ως ακολούθως.

$$\max_{e_d, e_s, h_d, h_s, x} [U^e(e_d) + U^h(h_d) + o + \pi_d^e e_d + \pi_d^h h_d - (C^g(e_s, h_s) + C^x(x))] \quad (4.28)$$

Λαμβάνοντας υπόψη τον περιορισμό προϋπολογισμού, ο οποίος είναι ο ακόλουθος,

$$\Pi_c^e e_c + \pi_c^h h_c + o = B \quad (4.29)$$

Συνεπώς, προκύπτει η τροποποιημένη μορφή του προβλήματος βελτιστοποίησης.

$$\max_{e_d, e_s, h_d, h_s, x} [U^e(e_d) + U^h(h_d) - C(e_s, h_s, x)] \quad (4.30)$$

Οι εκφράσεις μπορούν να προσδιοριστούν περαιτέρω σύμφωνα με τις υποθέσεις που γίνονται σε κάθε μοντέλο. Για παράδειγμα, εάν η C^d θεωρείται γραμμική τότε με την ήδη δοσμένη σημειογραφία η C^d μπορεί να δοθεί ως

$$\beta^e e_s + \beta^h h_s \quad (4.31)$$

4.1.2.6 Φόροι

Οι φόροι μπορούν να ενσωματωθούν στο μοντέλο με διάφορους τρόπους. Στο παρόν κείμενο θα ασχοληθούμε με τους παρακάτω τρόπους οι οποίοι έχουν υλοποιηθεί σε πραγματικά μοντέλα, καθώς επίσης στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας.

- Φόροι καυσίμων, για κάθε καύσιμο ανάλογα με το ποσό που καταναλώνεται στην παραγωγή.
- Φόροι εκπομπών, για κάθε εκπεμπόμενο τύπο ανάλογα με το ποσό που απελευθερώνεται.
- Φόροι κατανάλωσης, ανάλογα με το ποσό της ενέργειας που καταναλώνεται (θερμότητα ή ηλεκτρική ενέργεια)

Η εισαγωγή των φόρων μεταξύ άλλων εισάγει την ιδέα ότι σχετικά με την ανταλλαγή ηλεκτρισμού και θερμότητας το ποσό που θα πληρώνει ο καταναλωτής θα είναι διαφορετικό από το ποσό που θα λαμβάνει ο παραγωγός.

4.1.2.6.1 Φόροι καυσίμων

Η προσθήκη του φόρου στα καύσιμα είναι προφανής. Για το λόγο αυτό γίνεται η υπόθεση δύο δεικτών φόρων, t_0^f και t_1^f τέτοιων ώστε ο t_0^f να δίνεται σε μια βάση GJ (GigaJoule) και ο t_1^f σε μια σχετική βάση. Κατά αυτόν τον τρόπο, εάν π^f είναι η τιμή του καυσίμου σε μια βάση GJ χωρίς φόρους, το κόστος του καυσίμου που εισέρχεται στο μοντέλο θα είναι $(\pi^f + t_0^f)t_1^f$ σε μια βάση GJ.

4.1.2.6.2 Φόροι εκπομπών

Οι φόροι εκπομπών μπορούν να υλοποιηθούν με τρόπο παρόμοιο των φόρων καυσίμων. Κατά αυτόν τον τρόπο, εάν γίνει η υπόθεση ότι οι εκπομπές από ένα συγκεκριμένο συνδυασμό καυσίμων και τεχνολογιών δίνεται ως ε^{mf} όπου f το ποσό του καυσίμου και ε^m μια σταθερά, τότε με ένα φόρο εκπομπών t^m και μια τιμή καυσίμου π^f το κόστος καυσίμου που εισέρχεται στο μοντέλο θα είναι $\pi^f + t^m \varepsilon^m$.

4.1.2.6.3 Φόροι κατανάλωσης ενέργειας

Σε αυτή την ενότητα εισάγεται η έννοια των φόρων t^e και t^h για ηλεκτρισμό και θερμότητα αντίστοιχα, τέτοιων ώστε ο καταναλωτής ο οποίος αγοράζει e_d μονάδες ηλεκτρισμού σε μια τιμή π_d^e (εκτός φόρων) και h_d μονάδες θερμότητας σε μια τιμή π_d^h (εκτός φόρων) θα πληρώσει τελικά συμπεριλαμβανομένων των φόρων $(\pi_d^e + t^e) e_d + (\pi_d^h + t^h) h_d$.

Το κόστος αυτό πρέπει να εμφανίζεται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Κατά αυτόν τον τρόπο, ανάλογα με τις καταναλισκόμενες ποσότητες και τιμές, προσδιορίζεται ότι

$$(\pi_d^e + t^e) e_d + (\pi_d^h + t^h) h_d + o = B \quad (4.32)$$

και αντίστοιχα το πρόβλημα βελτιστοποίησης τροποποιείται ως ακολούθως.

$$\max_{e_d, e_s, h_d, h_s, x} [U^e(e_d) + U^h(h_d) - t^e e_d - t^h h_d - C(e_s, h_s, x)] \quad (4.33)$$

4.1.2.6.4 Επιβάρυνση φόρων

Λαμβάνοντας υπόψη την επιβάρυνση που προσθέτουν οι φόροι, με μια επιβάρυνση u στην κατανάλωση ενέργειας επιπροσθέτως των παραπάνω φόρων, η σχέση καταναλισκόμενων ποσοτήτων και τιμών τροποποιείται ως ακολούθως.

$$(1+u)((\pi_d^e + t^e) e_d + (\pi_d^h + t^h) h_d) + o = B \quad (4.34)$$

Παρόλα αυτά, σε αυτή την περίπτωση μια προσπάθεια για εξάλειψη και των τιμών και του όρου o στην παραπάνω σχέση θα ήταν ανεπιτυχής. Ο λόγος για αυτόν τον περιορισμό μπορεί επίσης να συζητηθεί και σχετικά με τις τιμές. Στην περίπτωση κατά την οποία οι τιμές ήταν γνωστές, θα ήταν πιθανή η διαχείριση του φόρου όπως έγινε προηγουμένως. Οι τιμές θα μπορούσαν για παράδειγμα να προσδιοριστούν ως οι τιμές οριακού κόστους παραγωγής έτσι ώστε οι παρακάτω περιορισμοί να προστεθούν στο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

$$\pi_s^e = \frac{\partial C(e, h)}{\partial e} \quad (4.35)$$

$$\pi_s^h = \frac{\partial C(e, h)}{\partial h} \quad (4.36)$$

όπου οι τιμές (π_s^e, π_s^h) και (π_d^e, π_d^h) είναι συνδεδεμένες, λόγω της μεταφοράς και της διανομής, η οποία αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Επιπρόσθετα, θα ήταν πιθανό να προστεθεί μια επιβάρυνση φόρου u εάν αυτή απευθυνόταν σε όλα τα προϊόντα. Σε αυτή την περίπτωση η σχέση καταναλισκόμενων ποσοτήτων και τιμών θα γινόταν

$$(1+u)((\pi_d^e + t^e) e_d + (\pi_d^h + t^h) h_d + o) = B \quad (4.37)$$

Η περίπτωση αυτή είναι παρόμοια της (4.32) με τη διαφορά ότι ο προϋπολογισμός B έχει μειωθεί στο $B/(1+u)$.

$$(\pi_d^e + t^e) e_d + (\pi_d^h + t^h) h_d + o = B / (1 + u) \quad (4.38)$$

Είναι προφανές ότι αυτές δεν θα επηρεάσει τις βέλτιστες τιμές των e και h , αν και θα αλλάξει ο παράγοντας o .

4.1.2.7 Ζήτηση

Στην ακόλουθη ενότητα θα προταθούν διάφορες πρότυπες συναρτήσεις για να περιγραφεί η ελαστικότητα της ζήτησης. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί η μαθηματική μορφή των συναρτήσεων ζήτησης και μερικές από τις κύριες επιπτώσεις, της κάθε μορφής συνάρτησης, κυρίως μελετώντας την ίδια ελαστικότητα της τιμής, τη συγκριτική ελαστικότητα της τιμής και την ελαστικότητα του εισοδήματος.

Αρχικά, γίνεται μελέτη της ακόλουθης μορφής:

$$\text{Max}[U(Y_1, \dots, Y_n)] \quad (4.39)$$

$$\sum_{i=1}^n \pi_i Y_i = B \quad (4.40)$$

όπου $U: R^n \rightarrow R$ είναι η συνάρτηση ευχαριστίας των καταναλωτών, Y_i είναι η κατανάλωση προϊόντος i , π_i είναι η τιμή του προϊόντος i και B είναι ο προϋπολογισμός του καταναλωτή.

Η λύση του παραπάνω προβλήματος μπορεί κάτω από κατάλληλες συνθήκες που εισάγουν μοναδικότητα, να γραφτεί για το προϊόν i ως

$$Y_i^* = Y_i^*(\pi_1, \dots, \pi_n; B) \quad (4.41)$$

στηριζόμενοι κυρίως στις τιμές των μεμονωμένων προϊόντων και στον προϋπολογισμό των πελατών σε σχέση βέβαια και με τη συγκεκριμένη μορφή της συνάρτησης U . Στη συνέχεια, ακολουθεί ανάλυση για διάφορες τυποποιημένες μορφές της συνάρτησης ευχαριστίας U .

