



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΑΤΟΥΡΟΣ Θ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέποντες: Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αναστασιάδης Ανέστης

Υ. Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΦΑΤΟΥΡΟΣ Θ. ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

Επιβλέποντες: Χατζηαργυρίου Νικόλαος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αναστασιάδης Ανέστης

Υ. Δ. Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 8^η Ιουλίου

Ν.Χατζηαργυρίου

Σ.Παπαθανασίου

Σ.Καβατζά

Καθηγητής ΕΜΠ

Λέκτορας ΕΜΠ

Λέκτορας ΕΜΠ

Αθήνα, Ιούλιος 2009

Φατούρος Παναγιώτης

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

Copyright © Φατούρος Θ. Παναγιώτης, 2009

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

Περίληψη

Το κοινοτικό πλαίσιο εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών (ETS), με έναρξη ισχύος το 2005 καλύπτει τις εκπομπές CO₂ από συγκεκριμένες μεγάλες βιομηχανικές δραστηριότητες και εγκαταστάσεις καύσης. Ένας μεγάλος αριθμός των υφιστάμενων και εν δυνάμει μελλοντικών εγκαταστάσεων συμπαραγωγής (CHP) υπόκεινται στο ETS και στοχεύουν στην μείωση των εκπομπών. Η συμπαραγωγή είναι μία σημαντική τεχνολογία για την αποδοτική και καθαρή παροχή ενέργειας, λόγω της ανώτερης απόδοσης του άνθρακα. Ο ορθός σχεδιασμός της εμπορίας των εκπομπών είναι σημαντικός και μπορεί να κάνει την συμπαραγωγή μία πραγματικά κερδοφόρα τεχνολογία υπό το ETS. Η μίξη ή εναλλαγή καυσίμου, θα είναι οι λογικές επιλογές για CHP παραγωγούς που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα για να πετύχουν τους στόχους εκπομπών με το χαμηλότερο δυνατό κόστος. Σε αυτή την εργασία μορφοποιούμε τον σχεδιασμό εμπορίας εκπομπών CO₂ ενός CHP παραγωγού σαν ένα πολλαπλών – περιόδων πρόβλημα στοχαστικής βελτιστοποίησης και προτείνουμε μία στοχαστική προσομοίωση και συντονισμένη προσέγγιση για την εξέταση της στάσης του παραγωγού απέναντι στο ρίσκο, ποινές για πλεονάζουσες εκπομπές και διαστήματα εμπιστοσύνης για τις εκτιμήσεις των εκπομπών. Σε δοκιμές με ένα ρεαλιστικό μοντέλο CHP η προτεινόμενη προσέγγιση της λύσης επιδεικνύει αποδοτική εμπορία σε σχέση με την αναλογία κέρδους – τζίρου. Η μελέτη των διαστημάτων εμπιστοσύνης για τις εκτιμήσεις των εκπομπών μπορεί να βοηθήσει τον παραγωγό να μειώσει το κόστος συναλλαγών στην εμπορία των εκπομπών. Συγκρίσεις μεταξύ των στρατηγικών μίξης και εναλλαγής καυσίμου οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η μίξη καυσίμων παρέχει καλύτερο συνδυασμό κέρδους και μείωσης εκπομπών.

Λέξεις κλειδιά: Στοχαστική βελτιστοποίηση; Εμπορία εκπομπών CO₂; Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού & θερμότητας (ΣΗΘ); Ενέργεια

Abstract

The EU emissions trading scheme (ETS) taking effect in 2005 covers CO₂ emissions from specific large-scale industrial activities and combustion installations. A large number of existing and potential future combined heat and power (CHP) installations are subject to ETS and targeted for emissions reduction. CHP production is an important technology for efficient and clean provision of energy because of its superior carbon efficiency. The proper planning of emissions trading can help its potential into full play, making it become a true “winning technology” under ETS. Fuel mix or fuel switch will be the reasonable choices for fossil fuel based CHP producers to achieve their emissions targets at the lowest possible cost. In this paper we formulate CO₂ emissions trading planning of a CHP producer as a multi-period stochastic optimization problem and propose a stochastic simulation and coordination approach for considering the risk attitude of the producer, penalty for excessive emissions, and the confidence interval for emission estimates. In test runs with a realistic CHP production model, the proposed solution approach demonstrates good trading efficiency in terms of profit-to-turnover ratio. Considering the confidence interval for emission estimates can help the producer to reduce the transaction costs in emissions trading. Comparisons between fuel switch and fuel mix strategies show that fuel mix can provide good tradeoff between profit-making and emissions reduction.

Keywords: *Stochastic optimization; CO₂ emissions trading; Combined heat and power (CHP) production; Energy*

Πρόλογος

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι στο μέλλον τα ενεργειακά προβλήματα θα αυξηθούν δραματικά, κυρίως λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου. Οι συνέπειες του φαινομένου αυτού είναι πλέον ορατές, με αποτέλεσμα να είναι επιτακτική η ανάγκη περιορισμού των εκπομπών CO₂, όπως προβλέπεται και από το Πρωτόκολλο του Κιότο. Έτσι, οι εγκαταστάσεις συμπαραγωγής θα πρέπει να εξετάσουν τεχνικές περιορισμού των εκπομπών, όπως εναλλαγή και μίξη καυσίμων, καθώς και να καταφύγουν σε εμπορία δικαιωμάτων, όταν αυτή κρίνεται συμφέρουσα. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η μελέτη της παραγωγής και εμπορίας ρύπων για μία εγκατάσταση συμπαραγωγής 'βάσης', με βάση την οικονομικότερη λειτουργία της και την στάση του αποφασίζοντα απέναντι στον κίνδυνο της εμπορίας.

Περιεχόμενα

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	i
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ	ii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	iii
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ	iv
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	
ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	17
1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	18
1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ	20
1.3 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	22
1.4 Η ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ	25
2.1 ΓΕΝΙΚΑ	26
2.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ	27
2.2.1 Τα αέρια του θερμοκηπίου	28
2.2.1.1 Υδρατμοί	28
2.2.1.2 Διοξείδιο του άνθρακα	28
2.2.1.3 Μεθάνιο	29
2.2.1.4 Μονοξείδιο του αζώτου	30
2.2.1.5 Φθοριούχα αέρια του θερμοκηπίου (Φρέον)	30
2.2.2 Μέτρηση των αερίων του θερμοκηπίου	31
2.3 Η ΤΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ	33
2.4 ΔΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ	35

2.4.1 Το πρωτόκολλο του Κιότο	35
2.4.2 Δράσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης	37
2.4.3 Η κατάσταση στην Ελλάδα	40

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ 41

3.1 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ	42
3.1.1 Γενικά	42
3.1.2 Ιστορικά στοιχεία	43
3.1.3 Χρήσεις	43
3.2 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ	45
3.2.1 Γενικά	45
3.2.2 Επίλυση στοχαστικών προγραμμάτων	47
3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ	49
3.3.1 Γενικά	49
3.3.2 Δημοσιονομικές εφαρμογές	49
3.3.3 Γεω-πολιτικές εφαρμογές	50
3.3.4 Παραδοσιακή κριτική	50

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕΣΩ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ 52

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	53
4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ CHP ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ	57
4.2.1 Χαρακτηριστικά της CHP παραγωγής	57
4.2.2 Αβεβαιότητες στην συνδυασμένη CHP παραγωγή και στον σχεδιασμό της εμπορίας των εκπομπών	58
4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ CHP ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ	61

4.3.1 Μοντέλο σχεδιασμού της παραγωγής ΣΗΘ	61
4.3.2 Συμβολισμοί μοντέλου	62
4.3.3 Το μοντέλο παραγωγής	64
4.3.4 Το μοντέλο εμπορίας	66

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ 67

5.1 ΣΕΝΑΡΙΑΚΩΝ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ	68
5.2 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ	70
5.2.1 Αποσύνθεση της CHP παραγωγικής και εμπορικής διαδικασίας	70
5.2.2 Συντονισμός μεταξύ των διεργασιών παραγωγής και εμπορίας εκπομπών	70
5.2.3 Διαχείριση της ποινής υπερβολικών εκπομπών	72
5.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ	76

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ CHP ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ 78

6.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (DATA FLOW DIAGRAM)	79
6.2 ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	83
6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ 95

7.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	96
7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	99
7.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ (CASE STUDY)	103
7.3.1 Case study 1 Μεταβολή noise τιμής δικαιωμάτων	103

7.3.2 Case study 2 Μεταβολή noise τιμής καυσίμου	105
7.3.3 Case study 3 Μεταβολή αρχικής κατανομής δικαιωμάτων	109
7.3.4 Case study 4 Μεταβολή ποινής υπερβολικών εκπομπών	113
7.3.5 Case study 5 Μεταβολή κόστους συναλλαγών & παράγοντα εμπιστοσύνης	114
7.3.6 Case study 6 Μεταβολή καυσίμου	117
7.4 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ	123

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	125
---------------------	-----

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α	128
--------------------	-----

A.1 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ	129
A.1.1 Κανονική κατανομή	129
A.1.1.1 Θεωρία κανονικής κατανομής	129
A.1.1.2 Ιστορία	130
A.1.1.3 Χαρακτηρισμός	131
A.1.2 Διωνυμική κατανομή	132
A.1.2.1 Γενικά	132
A.1.2.2 Παραδείγματα	132
A.1.2.3 Προσδιορισμός	132
A.1.2.4 Μέση τιμή και διακύμανση	135
A.1.3 Κίνηση κατά Brown	137
A.1.3.1 Γενικά	137
A.1.3.2 Ιστορική αναδρομή	137
A.1.3.3 Διαισθητική μεταφορά	139
A.1.3.4 Μαθηματική ανάλυση	139
A.1.3.5 Φυσική θεωρία Brown	142
A.1.3.6 Κώδικας Matlab	143

A.1.4	Διαδική αναζήτηση	144
A.1.4.1	Γενικά	144
A.1.4.2	Επισκόπηση	144
A.1.4.3	Παιχνίδι εύρεσης αριθμών	145
A.1.4.4	Λίστες λέξεων	145
A.1.4.5	Εφαρμογές στην θεωρία πολυπλοκότητας	145
A.1.4.6	Μέθοδος	146
A.1.4.7	Λειτουργία μεθόδου	146
A.1.4.8	Κώδικας Matlab	148
A.2	BUILD-IN ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΤΟΥ MATLAB	150
A.2.1	Συνάρτηση binornd	150
A.2.2	Συνάρτηση normrnd	150
A.2.3	Συνάρτηση fmincon	150
A.2.4	Συνάρτηση mean	151
A.2.5	Συνάρτηση std	151
A.2.6	Συνάρτηση sort	152

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

ΚΩΔΙΚΑΣ MATLAB

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα -1.1-: Ενδεικτικά συστήματα συμπαραγωγής α) Βιομηχανία, β) Κτίρια & γ) Τηλεθέρμανση / τηλεψύξη.....	18
Σχήμα -1.2-: Σύγκριση βαθμού απόδοσης συμπαραγωγής με χωριστή παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού.....	19
Σχήμα -2.1-: Φαινόμενο του θερμοκηπίου.....	27
Σχήμα -2.2-: Θέρμανση του πλανήτη.....	34

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα -1.1- Συμπαράγωγή ανά τομέα στην Ελλάδα.....	24
Διάγραμμα -2.1- Εκπομπές CO ₂ (ανά χώρα) από την παραγωγή ενέργειας και σχετικούς με αυτή τομείς	37
Διάγραμμα -4.1- Χαρακτηριστική Μονάδας Συμπαράγωγής.....	57
Διάγραμμα -4.2- Αβεβαιότητες και οι εξαρτήσεις τους στο πρόβλημα σχεδιασμού της εμπορίας των εκπομπών κατά την Nord Pool.....	59
Διάγραμμα -5.1- Συντονισμός διαδικασίας παραγωγής και εμπορίας.....	77
Διαγράμματα -6.1.α- έως -6.1.δ- Διάγραμμα ροής δεδομένων(Data flow diagram).....	79-82
Διάγραμμα -6.2- Χαρακτηριστική κόστους της μονάδας συμπαράγωγής.....	85
Διάγραμμα -6.3- Περιοχή λειτουργίας της μονάδας συμπαράγωγής.....	85
Διαγράμματα -7.1- έως -7.5- Διαγράμματα προσομοίωσης.....	99-101
Διαγράμματα -7.6- έως -7.8- Διαγράμματα case study 1.....	103-104
Διαγράμματα -7.9- έως -7.14- Διαγράμματα case study 2.....	105-108
Διαγράμματα -7.15- έως -7.20- Διαγράμματα case study 3.....	109-112
Διαγράμματα -7.21- έως -7.22- Διαγράμματα case study 4.....	113-114
Διαγράμματα -7.23- έως -7.26- Διαγράμματα case study 5.....	115-117
Διαγράμματα -7.27- έως -7.35- Διαγράμματα case study 6.....	118-122
Διάγραμμα -7.36- Αποδοτικότητα αλγορίθμου.....	123
Διάγραμμα -A.1- Κανονική κατανομή για διάφορες μέσες τιμές και αποκλίσεις.....	129
Διάγραμμα -A.2: Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.....	133
Διάγραμμα -A.3- Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και κανονική προσέγγιση για $n=6$ και $p=0,5$	134
Διάγραμμα -A.4- Συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας.....	135
Διάγραμμα -A.5- Τρεις ιχνογραφήσεις της κίνησης των κolloειδών σωματιδίων ακτίνας $0,53 \mu\text{m}$, όπως φαίνονται από το μικροσκόπιο.....	138
Διάγραμμα -A.6- Τρεις διαφορετικές μορφές της κίνησης κατά Brown, με 32 , 256 , 2.048 βήματα, σχεδιασμένες με προοδευτικά ελαφρύτερα χρώματα.....	141
Διάγραμμα -A.7- Ενιαία υλοποίηση τρισδιάστατης κίνησης κατά Brown για $0 \leq t \leq 2$	142
Διάγραμμα -A.8- Διάγραμμα ροής δεδομένων δυαδικής αναζήτησης.....	147

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας -6.1-: planning_horizon_matrix.....	8
Πίνακας -6.2.α- & -6.2.β-: normalized_planning_horizon_matrix.....	89-90
Πίνακας -6.3- trading_matrix_for_period_t.....	93
Πίνακας -7.1- Θερμικά φορτία.....	96
Πίνακας -7.2- Τιμές θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας.....	96
Πίνακας -7.3- Χρόνος προσομοίωσης.....	123

Συντομογραφίες

- BB** Τεχνική Branch & Bound
- CAAA** Clean Air Act Amendments (Αμερικάνικες Τροπολογίες Καθαρού Αέρα)
- CEC** Council of European Communities (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων)
- CFCs** Χλωροφθοράνθρακες
- CH₄** Χημικός τύπος μεθανίου (Methane)
- CHP** Cogeneration or Combined Heat & Power (ΣΗΘ)
- CO₂** Χημικός τύπος διοξειδίου του άνθρακα (carbon dioxide)
- DM** Decision maker (αποφασίζων)
- EBB** Τεχνική envelope-based Branch & Bound
- ECCP** European Climate Change Program (Ευρωπαϊκό πρόγραμμα για την αλλαγή του κλίματος)
- ETS** Emissions Trading Scheme (Κοινοτικό πλαίσιο εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών)
- H₂O** Χημικός τύπος νερού (water)
- HFCs** Υδροφθοράνθρακες
- IPCC** International Panel of Climate Change (Διακυβερνητική Επιτροπή για την κλιματική αλλαγή)
- LP** Linear programming (Γραμμικός προγραμματισμός)
- N₂O** Χημικός τύπος μονοξειδίου του αζώτου (Nitrus oxide)
- NO_x** Χημικός τύπος οξειδίων του αζώτου (Nitrus oxides)
- PDF** Probability Density Function (Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας)
- PFCs** Υπερφθοράνθρακες
- ppb** parts per billion (μέρη ανά δισεκατομμύριο)
- ppm** parts per million (μέρη ανά εκατομμύριο)
- PS** Μέθοδος Power Simplex
- SF₆** Εξαφθοριούχο Θείο (sulfur hexafluoride)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ (ΣΗΘ)

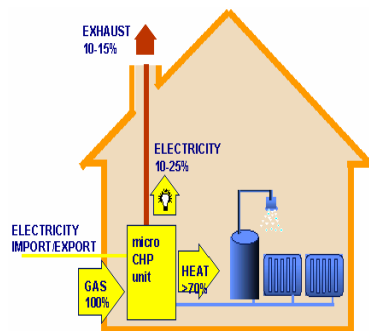
Η σημερινή κατάσταση του περιβάλλοντος δεν είναι ικανοποιητική, όχι μόνο εξ αιτίας της αυξημένης κατανάλωσης ενέργειας αλλά και λόγω της μη ουσιαστικής αντιμετώπισης του σημαντικού αυτού προβλήματος σε παγκόσμιο επίπεδο.

Ο συμβατικός τρόπος κάλυψης των ηλεκτρικών αναγκών ενός καταναλωτή (οικιακού ή βιομηχανικού) είναι η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από το εθνικό δίκτυο. Ομοίως, η κάλυψη των θερμικών αναγκών γίνεται με την καύση κάποιου καυσίμου (πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.τ.λ) με στόχο την παραγωγή θερμότητας. Τονίζεται ότι η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη με την χρήση μηχανών απορρόφησης. Η συνολική κατανάλωση καυσίμων, μειώνεται σημαντικά με εφαρμογή της συμπαραγωγής.

Η συμπαραγωγή (Cogeneration ή Combined Heat & Power – CHP), δηλαδή η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) και θερμικής ενέργειας (ΣΗΘ) από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας είναι δυνατόν να συντελέσει μερικώς στη μείωση:

- Των ρύπων και
- Της εξάρτησης της χώρας από το πετρέλαιο.