4.1.2.7.1 Η Cobb-Douglas συνάρτηση, CD

Η n -διάστατη συνάρτηση Cobb-Douglas μπορεί να γραφεί ως

$$\prod_{i=1}^n Y_i^{a_i} \quad (4.42)$$

όπου a_i είναι θετικές σταθερές. Εύκολα αποδεικνύεται ότι $\sum_{i=1}^n a_i = 1$. Θεωρώντας αυτή ως τη συνάρτηση ευχαριστίας στην (4.39) το πρόβλημα των καταναλωτών να μεγιστοποιήσουν την ευχαριστία τους υπό τον περιορισμό του προϋπολογισμού (4.40) μπορεί να επιλυθεί ως ακολούθως. Η έκφραση (4.39) μπορεί να αντικατασταθεί με $\max[\sum_{i=1}^n a_i \ln Y_i]$ χωρίς αλλαγή της βέλτιστης λύσης. Εισάγοντας έναν λαγκρανσιανό πολλαπλασιαστή μ στην (4.40), το πρόβλημα (4.39)-(4.40) μπορεί να γραφτεί ως

$$\max[\sum_{i=1}^n a_i \ln Y_i - \mu(\sum_{i=1}^n \pi_i Y_i - B)] \quad (4.43)$$

Οι πρώτης τάξης συνθήκες είναι

$$\frac{\partial(\sum_{i=1}^n a_i \ln Y_i - \mu(\sum_{i=1}^n \pi_i Y_i - B))}{\partial Y_i} = \frac{a_i}{Y_i} - \mu \pi_i = 0 \quad (4.44)$$

Ή ομοίως

$$Y_i = \frac{a_i}{\mu \pi_i} \quad (4.45)$$

Εισάγοντας την παραπάνω σχέση στην (4.40) έχουμε

$$\sum_{i=1}^n \pi_i \frac{a_i}{\mu \pi_i} = B \quad (4.46)$$

όπου

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n a_i}{B} \quad (4.47)$$

Η οποία με τη σειρά της χρησιμοποιώντας την (4.45) και υποθέτοντας ότι $\sum_{i=1}^n a_i = 1$, γίνεται

$$Y_i = \frac{a_i B}{\pi_i} \quad (4.48)$$

Αυτή είναι η γνωστή μη αντισταθμισμένη (η Marshallian) ζήτηση, στην οποία η αλλαγή των τιμών δεν επηρεάζεται από τις ταυτόχρονες αλλαγές του προϋπολογισμού B .

Τα βασικά χαρακτηριστικά της συνάρτησης ζήτησης είναι η ελαστικότητα της ίδιας τιμής, η ελαστικότητα της συγκριτικής τιμής και η ελαστικότητα του εισοδήματος. Η ελαστικότητα της ίδιας τιμής δηλαδή η σχετική αύξηση στη ζήτηση για μια ανάλογη (ποσοστιαία) αύξηση στις τιμές μπορούν να βρεθούν ως

$$\frac{\partial Y_i}{Y_i} = \frac{\partial Y_i}{\partial \pi_i} \frac{\pi_i}{Y_i} = -1 \quad (4.49)$$

Το οποίο σημαίνει ότι για μια αύξηση $x\%$ στην τιμή π_i προκαλεί μια αντίστοιχη μείωση $x\%$ στην Y_i .

Η ελαστικότητα της συγκριτικής τιμής, δηλαδή η σχετική (ποσοστιαία) αύξηση στην ζήτηση ενός προϊόντος i για μια αντίστοιχη αύξηση στην τιμή ενός άλλου προϊόντος j μπορεί να βρεθεί ως

$$\frac{\frac{\partial Y_i}{Y_i}}{\frac{\partial \pi_j}{\pi_j}} = \frac{\partial Y_i}{\partial \pi_j} \frac{\pi_j}{Y_i} = 0 \quad (4.50)$$

Όπως φαίνεται, η ζήτηση για το προϊόν i είναι ανεξάρτητη από τις τιμές των άλλων προϊόντων j , $j \neq i$.

Τέλος, η ελαστικότητα του εισοδήματος, δηλαδή η σχετική αύξηση στη ζήτηση για μια σχετική αύξηση στο εισόδημα (ή τον προϋπολογισμό B) μπορεί να βρεθεί ως

$$\frac{\frac{\partial Y_i}{Y_i}}{\frac{\partial B}{B}} = \frac{\partial Y_i}{\partial B} \frac{B}{Y_i} = 1 \quad (4.51)$$

Δηλαδή, μια αύξηση $x\%$ στο εισόδημα B εισάγει μια αντίστοιχη αύξηση $x\%$ στην Y_i .

4.1.2.7.2 Συνάρτηση σταθερής ελαστικότητας αντικατάστασης (CES: Constant Elasticity of Substitution function)

Η n -διάστατη CES συνάρτηση μπορεί να γραφεί ως

$$\left(\sum_{i=1}^n a_i Y_i^{(\sigma-1)/\sigma} \right)^{\sigma/(\sigma-1)} \quad (4.52)$$

όπου a_i είναι θετικές σταθερές. Εύκολα συνεπάγεται ότι $\sum_{i=1}^n a_i^{\sigma/(\sigma-1)} = 1$. Υποθέτοντας ότι $\sigma/(\sigma-1) < 1$ και $a_i > 0$ η συνάρτηση είναι κοίλη στην $Y_i^{(\sigma-1)/\sigma}$ και η εξίσωση (4.39) μπορεί να αντικατασταθεί με $\max[\sum_{i=1}^n a_i Y_i^{(\sigma-1)/\sigma}]$. Χρησιμοποιώντας την ίδια τεχνική με παραπάνω η εξίσωση όμοια και με την (4.43) μπορεί να γραφεί ως

$$\max \left[\sum_{i=1}^n a_i Y_i^{(\sigma-1)/\sigma} - \mu \left(\sum_{i=1}^n Y_i - B \right) \right] \quad (4.53)$$

Με πρώτης τάξης συνθήκες

$$\frac{\partial \left(\sum_{i=1}^n a_i Y_i^{(\sigma-1)/\sigma} - \mu \left(\sum_{i=1}^n \pi_i Y_i - B \right) \right)}{\partial Y_i} = a_i \left(\frac{\sigma-1}{\sigma} \right) Y_i^{-1/\sigma} - \mu \pi_i = 0 \quad (4.54)$$

ή έπειτα από πράξεις

$$Y_i = \frac{1}{\mu^\sigma} \left(\frac{a_i}{\pi_i} \right)^\sigma \left(\frac{\sigma-1}{\sigma} \right)^\sigma \quad (4.56)$$

Αντικαθιστώντας αυτό στην (4.55) έχουμε

$$Y_i = B \left(\frac{a_i}{\pi_i} \right)^\sigma \frac{1}{\sum_{i=1}^n \alpha_i^\sigma \pi_i^{1-\sigma}} \quad (4.57)$$

Τότε επίσης για την CES συνάρτηση η έκφραση για την μη αντισταθμισμένη ζήτηση παραγωγίζεται. Είναι προφανές ότι η ζήτηση για ένα προϊόν i όπως έχει εκφραστεί στην (4.57) θα εξαρτάται από τις τιμές στα προϊόντα $j, j \neq i$ σε αντιπαράθεση με την (4.48).

Με βάση τα παραπάνω η ελαστικότητα της ίδιας τιμής, η ελαστικότητα της συγκριτικής τιμής και η ελαστικότητα του εισοδήματος μπορούν να βρεθούν ως

$$\frac{\frac{\partial Y_i}{Y_i}}{\frac{\partial \pi_i}{\pi_i}} = -\sigma + (1-\sigma) \frac{\alpha_i^\sigma \pi_i^{1-\sigma}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i^\sigma \pi_i^{1-\sigma}} \quad (4.58)$$

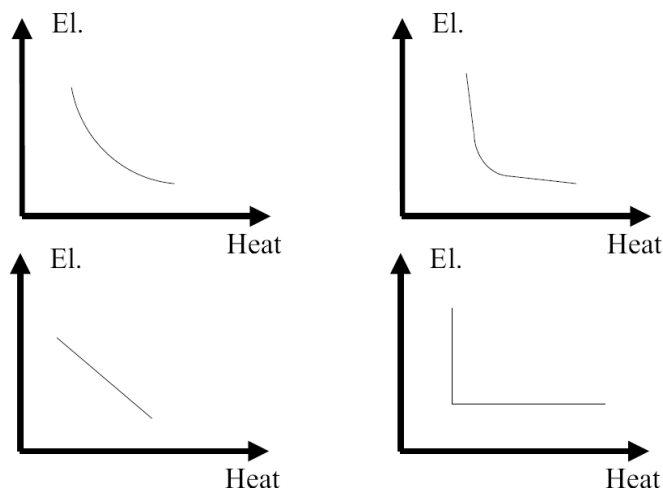
$$\frac{\frac{\partial Y_i}{Y_i}}{\frac{\partial \pi_j}{\pi_j}} = (\sigma-1) \frac{\alpha_j^\sigma \pi_j^{1-\sigma}}{\sum_{i=1}^n \alpha_i^\sigma \pi_i^{1-\sigma}} \quad (4.59)$$

$$\frac{\frac{\partial Y_i}{Y_i}}{\frac{\partial B}{B}} = 1 \quad (4.60)$$

4.1.2.7.3 Άλλες τυποποιημένες συναρτήσεις

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν και άλλες τυποποιημένες συναρτήσεις, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Έτσι οι ελαστικότητες μπορούν να προσδιοριστούν από CES συναρτήσεις ή LES Leontief, Stone-Geary συναρτήσεις ή άλλες συναρτήσεις που είναι ευρέως γνωστές.

Στο ακόλουθο σχήμα απεικονίζονται μερικές συνήθεις αντικαταστάσεις. Τα ανώτερα σχήματα απεικονίζουν συναρτήσεις CES εκ των οποίων η αριστερή δείχνει μεγάλη πιθανότητα αντικατάστασης ενώ η δεξιά μικρή. Η κάτω αριστερή εικόνα δείχνει την περίπτωση όπου η αντικατάσταση είναι άπειρη. Αυτή μπορεί να θεωρηθεί ειδική περίπτωση συνάρτησης CES με $\sigma = -\infty$.



Σχήμα 10: Καμπύλες συνήθων αντικαταστάσεων

4.1.2.7.4 Υλοποίηση

Ο προσδιορισμός της ζήτησης μπορεί πειστικά να γίνει σε σχέση με τη συνάρτηση ευχαριστίας η οποία είναι διαχωρίσιμη όσον αφορά τον ηλεκτρισμό και τη θερμότητα και γραμμική σχετικά με τα άλλα προϊόντα. Με σκοπό να αναπαρασταθούν οι ίδιες τιμές ελαστικότητας η διερεύνηση των τυποποιημένων συναρτήσεων έδειξε ότι η Cobb-Douglas συνάρτηση μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως βάση για την κατασκευή της συνάρτησης ζήτησης. Άλλες ιδιότητες όπως η ελαστικότητα της συγκριτικής τιμής και η ελαστικότητα εισοδήματος πρέπει να αναπαρασταθούν εξωτερικά.

Παρόλα αυτά δεν υπάρχει λόγος η μοντελοποίηση της συνάρτησης ευχαριστίας να περιοριστεί σε μια τυποποιημένη συνάρτηση, για το λόγο αυτό μια αύξουσα συνάρτηση μπορεί να επιλεγεί, ή σε σχέση με τη συνάρτηση ζήτησης, (η ζήτηση να εξαρτάται από την τιμή), οποιαδήποτε φθίνουσα συνάρτηση (για ηλεκτρισμό και θερμότητα ανεξάρτητα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί.

Από την άλλη πλευρά, εφόσον τα δεδομένα μπορούν να δοθούν σε σχέση με τις τυποποιημένες μορφές όπως την συνάρτηση Cobb-Douglas ή την CES συνάρτηση, οι ιδιοτιμές ελαστικότητας μιας τέτοιας συνάρτησης πρέπει (και δύναται) να προσδιορισθούν στην υλοποίηση.

4.1.2.8 Η αντικειμενική συνάρτηση και οι παράγοντες ισορροπίας

Σε αυτή την ενότητα αναπτύσσουμε τη βασική ιδέα του προσδιορισμού των περιορισμών ισορροπίας. Οι υποθέσεις είναι κυρίως: δύο προϊόντα (ηλεκτρισμός και θερμότητα), πολλοί παραγωγοί, πολλές τεχνολογίες, μια περίοδος (στατικό μοντέλο), μια γεωγραφική περιοχή, μια χώρα, όχι κόστος μεταφοράς ή διανομής ή περιορισμοί, ομαλές (συνεχώς διαφορίσιμες) συναρτήσεις, ένας καταναλωτής και βραχυπρόθεσμες συνθήκες. Υποθέτουμε λοιπόν ότι ο καταναλωτής έχει μια συνάρτηση ευχαριστίας $U:R^3 \rightarrow R$ (π.χ. μια πραγματική συνάρτηση με τρεις πραγματικές μεταβλητές) όπου οι

μεταβλητές είναι (e, h, o) π.χ. ηλεκτρισμός, θερμότητα και άλλο. Υποθέτεται ότι είναι διαχωρίσιμες και ισοτροπικές τέτοιες ώστε:

$$U(e, h, o) = U^e(e) + U^h(h) + o \quad (4.63)$$

όπου $U^e : R \rightarrow R$ και $U^h : R \rightarrow R$. Θα υποθεθεί ότι U^e και U^h είναι κυρτές και όπως προκύπτει από την (4.63), η U είναι γραμμική κατά το o . Υποθέτουμε ότι υπάρχει ένας καταναλωτής με συνολικό προϋπολογισμό B . Ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα διατίθενται στην αγορά σε τιμές π^e και π^h , αντίστοιχα.

Με βάση τις προηγούμενες υποθέσεις προκύπτει το ακόλουθο πρόβλημα:

$$\max [U(e, h, o) + \pi^e e + \pi^h h - C(e, h)] \quad (4.64)$$

$$\pi^e e + \pi^h h + o = B \quad (4.65)$$

Σε αυτό η συνάρτηση $C: R^2 \rightarrow R$ αναπαριστά τα κόστη παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας και υποθέτεται ότι η C είναι κυρτή. Επιπρόσθετα, η (4.65) εκφράζει τον περιορισμό του προϋπολογισμού του καταναλωτή.

Στην (4.64) ο όρος $(\pi^e e + \pi^h h - C(e, h))$ μπορεί να θεωρηθεί το περιθώριο ή η ευχαρίστηση του παραγωγού. Ανακεφαλαιώνοντας, το πρόβλημα (4.64)-(4.65) εκφράζει τη μεγιστοποίηση του αθροίσματος της ευχαριστίας παραγωγών και καταναλωτών υπό τον περιορισμό του προϋπολογισμού των καταναλωτών.

Χρησιμοποιώντας την (4.63) και την (4.65) και παρατηρώντας ότι ο σταθερός όρος $(B$ στην (4.65)) μπορεί να εξαλειφτεί από την αντικειμενική συνάρτηση χωρίς να επηρεάζεται η βέλτιστη λύση, το πρόβλημα (4.64)-(4.65) μπορεί να αναδιατυπωθεί ως

$$\max_{e, h} [U^e(e) - C(e, h)] \quad (4.66)$$

Αν υποθέτεται ότι η συνάρτηση είναι συνεχώς διαφορίσιμη, φαίνεται ότι οι απαραίτητες βέλτιστες συνθήκες για το πρόβλημα (4.66) είναι

$$\nabla U^e(e) = \frac{dU^e(e)}{de} = \frac{\partial C(e, h)}{\partial e} \quad (4.67)$$

$$\nabla U^h(h) = \frac{dU^h(h)}{dh} = \frac{\partial C(e, h)}{\partial h} \quad (4.68)$$

Εφόσον οι συναρτήσεις έχουν υποθεθεί κοίλη και κυρτή, αντίστοιχα, αυτές οι συνθήκες είναι ικανοποιητικές βέλτιστες συνθήκες. Για μη ομαλές συναρτήσεις το γενικευμένο ανάδελτα μπορεί να χρησιμοποιηθεί και οι (4.67)-(4.68) μπορούν να μετατραπούν σε

$$0 \in \partial(U^e(e) + U^h(h) - C(e, h)) \quad (4.69)$$

Καθώς παρατηρείται, οι συνθήκες δηλώνουν ότι οι βέλτιστες οριακές τιμές της συνάρτησης ευχαριστίας είναι ίσες με το οριακό κόστος παραγωγής των δυο προϊόντων e και h , το οποίο ήταν και το επιθυμητό αποτέλεσμα. Επιπλέον, το αποτέλεσμα εξήχθη χωρίς περιορισμούς στο πρόσημο των μεταβλητών e, h και o . Παρόλα αυτά, στην πραγματικότητα θέλουμε οι μεταβλητές αυτές να είναι θετικές. Αυτό μπορεί να

επιτευχθεί βάζοντας κάποιους περιορισμούς στις μεταβλητές (4.64)-(4.65) ή στην (4.66). Τέλος, συνέπεια της μορφής της U στην (4.63) είναι ότι μπορεί να προέλθει ολοκληρώνοντας τις μερικές μεταβλητές. Κατά αυτόν τον τρόπο προκύπτει ότι

$$U(e, h, o) = U(0, 0, 0) + \int_0^e (\nabla U^e(\varepsilon)) d\varepsilon + \int_0^h (\nabla U^h(\eta)) d\eta + o \quad (4.70)$$

Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα από τη χρήση της (4.66) ή γενικεύσεις όπως η (4.69) είναι περισσότερα από αυτά των (4.67)-(4.68) για τους καταναλωτές και τους παραγωγούς. Αρχικά, καθώς παρατηρείται μπορεί να υπάρξει ισορροπία μεταξύ ηλεκτρισμού και θερμότητας και η ισορροπία θα είναι αντίστοιχη με τις ποσότητες και τις τιμές. Δεύτερον, το έτος υποδιαιρείται σε χρονικά τμήματα, και ορισμένες τεχνολογίες παραγωγής. Πιο συγκεκριμένα οι υδρο-αποθηκευτικές τεχνολογίες εισάγουν μια σχέση μεταξύ των χρονικών τμημάτων. Για το λόγο αυτό, η ισορροπία μεταξύ των τιμών του ηλεκτρισμού σε διαφορετικά χρονικά τμήματα θα επιτευχθεί εφόσον οι φυσικοί περιορισμοί (αποθήκευση και μεταφορά) το επιτρέπουν. Το αποτέλεσμα αυτό όμως μπορεί να επηρεάσει και τη θερμότητα. Τρίτον, η μακροπρόθεσμη πλευρά που αναφέρεται στα μελλοντικά χρόνια, αναπαριστάται από την πιθανότητα να γίνουν επενδύσεις. Έτσι τα μακροπρόθεσμα οριακά κόστη μπορεί να γίνουν ρυθμιστικά των τιμών σε περιόδους με περιορισμένη διαθεσιμότητα. Αντίθετα, σε περιόδους με περίσσια διαθεσιμότητα, τα βραχυπρόθεσμα οριακά κόστη υπερισχύουν. Τέταρτον, η υποδιαίρεση των γεωγραφικών περιοχών του μοντέλου δηλώνει ότι η μεταφορά του ηλεκτρισμού θα γίνεται σύμφωνα με τις φυσικές δυνατότητες και τους οικονομικούς όρους που έχουν προσδιοριστεί. Αυτό θα εισάγει ισορροπία στις σχέσεις των γεωγραφικών περιοχών σύμφωνα με τους όρους μεταφοράς που έχουν προσδιοριστεί. Έτσι, οι όροι ισορροπίας καλύπτουν δυο τύπους συντελεστών (παραγωγούς και καταναλωτές), δυο προϊόντα (ηλεκτρισμό και θερμότητα), διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές (ηλεκτρικά διαιρεμένες περιοχές), και διάφορες άλλες οντότητες (βραχυπρόθεσμες (μέσα στο έτος) και μακροπρόθεσμες (μεταξύ ετών)).