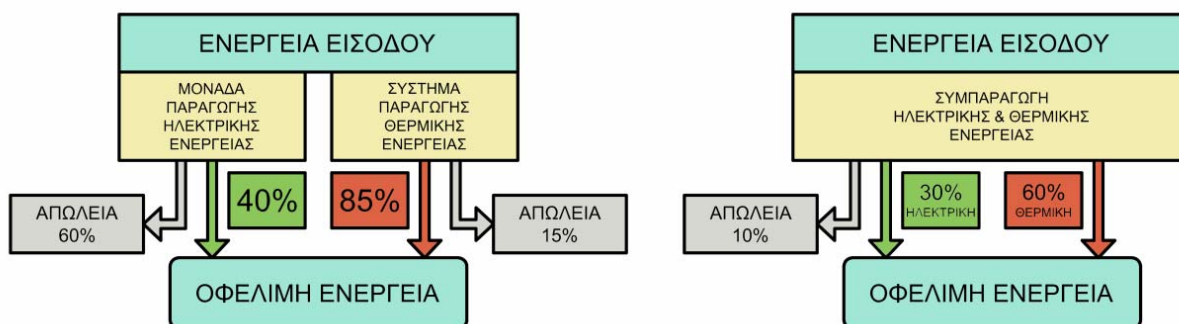
Οι εγκαταστάσεις συμπαραγωγής έχουν τη δυνατότητα να χρησιμοποιούν πολλαπλά καύσιμα (στερεά, υγρά και αέρια) μεμονωμένα ή και σε συνδυασμό, αλλά και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή, γεωθερμία). Σήμερα στη χώρα μας παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως καύσιμο το φυσικό αέριο (Φ.Α.). Τα συστήματα Συμπαραγωγής εγκαθίστανται συνήθως σε ενεργοβόρες βιομηχανίες, στον τριτογενή τομέα (νοσοκομεία, ξενοδοχεία, μεγάλα κτίρια, αθλητικά κέντρα, κλπ), ή καλύπτουν τις θερμικές και ηλεκτρικές ανάγκες μιας αστικής περιοχής, μέσω συστημάτων τηλεθέρμανσης / τηλεψύξης.



Σχήμα -1.1- Ενδεικτικά συστήματα συμπαραγωγής α) Βιομηχανία, β) Κτίρια & γ) Τηλεθέρμανση / τηλεψύξη

Κατά την λειτουργία ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού, μεγάλα ποσά ενέργειας αποβάλλονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών μηχανισμών είτε μέσω των καυσαερίων. Εξαιτίας αυτών των απωλειών, ο τυπικός βαθμός απόδοσης μίας τέτοιας εγκατάστασης είναι της τάξεως του 30 – 45 % σε αντίθεση με αυτόν μίας εγκατάστασης συμπαραγωγής που είναι της τάξεως του 80 – 95 %, καθώς αξιοποιεί ωφέλιμα το μεγαλύτερο μέρος της αποβαλλόμενης ενέργειας.

Τα παρακάτω σχήματα δείχνουν ένα τυπικό συμβατικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε σύγκριση με ένα τυπικό σύστημα Συμπαραγωγής, όπου φαίνονται τα πλεονεκτήματα από τη χρήση της ΣΗΘ έναντι των συμβατικών συστημάτων.



Σχήμα -1.2- Σύγκριση βαθμού απόδοσης συμπαραγωγής με χωριστή παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού.

Ίσως η πρώτη εφαρμογή εφαρμογή ΣΗΘ να έγινε από τον Thomas Edison, όπου το 1882 κατασκεύασε τον πρώτο εμπορικό σταθμό συμπαραγωγής ενέργειας, Pearl Street Station, παράγοντας ηλεκτρισμό και χρησιμοποιώντας την αποβαλλόμενη θερμότητα για την θέρμανση των γειτονικών κτιρίων, επιτυγχάνοντας απόδοση περίπου 50%.

Η ΣΗΘ ξεκίνησε στη Δυτική Ευρώπη και στις Η.Π.Α. στα τέλη του 19ου αιώνα. Τις πρώτες δεκαετίες του 20ου αιώνα, οι περισσότερες βιομηχανίες είχαν δικές τους μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με ατμολέβητα-στρόβιλο, που καταλάωναν μορφές άνθρακα. Περίπου το 60% της ηλεκτρικής ενέργειας, που παραγόταν σε βιομηχανίες των Η.Π.Α. στις αρχές του προηγούμενου αιώνα, προερχόταν από μονάδες συμπαραγωγής. Κατόπιν, λόγω της ανάπτυξης των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρισμού που προσέφεραν σχετικά φθηνή και αξιόπιστη ηλεκτρική ενέργεια, καθώς επίσης και λόγω της διαθεσιμότητας των υγρών καυσίμων και του φυσικού αερίου σε χαμηλές τιμές, η συμπαραγωγή ενέργειας ακολούθησε μία κάμψη έως το 1974 που έφθασε στο 5%. Από το 1974 και μετά, εξαιτίας της μεγάλης αύξησης των τιμών πετρελαίου, υπάρχει ικανοποιητική ανάκαμψη που συνοδεύεται και από σημαντική πρόοδο της απαιτούμενης τεχνολογίας.

1.2 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η εφαρμογή της συμπαραγωγής στην παραγωγή ενέργειας μπορεί να αποφέρει σημαντικά οφέλη τόσο ενεργειακά όσο και περιβαλλοντικά και οικονομικά. Τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της συμπαραγωγής είναι τα ακόλουθα:

- Η συμπαραγωγή είναι η πλέον αποτελεσματική και αποδοτική μορφή ηλεκτροπαραγωγής αλλά και παραγωγής θερμότητας, με αποτέλεσμα την αυξημένη απόδοση της μετατροπής και χρήσης της ενέργειας.
- Η συμπαραγωγή είναι μία από τις καλύτερες λύσεις για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από το πρωτόκολλο του Κιότο, τους οποίους έχει αποδεχθεί και η Ελλάδα, καθώς έχει μικρότερες εκπομπές προς το περιβάλλον, ιδιαίτερα CO₂, του σημαντικότερου αερίου στο οποίο οφείλεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου.
- Προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση οικονομικών πόρων, παρέχοντας πρόσθετη ανταγωνιστικότητα στη βιομηχανία και στις ΜΜΕ, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα παρέχονται σε προσιτές τιμές.
- Αποτελεί σημαντική ευκαιρία ώστε να προωθηθούν αποκεντρωμένες λύσεις ηλεκτροπαραγωγής, όπου οι σταθμοί ΣΗΘ σχεδιάζονται έτσι ώστε να ανταποκρίνονται στις ανάγκες των τοπικών καταναλωτών, παρέχοντας υψηλή απόδοση, αποφεύγοντας απώλειες μεταφοράς και αυξάνοντας την ευελιξία στη χρήση του συστήματος. Το πλεονέκτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, όταν το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται σαν κύριο καύσιμο.
- Η διάδοση της συμπαραγωγής αυξάνει το δυναμικό ηλεκτροπαραγωγής και περιορίζει τις ανάγκες κατασκευής νέων ηλεκτρικών σταθμών, προσφέροντας έτσι σημαντική εξοικονόμηση κεφαλαίων και καθιστά πιο ευέλικτη την κατασκευή νέων σταθμών ηλεκτροπαραγωγής για την αντιμετώπιση μελλοντικής αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η βελτιωμένη τοπική και γενική ασφάλεια παροχής, μπορεί να μειώσει την πιθανότητα να μείνουν οι καταναλωτές χωρίς ηλεκτρική ή/και θερμική ενέργεια. Επιπρόσθετα, η μειωμένη ανάγκη καυσίμων που παρέχει η συμπαραγωγή μειώνει την εξάρτηση από εισαγωγές – μία κεφαλαιώδη πρόκληση για το ενεργειακό μέλλον της Ελλάδας αλλά και της Ευρώπης.
- Η συμπαραγωγή παρέχει ένα από τα σημαντικότερα μέσα για την προώθηση της απελευθέρωσης στις ενεργειακές αγορές, συντελώντας στην αύξηση της

ποικιλίας των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής και στη δημιουργία συνθηκών ανταγωνισμού στην ηλεκτροπαραγωγή.

- Σύμφωνα με μελέτες που έχουν εκπονηθεί, η ανάπτυξη των συστημάτων συμπαραγωγής δημιουργούν νέες θέσεις εργασίας και τόνωση της οικονομικής δραστηριότητας της περιφέρειας.

Η συμπαραγωγή εκτός από τις θετικές μπορεί να έχει και ορισμένες αρνητικές επιπτώσεις στην εξάντληση μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας, στο περιβάλλον και στην κοινωνία. Μερικές από τις σημαντικότερες παρουσιάζονται παρακάτω:

- Η συμπαραγωγή μπορεί να βελτιώνει την αξιοπιστία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί όμως να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος. Τα προβλήματα αυτά μπορούν να εξαλειφθούν ή/και να περιοριστούν όταν το σύστημα συμπαραγωγής και η σύνδεση του με το δίκτυο πληρούν ορισμένες προδιαγραφές.
- Όταν πολλές μικρές διεσπαρμένες μονάδες συμπαραγωγής αντικαθιστούν μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής δεν είναι δεδομένη η βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος. Κατά κανόνα οι κεντρικοί σταθμοί παραγωγής βρίσκονται μακριά από τα αστικά κέντρα και διαθέτουν υψηλές καπνοδόχους που διασκορπίζουν επαρκώς τους προκαλούμενους ρύπους, σε αντίθεση με τις μικρές μονάδες συμπαραγωγής που βρίσκονται πολύ κοντά σε αστικά κέντρα και διαθέτουν χαμηλότερες καπνοδόχους, οι οποίες σε συνδυασμό με τα ψηλά κτίρια των αστικών κέντρων εμποδίζουν την διασπορά των ρύπων. Σε όλα αυτά θα πρέπει να συνυπολογίσουμε και την προκαλούμενη ηχορύπανση από την λειτουργία την μονάδας εντός του αστικού κέντρου.

1.3 ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Τα συστήματα Συμπααραγωγής μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες:

- Συστήματα 'κορυφής' (topping systems)
- Συστήματα 'βάσης' (bottoming systems)

Στα συστήματα 'κορυφής' ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με στόχο την κάλυψη του συνόλου των ηλεκτρικών αναγκών και στην συνέχεια η αποβαλλόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται είτε για την κάλυψη των θερμικών αναγκών είτε για την παραγωγή πρόσθετης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την άλλη, στα συστήματα 'βάσης' παράγεται πρώτα θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας, εξασφαλίζεται η κάλυψη του συνόλου των θερμικών αναγκών και στην συνέχεια τα θερμά αέρια διοχετεύονται στις περισσότερες περιπτώσεις σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας όπου παράγεται ατμός και στην συνέχεια ηλεκτρική ενέργεια.

Εκτός από τις δύο παραπάνω κατηγορίες τα συστήματα συμπααραγωγής μπορούν να λειτουργούν και σε επιπλέον δύο καταστάσεις:

- Μικτός τρόπος λειτουργίας, όπου ανάλογα με τα φορτία καλύπτεται άλλοτε τον θερμικό και άλλοτε το ηλεκτρικό φορτίο εξ' ολοκλήρου.
- Πλήρης κάλυψη και των θερμικών και των ηλεκτρικών φορτίων κάθε χρονική στιγμή, γεγονός που οδηγεί σε μη σύνδεση την μονάδας με το εθνικό δίκτυο. Γενικά απαιτείται μεγάλη εφεδρεία ισχύος και αρκετά περίπλοκο σύστημα λειτουργίας, γεγονός που καθιστά αρκετά δαπανηρή την λειτουργία του.

Επιγραμματικά, τα συστήματα Συμπααραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι:

- Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ)
- Αεριοστρόβιλοι
- Ατμοστρόβιλοι
- Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου
- Κυψέλες καυσίμου
- Κύκλοι βάσης Rankine με οργανικά ρευστά
- Μηχανές Stirling

1.4 Η ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

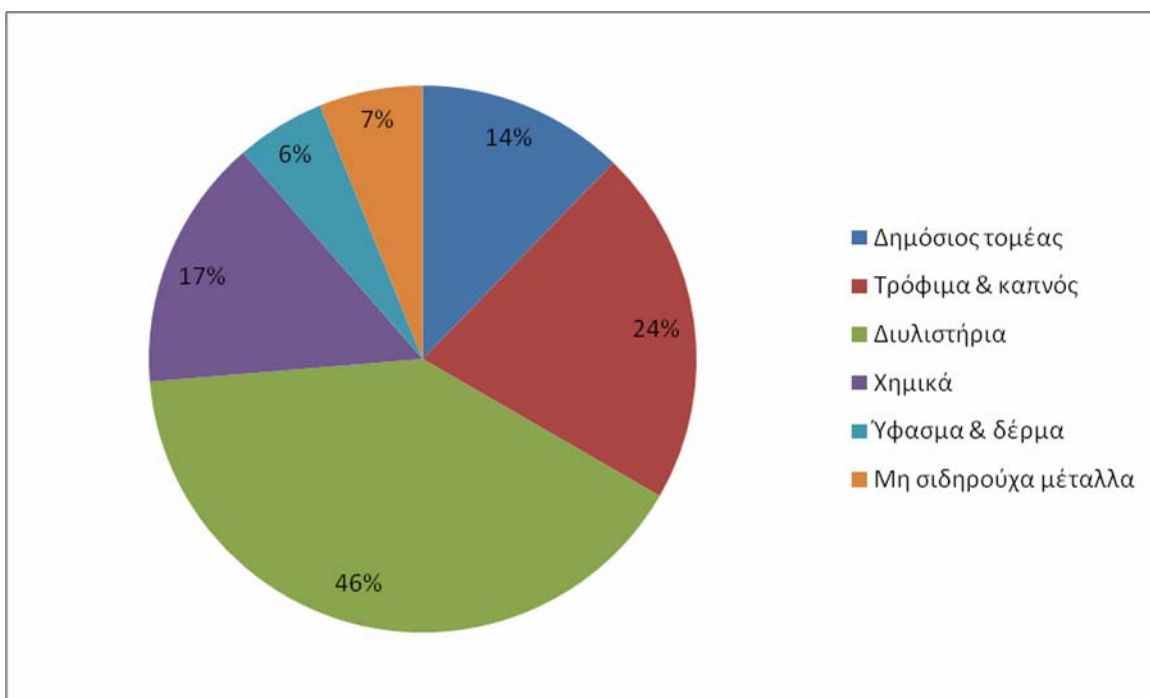
Το πρώτο σύστημα συμπαραγωγής στην Ελλάδα εγκαταστάθηκε στο Βόλο, και ειδικότερα στην κεραμοποιεία Τσαλαπάτα, από Βέλγους μηχανικούς στις αρχές του 20ου αιώνα και λειτουργούσε μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του '70. Σε ευρύτερη κλίμακα, οι πρώτες μονάδες συμπαραγωγής εγκαταστάθηκαν σε μεγάλες ελληνικές βιομηχανίες στις αρχές της δεκαετίας του '70. Σήμερα, λειτουργούν μονάδες συμπαραγωγής σε βιομηχανίες ζάχαρης και χάρτου, διυλιστήρια πετρελαίου, κλωστοϋφαντουργίες, κ.λπ. Επίσης, ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες της ΔΕΗ έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε να καλύπτουν τις θερμικές ανάγκες αστικών περιοχών με τα δίκτυα τηλεθέρμανσης, όπως τα δίκτυα της Κοζάνης, της Πτολεμαΐδας, του Αμυνταίου και της Μεγαλόπολης.

Η μεγάλη έξαρση και η ουσιαστική ανάπτυξη των συστημάτων συμπαραγωγής παρατηρήθηκε από το 1990 και μετά, ειδικότερα μετά την άφιξη του φυσικού αερίου στη χώρα μας. Το φυσικό αέριο εισάγεται στην Ελλάδα από τη Ρωσία μέσω αγωγών σε αέρια μορφή και από την Αλγερία μέσω δεξαμενόπλοιων σε υγροποιημένη μορφή στους -160 οC. Φθάνοντας στο νησάκι της Ρεβυθούσας εξαερώνεται και αναμιγνύεται με το Ρώσικο, για να διοχετευθεί στην συνέχεια στα δίκτυα διανομής της Αττικής. Πολλές εταιρίες και οργανισμοί δραστηριοποιούνται στο χώρο με ενημερωτικές εκστρατείες προς βιομηχάνους και καταναλωτές με αποτέλεσμα την κατασκευή πολλών μονάδων συμπαραγωγής στην Ελλάδα την τελευταία δεκαετία. Δυστυχώς όμως, αρκετές από αυτές τις εγκαταστάσεις έχουν βγει εκτός λειτουργίας και άλλες δεν έχουν ξεκινήσει να λειτουργούν εξαιτίας μιας σειράς εμποδίων που προκύπτουν παρά τη γενναία χρηματοδότηση από την Ε.Ε. μέσω των Κοινοτικών Πλαισίων Στήριξης. Κάποια από αυτά τα εμπόδια είναι:

- Αύξηση των τιμών του πετρελαίου και του φυσικού αερίου που επιβαρύνει τη συμπαραγωγή.
- Δυσκολία στον προσδιορισμό των βασικών μεγεθών για οικονομικοτεχνικές αναλύσεις στον ενεργειακό τομέα.
- Έλλειψη ανταγωνιστικής τιμολογιακής πολιτικής για συμπαραγωγή στον τριτογενή τομέα.
- Έλλειψη ανταγωνιστικής τιμολογιακής πολιτικής για συμπαραγωγή στον βιομηχανικό τομέα.
- Δυσκολίες για την περαιτέρω ανάπτυξη του δικτύου διανομής φυσικού αερίου.
- Αδυναμία της ΔΕΠΑ για την τήρηση του προβλεπόμενου χρονοδιαγράμματος για τη σύνδεση μεγάλων βιομηχανιών.
- Έλλειψη εμπειρίας στην ενεργειακή διαχείριση και αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων.