4.1.2.9 Συνολικό μοντέλο – Ένα έτος

Στην παραπάνω παρουσίαση ένα σύνολο διαστάσεων έχει συζητηθεί μεμονωμένα. Σε αυτό το τμήμα θα συνδυάσουμε τις διάφορες πλευρές, οι οποίες αναλύθηκαν παραπάνω. Ο στόχος της παρούσας ενότητας είναι να αποδειχθεί ότι ο συνδυασμός των διαφορετικών πλευρών δε θα παραβιάσει τα συμπεράσματα που εξήχθησαν για κάθε μια από αυτές μεμονωμένα. Ένας επιπρόσθετος σκοπός είναι να παρουσιάσουμε τη γενική δομή του μοντέλου με επαρκείς λεπτομέρειες ώστε να επιτραπεί το συμπέρασμα των γενικών ερμηνειών σε μετέπειτα ενότητα. Η παρουσίαση που θα γίνει σε αυτό το τμήμα περιορίζεται στη μοντελοποίηση ενός έτους.

Όσον αφορά την αντικειμενική συνάρτηση αυτή προσδιορίζεται με συστατικά στοιχεία για κάθε σχετική γεωγραφική περιοχή. Τα συστατικά στοιχεία των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας U^e , $I^e d$ πρέπει να προσδιορισθούν για όλες τις

περιφέρειες και ομοίως, τα συστατικά στοιχεία των καταναλωτών θερμότητας U^h , $t^h h_d$ πρέπει να προσδιορισθούν για όλες τις περιοχές. Ακόμα, τα συστατικά στοιχεία παραγωγής $C(e_s, h_s)$ πρέπει να προσδιορισθούν για όλες τις περιοχές. Όλα τα κόστη διανομής $d^e e_s$ και $d^h h_s$ πρέπει να προσδιορισθούν για σχετικές περιφέρειες και περιοχές. Αντίστοιχα και τα κόστη μεταφοράς πρέπει να προσδιορισθούν για όλα τα ζεύγη περιφερειών. Τέλος, τα κόστη εκπομπών πρέπει να προσδιορισθούν για κάθε χώρα.

Όσον αφορά την προσωρινή διάσταση, συστατικά στοιχεία όπως η ζήτηση και η παραγωγή πρέπει να προσδιορισθούν σύμφωνα με κάθε υποδιαίρεση του έτους, ενώ τα συστατικά στοιχεία όπως οι φόροι και οι τιμές καυσίμων μπορούν να αναπαρασταθούν πιο εύλογα από τιμές που θεωρούνται σταθερές μέσα στο χρόνο. Ας υποθέσουμε τα επόμενα σύνολα ότι δίνονται στο μοντέλο

- C: οι χώρες με στοιχεία c
- R: οι περιφέρειες με υποσύνολα
 - R(c): περιφέρειες μέσα σε μια χώρα c
- A: περιοχές με υποσύνολα
 - A(c): περιοχές σε μια χώρα c
 - A(r): περιοχές σε μια περιφέρεια r
- G: μονάδες παραγωγής, με υποσύνολα
 - G(c): το σύνολο των μονάδων παραγωγής σε μια χώρα c
 - G(r): το σύνολο των μονάδων παραγωγής σε μια περιφέρεια r
 - G(a): το σύνολο των μονάδων παραγωγής σε μια περιοχή a
- T: χρονική περίοδος μέσα σε ένα έτος
- M: τύπος εκπομπής

Δείκτες

- a: περιοχή
- r: περιφέρεια
- c: χώρα
- t: χρονική περίοδος μέσα σε ένα έτος
- s: προσφορά
- d: ζήτηση
- m: τύπος εκπομπής

Ας υποθέσουμε ότι οι μεταβλητές στο μοντέλο είναι

- $e_{s,g}^t$: παραγωγή ηλεκτρισμού στη μονάδα g τη χρονική περίοδο t
- $h^{s,g,t}$: παραγωγή θερμότητας στη μονάδα g τη χρονική περίοδο t
- $e_d^{r,t}$: ζήτηση ηλεκτρισμού στην περιφέρεια r τη χρονική περίοδο t
- $h_d^{a,t}$: ζήτηση θερμότητας στην περιοχή a τη χρονική περίοδο t

Ας υποθέσουμε ότι οι συναρτήσεις στο μοντέλο είναι

- K_g^t : Κόστος παραγωγής στην μονάδα g τη χρονική περίοδο t
- $X^{x(t,p)}$: κόστη επένδυσης για μεταφορά φορτίων
- g_g^t : τεχνικοί περιορισμοί στη μονάδα g τη χρονική περίοδο t

- Φ^m : τύπο εκπομπής m

Τότε οι παραδοχές του συνολικού μοντέλου πρέπει να προσδιορισθούν ακολούθως.

Η συνάρτηση κριτήριο μπορεί να προσδιορισθεί ως

$$\begin{aligned}
 \max / & \sum_{t \in T} \{ \sum_{c \in C} \{ \sum_{r \in R(c)} U^{e,r,t}(e_d^{r,t}) + \sum_{a \in A(c)} U^{h,a,t}(h_d^{a,t}) \\
 & - \sum_{r \in R(c)} t^e e_s^{r,t} (1 - e_r^e) - \sum_{a \in A(c)} t^h h_s^{a,t} (1 - e_r^h) \\
 & - \sum_{p \in A(c)} K_p^t(e_{s,p}^t, h_{s,p}^t) \\
 & - \sum_{(\rho,r): \rho \in R(c), \rho \neq r} \beta^{x(\rho,r)} x^{(\rho,r)} - \sum_{(\rho,r): \rho \in R(c), \rho \neq r} X^{x(\rho,r)} \\
 & - \sum_{r \in R(c)} \beta_r^e e_d^t / (1 - e_r^e) - \sum_{a \in A(c)} \beta_a^h h_d^t / (1 - e_a^h) \} \} \} \}
 \end{aligned} \quad (4.71)$$

Εδώ οι όροι της πρώτης γραμμής αναγνωρίζονται ως οι ευχαριστία των καταναλωτών. Η δεύτερη γραμμή αναπαριστά τους φόρους κατανάλωσης ενέργειας, και πιθανώς άλλους φόρους. Η τρίτη γραμμή αναπαριστά τα κόστη παραγωγής, μαζί με κάθε φόρο καυσίμου και ακόμα εμπεριέχει κόστη λειτουργίας και συντήρησης και κόστη επενδύσεων. Η τέταρτη γραμμή αναπαριστά κόστη μεταφοράς και κόστη επενδύσεων και η πέμπτη γραμμή αναπαριστά κόστη διανομής.

Το ισοζύγιο ηλεκτρισμού δίνεται ως:

$$\sum_{g \in G(r)} e_{s,g}^t + \sum_{\rho \in R, \rho \neq r} x^{(\rho,r)t} (1 - e^{x(\rho,r)}) = e_d^{r,t} / (1 - e_r^e), \quad \forall t \in T \quad (4.72)$$

Το ισοζύγιο θερμότητας δίνεται ως:

$$\sum_{g \in G(a)} h_{s,g}^t = h_d^{a,t} / (1 - e_r^h), \quad \forall a \in A, \forall t \in T \quad (4.73)$$

Οι περιορισμοί σε συγκεκριμένες μονάδες παραγωγής, συμπεριλαμβανομένων και αυτών που σχετίζονται με επενδύσεις, δίνονται:

$$g_g^t(e_{s,g}^t, h_{s,g}^t) \leq 0, \quad \forall g \in G, \forall t \in T \quad (4.74)$$

Άνω όρια στις εκπομπές μπορεί να δοθούν ως ακολούθως, όπου μπορεί να υποτεθεί ότι η μέγιστη ετήσια ποσότητα προσδιορίζεται για κάθε χώρα:

$$\sum_{g \in G(c)} \sum_{t \in T} \Phi^m(e_{s,g}^t, h_{s,g}^t) \leq \bar{m}_c, \quad \forall c \in C, \forall m \in M \quad (4.75)$$

Επιπροσθέτως αυτών που δόθηκαν στις (4.72)-(4.75), μπορούν να υπάρχουν κάτω και άνω όρια σε ανεξάρτητες μεταβλητές. Ακόμα, με τους παραπάνω περιορισμούς μπορούν να προστεθούν και άλλες λεπτομέρειες. Αυτό μπορεί να επηρεάσει τη λύση του μοντέλου, βέβαια. Παρόλα αυτά, εφόσον η μορφή κρατηθεί γραμμική αυτό δεν θα αλλάξει τα γενικά αποτελέσματα.

4.1.2.10 Δυναμικότητα του μοντέλου

Το μοντέλο έχει υλοποιηθεί σαν ένα δυναμικό μοντέλο ως ακολούθως. Κάθε έτος υποδιαιρείται σε υποπεριόδους. Κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης ενός έτους, όλος ο χρόνος υποπεριόδων θεωρείται ανεξάρτητος, μέσω μίας ταυτόχρονης βελτιστοποίησης. Οι εξωτερικές παράμετροι που σχετίζονται με αυτό είναι μεταξύ άλλων εγκατεστημένα φορτία παραγωγής και μεταφοράς στην αρχή του χρόνου. Το αποτέλεσμα της προσομοίωσης είναι ένας αριθμός από φυσικές ποσότητες, συμπεριλαμβανομένων νέων φορτίων για παραγωγή και μεταφορά τα οποία έχουν εγκατασταθεί κατά τη διάρκεια του χρόνου. Αυτά, λοιπόν, μεταφέρονται στην αρχή του επόμενου χρόνου. Έτσι, η εσωτερική ετήσια δυναμική του μοντέλου μπορεί να χαρακτηριστεί ως μωπική.