Έτσι, εξαιτίας των εμποδίων αυτών, η συμμετοχή της συμπαραγωγής στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι σήμερα της τάξης του 2% και στην εγκατεστημένη ισχύ είναι επίσης της τάξης του 2%, σε αντίθεση με τις άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, όπου 11 χώρες παράγουν πάνω από το 20% της ηλεκτρικής τους ενέργειας από συμπαραγωγή και 4 χώρες πάνω από 50%. Ο Ευρωπαϊκός μέσος όρος είναι γύρω στο 10%. Από τη συμπαραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια το 40% παράγεται από καύση φυσικού αερίου, το 19% από καύση άνθρακα και το 10% από ΑΠΕ.

Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζονται οι τομείς στους οποίους εφαρμόζονται τεχνολογίες συμπαραγωγής στην Ελλάδα.



Διάγραμμα -1.1- Συμπαραγωγή ανά τομέα στην Ελλάδα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2
ΚΛΙΜΑΤΙΚΗ ΑΛΛΑΓΗ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα προβλήματα του περιβάλλοντος που σχετίζονται με τις διαδικασίες παραγωγής ενέργειας είναι:

- Η κλιματική αλλαγή (λόγω των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου)
- Η ατμοσφαιρική ρύπανση (αέριοι ρυπαντές, όξινη βροχή, φωτοχημικό νέφος)
- Κίνδυνοι που ελλοχεύουν κατά την θαλάσσια μεταφορά υδρογονανθράκων

Συγκεκριμένα, τα τελευταία χρόνια έχει καταγραφεί μια συνεχής άνοδος της μέσης θερμοκρασίας της Γης, ως αποτέλεσμα του φαινομένου του θερμοκηπίου, δηλαδή της φυσικής κατά βάση διαδικασίας για την διατήρηση της θερμοκρασίας της Γης σε κατάλληλα για την ανάπτυξη ζωής επίπεδα. Σύμφωνα με την Διακυβερνητική Επιτροπή για την κλιματική αλλαγή (International Panel of Climate Change, IPCC) υπάρχουν ολοένα και ισχυρότερες ενδείξεις ότι η παρατηρούμενη αύξηση της θερμοκρασίας οφείλεται σε επιρροές από την ανθρώπινη δραστηριότητα. Σε κάθε περίπτωση γίνεται ολοένα και περισσότερο αντιληπτό ότι θα πρέπει να ληφθούν προληπτικές δράσεις, πριν οι δυσάρεστες συνέπειες της κλιματικής αλλαγής γίνουν μη αναστρέψιμες.

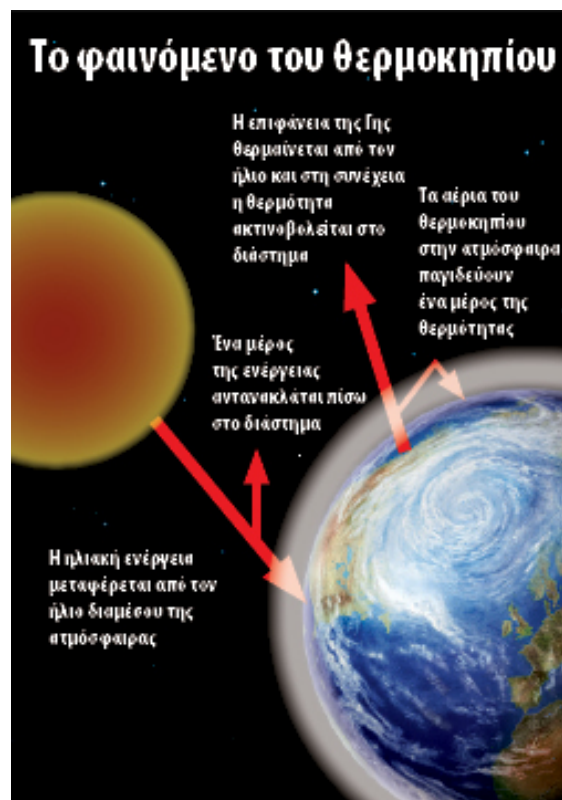
Εισάγοντας φόρους στις εκπομπές άνθρακα είναι εμφανές ότι οι εκπομπές μετριάζονται σε σχέση με την περίπτωση που δεν υπάρχει συμπαραγωγή και συνεπώς καταδεικνύονται τα πιθανά οφέλη στην προσπάθεια αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής από την εγκατάσταση μικρής κλίμακας τεχνολογιών συμπαραγωγής.

2.2 ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί αυτή τη στιγμή το νούμερο ένα πρόβλημα του πλανήτη με καταστροφικές συνέπειες. Ο όρος «κλίμα», δε σημαίνει όμως καιρός. Πρόκειται για το μέσο όρο των καιρικών συνθηκών που επικρατούν σε μια ορισμένη περιοχή για μεγάλη χρονική περίοδο.

Η ενέργεια του ήλιου θερμαίνει την επιφάνεια της γης και, καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται, η θερμότητα αντανακλάται στην ατμόσφαιρα ως ενέργεια υπεριώδους ακτινοβολίας. Ένα μέρος της ενέργειας απορροφάται στην ατμόσφαιρα από τα λεγόμενα «αέρια του θερμοκηπίου».

Πιο συγκεκριμένα, η ατμόσφαιρα λειτουργεί όπως τα τοιχώματα ενός θερμοκηπίου, αφήνοντας το ορατό ηλιακό φως να εισέλθει και απορροφώντας την εξερχόμενη ενέργεια υπεριώδους ακτινοβολίας, διατηρώντας ζεστό το εσωτερικό του. Αυτή η φυσική διαδικασία ονομάζεται "φαινόμενο του θερμοκηπίου". Χωρίς αυτό, η μέση θερμοκρασία στη γη θα ήταν -18°C , ενώ αυτή τη στιγμή φθάνει τους $+15^{\circ}\text{C}$.



Σχήμα -2.1- Φαινόμενο του θερμοκηπίου

Το κλίμα παρουσιάζε, και θα παρουσιάζει για πάντα, αποκλίσεις που οφείλονται σε φυσικά αίτια. Οι φυσικές αυτές αιτίες συμπεριλαμβάνουν τις ανεπαίσθητες μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας, τις ηφαιστειακές εκρήξεις, οι οποίες μπορούν να καλύψουν τη

γη με σκόνη που αντανακλά την ηλιακή θερμότητα στο διάστημα, καθώς και τις φυσικές αποκλίσεις του ίδιου του κλιματικού συστήματος.

Εντούτοις, οι φυσικές αιτίες μπορούν να εξηγήσουν μόνο ένα μικρό μέρος αυτής της θέρμανσης. Οι ανθρωπογενείς δραστηριότητες συντελούν στην αύξηση της συγκέντρωσης στην ατμόσφαιρα αερίων του θερμοκηπίου, ιδιαίτερα διοξειδίου του άνθρακα (CO₂), μεθανίου και πρωτοξειδίου του αζώτου, τα οποία ενισχύουν το φυσικό φαινόμενο του θερμοκηπίου και αυξάνουν τη θερμοκρασία. Η βασική ανθρωπίνη δραστηριότητα που εντείνει το πρόβλημα είναι η καύση ορυκτών καυσίμων που αυξάνει το ποσό του CO₂ και άλλων αερίων στην ατμόσφαιρα, οι υδρατμοί των οποίων σχηματίζουν ένα φυσικό διαχωριστικό στρώμα γύρω από τη Γη. Αυτό το στρώμα εμποδίζει ένα ποσοστό μεγαλύτερο από το φυσιολογικό (30%) της ανακλώμενης στην επιφάνεια της Γης ηλιακής ακτινοβολίας να επιστρέψει στο διάστημα και το παγιδεύει στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα την υπερθέρμανση του πλανήτη. Αυτή η υπερθέρμανση που προκαλεί ο ανθρωπίνος παράγοντας ονομάζεται "ενισχυμένο" φαινόμενο του θερμοκηπίου.

2.2.1 Τα αέρια του θερμοκηπίου

2.2.1.1 Υδρατμοί

Το κυριότερο αέριο του θερμοκηπίου είναι οι υδρατμοί (H₂O), οι οποίοι ευθύνονται για περίπου τα 2/3 του φυσικού φαινομένου του θερμοκηπίου. Στην ατμόσφαιρα, τα μόρια του νερού δεσμεύουν τη θερμότητα που εκπέμπει η γη και έπειτα εκπέμπουν εκ νέου προς όλες τις κατευθύνσεις, θερμαίνοντας έτσι την επιφάνεια της γης πριν επιστρέψουν τελικά στο διάστημα. Οι υδρατμοί της ατμόσφαιρας αποτελούν τμήμα του υδρολογικού κύκλου, ενός κλειστού συστήματος κυκλοφορίας του νερού από τους ωκεανούς και το έδαφος στην ατμόσφαιρα και από εκεί πίσω στο έδαφος μέσω της εξάτμισης και της διαπνοής, της συμπύκνωσης και της κατακρήμνισης. Οι ανθρωπίνες δραστηριότητες δεν αυξάνουν τους υδρατμούς στην ατμόσφαιρα. Ωστόσο, ο θερμότερος αέρας μπορεί να κατακρατήσει πολύ περισσότερη υγρασία και συνεπώς, οι αυξημένες θερμοκρασίες εντείνουν περαιτέρω τις κλιματικές αλλαγές.

2.2.1.2 Διοξείδιο του άνθρακα

Ο κυριότερος συντελεστής του «ενισχυμένου» φαινομένου του θερμοκηπίου είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Ευθύνεται παγκοσμίως για τουλάχιστον το 60% του φαινομένου. Στις βιομηχανικές χώρες, αποτελεί το 80% των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Στη γη υπάρχουν πεπερασμένες ποσότητες άνθρακα, οι οποίες, όπως και το νερό, ανακυκλώνονται με τον κύκλο του άνθρακα. Πρόκειται για ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο σύστημα στο οποίο ο άνθρακας κινείται μεταξύ της ατμόσφαιρας, της επίγειας βιόσφαιρας και των ωκεανών. Τα φυτά απορροφούν CO₂ από την ατμόσφαιρα κατά τη φωτοσύνθεση. Χρησιμοποιούν τον άνθρακα για να συνθέσουν τους ιστούς τους και τον απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα όταν ξεραίνονται και αποσυντίθενται. Ο οργανισμός των ζώων και των ανθρώπων περιέχει και αυτός άνθρακα τον οποίο λαμβάνει από τα βρώσιμα φυτά ή από τα ζώα που καταναλώνουν αυτά τα φυτά. Ο

άνθρακας απελευθερώνεται ως CO₂ με την αναπνοή, καθώς και με το θάνατο και την αποσύνθεση. Τα ορυκτά καύσιμα είναι τα απολιθωμένα υπολείμματα νεκρών ζώων και φυτών τα οποία συντίθενται υπό συγκεκριμένες συνθήκες σε διάστημα εκατομμυρίων ετών και συνεπώς έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε άνθρακα. Με την ευρεία έννοια, το κάρβουνο δεν είναι παρά υπολείμματα καμένων δασών, ενώ το πετρέλαιο προέρχεται από τη χλωρίδα των ωκεανών. (Οι ωκεανοί απορροφούν CO₂, που χρησιμοποιείται σε διαλυμένη μορφή για τη φωτοσύνθεση της θαλάσσιας χλωρίδας.)

Πολλά δισεκατομμύρια τόνοι άνθρακα ανταλλάσσονται με φυσικό τρόπο κάθε χρόνο μεταξύ της ατμόσφαιρας, των ωκεανών και της επίγειας χλωρίδας. Τα επίπεδα διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα παρουσιάζουν αποκλίσεις μικρότερες από 10% κατά τη διάρκεια των 10000 χρόνων που προηγήθηκαν της βιομηχανικής επανάστασης. Ωστόσο, από το 1800 η συγκέντρωσή του έχει αυξηθεί κατά περίπου 30%, καθώς τεράστιες ποσότητες ορυκτών καυσίμων καίγονται για να παραχθεί ενέργεια, κυρίως στις αναπτυσσόμενες χώρες. Σήμερα εκπέμπουμε στην ατμόσφαιρα τουλάχιστον 25 δισεκατομμύρια τόνους CO₂ το χρόνο. Πρόσφατα, Ευρωπαίοι ερευνητές ανακάλυψαν ότι οι τρέχουσες συγκεντρώσεις CO₂ στην ατμόσφαιρα είναι τώρα υψηλότερες από ποτέ τα τελευταία 650000 χρόνια. Πραγματοποιήθηκε πυρηνοληψία πάγου σε βάθος άνω των 3 χιλιομέτρων στους πάγους της Ανταρκτικής οι οποίοι διαμορφώθηκαν εκατοντάδες χιλιάδες χρόνια πριν. Ο πάγος περιέχει φυσαλίδες αέρα, οι οποίες μας δίνουν πληροφορίες για την ατμοσφαιρική σύσταση σε διάφορες εποχές της ιστορίας του πλανήτη. Το CO₂ μπορεί να παραμείνει στην ατμόσφαιρα για 50-200 χρόνια, ανάλογα με τον τρόπο ανακύκλωσης και επιστροφής του στο έδαφος και τους ωκεανούς.

Εκτός από το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), του οποίου η περιεκτικότητα στην ατμόσφαιρα παίζει καταλυτικό χαρακτήρα για την απορρόφηση θερμότητας και επομένως αύξησης της θερμοκρασίας και μεγάλη συμβολή στο «φαινόμενο του θερμοκηπίου», υπάρχουν και άλλα αέρια των οποίων το μόριο έχει ανάλογες ιδιότητες απορρόφησης και συγκράτησης της υπέρυθρης ακτινοβολίας και σημαντικής συμβολής στο φαινόμενο. Τέτοια είναι το μεθάνιο (CH₄), τα οξείδια του Αζώτου (NO_x) και το "Φρέον" (Χλωριωμένοι Υδρογονάνθρακες), με πολλαπλάσια ως προς το διοξείδιο του άνθρακα ικανότητα απορρόφησης της θερμότητας, η οποία ξεκινά από 25 φορές για το μεθάνιο, ανέρχεται σε 230 για τα οξείδια του αζώτου και φθάνει μέχρι 15.000 για το Φρέον.

2.2.1.3 Μεθάνιο

Το δεύτερο σημαντικότερο αέριο που ευθύνεται για το ενισχυμένο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι το μεθάνιο (CH₄). Από τις απαρχές της βιομηχανικής επανάστασης, οι ατμοσφαιρικές συγκεντρώσεις μεθανίου έχουν διπλασιαστεί και συμβάλλουν κατά περίπου 20% στην ενίσχυση του φαινομένου. Στις βιομηχανικές χώρες, το μεθάνιο αποτελεί συνήθως το 15% των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Το μεθάνιο συντίθεται κατά κύριο λόγο από βακτήρια που ενισχύονται με οργανικές ύλες ελλείψει οξυγόνου. Συνεπώς εκπέμπεται από διάφορες φυσικές πηγές και πηγές που επηρεάζονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα, με κυριότερες τις τελευταίες. Οι φυσικές πηγές περιλαμβάνουν υγροτόπους, τερμίτες και ωκεανούς. Οι πηγές που

επηρεάζονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα περιλαμβάνουν την εξόρυξη και την καύση ορυκτών καυσίμων, την κτηνοτροφία (τα βοοειδή καταναλώνουν φυτά, τα οποία ζυμώνονται στο πεπτικό τους σύστημα και τα οποία εκπέμπουν μεθάνιο μέσω της εκπνοής και των περιπτωμάτων τους), τις ρυζοκαλλιέργειες (οι ορυζώνες παράγουν μεθάνιο καθώς οι οργανικές ύλες του εδάφους αποσυντίθενται χωρίς αρκετό οξυγόνο) και τους χώρους ταφής (κι εδώ τα οργανικά απόβλητα αποσυντίθενται χωρίς αρκετό οξυγόνο). Το μεθάνιο στην ατμόσφαιρα δεσμεύει 23 φορές πιο αποτελεσματικά το CO₂. Ωστόσο, η διάρκεια ζωής του είναι μικρότερη και κυμαίνεται από 10 έως 15 χρόνια.

2.2.1.4 Μονοξείδιο του αζώτου

Το μονοξείδιο του αζώτου (N₂O) απελευθερώνεται με φυσικό τρόπο από τους ωκεανούς και τα παρθένα δάση, καθώς και από τα βακτήρια του εδάφους. Οι πηγές που επηρεάζονται από την ανθρώπινη δραστηριότητα περιλαμβάνουν τα αζωτούχα λιπάσματα, την καύση ορυκτών καυσίμων και τη βιομηχανική χημική παραγωγή με χρήση αζώτου, όπως είναι η επεξεργασία λυμάτων. Στις βιομηχανικές χώρες, το N₂O αποτελεί το 6% των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου. Όπως το CO₂ και το μεθάνιο, έτσι και το μονοξείδιο του αζώτου είναι ένα αέριο του θερμοκηπίου, του οποίου τα μόρια απορροφούν θερμότητα που προσπαθεί να διαφύγει στο διάστημα. Το N₂O είναι 310 φορές πιο αποτελεσματικό από το CO₂ στην απορρόφηση της θερμότητας. Από τις απαρχές της βιομηχανικής επανάστασης, οι συγκεντρώσεις υποξειδίου του αζώτου στην ατμόσφαιρα έχουν αυξηθεί κατά περίπου 16% και συμβάλλουν κατά 4 – 6 % στην ενίσχυση του φαινομένου του θερμοκηπίου.