4.1.2.11 Υλοποίηση γραμμικού προγραμματισμού

Το μοντέλο έχει υλοποιηθεί ως ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού. Τα πλεονεκτήματα αυτού είναι ότι παρέχει πιο εύκολα και αξιόπιστα αριθμητική λύση για το μοντέλο. Επιπλέον, τα περισσότερα δεδομένα δεν είναι διαθέσιμα με ακρίβεια ώστε να δικαιολογούν μη γραμμικές σχέσεις. Τα μειονεκτήματα είναι ότι για ορισμένα ζητήματα οι γραμμικές εξισώσεις είναι θεωρητικά ακατάλληλες. Αυτό για παράδειγμα είναι αληθές στη περίπτωση του προσδιορισμού της ελαστικότητας της ζήτησης, που παραδοσιακά μοντελοποιούνται με συνεχείς και ομαλές σχέσεις μεταξύ τιμής και ζήτησης. Ακόμα, κατά την εξήγηση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του μοντέλου μη συνεχείς μετακινήσεις τιμών μπορεί να βρεθούν. Ένας αριθμός θεωρητικών αποτελεσμάτων παραδοσιακά προέρχεται υπό την προϋπόθεση αυστηρής κυρτότητας, (ή κοιλότητας, όπως οι εκάστοτε συνθήκες επιβάλλουν) από κάποιες από τις συναρτήσεις.

4.1.2.11.1 Το σύστημα παραγωγής, Μεταφορά και Διανομή

Το σύστημα παραγωγής, καθώς επίσης η μεταφορά και η διανομή μοντελοποιούνται με γραμμικές σχέσεις όπως έχει ήδη αποσαφηνιστεί στις προηγούμενες ενότητες.

4.1.2.11.2 Ζήτηση

Η δομή της ζήτησης προσδιορίζεται ως ακολούθως. Θεωρείστε τη ζήτηση ηλεκτρισμού σε μια περιφέρεια και για μία χρονική περίοδο. Από τις προηγούμενες

ενότητα προκύπτει ότι πρέπει να επιλέξουμε μια φθίνουσα συνάρτηση ζήτησης εξαρτώμενη από τις τιμές. Δεδομένου ότι το μοντέλο είναι γραμμικό (τμηματικά γραμμικό και κυρτό) αυτό μπορεί να γίνει ακολούθως. Για τη ζήτηση πρώτα προσδιορίζουμε μια ονομαστική ζήτηση (η οποία μπορεί να προσδιορισθεί στο μοντέλο με ανελαστική ζήτηση). Στηριζόμενοι σε αυτό, προσδιορίζουμε βήματα απόκλισης, τα οποία ενώνουν τα βήματα τιμών με τα βήματα στις αλλαγές της ζήτησης. Έτσι, σε ένα μοντέλο με ανελαστική ζήτηση η ισορροπία μεταξύ παραγωγής και ζήτησης μπορεί να γραφεί ως:

$$\sum_i e_i^t = \hat{D}^t \quad (4.76)$$

Όπου e_i^t είναι η παραγωγή στη μονάδα i τη χρονική περίοδο t , και \hat{D}^t είναι η ζήτηση κατά την περίοδο t . Εισάγοντας τις μεταβλητές u_s^t (που αναπαριστά αύξουσα κατανάλωση συγκριτικά με την ονομαστική) και d_r^t (που αναπαριστά φθίνουσα κατανάλωση συγκριτικά με την ονομαστική) με περιορισμό $0 \leq u_s^t \leq u_s^{t-1}$ και $0 \leq d_r^t \leq d_r^{t-1}$, αντικαθιστούμε την (4.76) με

$$\sum_i e_i^t = \hat{D}^t + \sum_s u_s^t - \sum_r d_r^t \quad (4.77)$$

Η συνολική ζήτηση D^t φαίνεται στη δεξιά πλευρά της (4.77). Το μέγεθος αυτού θα προσδιορισθεί με ενδογενή τρόπο. Με αυτό τον τρόπο η ζήτηση είναι ελαστική.

Ακολουθεί το ότι:

$$\sum_s d_s^t = \hat{D}^t - D^t \quad (4.78)$$

$$\sum_r u_r^t = D^t - \hat{D}^t \quad (4.79)$$

Εισάγοντας τους θετικούς αριθμούς a_r^t και β_s^t και προσθέτοντας τους επόμενους όρους στην αντικειμενική συνάρτηση:

$$\sum_r a_s^t u_s^t - \sum_r \beta_r^t d_r^t \quad (4.80)$$

Η ισορροπία της ζήτησης D^t έναντι στην τιμή φαίνεται να επιτυγχάνεται. Υποθέτοντας ότι $\alpha_s^{t+1} > \alpha_s^t$, $\alpha_1^t > \beta_1^t$, $\beta_r^t < \beta_r^{t+1}$, η βελτιστοποίηση θα βεβαιώσει ότι είτε όλα τα $d_s^t = 0$ ή όλα τα $u_s^t = 0$, και επιπλέον, ότι αν $d_{s+1} > 0$ τότε $d_s^t = d_s^{t-1}$, και αν $u_{r+1} > 0$ τότε $u_r^t = u_r^{t-1}$.

Η οριακή ευχαριστία του καταναλωτή πdt θα ικανοποιείται:

$$a_{r+1} \geq \pi dt \geq a_r t \text{ αν } d_r > 0 \text{ και } d_{r+1} = 0 \quad (4.81)$$

$$\beta_{t+1} \geq \pi dt \geq \beta_t t \text{ αν } u_s > 0 \text{ και } d_{s+1} = 0 \quad (4.82)$$

Όπως φαίνεται η συνάρτηση ζήτησης είναι τμηματικά σταθερή. Εκτός από αυτή τη συναρτησιακή μορφή, μπορεί να προσδιορισθεί και αυθαίρετα αρκεί να είναι μη αύξουσα. Πρέπει να υπάρχει μια συνάρτηση προσδιορισμένη στην (4.77) και (4.80) για ζήτηση θερμότητας σε κάθε περιοχή και για κάθε περίοδο και μια συνάρτηση για τη ζήτηση ηλεκτρισμού σε κάθε περιφέρεια και για κάθε χρονική περίοδο.

4.1.2.11.3 Ισορροπία και ΚΚΤ (Karush–Kuhn–Tucker) συνθήκες

Θεωρείστε τώρα τις συνθήκες ισορροπίας όπως στην (4.69). Μέσα στη γραμμική μορφή ένας ισοδύναμος περιορισμός μπορεί να ορισθεί όπως ο ακόλουθος.

Ξαναγράφουμε το πρόβλημα (4.71)-(4.75) στην επόμενη συμπτυκνωμένη μορφή:

$$\max_x [f(x)] \quad (4.83)$$

$$g(x) \leq \gamma \quad (4.84)$$

$$h(x) = \eta \quad (4.85)$$

Εδώ το x αναπαριστά τη μεταβλητή απόφασης στο πρόβλημα και οι παράμετροι f, g και h αναπαριστούν τις διάφορες συναρτήσεις. Αν το πρόβλημα είναι καλώς ορισμένο τότε υπάρχει βέλτιστη λύση x^* (αν και όχι απαραίτητα μοναδική). Τότε, εφόσον οι (4.71)-(4.75) αποτελούν ένα πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού, υπάρχουν Lagrange πολλαπλασιαστές διανύσματα λ και μ που ανταποκρίνονται στις (4.84) και (4.85) αντίστοιχα, ικανοποιώντας:

$$\nabla_x f(x^*) = \lambda \nabla_x g(x^*) + \mu \nabla_x h(x^*) \quad (4.86)$$

$$\lambda \geq 0 \quad (4.87)$$

$$\lambda(g(x^*) - \gamma) = 0 \quad (4.88)$$

Αυτές οι συνθήκες σε συνδυασμό με τις προφανείς συνθήκες εφικτότητας του x^* στις (4.84)-(4.85) καλούνται και συνθήκες Karush-Kuhn_tucker (ή Kuhn-Tucker). Όπως μόλις εξηγήθηκε, αν μια βέλτιστη λύση x^* υπάρχει τότε υπάρχουν και οι Lagrange πολλαπλασιαστές διανύσματα λ και μ τέτοια ώστε αυτοί οι περιορισμοί να ισχύουν στο x^* . Ακόμα, το επιχείρημα ισχύει και αντίστροφα, αν ένα (x^*, λ, μ) μπορεί να βρεθεί ικανοποιώντας τις (4.86)-(4.88) τότε το x^* είναι το βέλτιστο στις (4.83)-(4.85).

4.1.2.11.4 Υλοποίηση μοντελοποίησης συστήματος

Το μοντέλο (4.71)-(4.75) υλοποιήθηκε σε GAMS γλώσσα μοντελοποίησης. Η συγκεκριμένη γλώσσα μοντελοποίησης δεν επηρεάζει τις θεωρητικές ιδιότητες του μοντέλου (είναι δηλαδή γραμμικό). Το περιβάλλον μοντελοποίησης και επίλυσης που χρησιμοποιήθηκε, βεβαιώνει μεταξύ άλλων ότι μια βέλτιστη λύση μπορεί να βρεθεί με συσχετισμένες διπλές μεταβλητές (πολλαπλασιαστές Lagrange). Τονίζουμε ότι από

τις πληροφορίες από τη λύση που δίνεται από το GAMS δεν είναι γνωστό αν η λύση ή οι διπλές μεταβλητές είναι μοναδικές.