2.2.1.5 Φθοριούχα αέρια του θερμοκηπίου (Φρέον)

Είναι τα μόνα αέρια θερμοκηπίου που δεν έχουν συντεθεί με φυσικό τρόπο, αλλά έχουν δημιουργηθεί από τον άνθρωπο για βιομηχανικούς σκοπούς. Το μερίδιό τους στις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από τις βιομηχανικές χώρες είναι περίπου 1,5%. Όμως, είναι εξαιρετικά ισχυρά αφού μπορούν να δεσμεύσουν θερμότητα 22000 φορές πιο αποτελεσματικά από το CO₂ και παραμένουν στην ατμόσφαιρα για χιλιάδες χρόνια. Τα φθοριούχα αέρια θερμοκηπίου περιλαμβάνουν τους υδροφθοράνθρακες (HFCs) που χρησιμοποιούνται για την ψύξη και την κατάψυξη συμπεριλαμβανομένων των συστημάτων κλιματισμού, το εξαφθοριούχο θείο (SF₆) που χρησιμοποιείται για παράδειγμα στην ηλεκτρονική βιομηχανία και τους υπερφθοράνθρακες (PFC) που εκπέμπονται κατά την παραγωγή αλουμινίου και χρησιμοποιούνται στην ηλεκτρονική βιομηχανία. Αδιαμφισβήτητα, τα γνωστότερα από αυτά τα αέρια είναι οι χλωροφθοράνθρακες (CFCs) που δεν είναι μόνον φθοριούχα αέρια θερμοκηπίου, αλλά καταστρέφουν και το στρώμα του όζοντος. Αποσύρονται σταδιακά από την κυκλοφορία σύμφωνα με το Πρωτόκολλο του Μόντρεαλ του 1987 για τις ουσίες που καταστρέφουν το στρώμα του όζοντος.

2.2.2 Μέτρηση των αερίων του θερμοκηπίου

Οι συγκεντρώσεις αερίων στην ατμόσφαιρα μπορούν να εκφραστούν σε μέρη ανά εκατομμύριο (ppm) ή δισεκατομμύριο (ppb). Το ppm αντιστοιχεί σε 1 κυβικό εκατοστό αερίου ανά κυβικό μέτρο αέρα. Επίσης, 1 ppm σημαίνει ότι υπάρχει ένα μόριο του εν λόγω αερίου ανά 1.000.000 μόρια όλων των αερίων που περιέχονται στον αέρα.

Ωστόσο, ορισμένα αέρια θερμοκηπίου απορροφούν ραδιενέργεια πιο αποτελεσματικά από άλλα, καθώς απορροφούν ραδιενέργεια σε διαφορετικά μήκη κύματος και άλλα αλληλοκαλύπτονται μεταξύ τους. Για να εξηγηθούν οι διαφορές απορρόφησης, έχει υιοθετηθεί η έννοια του δυναμικού πλανητικής υπερθέρμανσης, όπου όλα τα αέρια συγκρίνονται με το CO₂, του οποίου το δυναμικό υπερθέρμανσης ισούται με 1. Για παράδειγμα, για μια περίοδο 100 ετών το δυναμικό υπερθέρμανσης του μεθανίου είναι 23 φορές μεγαλύτερο του δυναμικού του CO₂. Το πρωτοξειδίο του αζώτου είναι 296 φορές πιο αποτελεσματικό στην απορρόφηση από το CO₂ και το δυναμικό υπερθέρμανσης του SF₆ είναι τουλάχιστον 22.000 φορές μεγαλύτερο από αυτό του CO₂.

Είναι σημαντικό το δυναμικό υπερθέρμανσης να ορίζεται για συγκεκριμένη χρονική περίοδο εφόσον η ατμοσφαιρική διάρκεια ζωής των αερίων θερμοκηπίου παρουσιάζει σημαντικές αποκλίσεις. Το CO₂ μπορεί να παραμείνει στην ατμόσφαιρα για 50-200 έτη, ανάλογα με τον τρόπο ανακύκλωσής του στην ξηρά ή στους ωκεανούς, το μεθάνιο έχει διάρκεια ζωής στην ατμόσφαιρα 10-15 έτη, ενώ ορισμένα από τα φθοριούχα αέρια του θερμοκηπίου έχουν διάρκεια ζωής αρκετών χιλιάδων ετών.

Από τη βιομηχανική επανάσταση και έπειτα η συγκέντρωση αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα έχει αυξηθεί κατά τουλάχιστον 50%, από 280 σε 360 ppm μόνο για το CO₂. Σε αυτό προστίθεται αύξηση άλλων αερίων θερμοκηπίου, η οποία εκφράζεται σε ισοδύναμα του CO₂ και φθάνει σήμερα τα 425 μέρη ισοδύναμων του CO₂ ανά εκατομμύριο.

Οι συγκεντρώσεις των παραπάνω αερίων στην ατμόσφαιρα λοιπόν είναι: α) διοξείδιο του άνθρακα 351,3 ppm (μέρη στο εκατομμύριο), β) μεθάνιο 1,675 ppm, γ) οξείδια του αζώτου 0,31 ppm, και δ) φρέον 0,000225 ppm.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, ο βαθμός απορρόφησης θερμικής ακτινοβολίας για το καθένα είναι διαφορετικός, ώστε η σχετική συνεισφορά τους στο «φαινόμενο του θερμοκηπίου» να έχει ως ακολούθως: α) διοξείδιο του Άνθρακα 57%, β) μεθάνιο 12%, γ) οξείδια του αζώτου 6%, και δ) φρέον 25%.

Από τα παραπάνω παρατηρείται μια δυσανάλογη, σχετικά με τη συγκέντρωσή τους, συνεισφορά τους στο «φαινόμενο του θερμοκηπίου», πράγμα που υπαγορεύει την ήδη σε εξέλιξη ευρισκόμενη στρατηγική άμεσης μείωσής τους. Η τύχη όμως των παραπάνω αερίων είναι διαφορετική για το καθένα.

Το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), έπειτα από ένα μέσο χρόνο παραμονής 4 ετών στην ατμόσφαιρα απορροφάται από τα φυτά για να εξυπηρετήσει τις διαδικασίες της φωτοσύνθεσης ή αντιδρά με την αλκαλικότητα της θάλασσας παρέχοντας όξινα ανθρακικά, που καταλήγουν σε αναδιάλυση των ιζημάτων ανθρακικού ασβεστίου. Η

συνολική ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που εισήλθε κατά το 1998 στην ατμόσφαιρα ανερχόταν σε 24 δισεκατομμύρια τόνους περίπου, από τα οποία τα 3 δισεκατομμύρια κατακρατήθηκαν τελικώς από τους ωκεανούς, άλλα 18 δισεκατομμύρια απορροφήθηκαν από επίγειες βιολογικές διεργασίες (κυρίως φωτοσύνθεση), ενώ τα υπόλοιπα 3 δισεκατομμύρια συσσωρεύτηκαν στην ατμόσφαιρα.

Το μεθάνιο (CH_4), που προέρχεται κυρίως από βιολογικές διεργασίες αποδόμησης οργανικών ουσιών καθώς και διαρροές φυσικού αερίου, κατευθύνεται προς την στρατόσφαιρα, όπου συνεισφέρει στο «στρατοσφαιρικό φαινόμενο του θερμοκηπίου». Το μεθάνιο αποτελεί «τελικό προϊόν» βιολογικών διεργασιών και κατά συνέπεια δεν μπορεί να καταναλωθεί από καμία βιολογική διεργασία, όπως συμβαίνει με το διοξείδιο του άνθρακα. Ο μέσος χρόνος παραμονής του στην ατμόσφαιρα ανέρχεται σε 11 χρόνια, οι δε 3,5 δισεκατομμύρια τόνοι που είναι συσσωρευμένοι στην ατμόσφαιρα υφίστανται κάθε χρόνο μια προσθήκη 300 εκατομμυρίων τόνων, από την οποία το μεγαλύτερο μέρος (90% περίπου) καταστρέφεται, επιτρέποντας μια συσσώρευση στην ατμόσφαιρα ίσης με 30-40 εκατομμύρια τόνους ή 1% περίπου ετησίως.

Τα Οξειδία του Αζώτου (NO_x), τα οποία προέρχονται από κάθε είδους καύση και από ορισμένες βιολογικές δραστηριότητες (π.χ. αποσύνθεση λιπασμάτων), εισέρχονται στην ατμόσφαιρα συνεισφέροντας τόσο στο «φαινόμενο θερμοκηπίου» όσο και στη δημιουργία της «τρύπας του όζοντος». Τα Οξειδία του Αζώτου αποδομούνται με ένα βραδύτατο ρυθμό (0,7% το έτος) προς νιτρικά άλατα ή προς Άζωτο και Οξυγόνο, δημιουργώντας έτσι μια συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα του ύψους των 700 εκατομμυρίων τόνων. Ο ρυθμός συσσώρευσης τους είναι 0,2%, δηλαδή κάτι τι μικρότερος από εκείνου του διοξειδίου του άνθρακα. Από πλευράς δε στρατηγικής μείωσης τους ακολουθούνται περίπου αυτόματα τα μέτρα που θα ληφθούν και για το διοξείδιο του άνθρακα.

Τέλος, οι χλωριωμένοι υδρογονάνθρακες, προέρχονται αποκλειστικά από τις «μοντέρνες» λειτουργίες του πολιτισμού (σπρέι, χημικοί διαλύτες, ηλεκτρικά ψυγεία, αirkοντίσιον, κ.ά.) και κατευθύνονται ταχύτατα στη στρατόσφαιρα, δημιουργώντας τόσο το «στρατοσφαιρικό φαινόμενο του θερμοκηπίου», όσο και τη γνωστή «τρύπα του όζοντος». Σήμερα εκπέμπονται ετησίως άνω των 30.000 τόνων πάσης φύσεως αέρια τύπου Φρέον, τα οποία έχουν συσσωρεύσει μέχρι στιγμής στην ατμόσφαιρα ποσότητα άνω των 500.000 τόνων. Από αυτούς, καταστρέφονται οι 5.000 τόνοι περίπου το χρόνο ενώ οι υπόλοιποι 25.000 εξακολουθούν να συσσωρεύονται.

Το φαινόμενο του θερμοκηπίου, δημιουργείται από τα αέρια του θερμοκηπίου ως εξής. Αυτά επιτρέπουν τη δίοδο της ακτινοβολίας του Ηλίου προς τη Γη, αλλά δεν επιτρέπουν την ακτινοβολήση θερμότητας από τη Γη προς το διάστημα. Η εισερχόμενη ακτινοβολία έχει μικρό μήκος κύματος και περνάει, ενώ η εξερχόμενη έχει μεγάλο μήκος κύματος και δεν περνάει, όπως σε ένα θερμοκήπιο με τζάμια ή πλαστικό, στο οποίο οφείλεται και το όνομα του φαινομένου.

2.3 Η ΤΑΣΗ ΤΗΣ ΘΕΡΜΑΝΣΗΣ

Τα τελευταία 100 χρόνια, η μέση ατμοσφαιρική θερμοκρασία στην επιφάνεια του πλανήτη αυξήθηκε κατά 0,74 °C παγκοσμίως και κατά σχεδόν 1 °C στην Ευρώπη, γεγονός που συνιστά ασυνήθιστα ταχεία θέρμανση. Πράγματι, ο 20ός αιώνας ήταν ο θερμότερος αιώνας και η δεκαετία του 1990 ήταν η θερμότερη δεκαετία των τελευταίων 1.000 ετών. Αυτή η τάση υπερθέρμανσης συνεχίζεται: τα έντεκα θερμότερα έτη έχουν καταγραφεί την τελευταία δωδεκαετία. Η Διεθνής Ομάδα για την Αλλαγή του Κλίματος (IPCC), ένας οργανισμός του Ο.Η.Ε. που αποτελεί σημείο συνάντησης εκατοντάδων ειδικών επί του κλίματος από ολόκληρο τον κόσμο, προβλέπει ότι μέχρι το 2100 η μέση παγκόσμια θερμοκρασία είναι πολύ πιθανό να αυξηθεί περαιτέρω κατά 1,8°C έως 4°C – και στη χειρότερη περίπτωση έως 6,4°C – εκτός αν οι άνθρωποι αναλάβουν δράση για τον περιορισμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Αν και με την πρώτη ματιά η διαφορά δεν μοιάζει σημαντική, στη διάρκεια της τελευταίας εποχής των πάγων, πριν από 11.500 χρόνια, η μέση θερμοκρασία στον πλανήτη ήταν μόνο κατά 5°C χαμηλότερη από τη σημερινή, και παρόλα αυτά το μεγαλύτερο μέρος της Ευρώπης ήταν καλυμμένο από ένα χοντρό στρώμα πάγου. Ενδεικτικά της υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι τα παρακάτω γεγονότα. Το 2005 καταγράφηκε επίσημα ως το πιο θερμό έτος των τελευταίων εκατό ετών. Έως το 2005, το πιο θερμό έτος ήταν το 1987. Τον 20ο αιώνα η μέση θερμοκρασία αυξήθηκε κατά 0,4 – 0,8 βαθμούς Κελσίου κατατάσσοντας τον αιώνα ως τον θερμότερο των τελευταίων χιλίων ετών. Η Διακυβερνητική Επιτροπή για τις Κλιματικές Αλλαγές προβλέπει ότι αν συνεχίσει η εξάρτηση του πλανήτη από τα ορυκτά καύσιμα, τότε η μέση πλανητική θερμοκρασία θα αυξηθεί κατά 1,4 – 5,8 βαθμούς Κελσίου. Η μέση πλανητική θερμοκρασία έχει αυξηθεί σήμερα κατά 0,7 βαθμούς Κελσίου. Πιθανή αύξηση της θερμοκρασίας κατά 3 βαθμούς Κελσίου θα προκαλέσει την αύξηση της στάθμης της θάλασσας κατά 1 μέτρο. Η μέση στάθμη της θάλασσας έχει αυξηθεί κατά 20 εκατοστά τον 20^ο αιώνα. Οι συγκεντρώσεις αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα είναι οι υψηλότερες των τελευταίων 420.000 ετών. Η δεκαετία του 1990 ήταν η θερμότερη της χιλιετίας για το Βόρειο ημισφαίριο. Τα οχτώ πιο θερμά έτη που έχουν καταγραφεί στην ιστορία, εμφανίζονται μετά το 1983.



Σχήμα -2.2- Θέρμανση του πλανήτη

2.4 ΔΡΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟ ΤΩΝ ΑΛΛΑΓΩΝ

Η αλλαγή του κλίματος έχει ήδη εμφανή αποτελέσματα, που εκτείνονται από την αύξηση της θερμοκρασίας έως την άνοδο της στάθμης της θάλασσας σαν αποτέλεσμα της τήξης των πολικών παγετών, καθώς και τη συχνότερη εμφάνιση καταιγίδων και πλημμυρών. Εάν δεν αναλάβουμε δράση, η αλλαγή του κλίματος θα προκαλεί όλο και περισσότερο δαπανηρές ζημιές και θα διαταράσσει τη λειτουργία του φυσικού περιβάλλοντός μας, το οποίο μας παρέχει τροφή, πρώτες ύλες και άλλους ζωτικούς φυσικούς πόρους. Αυτό θα επιδράσει αρνητικά στις οικονομίες μας και θα μπορούσε να αποσταθεροποιήσει τις κοινωνίες σε ολόκληρο τον κόσμο. Το 2005 μόνο, η ασφαλιστική βιομηχανία δαπάνησε 60 δισεκατομμύρια δολάρια για να καλύψουν ζημιές που σχετίζονται με ακραία καιρικά φαινόμενα.

2.4.1 Το Πρωτόκολλο του Κιότο

Η ένταση του φαινομένου του θερμοκηπίου τα τελευταία χρόνια οδήγησε σε μια νομική δέσμευση των αναπτυγμένων χωρών για μείωση των εκπομπών αερίων, το Πρωτόκολλο του Κιότο. Σύμφωνα με αυτό, τα κράτη που το έχουν συνυπογράψει δεσμεύονται να ελαττώσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου την πρώτη περίοδο ανάληψης υποχρεώσεων (2008-2012) τουλάχιστον κατά 5% σε σχέση με τις εκπομπές του 1990 (ή του 1995 για ορισμένα αέρια) και κατά παραπάνω για συγκεκριμένες χώρες (7% για τις Η.Π.Α. και 8% για την Ε.Ε.) ενώ οι αναπτυσσόμενες χώρες δεν έχουν ποσοτικοποιημένους στόχους.

Αυτό επιχειρείται να γίνει με τον πιο οικονομικά αποδοτικό τρόπο, ώστε να μην επιβαρυνθεί η παγκόσμια οικονομία. Έτσι, το Πρωτόκολλο του Κιότο περιλαμβάνει τρεις ευέλικτους μηχανισμούς:

- την Εμπορία Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΕΔΕ)
- τα Προγράμματα από Κοινού (ΠΚ)
- το Μηχανισμό Καθαρής Ανάπτυξης (ΜΚΑ)

Ο πρώτος μηχανισμός προβλέπει την αγοραπωλησία δικαιωμάτων εκπομπών μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών (χωρών του Παραρτήματος Ι) για να επιτύχουν τις δεσμεύσεις του Κιότο. Αποτελεί εργαλείο της αγοράς που χρησιμοποιείται για την περιβαλλοντική προστασία ώστε να ενισχύσει την αποδοτικότητα της αγοράς αναφορικά με τη μείωση των εκπομπών του αερίου του θερμοκηπίου. Ένα βέλτιστο σύστημα ΕΔΕ ελαχιστοποιεί τα συνολικά κόστη συμμόρφωσης προς τις απαιτήσεις του Πρωτοκόλλου, εξασφαλίζοντας ότι οι μειώσεις των εκπομπών λαμβάνουν χώρα όπου τα οριακά κόστη ελαχιστοποιούνται. Επιτρέπει στις χώρες του Παραρτήματος Ι να συναλλάσσουν μέρος των δεσμεύσεων εκπομπών και να ανακατανέμουν πρακτικά τις επιτρεπόμενες εκπομπές μεταξύ τους. Αυτό γίνεται αγοράζοντας τα δικαιώματα εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου από άλλες χώρες του Παραρτήματος Ι, που έχουν

μειώσει τις εκπομπές τους κάτω από τις δεσμεύσεις τους. Επιτρέπει επίσης τη διακυβερνητική εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών.

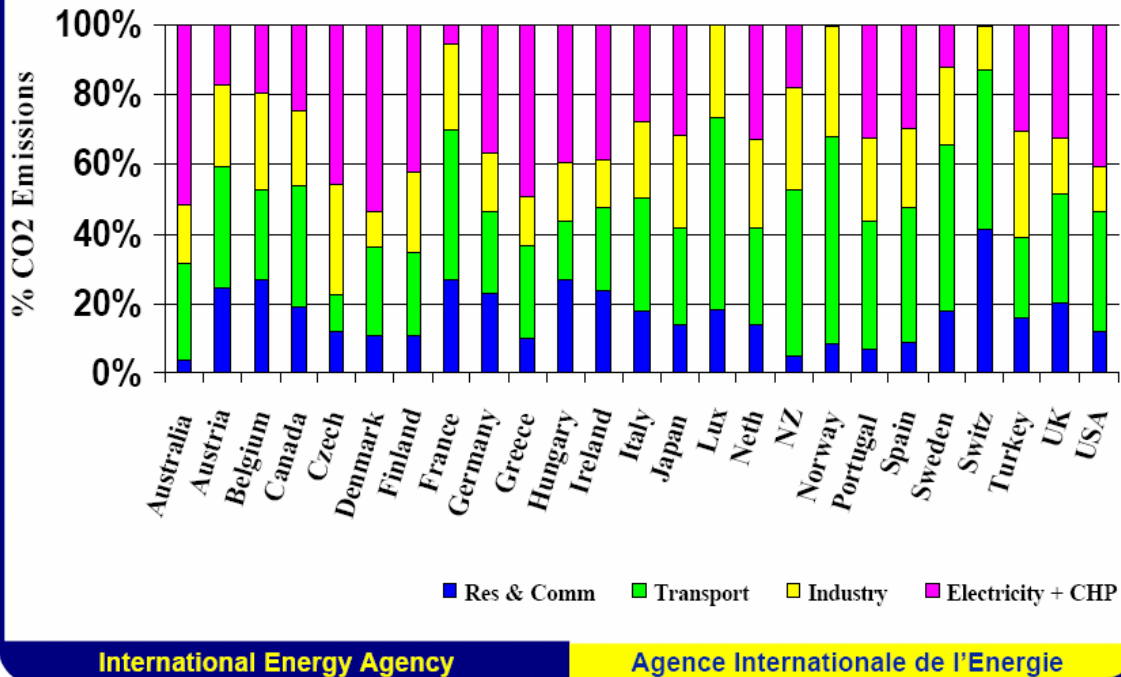
Ο δεύτερος, τα Προγράμματα από Κοινού (ΠΚ), προβλέπει την πραγματοποίηση έργων από μια χώρα του Παραρτήματος Ι για μείωση των εκπομπών σε κάποια άλλη χώρα του Παραρτήματος. Αυτές οι δράσεις δίνουν στην πρώτη χώρα Μονάδες Μείωσης Εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (ΜΜΕ). Ο μηχανισμός αυτός όμως παρουσιάζει κάποιες δυσκολίες όπως τη δημιουργία τεχνητών μειώσεων εκπομπών και γη' αυτό προτιμάται συνήθως ο τρίτος μηχανισμός.

Ο Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης προβλέπει την επένδυση από χώρες του Παραρτήματος Ι σε χώρες εκτός αυτού (αναπτυσσόμενες) για την πραγματοποίηση έργων μείωσης εκπομπών. Οι μονάδες μείωσης εκπομπών που προκύπτουν σε ένα έργο ΜΚΑ ονομάζονται Βεβαιωμένες Μειώσεις Εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (ΒΜΕ). Όταν μια χώρα επενδύει σε έργα σε κάποια άλλη χώρα κερδίζει μονάδες ΒΜΕ, τις οποίες μπορούν να χρησιμοποιήσουν για τη συμμόρφωση με τις δικές τους δεσμεύσεις. Στόχος του Μηχανισμού Καθαρής Ανάπτυξης είναι να βοηθήσει τα μη μέλη του Παραρτήματος Ι να επιτύχουν βιώσιμη ανάπτυξη συμβάλλοντας ταυτόχρονα στο στόχο του Κιότο και βοηθάει τα μέλη του Παραρτήματος Ι να συμμορφωθούν στα όρια εκπομπών με σημαντική μείωση του κόστους. Επίσης συμβάλλει στην προώθηση της χρήσης καθαρών τεχνολογιών στις αναπτυσσόμενες χώρες.

Τα αέρια που πραγματεύεται το Πρωτόκολλο του Κιότο είναι έξι:

- διοξείδιο του άνθρακα CO₂ (που αποτελεί το σημαντικότερο αέριο)
- μεθάνιο CH₄
- υποξείδιο του αζώτου N₂O
- υδροφθοράνθρακες HFC
- πλήρως φθοριωμένοι υδρογονάνθρακες ή υπερφθοράνθρακες PFC
- εξαφθοριούχο θείο SF₆

CO₂ Emissions from Energy and Energy-Related Sectors



Διάγραμμα -2.1- Εκπομπές CO₂ (ανά χώρα) από την παραγωγή ενέργειας και σχετικούς με αυτή τομείς

Το Πρωτόκολλο του Κιότο δεν έχει επικυρωθεί από τις ΗΠΑ, αν και μια από τις προεκλογικές διακηρύξεις του νυν Προέδρου των Η.Π.Α. Μπαράκ Ομπάμα ήταν η επικύρωσή του. Επιπλέον, δεν προβλέπει δεσμεύσεις μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου για τις αναπτυσσόμενες χώρες, με κυριότερες την Κίνα και την Ινδία.

2.4.2 Δράσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Ένα από τα σημαντικότερα μέτρα που έχει λάβει η Ε.Ε. για την αντιμετώπιση των κλιματικών αλλαγών είναι η υιοθέτηση του Πρωτοκόλλου του Κιότο ενώ παράλληλα ενθαρρύνει τα κράτη μέλη να εφαρμόσουν τις πρωτοβουλίες σε εθνικό επίπεδο. Προκειμένου να επιτύχει τους στόχους μείωσης της εκπομπής αερίων που έχουν τεθεί από το Πρωτόκολλο του Κιότο, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έθεσε σε εφαρμογή το Μάρτιο του 2000 το Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα για την Αλλαγή του Κλίματος (European Climate

Change Program - ECCP). Σύμφωνα με την Επιτροπή όλες οι χώρες, παγκοσμίως, θα πρέπει να προσπαθήσουν να επιτύχουν δύο στόχους.

Πρώτον, να περιορίσουν την αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη στους δύο βαθμούς Κελσίου και δεύτερον, να μειώσουν τις βλαβερές για το περιβάλλον εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά 30% ως το 2020 (σ.σ. σύμφωνα με επιστημονικές εκτιμήσεις αν δεν ληφθούν μέτρα, η μέση θερμοκρασία του πλανήτη θα αυξηθεί τον 21^ο αιώνα κατά 5 βαθμούς Κελσίου). Στο πλαίσιο του προγράμματος, η Επιτροπή συνεργάζεται με βιομηχανίες, περιβαλλοντικές οργανώσεις και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς, για να προσδιοριστούν μέτρα μείωσης των εκπομπών με χαμηλό κόστος. Περισσότερα από 30 μέτρα έχουν ήδη τεθεί σε εφαρμογή. Μια θεμελιώδους σημασίας πολιτική της Ε.Ε. όσον αφορά την αλλαγή του κλίματος είναι το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών της Ε.Ε., που ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2005. Οι κυβερνήσεις της Ε.Ε. έχουν θέσει όρια στις ποσότητες CO₂, που μπορούν να εκπέμπουν ετησίως περίπου 10.500 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ενεργοβόρα εργοστάσια. Αυτές οι βιομηχανικές μονάδες ευθύνονται για σχεδόν το ήμισυ των εκπομπών CO₂ στην Ε.Ε. Οι μονάδες, οι οποίες εκπέμπουν λιγότερο CO₂ από το επιτρεπόμενο, μπορούν να πωλήσουν τα αναξιοποίητα μερίδια εκπομπών σε άλλα εργοστάσια που δεν τα καταφέρνουν εξίσου καλά. Έτσι, υπάρχει και ένα οικονομικό κίνητρο να μειώσουν τις εκπομπές.

Επιπλέον, το σύστημα εξασφαλίζει ότι θα υπάρχουν αγοραστές για τα δικαιώματα εκπομπής, δηλαδή εταιρείες που υπερβαίνουν τα επιτρεπόμενα όρια εκπομπών και θα ήταν υποχρεωμένες να καταβάλλουν υψηλά πρόστιμα, εάν δεν αγόραζαν δικαιώματα εκπομπών από άλλους. Το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών διασφαλίζει τη μείωση των εκπομπών εκεί όπου αυτό είναι οικονομικά συμφέρον και περιορίζει το συνολικό κόστος μείωσης των εκπομπών.

Άλλα μέτρα στο πλαίσιο του ECCP αποσκοπούν στη βελτίωση της απόδοσης των καυσίμων των αυτοκινήτων και της ενεργειακής απόδοσης των κτιρίων (η καλύτερη μόνωση μπορεί να μειώσει το κόστος θέρμανσης κατά 90%!), την αυξανόμενη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι η αιολική, η ηλιακή, η παλιρροϊκή, η βιομάζα (οργανικές ύλες, όπως ξύλο, υποπροϊόντα άλεσης, φυτά, ζωικά περιττώματα κ.λπ.) και η γεωθερμική ενέργεια (θέρμανση από τις θερμές πηγές ή τα ηφαίστεια), και τη μείωση των εκπομπών μεθανίου από τις χωματερές.

Η δεύτερη φάση του ECCP ξεκίνησε τον Οκτώβριο του 2005, με στόχο το σχεδιασμό περαιτέρω ανάπτυξης μέτρων μείωσης των εκπομπών με χαμηλό κόστος. Η φάση αυτή εστιάζει στην ανάπτυξη προτάσεων με σκοπό την ενίσχυση του Συστήματος Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών της Ε.Ε., την αντιμετώπιση των εκπομπών των επιβατικών αεροπορικών και οδικών μεταφορών, την ανάπτυξη τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης του άνθρακα και το σχεδιασμό μέτρων προσαρμογής στις αναπόδραστες συνέπειες των κλιματικών μεταβολών. Βάσει των εργασιών αυτών, η Επιτροπή

πρότεινε πρόσφατα νόμους για την εισαγωγή των αεροπορικών εταιρειών στο Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών της Ε.Ε. και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τα οδικά καύσιμα. Έχει επίσης ανακοινώσει ότι θα προωθήσει νομοθεσία για τη μείωση των εκπομπών CO₂ από τα καινούρια αυτοκίνητα.

Συγκεκριμένα, για να περιοριστεί η αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη στους δύο βαθμούς Κελσίου η Επιτροπή πιστεύει πως θα πρέπει να γίνουν οι εξής προσπάθειες:

- Να περιοριστούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ως το 2020 κατά 30% παγκοσμίως και ως το 2050 οι εκπομπές άνθρακα θα πρέπει να μειωθούν κατά 50% (σ.σ. με έτος αναφοράς το 1990).
- Η Ε.Ε. θα πρέπει να συνεχίσει τις αυτόνομες προσπάθειές της για μείωση των εκπομπών άνθρακα ως το 2020, τουλάχιστον κατά 20%.
- Πέρα από τις αναπτυγμένες χώρες οι οποίες θα πρέπει να συνεχίσουν να στηρίζουν το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας προσπάθειας για μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, χρειάζεται δράση και από την πλευρά των αναπτυσσόμενων χωρών, οι οποίες θα πρέπει να αρχίσουν να περιορίζουν τις αυξανόμενες εκπομπές τους σε διοξείδιο του άνθρακα.
- Να σταματήσει η αποψίλωση τροπικών δασών, στην οποία οφείλεται το 20% της υπερθέρμανσης του πλανήτη, ποσοστό υψηλότερο από αυτό που προκαλεί ο τομέας των μεταφορών.
- Η εφαρμογή ενός Σχεδίου Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών Ρύπων σε όλες τις αναπτυγμένες χώρες, όπως αυτό που εφαρμόζεται στην Ε.Ε., θα βοηθήσει στην περαιτέρω μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.

Σε ό,τι αφορά τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στην ΕΕ η Επιτροπή προτείνει τα εξής:

- Βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας της ΕΕ κατά 20% μέχρι το 2020
- Αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κατά 20% μέχρι το 2020
- Ενίσχυση του Ευρωπαϊκού Συστήματος Κατανομής Δικαιωμάτων Εκπομπών για τις βιομηχανίες
- Περιορισμός των ρύπων που προέρχονται από τον τομέα των μεταφορών και κυρίως από τα ιδιωτικά Ι.Χ. και τις αεροπορικές εταιρείες
- Μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που προέρχονται από την καθημερινή χρήση ενέργειας που κάνουν τα νοικοκυριά, τα εμπορικά κτίρια κτλ.
- Σημαντική αύξηση του ευρωπαϊκού προϋπολογισμού, μετά το 2013, για δράσεις που θα αφορούν το περιβάλλον, την ενέργεια και την έρευνα κυρίως στον τομέα των μεταφορών.

Δεδομένου ότι οι στόχοι του Κιότο εκπνέουν το 2012, η Ευρωπαϊκή Ένωση ασκεί πιέσεις για τη σύναψη νέας διεθνούς συμφωνίας, προκειμένου να διασφαλιστεί η αναχαίτιση της παγκόσμιας θέρμανσης, πριν ξεπεράσει τους 2°C, σε σχέση με τα επίπεδα θερμοκρασίας της προ-βιομηχανικής εποχής. Οι επιστήμονες θεωρούν τους 2°C ως το όριο, πέραν του οποίου, οι κλιματικές αλλαγές θα μπορούσαν να πυροδοτήσουν μη ανατρέψιμες και πιθανότατα καταστροφικές αλλαγές στον πλανήτη.

Έχοντας υπ' όψιν αυτό το όριο θερμοκρασίας, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε τον Ιανουάριο του 2007 μια στρατηγική για το κλίμα και την ενέργεια, η οποία συνίσταται σε μια σειρά φιλόδοξων στόχων και μέτρων, τα οποία επικυρώθηκαν από τους ηγέτες της Ε.Ε. δύο μήνες αργότερα.

Η Ε.Ε. έχει πλέον δεσμευτεί να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου τουλάχιστον κατά 20% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990 έως το 2020 και σε περαιτέρω μείωση έως το 30%, εφόσον και οι άλλες βιομηχανοποιημένες χώρες συμφωνήσουν να πράξουν το ίδιο και αναλάβουν δράση και οι αναπτυσσόμενες χώρες. Για πετύχουν τη μείωση κατά 20% τουλάχιστον, τα ήδη υφιστάμενα μέτρα, όπως το Σύστημα ETS, θα πρέπει να συμπληρωθούν με νέα μέτρα, που θα αποσκοπούν ειδικά στην ενίσχυση της ενεργειακής απόδοσης κατά 20% έως το 2020, την αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 20% έως το 2020 και τον εξοπλισμό των νέων εργοστασίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τεχνολογία δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα.