4.1.2.11.5 Λύση

Το αποτέλεσμα της προσπάθειας επίλυσης είναι μια βέλτιστη λύση συσχετισμένη με τους Lagrange πολλαπλασιαστές. Οι Lagrange πολλαπλασιαστές καλούνται συχνά και διπλές μεταβλητές και οι βέλτιστες τιμές τους διπλή λύση, και αναφορικά με την βέλτιστη λύση του προβλήματος μπορούν να ονομαστούν και αρχική λύση. Η αρχική λύση αποτελείται από τιμές από εκείνες τις οντότητες (μεταβλητές ή ενδογενείς μεταβλητές) με τις οποίες έχουμε μορφοποιήσει το πρόβλημα. Συνήθως αυτές είναι η παραγωγή και η ζήτηση ηλεκτρισμού και θερμότητας, επενδύσεις σε φορτία παραγωγής και φορτία μεταφοράς σύμφωνα με τις γεωγραφικές και τις τοπικές εκτάσεις του προβλήματος. Οι διπλές μεταβλητές δεν χρησιμοποιούνται στη φόρμα του μοντέλου, αν και είναι πολύ χρήσιμες στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, εφόσον μπορούν να ερμηνευθούν ως τιμές και μερικές φορές οι διπλές μεταβλητές καλούνται επίσης και «σκιασμένες» τιμές.

4.1.2.12 Ερμηνεία

Το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης θα είναι οι βέλτιστες τιμές των πρώτων και διπλών μεταβλητών, τέτοιο ώστε οι συνθήκες ισορροπίας να ικανοποιούνται στην μορφή των ΚΚΤ συνθηκών. Σε γενικές γραμμές είναι σχετικά εύκολο να ερμηνευθούν οι πρώτες τιμές εφόσον εισέρχονται κατευθείαν στη μορφοποίηση του μοντέλου. Πιο δύσκολη μπορεί να είναι η ερμηνεία των διπλών μεταβλητών. Όπως είναι γνωστό από τη θεωρία βελτιστοποίησης, αυτές μπορούν να ερμηνευθούν ως οριακά κόστη ή τιμές αν και δεν είναι πάντα ξεκάθαρος ο τρόπος. Έτσι, δίνουμε ερμηνείες για κάποιες από τις κεντρικές διπλές μεταβλητές σε αυτό το κεφάλαιο.

Όσον αφορά τις συνθήκες (4.72)-(4.75), εφόσον για ένα καλώς ορισμένο και επιλυμένο μοντέλο θα ικανοποιούνται, δεν υπάρχουν περισσότερες πληροφορίες που να προκύπτουν από τη βέλτιστη λύση από αυτές που ήδη περιέχονται στη μορφή. Σε αντιπαράθεση με αυτό, η συνάρτηση (4.71) δεν είναι απαραίτητα εύκολο να ερμηνευθεί. Βέλτιστες λύσεις πρώτων και διπλών μεταβλητών μπορούν να συνδυαστούν με χρήσιμες μετρήσεις και θα συζητηθούν για συγκεκριμένο περίσσειμα καταναλωτών και παραγωγών.

4.1.2.12.1 Οριακό κόστος και «σκιασμένες» τιμές

Η αντικειμενική συνάρτηση (4.71) είναι επιτακτική στον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών των μεταβλητών αποφάσεων στο πρόβλημα (4.71)-(4.75). Παρόλα αυτά, η βέλτιστη τιμή της συνάρτησης μπορεί να περιέχει περιορισμένες πληροφορίες, καθώς αλλαγές στις βέλτιστες τιμές όπως οδηγούνται από αλλαγές σε κάποιες από τις

παραμέτρους που ορίζουν το πρόβλημα (4.71)-(4.75) μπορούν να δώσουν σημαντικές ερμηνείες όπως θα διαπιστωθεί σε αυτό το κεφάλαιο.

Ξαναγράφουμε το πρόβλημα (4.71)-(4.75) στην ακόλουθη μορφή:

$$Z^*(\alpha, \gamma, \eta) = \max[f(\alpha; x)] \quad (4.89)$$

$$g(\alpha; x) \leq x \quad (4.90)$$

$$h(\alpha; x) = \eta \quad (4.91)$$

το οποίο είναι ισοδύναμο με τις (4.83)-(4.85) εκτός από το ότι επιπροσθέτως του γ και επίσης και το α το οποίο αναπαριστά άλλες παραμέτρους (αποδοτικότητα, ζήτηση, φορτία παραγωγής κτλ) στο πρόβλημα, έχει ορισθεί ρητά. Ακόμα, οι (4.86)-(4.88) είναι όμοιες με:

$$\nabla_x f(\alpha; x^*) = \lambda \nabla_x g(\alpha; x^*) + \mu \nabla_x h(\alpha; x^*) \quad (4.92)$$

$$\lambda \geq 0 \quad (4.93)$$

$$\lambda(g(\alpha; x^*) - \gamma) = 0 \quad (4.94)$$

Είναι γνωστό ότι τα λ και μ μπορούν να ερμηνευθούν ως «σκιασμένες» τιμές. Αυτό σημαίνει ότι αν η $Z^*(\alpha, \gamma, \eta)$ είναι συνεχώς διαφορίσιμη στις συγκεκριμένες τιμές (α, γ, η) τότε

$$\frac{\partial Z^*(\alpha, \gamma, \eta)}{\partial \alpha} = \frac{\partial (f(\alpha; x^*) - \lambda(g(\alpha; x^*) - \gamma) - \mu(h(\alpha; x^*) - \eta))}{\partial \alpha} \quad (4.95)$$

Και όμοια αποτελέσματα δίνονται και για το γ και το η .

Η έκφραση (4.95) (και οι όμοιες για το γ και το η) σημαίνει ότι η αλλαγή στην Z^* που συμβαίνει λόγω της αλλαγής στα (α, γ, η) μπορεί να εκτιμηθεί, όταν το x^* , λ και μ είναι γνωστά. Αυτή η τελευταία πληροφορία παράγεται από τα πιο γνωστά λογισμικά βελτιστοποίησης στη μορφή διπλών μεταβλητών.

Σχετικά με τα γ και η έκφραση (4.95) παίρνει συγκεκριμένες απλές μορφές, όπως:

$$\frac{\partial Z^*(\alpha, \gamma, \eta)}{\partial \gamma} = \lambda \quad (4.96)$$

$$\frac{\partial Z^*(\alpha, \gamma, \eta)}{\partial \eta} = \mu \quad (4.97)$$

Αυτές οι δυο τελευταίες εκφράσεις δείχνουν ότι μια μοναδιαία αλλαγή στο δεξί μέλος των (4.84) ή (4.85) οδηγούν σε μια αλλαγή στην Z^* στο λ ή μ , αντίστοιχα. Από αυτή την έκφραση, ο όρος «σκιασμένη τιμή» μπορεί να δικαιολογηθεί. Για παράδειγμα αυτός που λαμβάνει τις αποφάσεις θα αποδεχθεί να πληρώσει έως και μ για μια μοναδιαία αύξηση στο η στην (4.85).

Οι εκφράσεις (4.95) – (4.97) προϋποθέτουν για να είναι έγκυρες ότι η Z^* είναι συνεχώς διαφορίσιμη στο σημείο (α, γ, η) . Σε γενικά πλαίσια αυτό δεν συμβαίνει. Αυτό είναι στενά συσχετιζόμενο με τη μοναδικότητα των x^* , λ και μ εφόσον η μοναδικότητα και για τα τρία αυτά διανύσματα κάνει συνεχώς διαφορίσιμη τη Z^* . Το λογισμικό βελτιστοποίησης γενικά δεν παρέχει πληροφορίες για την μοναδικότητα των x^* , λ και μ . Αν η Z^* δεν είναι συνεχώς διαφορίσιμη τότε οι πιο γενικές εκφράσεις μπορεί να διατυπωθούν, και όπως εξηγήθηκε, αυτό υποδηλώνει την αντικατάσταση των (4.67)-(4.68) από την (4.69) (όπου με τη σειρά της η δεύτερη μπορεί να αντικατασταθεί από τις συνθήκες KKT (4.86)-(4.88)). Η πρακτική επίπτωση της απουσίας της συνέχειας διαφορίσιμης είναι ότι οι «σκιασμένες» τιμές (οριακό κόστος) δεν είναι μοναδικές.

Αν η λύση υπάρχει αλλά τα τρία διανύσματα δεν είναι μοναδικά τότε το λ μπορεί να ερμηνευθεί ως ακολούθως. Οποιαδήποτε τιμή του λ που υπάρχει στις (4.86)-(4.88) είναι ένα άνω όριο στην αύξηση της Z^* για μια μοναδιαία αύξηση στο γ , και για οποιαδήποτε τιμή του λ που υπάρχει στις (4.86)-(4.88) είναι ένα κάτω όριο στη μείωση της Z^* για μια μοναδιαία μείωση στο γ . Ομοίως ερμηνεύονται και τα μ και η . Όσον αφορά τις μονάδες στις οποίες εκφράζονται οι «σκιασμένες» τιμές, αυτές προέρχονται από τις μονάδες στις οποίες εκφράζονται η αντικειμενική συνάρτηση (4.83) και οι αντίστοιχοι περιορισμοί (4.84) και (4.85). Τέλος, παρατηρείται ότι αναμορφοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης ή ενός περιορισμού σε μια μαθηματικά ισοδύναμη μορφή (τέτοια ώστε η βέλτιστη λύση x^* να μένει ανεπηρέαστη) μπορεί να αλλάξει τις τιμές και την ερμηνεία των λ και μ .