2.4.3 Η κατάσταση στην Ελλάδα

Η Ελλάδα πιο συγκεκριμένα είναι από τις ελάχιστες αναπτυγμένες χώρες που έχουν το δικαίωμα να αυξήσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου βάσει του Πρωτοκόλλου του Κιότο (+25%). Το 2005, είχε ήδη αυξήσει τις εκπομπές της κατά 28% σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990. Τα επίσημα στοιχεία προβλέπουν αύξηση κατά 38,4% έως το 2010 και 58,4% έως το 2020. Μόλις το 3% της ηλεκτροπαραγωγής της χώρας καλύπτεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το 9% καλύπτεται από μεγάλα υδροηλεκτρικά φράγματα και το υπόλοιπο 88% από ορυκτά καύσιμα με κυριότερο το λιγνίτη (55%). Τα σημαντικότερα κοιτάσματα λιγνίτη στην Ελλάδα (Πτολεμαΐδα, Κοζάνη, Μεγαλόπολη) θα εξαντληθούν μέσα στα επόμενα 30 χρόνια, ακόμα και αν συνεχίσουμε να τα εκμεταλλευόμαστε με τον ίδιο ρυθμό. Τα τελευταία 40 χρόνια οι βροχοπτώσεις μειώθηκαν κατά 10 – 30% στη χώρα μας και η μέση μέγιστη θερμοκρασία αναμένεται να αυξηθεί κατά 8 βαθμούς Κελσίου έως το τέλος του αιώνα (από 33 σε 41 βαθμούς Κελσίου). Τέλος, οι πιο ευάλωτες περιοχές στις κλιματικές αλλαγές είναι οι Κυκλάδες, η Θεσσαλία, η Κρήτη και η Θεσσαλονίκη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3
ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

3.1 ΓΡΑΜΜΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

3.1.1 Γενικά

Στα μαθηματικά, ο γραμμικός προγραμματισμός (LP) είναι μια τεχνική για την βελτιστοποίηση μιας γραμμικής αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία υπόκειται σε γραμμικούς περιορισμούς ισότητας και ανισότητας. Ανεπίσημα, ο γραμμικός προγραμματισμός καθορίζει τον τρόπο για να επιτευχθεί το βέλτιστο αποτέλεσμα (όπως το μέγιστο κέρδος ή το χαμηλότερο κόστος) σε ένα συγκεκριμένο μαθηματικό μοντέλο με δοσμένο κάποιο σύνολο απαιτήσεων που εκπροσωπούνται από τις γραμμικές εξισώσεις. Πιο επίσημα, με δοσμένο ένα χώρο (για παράδειγμα, ένα πολύγωνο ή ένα πολυέδρο), και μια πραγματική συνάρτηση:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1 * x_1 + c_2 * x_2 + \dots + c_n * x_n + d$$

η οποία ορίζεται στον συγκεκριμένο χώρο, η μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού θα βρει ένα σημείο του χώρου, στο οποίο η συνάρτηση έχει την ελάχιστη (ή μέγιστη) τιμή της. Τέτοια σημεία μπορεί να μην υπάρχουν, αλλά εάν υπάρχουν, η αναζήτηση στον συγκεκριμένο χώρο θα καταλήξει εγγυημένα σε τουλάχιστον ένα από αυτά.

Γραμμικά προγράμματα είναι τα προβλήματα που εκφράζονται σε κανονική μορφή ως εξής:

- μεγιστοποίησε το $c^T * x$
- υπό τους περιορισμούς $A * x \leq b$

Το x αντιπροσωπεύει το διάνυσμα των μεταβλητών (που θα καθορισθεί), ενώ τα c και b είναι διανύσματα (γνωστών) συντελεστών και A είναι ένας (γνωστός) πίνακας συντελεστών. Ο όρος που πρέπει να μεγιστοποιηθεί ή να ελαχιστοποιηθεί ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση ($c^T * x$ στην περίπτωση μας). Οι ανισότητες $A * x \leq b$ είναι οι περιορισμοί που καθορίζουν το κυρτό πολυέδρο επί του οποίου θα βελτιστοποιηθεί η αντικειμενική συνάρτηση.

Ο γραμμικός προγραμματισμός μπορεί να εφαρμοστεί σε διάφορα πεδία μελέτης. Πιο εκτεταμένη είναι η χρήση του σε επιχειρηματικές και οικονομικές καταστάσεις, αλλά μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και για ορισμένα προβλήματα της μηχανικής. Ορισμένες βιομηχανίες που χρησιμοποιούν μοντέλα γραμμικού προγραμματισμού περιλαμβάνουν τις μεταφορές, την ενέργεια, τις τηλεπικοινωνίες, και τις κατασκευές.

Έχει αποδειχθεί χρήσιμος για την μοντελοποίηση ποικίλων τύπων προβλημάτων, στο σχεδιασμό, τη δρομολόγηση, τον προγραμματισμό, την ανάθεση και τον σχεδιασμό.

3.1.2 Ιστορικά στοιχεία

Το πρόβλημα της επίλυσης ενός συστήματος γραμμικών ανισοτήτων χρονολογείται τουλάχιστον από την εποχή του Fourier, από τον οποίο πήρε το όνομα της η μέθοδος Fourier-Motzkin. Ο γραμμικός προγραμματισμός προέκυψε ως ένα μαθηματικό μοντέλο που αναπτύχθηκε κατά τον δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο για τον σχεδιασμό των δαπανών και των επιστροφών, με στόχο την μείωση του κόστους στο στρατό και την αύξηση των απωλειών του εχθρού. Η μέθοδος αποτελούσε κρυφό μυστικό μέχρι το 1947. Μεταπολεμικά, πολλές βιομηχανίες διαπίστωσαν τη χρησιμότητά της στον καθημερινό τους σχεδιασμό.

Οι θεμελιωτές της θεωρίας είναι ο Leonid Kantorovich, ένας Ρώσος μαθηματικός που ανέπτυξε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, το 1939, ο George B. Dantzig, που δημοσίευσε την μέθοδο Simplex το 1947, και ο John von Neumann, που ανέπτυξε τη θεωρία της δυαδικότητας κατά το ίδιο έτος. Το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού για πρώτη φορά αποδεικνύεται ότι είναι επιλύσιμο σε πολυωνυμικό χρόνο από τον Leonid Khachiyan το 1979, αλλά μια ευρύτερη θεωρητική και πρακτική πρόοδος στον συγκεκριμένο τομέα έλαβε χώρα το 1984 όταν ο Narendra Karmarkar εισήγαγε μία νέα μέθοδο εσωτερικού σημείου για την επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού.

Η χρησιμότητα του γραμμικού προγραμματισμού γίνεται περισσότερο εμφανής εξετάζοντας το παράδειγμα του Dantzig σχετικά με την καλύτερη κατανομή 70 ατόμων σε 70 θέσεις εργασίας. Η υπολογιστική ισχύς που απαιτείται για τη δοκιμή όλων των δυνατών περιπτώσεων και την επιλογή της βέλτιστης ανάθεσης είναι τεράστια. Ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών υπερβαίνει τον αριθμό των σωματιδίων στο σύμπαν. Εντούτοις, χρειάζεται μόνο μια στιγμή για την εύρεση της βέλτιστης λύσης αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα σαν πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού και εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο Simplex. Η θεωρία πίσω από γραμμικό προγραμματισμό μειώνει δραστικά τον αριθμό των πιθανών βέλτιστων λύσεων που πρέπει να ελεγχθούν.

3.1.3 Χρήσεις

Ο γραμμικός προγραμματισμός αποτελεί ένα σημαντικό τομέα της βελτιστοποίησης για διάφορους λόγους. Πολλά πρακτικά προβλήματα στον ερευνητικό τομέα μπορούν να εκφραστούν ως προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού. Ορισμένες ειδικές

περιπτώσεις του γραμμικού προγραμματισμού, όπως τα προβλήματα ροής δικτύου και πολύπλευρα προβλήματα ροής θεωρούνται αρκετά σημαντικές με αποτέλεσμα να έχουν οδηγήσει σε πολύ εξειδικευμένη έρευνα για αλγορίθμους επίλυσής τους. Ένας αριθμός των αλγορίθμων για άλλα είδη προβλημάτων βελτιστοποίησης λειτουργούν λύνοντας τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού ως υπο-προβλήματα. Ιστορικά, οι ιδέες από το γραμμικό προγραμματισμό ενέπνευσαν πολλές από τις κεντρικές έννοιες της θεωρίας βελτιστοποίησης, όπως η δυαδικότητα, η αποσύνθεση και η σημασία της κυρτότητας και των γενικεύσεών της. Ομοίως, ο γραμμικός προγραμματισμός χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό και στην μικροοικονομία και την διοίκηση επιχειρήσεων σε τομείς όπως ο σχεδιασμός, η παραγωγή, η μεταφορά και η τεχνολογία. Παρά το γεγονός ότι τα ζητήματα σύγχρονης διαχείρισης είναι ρευστά, οι περισσότερες επιχειρήσεις θα ήθελαν να μεγιστοποιήσουν τα κέρδη ή να ελαχιστοποιήσουν τα κόστη, με περιορισμένους πόρους. Ως εκ τούτου, πολλά θέματα μπορεί να συνοψίζονται σε προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού.

3.2 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

3.2.1 Γενικά

Ο στοχαστικός προγραμματισμός είναι μια προσέγγιση για την μοντελοποίηση των προβλημάτων βελτιστοποίησης που εμπεριέχουν αβεβαιότητα. Ενώ τα ντετερμινιστικά προβλήματα βελτιστοποίησης διατυπώνονται με γνωστές παραμέτρους, τα προβλήματα που συναντάμε στην πραγματικότητα σχεδόν πάντα περιλαμβάνουν ορισμένες παραμέτρους, οι οποίες είναι άγνωστες όταν πρέπει να ληφθεί μια απόφαση. Όταν οι παράμετροι είναι αβέβαιες, αλλά υποτίθεται ότι παίρνουν ένα συγκεκριμένο σύνολο δυνατών τιμών, μπορεί να αναζητηθεί μια λύση που θα είναι εφικτή για όλες τις πιθανές επιλογές παραμέτρων και θα βελτιστοποιεί μια δοσμένη αντικειμενική συνάρτηση. Μια τέτοια προσέγγιση θα μπορούσε να έχει νόημα για παράδειγμα, κατά τον σχεδιασμό μιας γέφυρας ελαχίστου βάρους από χάλυβα, με αντοχή σε εφελκυσμό που είναι γνωστή μόνο με κάποια ανοχή. Τα μοντέλα στοχαστικού προγραμματισμού είναι παρόμοια σε μορφή, αλλά προσπαθούν να επωφεληθούν από το γεγονός ότι οι κατανομές πιθανότητας που διέπουν τα στοιχεία είναι γνωστές ή μπορούν να εκτιμηθούν. Συχνά αυτά τα μοντέλα εφαρμόζονται σε περιπτώσεις όπου οι αποφάσεις λαμβάνονται ουσιαστικά κατ' επανάληψη κάτω από τις ίδιες συνθήκες, και ο στόχος είναι η λήψη μιας απόφασης που θα έχει καλή απόδοση κατά μέσο όρο. Ένα παράδειγμα θα μπορούσε να είναι ο σχεδιασμός των καθημερινών δρομολογίων των φορτηγών μεταφοράς γάλακτος σε πελάτες με τυχαία ζήτηση. Εδώ οι κατανομές πιθανότητας (π.χ., της ζήτησης) μπορούν να εκτιμηθούν από τα δεδομένα που έχουν συλλεχθεί καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου. Ο στόχος εδώ είναι να βρεθεί κάποια λύση που θα είναι εφικτή για όλες (ή σχεδόν όλες) τις πιθανές περιπτώσεις, και μεγιστοποιεί το προσδοκώμενο κέρδος κάποιας συνάρτησης των αποφάσεων και των τυχαίων μεταβλητών.

Ο στοχαστικός προγραμματισμός μπορεί επίσης να εφαρμοστεί σε περιπτώσεις που πρέπει να ληφθεί μια ακαριαία απόφαση. Ένα παράδειγμα θα ήταν η κατασκευή ενός χαρτοφυλακίου επενδύσεων με στόχο την μεγιστοποίηση του κέρδους. Όπως και στο παράδειγμα της παράδοσης του γάλακτος, οι κατανομές πιθανότητας των αποδόσεων για τα χρηματοπιστωτικά μέσα που εξετάζονται θεωρούνται γνωστές, αλλά εξαιτίας της έλλειψης στοιχείων για μελλοντικές περιόδους, αυτές οι κατανομές θα πρέπει να εξάγονται από κάποιο συνοδευτικό μοντέλο, το οποίο στην πιο απλή του μορφή θα μπορούσε να προέρχεται αποκλειστικά από τις πεποιθήσεις του αποφασίζοντα (DM). Μια άλλη επιπλοκή σε αυτή την περίπτωση είναι η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης: η μεγιστοποίηση του αναμενόμενου κέρδους γίνεται λιγότερο δικαιολογημένη, όταν η απόφαση πρόκειται να γίνει μία μόνο φορά, και η στάση του αποφασίζοντα απέναντι στο ρίσκο τότε γίνεται σημαντική.

Τα πιο διαδεδομένα και θεωρητικά ανεπτυγμένα μοντέλα στοχαστικού προγραμματισμού είναι τα γραμμικά προγράμματα δύο σταδίων. Σε αυτά ο αποφασίζων προχωρά σε κάποιες ενέργειες σε πρώτη φάση, μετά τις οποίες λαμβάνει χώρα ένα τυχαίο γεγονός που επηρεάζει το αποτέλεσμα της πρώτης απόφασης. Μια αναδρομική απόφαση μπορεί να ληφθεί στο δεύτερο στάδιο, που θα αντισταθμίζει οποιαδήποτε αρνητική επίδραση που μπορεί να έχει καταγραφεί ως αποτέλεσμα της πρώτης απόφασης. Η βέλτιστη πολιτική από ένα τέτοιο μοντέλο είναι μία και μόνη απόφαση κατά την πρώτη φάση και ένα σύνολο από αναδρομικές αποφάσεις (με βάση κάποιον κανόνα απόφασης) που θα καθορίζει ποια δράση της δεύτερης φάσης θα πρέπει να ληφθεί σε σχέση με κάθε τυχαίο αποτέλεσμα.

Παρά το γεγονός ότι τα γραμμικά στοχαστικά προγράμματα δύο σταδίων συχνά θεωρούνται ως το κλασικό παράδειγμα μοντελοποίησης στοχαστικού προγραμματισμού, η ισχύς του στοχαστικού προγραμματισμού έχει αναπτυχθεί και διευρυνθεί ώστε να συμπεριλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα μοντέλων και προσεγγίσεων λύσεων. Οι εφαρμογές του είναι ευρέως διαδεδομένες, από την οικονομία μέχρι και την διαχείριση της αλιείας. Ένα εναλλακτικό μοντέλο προσέγγισης χρησιμοποιεί τους λεγόμενους τυχαίους περιορισμούς. Αυτοί δεν απαιτούν οι αποφάσεις μας να είναι εφικτές για σχεδόν όλα τα αποτελέσματα των τυχαίων παραμέτρων, αλλά τουλάχιστον με κάποια συγκεκριμένη πιθανότητα.

Μια φυσική γενίκευση του μοντέλου δύο σταδίων το επεκτείνει σε πολλά στάδια. Σε αυτή την περίπτωση κάθε στάδιο αποτελείται από μια απόφαση που ακολουθείται από μια σειρά από παρατηρήσεις των αβέβαιων παραμέτρων που κάνουν την εμφάνισή τους σταδιακά με την πάροδο του χρόνου. Σε αυτό το πλαίσιο, ο στοχαστικός προγραμματισμός σχετίζεται στενά με την ανάλυση αποφάσεων, την βελτιστοποίηση των προσομοιώσεων διακριτών περιπτώσεων, την στοχαστική θεωρία ελέγχου, τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων Markov, και τον δυναμικό προγραμματισμό.

Σε γενικές γραμμές η μέθοδος συνδυάζει τη δύναμη του μαθηματικού προγραμματισμού με προηγμένες τεχνικές πιθανότητας, για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης που εμπειρεύουν την αβεβαιότητα. Μια προσέγγιση μαθηματικού προγραμματισμού έχει σημαντικά πλεονεκτήματα: τα εργαλεία της κυρτής ανάλυσης και η δυαδική θεωρία μπορούν να εφαρμοστούν για να αποφέρουν σημαντικές γνώσεις και να αναπτύξουν τεχνικές επίλυσης βασισμένες στην αποσύνθεση μεγάλων προβλημάτων σε τμήματα που μπορούν να μελετηθούν εύκολα. Τα εργαλεία του μαθηματικού προγραμματισμού είναι επίσης απαραίτητα για τον χειρισμό γενικών περιορισμών του προβλήματος και

μεταβλητών απόφασης. Η προσθήκη των περιορισμών είναι συχνά ένα σοβαρό εμπόδιο για τις τεχνικές δυναμικού προγραμματισμού, καθώς αυξάνει την διάσταση του χώρου δυνατών καταστάσεων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ένα δυσεπίλυτο πρόβλημα. Ένας σημαντικός τρέχων περιορισμός για τα προβλήματα στοχαστικού προγραμματισμού -σε αντίθεση με τα προβλήματα δυναμικού προγραμματισμού- είναι ότι οι κατανομές πιθανότητας των τυχαίων παραμέτρων θεωρούνται δεδομένες, και δεν μπορούν να εξαρτώνται από τις αποφάσεις που λαμβάνονται.

3.2.2 Επίλυση στοχαστικών προγραμμάτων

Η προσέγγιση της λύσης για τα μοντέλα στοχαστικού προγραμματισμού μοντέλα κατευθύνονται από τον τύπο των κατανομών πιθανότητας που διέπουν τις τυχαίες παραμέτρους. Μια συνηθισμένη προσέγγιση για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας είναι ο καθορισμός ενός μικρού αριθμού σεναρίων, τα οποία αντιπροσωπεύουν το μέλλον. Στην περίπτωση αυτή είναι δυνατόν να υπολογιστεί μια λύση στο πρόβλημα στοχαστικού προγραμματισμού από την επίλυση ενός ντετερμινιστικού ισοδύναμου γραμμικού προγράμματος. Τα προβλήματα αυτά είναι συνήθως προβλήματα πολύ μεγάλης κλίμακας και, ως εκ τούτου, μεγάλο μέρος των ερευνητικών προσπαθειών της κοινότητας στοχαστικού προγραμματισμού έχει αφιερωθεί στην ανάπτυξη αλγορίθμων που εκμεταλλεύονται την δομή του προβλήματος, ιδίως με την ελπίδα της αποσύνθεσης μεγάλων προβλημάτων σε μικρότερα απλούστερα συστατικά. Στην περίπτωση αυτή η κυρτότητα είναι μία βασική ιδιότητα.