4.1.2.12.2 Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας

Η εξίσωση (4.72) εκφράζει το ισοζύγιο μεταξύ ζήτησης και προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην περιφέρεια r τη χρονική περίοδο t . Ας υποθέσουμε ότι το μ_r^t είναι ο σχετικός πολλαπλασιαστής Lagrange. Εξάγεται ότι το μ_r^t μπορεί να μεταφραστεί ως το οριακό κόστος ή η «σκιασμένη» τιμή της παραγωγής ηλεκτρισμού στην περιφέρεια r την χρονική περίοδο t . Προφανώς η αριθμητική τιμή της «σκιασμένης» τιμής θα εξαρτάται από τις μονάδες που χρησιμοποιήθηκαν στις προσδιοριζόμενες εκφράσεις. Υποθέτουμε στη συνέχεια ότι η αντικειμενική συνάρτηση (4.71) είναι εκφρασμένη σε ΜΧρήματα (όπου ΜΧρήματα είναι εκατομμύρια ευρώ) και ότι η εξίσωση ισορροπίας της ηλεκτρικής ενέργειας είναι εκφρασμένη σε MW. Οι μονάδες στις οποίες είναι εκφρασμένο το μ_r^t είναι εκατομμύρια χρήματα ανά MW, Μχρήμα/MW. Συνέπεια αυτού είναι ότι και η (4.71) θα είναι εκφρασμένη σε Μχρήμα και η (4.72) σε MW. Για να μετατρέψουμε αυτό σε πιο οικεία μονάδα δηλαδή Μχρήμα/MWh το ακόλουθο πρέπει να γίνει. Πρώτα, το μ_r^t πρέπει να πολλαπλασιαστεί με 10^6 για να μετατρέψουμε το Μχρήμα σε χρήμα. Δεύτερον, το αποτέλεσμα πρέπει να διαιρεθεί με τον αριθμό των ωρών κατά τις οποίες ισχύει η εξίσωση έστω w^t . Έτσι, από τη γενική ιδέα της κατασκευής του μοντέλου, συνεπάγεται ότι υπάρχει ισοτιμία μεταξύ οριακής ευχαριστίας παραγωγών και οριακού κόστους παραγωγής, καταλλήλως εφαρμοσμένη για τα κόστη και τις απώλειες της μεταφοράς και της διανομής. Όπως φαίνεται, αν το δεξιό μέλος της (4.72) αυξηθεί κατά μία μονάδα, τότε σύμφωνα με την ερμηνεία της (4.97) και την ακριβείς μορφή της (4.72), αυτό μπορεί αν αντισταθμιστεί από μια

μοναδιαία αύξηση στην παραγωγή. Με αυτό τον τρόπο η ποσότητα $10^6 \mu_r^t / w^t$ είναι το οριακό κόστος παραγωγής.

Η (4.72) μπορεί να μετασχηματιστεί στην επόμενη μαθηματικά ισοδύναμη μορφή:

$$\left(\sum_{g \in G(r)} e_{s,g}^t + \sum_{\rho \neq r} x^{(\rho,r),t} (1 - e^{x^{(\rho,r)}}) \right) (1 - e_r^e) = e_d^{r,t} \quad \forall r \in R, \forall t \in T \quad (4.98)$$

Αυτό δεν θα επηρεάσει τη βέλτιστη λύση, θα επηρεάσει όμως την αριθμητική τιμή της μ_r^t . Σύμφωνα με αυτό η ερμηνεία του $10^6 \mu_r^t / w^t$ σε σχέση με την (4.98) δεν είναι πλέον το οριακό κόστος παραγωγής αλλά το όριο του οριακού κόστους παροχής στα σημεία κατανάλωσης. (Αυτές οι δυο τιμές διαφέρουν όταν υπάρχει κόστος ή απώλειες κατά τη διανομή). Παρατηρείστε ότι σύμφωνα με την (4.67) το όριο οριακού κόστους παροχής στα σημεία κατανάλωσης θα είναι ίδιο με την οριακή ευχαριστία των καταναλωτών (αγνοώντας του φόρους κατανάλωσης). Αυτό δείχνει τη σημαντικότητα του προσδιορισμού των ερμηνειών.

4.1.2.12.3 Η τιμές της θερμότητας

Η ερμηνεία της (4.73) είναι ίδια με την ερμηνεία της (4.72). Έτσι, αν το μ_a^t είναι ο πολλαπλασιαστής Lagrange στην (4.73) για την περιοχή α τη χρονική περίοδο t συσχετισμένος με την βέλτιστη λύση, τότε το $10^6 \mu_a^t / w^t$ είναι το οριακό κόστος παραγωγής θερμότητας στην περιοχή α τη χρονική περίοδο t , εκφρασμένη σε Χρήμα/MWh.

4.1.2.12.4 Υπόλοιπο παραγωγών και καταναλωτών

Από τη γνώση της συνάρτησης ευχαριστίας των καταναλωτών, της συνάρτησης οριακού κόστους των παραγωγών, των ποσοτήτων που καταναλώνονται και παράγονται και των αντίστοιχων τιμών είναι δυνατό να υπολογιστεί το περίσσειμα των παραγωγών και των καταναλωτών ως ακολούθως. Θεωρήστε κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο και συγκεκριμένη ζήτηση σε μια περιφέρεια. Ας υποθέσουμε ότι το ποσό ηλεκτρισμού που καταναλώθηκε είναι D και ας υποθέσουμε ότι η τιμή κατανάλωσης είναι π_d^e . Με τη συνάρτηση ευχαριστίας των καταναλωτών να έχει προσδιορισθεί όπως στην (4.63) το περίσσειμα των καταναλωτών είναι:

$$\int_0^D (U^e(e) - \pi_d^e) de \quad (4.99)$$

Συγκεκριμένα παρατηρείστε ότι το αποτέλεσμα εξαρτάται από την υποθετιμένη προσθετική ιδιότητα της ευχαριστίας ανάλογα με τον ηλεκτρισμό και την θερμότητα. Από αυτό, αλλαγές στην ευχαριστία των καταναλωτών σύμφωνα με τον ηλεκτρισμό

από μια κατάσταση που χαρακτηρίζεται από την τιμή και τη ζήτηση ως ζεύγος (π_d^e, e_d^0) σε μια κατάσταση (π_d^e, e_d^1) μπορεί να προέρχεται από:

$$\begin{aligned} & \int_0^{e_d^1} (U^e(e) - \pi_d^{e_d^1}) de - \int_0^{e_d^0} (U^e(e) - \pi_d^{e_d^0}) de = \\ & \int_0^{e_d^0} (U^e(e) - \pi_d^{e_d^1}) de + \int_{e_d^0}^{e_d^1} (U^e(e) - \pi_d^{e_d^1}) de - \int_0^{e_d^0} (U^e(e) - \pi_d^{e_d^1}) de = \\ & \int_0^{e_d^0} (\pi_d^{e_d^0} - \pi_d^{e_d^1}) de + \int_{e_d^0}^{e_d^1} (U^e(e) - \pi_d^{e_d^1}) de = \\ & (\pi_d^{e_d^0} - \pi_d^{e_d^1}) e^0 + (e_d^0 - e_d^1) \pi_d^{e_d^1} + \int_{e_d^0}^{e_d^1} U^e(e) de \end{aligned} \quad (4.100)$$

Όμοια με αυτό, οι αλλαγές στο περίσσευμα των καταναλωτών για την θερμότητα από μια κατάσταση που χαρακτηρίζεται από το ζεύγος τιμής και ζήτησης (π_d^{h0}, h_d^0) στην κατάσταση (π_d^{h1}, h_d^1) μπορεί να προκύψει ως :

$$(\pi_d^{h_d^0} - \pi_d^{h_d^1}) h^0 + (h_d^0 - h_d^1) \pi_d^{h_d^1} + \int_{h_d^0}^{h_d^1} U^h(h) dh \quad (4.101)$$

Παρατηρείστε ότι για να υπολογίσουμε τις αλλαγές στο περίσσευμα των καταναλωτών είναι αρκετό να ξέρουμε τη συνάρτηση ευχαριστίας U^e στο ολοκλήρωμα από το e_d^0 έως το e_d^1 και ομοίως την U^h από το h_d^0 έως το h_d^1 .

Συνολικές αλλαγές στο περίσσευμα των καταναλωτών υπολογίζονται λαμβάνοντας υπ όψη όλες τις χρονικές περιόδους και όλες τις περιφέρειες ζήτησης ηλεκτρισμού. Όσον αφορά το περίσσευμα των παραγωγών μπορούμε να προχωρήσουμε όπως ακολούθως. Θεωρήστε μια συγκεκριμένη γεωγραφική οντότητα όπου υπάρχει μόνο ένας κόμβος ηλεκτρισμού και ένας κόμβος θερμότητας. Συγκρίνουμε τις αλλαγές από μία κατάσταση που χαρακτηρίζεται από την τετράδα $(\pi_s^{e0}, e_s^0, \pi_s^{h0}, h_s^0)$ σε μια κατάσταση $(\pi_s^{e1}, e_s^1, \pi_s^{h1}, h_s^1)$. Η αλλαγή στο περίσσευμα των παραγωγών είναι:

$$\pi_s^{e1} e_s^1 + \pi_s^{h1} h_s^1 - C(e_s^1, h_s^1) - (\pi_s^{e0} e_s^0 + \pi_s^{h0} h_s^0 - C(e_s^0, h_s^0)) \quad (4.102)$$

όπου C είναι το κόστος παραγωγής.

Οι συνολικές αλλαγές στο περίσσευμα των παραγωγών υπολογίζονται λαμβάνοντας υπ όψη όλες τις χρονικές περιόδους και όλες τις περιφέρειες παραγωγής ηλεκτρισμού και όλες τις περιοχές παραγωγής θερμότητας.

4.1.2.12.5 Γενικά συμπεράσματα

Στις προηγούμενες ενότητες παρουσιάστηκαν μερικά παραδείγματα της ερμηνείας των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Οι ίδιες αρχές που προκύπτουν από τις ερμηνείες μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλα σχετικά στοιχεία του μοντέλου. Η βάση της ερμηνείας είναι όπως εξηγήθηκε και παραπάνω η γενική βέλτιστη λύση και οι συσχετισμένες διπλές μεταβλητές. Από αυτά, οι συγκεκριμένες ερμηνείες προκύπτουν σύμφωνα με τα πραγματικά δεδομένα.