Όταν οι κατανομές πιθανότητας των τυχαίων παραμέτρων είναι συνεχείς, ή όταν υπάρχουν πολλές τυχαίες παράμετροι, εμφανίζεται το πρόβλημα της κατασκευής κατάλληλων σεναρίων για την προσέγγιση της αβεβαιότητας. Μία προσέγγιση του προβλήματος κατασκευάζει δύο διαφορετικά ντετερμινιστικά ισοδύναμα προβλήματα, οι βέλτιστες λύσεις των οποίων παρέχουν τα άνω και κάτω όρια της βέλτιστης τιμής z^* του αρχικού προβλήματος.

Μια εναλλακτική μεθοδολογία εύρεσης της λύσης αντικαθιστά τις τυχαίες μεταβλητές από ένα πεπερασμένο τυχαίο δείγμα και λύνει τα προκύπτοντα (ντετερμινιστικά) προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού, όπως ακριβώς θα γινόταν για μία ορισμένη σεναριακή περίπτωση (βλ. παραπάνω). Η διαδικασία αυτή αποκαλείται συχνά εξωτερική μέθοδος δειγματοληψίας (external sampling method). Υπό αρκετά πιο ήπιες συνθήκες μπορεί να ληφθεί μια στατιστική εκτίμηση της τιμής της βέλτιστης λύσης που να συγκλίνει στο z^* καθώς το μέγεθος του δείγματος αυξάνει. Οι εξωτερικές μέθοδοι δειγματοληψίας συνήθως επιλέγουν ένα δείγμα πριν από την εφαρμογή μίας μεθόδου μαθηματικού προγραμματισμού. Ένας αριθμός αλγοριθμικών διαδικασιών (βλ. δεύτερο μισό της εργασίας του Birge) έχει αναπτυχθεί για την λήψη επαναλαμβανόμενων

δειγμάτων κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου. Η μέθοδος αυτή συχνά ονομάζεται εσωτερική μέθοδος δειγματοληψίας.

Μοντέλα στοχαστικού προγραμματισμού ακεραίων προκύπτουν όταν οι μεταβλητές απόφασης απαιτείται να λάβουν ακέραιες τιμές. Στις περισσότερες πραγματικές περιπτώσεις αυτό οδηγεί σε απώλεια της κυρτότητας και καθιστά την εφαρμογή των μεθόδων αποσύνθεσης προβληματική. Οι τεχνικές για την επίλυση των μοντέλων στοχαστικού προγραμματισμού ακεραίων, αποτελούν ενεργό τμήμα της έρευνας.

3.3 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

3.3.1 Γενικά

Η ανάλυση είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να οδηγεί σε βελτιωμένη διαδικασία λήψης αποφάσεων, επιτρέποντας την εξέταση των αποτελεσμάτων και των συνεπειών τους.

Η σεναριακή ανάλυση μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για να φωτίζει τα λεγόμενα 'βαριά χαρτιά'. Για παράδειγμα, η ανάλυση της πιθανότητα η γη να συγκρουστεί με ένα μεγάλο ουράνιο αντικείμενο (μετεωρίτη) δείχνει ότι, ενώ η πιθανότητα είναι μικρή, οι προκαλούμενες ζημιές είναι τόσο υψηλές, ώστε αυτό το ενδεχόμενο είναι πολύ πιο σημαντικό (απειλητικό) από ότι υποδηλώνει μεμονωμένα η μικρή πιθανότητα(σε οποιοδήποτε έτος). Ωστόσο, αυτή η πιθανότητα αυτή συνήθως αγνοείται από τους οργανισμούς που χρησιμοποιούν σεναριακή ανάλυση για την ανάπτυξη ενός στρατηγικού σχεδίου, δεδομένου ότι έχει τέτοιες σημαντικές επιπτώσεις.

3.3.2 Δημοσιονομικές εφαρμογές

Για παράδειγμα, στην οικονομία και τις επενδύσεις, ένα χρηματοπιστωτικό ίδρυμα θα μπορούσε να επιχειρήσει να προβλέψει πολλά πιθανά σενάρια για την οικονομία (π.χ. ταχεία ανάπτυξη, μέτρια ανάπτυξη, αργή ανάπτυξη) και θα μπορούσε επίσης να επιχειρήσει να προβλέψει τα κέρδη της χρηματοπιστωτικής αγοράς (για τα ομόλογα, τις μετοχές και τα μετρητά) σε καθένα από αυτά τα σενάρια. Θα μπορούσε να θεωρήσει υποσύνολα για καθεμία από τις πιθανότητες. Θα μπορούσε να προσπαθήσει να καθορίσει περαιτέρω συσχετίσεις και να αναθέσει πιθανότητες σε κάθε σενάριο (και υποσύνολο εάν υπάρχει). Τότε θα ήταν σε θέση να εξετάσει τον τρόπο διανομής των στοιχείων ενεργητικού σε κατηγορίες στοιχείων. Το ίδρυμα θα μπορούσε να υπολογίσει το σεναριακά σταθμισμένο αναμενόμενο κέρδος(το οποία θα αντιπροσωπεύει την συνολική ελκυστικότητα του οικονομικού περιβάλλοντος). Θα μπορούσε επίσης να εκτελέσει δοκιμές ακραίων περιπτώσεων, με δυσμενή σενάρια.

Ανάλογα με την πολυπλοκότητα του προβλήματος, η σεναριακή ανάλυση μπορεί να είναι μια απαιτητική διαδικασία. Μπορεί να είναι δύσκολη η πρόβλεψη των μελλοντικών γεγονότων (π.χ. το πραγματικό μελλοντικό αποτέλεσμα μπορεί να είναι εντελώς απρόσμενο), για παράδειγμα να προβλέψει ποια ακριβώς είναι τα πιθανά σενάρια και να αναθέσει πιθανότητες σε αυτά. Και είναι γεγονός ότι οι γενικές προβλέψεις δεν επηρεάζονται από τα συνεπαγόμενα κέρδη της οικονομικής αγοράς. Τα αποτελέσματα μπορούν να μοντελοποιηθούν μαθηματικά/στατιστικά π.χ. λαμβάνοντας υπόψη την

πιθανή μεταβλητότητα εντός ενός σεναρίου, καθώς και διατυπώνοντας πιθανές σχέσεις μεταξύ των σεναρίων. Σε γενικές γραμμές, θα πρέπει η εκχώρηση πιθανοτήτων σε διαφορετικά σεναρία να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή, καθώς αυτό θα μπορούσε να προκαλέσει την τάση να λαμβάνεται υπόψη μόνο το σενάριο με την υψηλότερη πιθανότητα.

Τα χρηματοπιστωτικά ιδρύματα μπορούν να προχωρήσουν την ανάλυση περαιτέρω συσχετίζοντας τα στοιχεία του ενεργητικού που προκύπτουν από τους ανωτέρω υπολογισμούς με την κατανομή των στοιχείων του ενεργητικού της εταιρείας. Με αυτόν τον τρόπο το χρηματοπιστωτικό ίδρυμα επιδιώκει να ελέγχει το δικό του επιχειρηματικό κίνδυνο και όχι τον κίνδυνο του χαρτοφυλακίου του πελάτη.

3.3.3 Γεω-πολιτικές εφαρμογές

Στην πολιτική ή την γεω-πολιτική, η σεναριακή ανάλυση περιλαμβάνει την μοντελοποίηση των πιθανών εναλλακτικών διαδρομών ενός κοινωνικού ή πολιτικού περιβάλλοντος και, ενδεχομένως, των διπλωματικών και πολεμικών κινδύνων. Για παράδειγμα, στον πρόσφατο πόλεμο στο Ιράκ, το Πεντάγωνο είχε να μοντελοποιήσει εναλλακτικές πιθανότητες που είναι δυνατόν να προκύψουν κατά την εμπόλεμη κατάσταση και είχε να προγραμματίσει ανάλογα την θέση του υλικού και των στρατευμάτων. Η δυσκολία αυτής της πρόβλεψης τονίζεται σε αυτή την περίπτωση από το γεγονός ότι αναμφισβήτητα το Πεντάγωνο απέτυχε να προβλέψει την ανομία και την ανασφάλεια της μεταπολεμικής κατάστασης και το επίπεδο της εχθρότητας έναντι των δυνάμεων κατοχής.

3.3.4 Παραδοσιακή κριτική

Ενώ υπάρχει χρησιμότητα στην στάθμιση των υποθέσεων και στην διακλάδωση πιθανών αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αυτές, η εμπιστοσύνη στην σεναριακή ανάλυση, χωρίς κάποια ανάλυση των παραμέτρων μέτρησης της ακρίβειας (τυπικά σφάλματα, διαστήματα εμπιστοσύνης των προβλέψεων, μεταδεδομένα, τυποποίηση και κωδικοποίηση, στάθμιση για μη απόκριση, λάθος στην αναφορά, σχεδιασμός του δείγματος, μέτρηση περιπτώσεων, κ.λπ.), δεν μπορεί να αντικαταστήσει αυτήν της παραδοσιακής πρόβλεψης. Ειδικά σε σύνθετα προβλήματα, παράγοντες και υποθέσεις δεν συσχετίζονται με αδιάρρηκτο τρόπο. Μόλις μια συγκεκριμένη ευαισθησία είναι απροσδιόριστη, το σύνολο της μελέτης μπορεί να οδηγηθεί σε αμφισβήτηση.

Είναι λανθασμένη λογική να θεωρούμε, όταν κρίνουμε τα αποτελέσματα, ότι η καλύτερη περίπτωση θα αποτρέψει την ανάγκη για αισθησιαρχία. Από την άποψη αυτή, η

σεναριακή ανάλυση προσπαθεί να αναβάλλει την ανάλυση των στατιστικών νόμων (π.χ. νόμος του Chebyshev), επειδή οι κανόνες απόφασης συμβαίνουν έξω από ένα περιορισμένο σύνολο. Τα αποτελέσματα δεν επιτρέπεται απλώς να 'συμβούν'. Μάλλον, θα είναι υποχρεωμένα να συμμορφώνονται με αυθαίρετες υποθέσεις εκ των υστέρων και, κατά συνέπεια, δεν υπάρχει βάση επί της οποίας θα τεθούν οι αναμενόμενες τιμές. Στην πραγματικότητα, δεν υπάρχουν εκ των προτέρων αναμενόμενες τιμές, μόνο υποθέσεις, και ενυπάρχει πάντα μια αμφιβολία σχετικά με το ρόλο των μοντέλων και των δεδομένων απόφασης. Με λίγα λόγια, οι συγκρίσεις των σεναρίων με τα αποτελέσματα είναι μεροληπτική καθώς δεν αναφέρονται στα δεδομένα. Αυτό μπορεί να είναι βολικό, αλλά είναι απαράδεκτο.

Η σεναριακή ανάλυση δεν μπορεί να υποκαθιστά την πλήρη και τεκμηριωμένη έκθεση της έρευνας σφαλμάτων σε οικονομικές μελέτες. Στην παραδοσιακή πρόβλεψη, με δεδομένα τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την μοντελοποίηση του προβλήματος, με αιτιολογημένη προδιαγραφή και τεχνική, ένας αναλυτής μπορεί να εκθέσει, μέσα σε ένα ορισμένο ποσοστό στατιστικού σφάλματος, την πιθανότητα ένας συντελεστής να βρίσκεται εντός ορισμένου αριθμητικού διαστήματος. Αυτή η ακρίβεια δεν χρειάζεται να έρχεται σε βάρος της πολύ αναλυτικής δήλωσης των υποθέσεων. Το λογισμικό R, και συγκεκριμένα η ενότητα "WhatIf" (βλέπε επίσης και Matchit Zelig) έχει αναπτυχθεί για την αιτιώδη συνάφεια, και για να αξιολογήσει τις αντιπαραθέσεις. Το εν λόγω πρόγραμμα έχει αρκετά εξελιγμένες θεραπείες για τον προσδιορισμό των εξαρτήσεων του μοντέλου, έτσι ώστε να διατυπώσει με ακρίβεια πόσο ευαίσθητα είναι τα αποτελέσματα για μοντέλα που δεν βασίζονται σε εμπειρικές αποδείξεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΣΤΗΝ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕΣΩ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο μετριασμός των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της παραγωγής και χρήσης ενέργειας έχει καταστεί αναπόσπαστο μέρος της ενεργειακής πολιτικής. Συνεπώς, η απαίτηση για φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες ενεργειακής παραγωγής έχει κερδίσει πολύ έδαφος στις επιχειρήσεις που έχουν ως αντικείμενο την παραγωγή ενέργειας. Η κλιματική αλλαγή βρέθηκε πρόσφατα στο κέντρο των συζητήσεων. Η CHP είναι μία πρωτοπόρα τεχνολογία που ανταποκρίνεται στις ανάγκες της αγοράς και τις περιβαλλοντικές ανησυχίες λόγω της υψηλής ενεργειακής απόδοσης. Η επιτροπή της ΕΕ ενθαρρύνει τη χρήση πιο αποδοτικών ενεργειακών τεχνολογιών, συμπεριλαμβανομένης της τεχνολογίας συνδυασμένης παραγωγής, στην παραγωγή λιγότερων εκπομπών ανά μονάδα παραγόμενου προϊόντος. Έτσι, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει προκηρύξει αύξηση του μεριδίου της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από CHP τεχνολογίες από 9% σε 18% κατά τα έτη 1997-2010 (CEC Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 1997). Ένα πανευρωπαϊκό πλαίσιο εμπορίας εκπομπών έχει ήδη ξεκινήσει από το 2005 για να εκπληρώσει την δέσμευση της ΕΕ, κάτω από το πλαίσιο του πρωτοκόλλου του Κιότο, για αποδοτική μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου κατά 8% κατά την περίοδο 2008 – 2012 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 (Επιτροπή των Ευρωπαϊκών Κοινοτήτων, 2000).

Το ETS ορίζει ότι οι βιομηχανικές δραστηριότητες που εκπέμπουν σημαντικές ποσότητες CO₂ πρέπει να έχουν άδεια. Στις εν λόγω βιομηχανίες θα χορηγηθούν δικαιώματα για συγκεκριμένες ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου για τις σχετικές περιόδους δέσμευσης με βάση τα εθνικά σχέδια κατανομής των επιμέρους χωρών μελών. Οι μεμονωμένοι παραγωγοί μπορούν να επιτύχουν τους στόχους τους με τη μείωση των εκπομπών τους ή μέσω της εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Οι παραγωγοί πρέπει να καταβάλλουν χρηματική ποινή για υπερβολικές εκπομπές και πρέπει να καλύψουν το έλλειμμα αγοράζοντας τα δικαιώματα στην αρχή της επικείμενης περιόδου δέσμευσης. Ιδανικά το ETS θα προκαλέσει μείωση των εκπομπών CO₂, όπου αυτό μπορεί να γίνει περισσότερο αποδοτικά.

Το ETS παρέχει προκλήσεις και ευκαιρίες για τους ενεργειακούς τομείς που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένων και των εγκαταστάσεων CHP. Ένας μεγάλος αριθμός των υφιστάμενων και των εν δυνάμει εγκαταστάσεων CHP θα υπόκεινται στο ETS και θα έχουν σαν στόχο την μείωση των εκπομπών. Η υψηλή ενεργειακή απόδοση και οι χαμηλές εκπομπές καθιστούν τις τεχνολογίες συμπαραγωγής λύσεις φιλικές προς το περιβάλλον σε σύγκριση με πολλές άλλες

μορφές παραγωγής. Η ευελιξία στην επιλογή καυσίμου διευκολύνει την εναλλαγή καυσίμων (αλλαγή σε καύσιμα με χαμηλότερες ειδικές εκπομπές CO₂), καθώς και την μίξη καυσίμων, ως λογικές εναλλακτικές δυνατότητες για CHP παραγωγούς για την μείωση των εκπομπών τους. Η αξιολόγηση των επιλογών για τη συμμόρφωση με τους στόχους εκπομπών με οικονομικό τρόπο είναι περίπλοκη εξαιτίας της αβεβαιότητας που εμπεριέχεται στις διαδικασίες της CHP παραγωγής και της εμπορίας εκπομπών. Στην CHP, η παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας έχουν μία κοινή χαρακτηριστική, πράγμα που σημαίνει ότι ο σχεδιασμός της παραγωγής και των δύο βασικών εμπορευμάτων πρέπει να γίνεται σε συντονισμό. Στην ελεύθερη αγορά ενέργειας, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να αντιδρά στην εύκολα επηρεαζόμενη από εξωτερικούς παράγοντες τιμή πώλησης, ενώ η θερμότητα θα πρέπει να συνεχίσει να παράγεται για την εξισορρόπηση της ζήτησης. Επιπλέον, η τιμή των καυσίμων και της αγοράς δικαιωμάτων παίζουν σημαντικό ρόλο στην επιλογή των καυσίμων. Ο σωστός σχεδιασμός της εμπορίας εκπομπών μπορεί να βοηθήσει την εξέλιξη της CHP τεχνολογίας, κάνοντας την συμπαραγωγή μία πραγματικά κερδοφόρα τεχνολογία υπό το ETS.