4.1.2.13 Συμπεράσματα

Τα κύρια σημεία που παρουσιάστηκαν σε αυτή την ενότητα είναι:

- Το μοντέλο αναπαριστά παραγωγή, μεταφορά και κατανάλωση ενέργειας.
- Το μοντέλο έχει μορφοποιηθεί ώστε να είναι κυρτό, ή πιο συγκεκριμένα, ως γραμμικό.
- Το σύστημα παροχής εμπεριέχει ηλεκτρισμό και θερμότητα, διάφορες μονάδες παραγωγής, διάφορα καύσιμα, διάφορα κόστη, κόστη επενδύσεων, εκπομπών, απωλειών, διανομής και μεταφοράς, όρια μεταφοράς, φόρους καυσίμων, φόρους εκπομπών και άλλα στοιχεία
- Η ζήτηση αναπαριστάται από τη συνάρτηση ευχαριστίας των καταναλωτών αναφορικά με τον ηλεκτρισμό και τη θερμότητα που έχουν υποτεθεί ότι είναι διαχωρίσιμα και ότι καθένα από αυτά είναι μη αυξανόμενο με αυξανόμενη κατανάλωση. Πιθανότητα αντικατάστασης μεταξύ των δυο παρουσιάζεται με άλλο τρόπο.
- Το μοντέλο κάνει διαφοροποίηση μεταξύ των γεωγραφικών μονάδων, για να αναπαραστήσει πιθανότητες και κόστη αναφορικά με τη μεταφορά του ηλεκτρισμού και της θερμότητας και να αναπαραστήσει διάφορες άλλες εθνικές και φυσικές διαφορές.
- Το μοντέλο έχει μια ανάλυση χρόνου μέσα στα έτη επιτρέποντας για παράδειγμα την αναπαράσταση της διαφοροποίησης της ζήτησης και την διαχρονική αποθήκευση.
- Όσον αφορά τη δυναμική πλευρά για μερικά χρόνια, το μοντέλο επιλύεται για ένα έτος τη φορά, με τον μηχανισμό για τα επόμενα χρόνια (έχοντας υπόψη πιθανές αποφάσεις για επενδύσεις μέσα σε αυτό το χρόνο) να αναπαριστάται από τη γνώση για μακροχρόνια οριακά κόστη επενδύσεων.
- Ο βασικός κανόνας για τον προσδιορισμό των ενδογενών μεταβλητών είναι το ότι πρέπει να υπάρχει ισορροπία μεταξύ της περίσσειας καταναλωτών και παραγωγών για ηλεκτρισμό και θερμότητα. Οι συνθήκες ισορροπίας καλύπτουν δυο τύπους συντελεστών (παραγωγούς και καταναλωτές), δυο προϊόντα (ηλεκτρισμό και θερμότητα), διάφορες σχετικές γεωγραφικές οντότητες (ηλεκτρικά διαχωρισμένες περιφέρειες) και διάφορες χρονικές οντότητες (βραχυπρόθεσμες (εντός έτους) και μακροπρόθεσμες (μεταξύ ετών)).
- Οι συνθήκες ισορροπίας εντός του περιεχομένου του μοντέλου μεταφράζονται στην έννοια των ΚΚΤ συνθηκών.

- Τα αποτελέσματα του μοντέλου περιέχουν πληροφορίες για τις φυσικές ποσότητες όπως η παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας σύμφωνα με το χρόνο, το χώρο, την τεχνολογία παραγωγής και το καύσιμο και τις πληροφορίες που προκύπτουν που μπορούν να ερμηνευθούν ως οριακό κόστος, ή τιμές πώλησης των παραγωγών ή τιμές των καταναλωτών.

Πρέπει να δώσουμε έμφαση στο ότι οποιοσδήποτε αριθμός εξωγενών παραμέτρων μπορεί να συμπεριληφθεί στο μοντέλο (εφόσον αυτό αναπαριστάται από γραμμικές σχέσεις) χωρίς να παραβιάζονται οι βασικοί μηχανισμοί. Έτσι, όλα τα συμπεράσματα που προκύπτουν εδώ αληθεύουν για οποιαδήποτε υλοποίηση των δομών δεδομένων όπως επίσης και για τη συγκεκριμένη του μοντέλου Balmorel.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Balmorel 2004, Balmorel Version 2.10 Alpha (May 2003). www.balmorel.com (February 2004)
2. IEA 1998, International Energy Agency (IEA): Mapping the Energy Future: Energy Modelling and Climate Change Policy, Paris: OECD/IEA, 1998
3. Mure 2004, Mesures d'Utilisation Rationnelle de l'Energie (MURE) : Database households, <http://www.isis-it.com/mure> (May 2004)
4. Zhang / Folmer. 1998, Zahng, Z. a. Folmer, H.: Economic Modelling Approaches to Cost Estimates for the Control of Carbon Dioxide Emissions. Energy Economics, Vol. 20, No. 1, 1998, 101-120.
5. Vived Economics (2007): *A study to estimate ticket price changes for aviation in the EU ETS*, A Report to DEFRA and DfT, London.
6. Zhou , Q., and J. Bialek (2005): "Approximate model of European interconnected system as a benchmark system to study effects of cross-border trades", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 20, No. 2, pp. 782-788.
7. Voorspoels, K. (2006): "The Carbon Component of the UK Power Price", *Environmental Science & Technology*, Vol. 40, No. 15, pp. 4543-4546.
8. Reinaud, J. (2008): "From electricity prices to electricity costs; impact of emissions trading on industry's purchasing strategies", in: Gulli, F., ed., *Markets for Carbon and Power Pricing in Europe – Theoretical Issues and Empirical Analyses*, New Horizons in Environmental Economics, Edward Elgar, Cheltenham, UK, and Northampton, MA, USA, pp. 80-99.
9. Point Carbon (2008): *EU ETS Phase II – The potential and scale of windfall profits in the power sector*, A report to WWF, Point Carbon Advisory Services, Oslo.
10. Mansanet-Bataller, M., A. Pardo, and E. Valor (2007): "CO2 Prices, Energy and Water", *The Energy Journal*, Vol. 28, No. 3, pp. 73-92.
11. Lise, W., V. Linderhof, O. Kuik, C. Kemfert, R. Östling and T. Heinzow (2006): "A Game Theoretic Model of the Northwestern European Electricity Market – Market Power and the Environment", *Energy Policy*, Vol. 34, No. 15, pp. 2123–2136.
12. Linares, P. and F. Santos (2008): "The joint impact of carbon emissions trading and tradable green certificates on the evolution of liberalized electricity markets: the Spanish case", in: Gulli, F., ed., *Markets for Carbon and Power Pricing in Europe –*

Theoretical Issues and Empirical Analyses, New Horizons in Environmental Economics, Edward Elgar, Cheltenham, UK, and Northampton, MA, USA, pp. 213- 2xx.

13. Kate, A. ten, and G. Niels (2005): "To what extent are cost savings passed on to consumers? An oligopoly approach", *European Journal of Law and Economics*, Vol. 20, No. 3, pp. 323-337.
14. Jeekel, R. (2005): *The ETS Impact on the Power Prices and Markets*. European Association of Metals, Presentation at the Environmental Finance Conference EU Emissions Trading 2005, Brussels 11-12 July 2005.
15. IEA (2007): *Energy Policies of IEA Countries - Germany 2007 Review*, International Energy Agency, Paris.
16. Hobbs, B., F. Rijkers, and A. Wals (2004b): "Strategic Generation with Conjectured Transmission Price Responses in a Mixed Transmission System II: Application", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 872-878.
17. Harrison, D., P. Klevnas, D. Radov, and A. Foss (2007): *Complexities of Allocation Choices in a Greenhouse Gas Emissions Trading Program*, Report to the International Emissions Trading Association (IETA), NERA Economic Consulting, Boston, Massachusetts.
18. Gulli, F., ed. (2008): *Markets for Carbon and Power Pricing in Europe – Theoretical Issues and Empirical Analyses*, New Horizons in Environmental Economics, Edward Elgar, Cheltenham, UK, and Northampton, MA, USA.
19. Frontier Economics (2006a): *CO2 trading and its influence on electricity markets*. Final report to DTe, Frontier Economics Ltd, London.
20. Eurostat (2006b): *Electricity Prices for EU Households and Industrial Consumers on 1 January 2006*, Luxembourg.
21. EULA, CEPI, CPIV, EM, CEMBUREAU, EuroChlor, Euro Alliages, EUROFER and CERAME-Unie (2004): *Yes to Emissions Trading but No to Windfall Profits! Call for Action towards Solutions*, An initiative supported by the International Federation of Industrial Energy Consumers (IFIEC), Ford Europe and Solvay.
22. Chernyavs'ka, L., and F. Gulli (2008): "The impact of the European Emissions Trading Scheme on power prices in Italy: the 'load duration curve approach', in: Gulli, F., ed., *Markets for Carbon and Power Pricing in Europe – Theoretical Issues and Empirical Analyses*, New Horizons in Environmental Economics, Edward Elgar, Cheltenham, UK, and Northampton, MA, USA, pp. 193- 212.
23. Bunn, D., and C. Fezzi (2008): "A vector error correction model of the interactions among gas, electricity and carbon prices: an application of the cases of Germany and

Α. Παπαθανασίου

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΛΕΤΗ ΤΩΝ ΜΕΤΡΩΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΩΝ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

the United Kingdom”, in: Gulli, F., ed., *Markets for Carbon and Power Pricing in Europe – Theoretical Issues and Empirical Analyses*, New Horizons in Environmental Economics, Edward Elgar, Cheltenham, UK, and Northampton, MA, USA, pp. 145-159.