Γενικά, το σύστημα εμπορίας εκπομπών θα πρέπει να συμμορφώνεται με άλλες στενά συνδεδεμένες επιχειρησιακές αποφάσεις. Διαφορετικές επιλογές για την συμμόρφωση με τους στόχους εκπομπών μπορούν επίσης να τεθούν σε παράλληλη ισχύ. Σύμφωνα με τις Αμερικανικές Τροπολογίες Δράσης Καθαρού Αέρα του 1990 (Clean Air Act Amendments, CAAA) το Lee et al. (1994) εξέτασε το συντονισμό της εμπορίας εκπομπών SO₂ με συναλλαγές ενέργειας και ευμετάβλητου αποθεματικού και την κατανάλωση καυσίμων που έχουν αγοραστεί με μακροπρόθεσμα συμβόλαια (take-or-pay fuel provision). Προσάρμοσε τους στόχους εκπομπών για ολόκληρη την εξεταζόμενη περίοδο σε βραχυπρόθεσμους επιχειρησιακούς στόχους, οι οποίοι με τη σειρά τους επιβλήθηκαν στις σχετικές δεσμευμένες μονάδες, και τους χώρισαν σε δυναμικά μεταβαλλόμενα υποπροβλήματα. Η Manetsch (1994) πρότεινε μακροπρόθεσμη δέσμευση των μονάδων και μια μέθοδο για την ενσωμάτωση του σχεδιασμού παραγωγής με τον καθορισμό των επιλογών συμμόρφωσης των εκπομπών SO₂, όπως η εναλλαγή σε άνθρακα χαμηλής περιεκτικότητας σε θείο και η εγκατάσταση φίλτρων. Αυτές οι μελέτες τονίζουν το σχεδιασμό παραγωγής των συστημάτων παραγωγής ενέργειας στο πλαίσιο των περιορισμών του ελέγχου των εκπομπών. Μέχρι τώρα, οι περισσότερες δημοσιευμένες μελέτες που ασχολούνται με την εμπορία εκπομπών CO₂ στον τομέα της ενέργειας έχουν την οπτική γωνία του σχεδιασμού στρατηγικής (Kunsh et al. - 2004, Hauch – 2003, Soderholm και Stromberg - 2003). Δεν αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της εμπορίας αυτό καθ' εαυτό.

Στην εργασία αυτή, μελετάμε τον σχεδιασμό του προβλήματος της εμπορίας εκπομπών CO₂ ενός μεμονωμένου παραγωγού CHP σε λειτουργικό επίπεδο. Μορφοποιούμε τον σχεδιασμό της εμπορίας εκπομπών CO₂ ενός CHP παραγωγού ως ένα πρόβλημα στοχαστικής βελτιστοποίησης πολλαπλών - περιόδων και προτείνουμε μια προσέγγιση της λύσης που βελτιστοποιεί τη λειτουργία της CHP εγκατάστασης και την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ ταυτόχρονα. Κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου εμπορίας, η μελλοντική CHP παραγωγή έχει βελτιστοποιηθεί μέχρι το τέλος της εξεταζόμενης περιόδου με βάση τα σενάρια για τη ζήτηση θερμότητας, τις τιμές ενέργειας και την τιμή των δικαιωμάτων. Με βάση τα βελτιστοποιημένα σχέδια παραγωγής, εκτιμώνται οι εκπομπές CO₂ κατά την περίοδο υποχρέωσης για να καθοριστεί το ποσό των δικαιωμάτων που θα πρέπει να αποτελέσουν αντικείμενο συναλλαγής (αγοράς ή πώλησης). Οι στρατηγικές εμπορίας σχετίζονται με την στάση αυτού που λαμβάνει τις αποφάσεις απέναντι στο ρίσκο (Decision Maker, DM). Η προτεινόμενη μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση της σχετικής αποτελεσματικότητας των διαφορετικών επιλογών συμμόρφωσης εκπομπών, όπως η εναλλαγή καυσίμου και η μίξη καυσίμων. Αυτή η μελέτη επεκτείνει τις ιδέες που παρουσιάστηκαν σε προηγούμενες εργασίες με πέντε τρόπους:

- Λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν στη διατύπωση του προβλήματος η στάση αυτού που παίρνει τις αποφάσεις απέναντι στο ρίσκο (Decision Maker, DM). Αντί για τη μεγιστοποίηση των αναμενόμενων κερδών, μεγιστοποιείται η αναμενόμενη χρησιμότητα του κέρδους.
- Ένα ωριαίο μοντέλο σχεδιασμού της CHP παραγωγής αντικαθιστά το προηγούμενο συγκεντρωτικό μοντέλο στο σχεδιασμό παραγωγής.
- Λαμβάνεται υπ' όψιν το κόστος συναλλαγής της εμπορίας των εκπομπών και προτείνεται μια στρατηγική εμπορίας που εξαρτάται από το πόσο αβέβαιες είναι οι εκτιμήσεις τους.
- Λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψιν οι ποινές για υπερβολικές εκπομπές στην προσέγγιση της λύσης που βασίζεται σε βέλτιστες συνθήκες.
- Τέλος, οι εκπομπές εκτιμώνται χρησιμοποιώντας ένα σταθμισμένο μέσο όρο με τις τιμές των δικαιωμάτων ως βάρη. Προηγούμενες μέθοδοι δεν χρησιμοποιούσαν συντελεστές στάθμισης κατά την εκτίμηση.

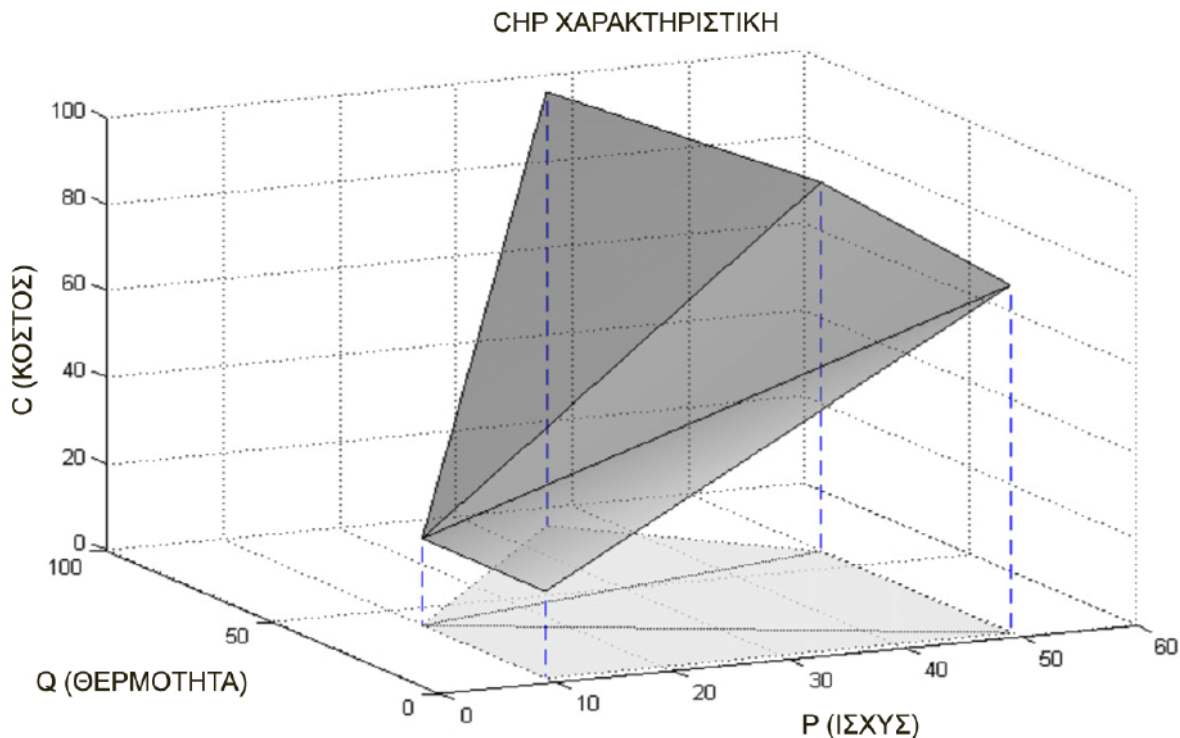
Η παρούσα εργασία είναι οργανωμένη ως εξής. Στην ενότητα 4.2, περιγράφονται τα χαρακτηριστικά της CHP παραγωγής και οι αβεβαιότητες που συμπεριλαμβάνονται στην CHP παραγωγή και στο σχεδιασμό της εμπορίας των εκπομπών στο πλαίσιο της ελεύθερης αγοράς ενέργειας. Στην ενότητα 4.3, μορφοποιείται το πρόβλημα του

σχεδιασμού της εμπορίας των δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ για ένα CHP παραγωγό σαν ένα πρόβλημα στοχαστικής βελτιστοποίησης πολλαπλών - περιόδων. Στο κεφάλαιο 5, παρουσιάζεται η προσέγγιση της λύσης για την ενσωμάτωση του σχεδιασμού της CHP παραγωγής και της εμπορίας των δικαιωμάτων εκπομπών και προτείνονται οι αντίστοιχες στρατηγικές εμπορίας. Στο κεφάλαιο 7, ανακοινώνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και μελετώνται τα αποτελέσματα διάφορων περιπτώσεων.

4.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ CHP ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΟΝ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΤΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

4.2.1 Χαρακτηριστικά της CHP παραγωγής

Το πρωταρχικό μέλημα ενός CHP παραγωγού είναι η παραγωγή θερμότητας για να ικανοποιήσει την μεταβλητή ζήτηση. Κανονικά η παραγωγή θερμότητας πρέπει να ικανοποιεί τη ζήτηση σε ωριαία βάση. Στην CHP τεχνολογία, η παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας είναι στενά συνδεδεμένες. Το επίπεδο της παραγωγής θερμότητας καθορίζει το εύρος στο οποίο μπορεί να ρυθμιστεί η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επίσης και το οριακό κόστος λειτουργίας της ηλεκτρικής παραγωγής. Μια εγκατάσταση CHP μπορεί να απεικονιστεί από μια κοινή χαρακτηριστική που καθορίζει την εξάρτηση μεταξύ του κόστους παραγωγής και της παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας όπως φαίνεται στο Διάγραμμα -4.1-.



Διάγραμμα -4.1- Χαρακτηριστική Μονάδας Συμπαγωγής

Επειδή το κόστος παραγωγής καθορίζεται κατά κανόνα από την κατανάλωση καυσίμων, η χαρακτηριστική μπορεί εναλλακτικά να προσδιορίζει την εξάρτηση μεταξύ της κατανάλωσης καυσίμων και παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Η

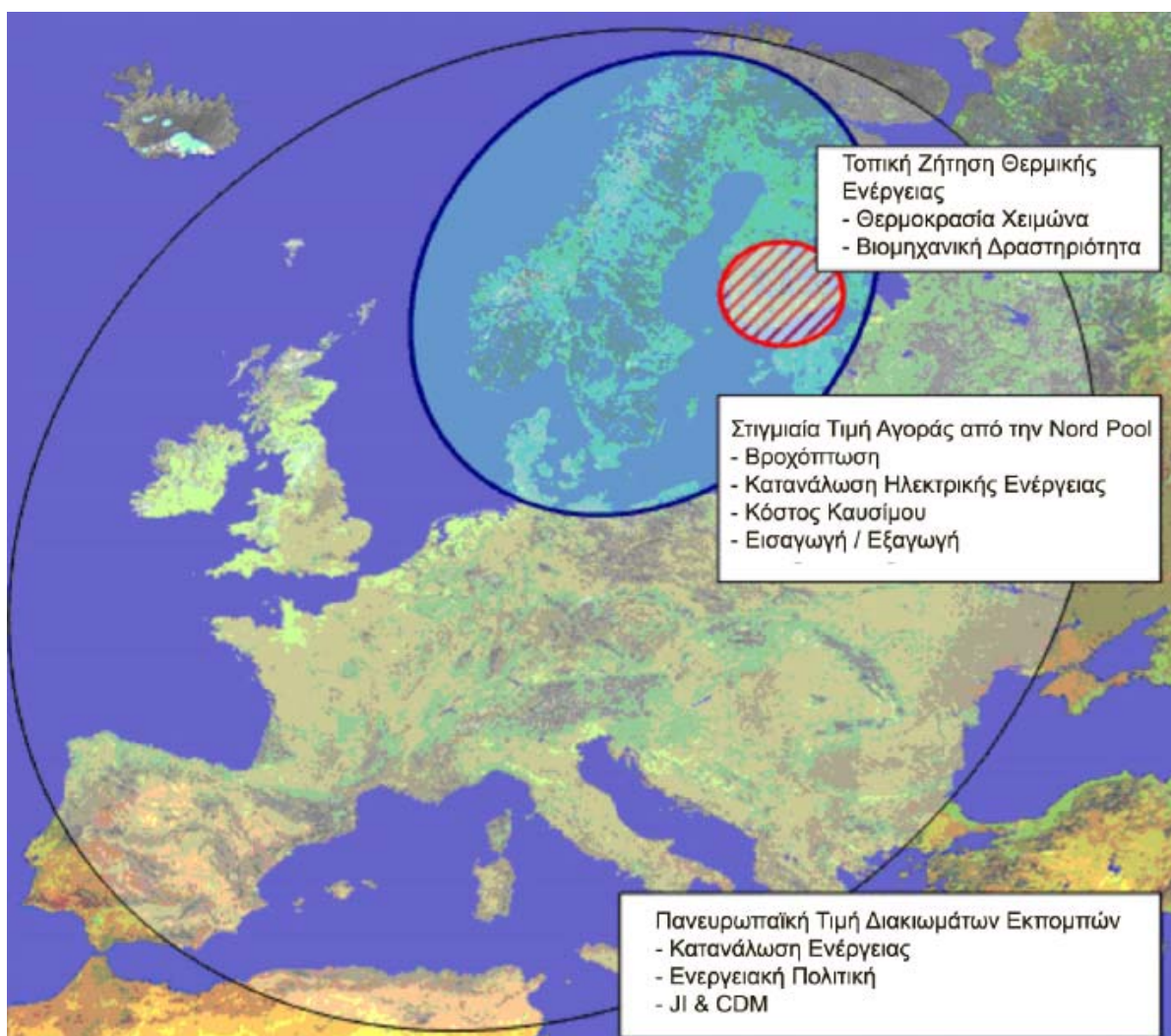
χαρακτηριστική μπορεί να είναι είτε κυρτή είτε μη κυρτή. Για μια κυρτή CHP εγκατάσταση, η χαρακτηριστική περιοχή λειτουργίας μπορεί να απεικονιστεί από ένα κυρτό συνδυασμό των ακραίων σημείων (C_j , P_j , q_j), που είναι τα ακραία σημεία των τριγωνικών εδρών στο Διάγραμμα -4.1-. Μια μη κυρτή χαρακτηριστική μπορεί να χωρίζεται σε πολλαπλές κυρτές υπο-περιοχές, οι οποίες έχουν κωδικοποιηθεί ως εναλλακτικές συνιστώσες του μοντέλου.

Η ίδια τεχνική μοντελοποίησης εφαρμόζεται και σε άλλες συνιστώσες της αγοράς ενέργειας, όπως οι χωριστές εγκαταστάσεις θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, οι συμβάσεις αγοράς και οι συνιστώσες διαχείρισης από την πλευρά της ζήτησης. Ο ενδιαφερόμενος αναγνώστης μπορεί να απευθυνθεί στο Lahdelma και Hakonen (2003) για την μοντελοποίηση μιας κυρτής CHP εγκατάστασης και στο Makkonen και Lahdelma (2006) για την μοντελοποίηση μη κυρτής εγκατάστασης. Στην απελευθερωμένη αγορά ενέργειας, ο ορθολογικός παραγωγός θα πρέπει να προσαρμόσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι ώστε το οριακό κόστος παραγωγής να είναι ίσο με την τιμή της αγοράς. Ως αποτέλεσμα, ο παραγωγός θα πρέπει να βελτιστοποιήσει την ωριαία παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού σύμφωνα με τις πιο πρόσφατες προβλέψεις για τη ζήτηση θερμότητας και την στιγμιαία τιμή στην αγορά.

Ο σχεδιασμός της CHP παραγωγής είναι ακόμη πιο πολύπλοκος λόγω της ανάγκης ελέγχου των εκπομπών CO_2 . Η ποσότητα και το είδος των καυσίμων που καταναλώνονται καθορίζει τις προκαλούμενες εκπομπές CO_2 . Οι σύγχρονες εγκαταστάσεις συμπαραγωγής που κάνουν χρήση πολλαπλών καυσίμων μπορούν να χρησιμοποιήσουν διαφορετικά καύσιμα και είναι σε θέση να προχωρήσουν σε εναλλαγή μεταξύ των καυσίμων πολύ γρήγορα. Στην λειτουργία μίξης καυσίμων, διάφορα καύσιμα μπορούν να χρησιμοποιούνται ταυτόχρονα εντός ορισμένων ορίων. Η κατανομή των καυσίμων διέπεται από ορισμένους κανόνες. Γενικά το φθηνότερο καύσιμο καταναλώνεται πρώτο εκτός εάν υπάρχουν άλλες ειδικές απαιτήσεις. Οι τιμές των καυσίμων και η μίξη τους επηρεάζει το σχήμα της χαρακτηριστικής της CHP εγκατάστασης. Ο παραγωγός μπορεί να προσαρμόσει το επίπεδο της παραγωγής, να επιλέξει μεταξύ διαφορετικών καυσίμων, και να εμπορευθεί τα δικαιώματα εκπομπών για την εξισορρόπηση των εκπομπών του με τα επιτρεπτά όρια. Έτσι, το πρόβλημα του σχεδιασμού της CHP παραγωγής πρέπει να επιλυθεί σε συντονισμό με τον σχεδιασμό της εμπορίας των εκπομπών.

4.2.2 Αβεβαιότητες στην συνδυασμένη CHP παραγωγή και στον σχεδιασμό της εμπορίας των εκπομπών ρύπων

Στο πρόβλημα του σχεδιασμού θεωρούμε τρεις κύριες πηγές αβεβαιότητας: τη ζήτηση θερμότητας, την τιμή της ενέργειας και την τιμή των δικαιωμάτων. Π.χ το Διάγραμμα - 4.2- απεικονίζει τις αβεβαιότητες και τις εξαρτήσεις τους στο πρόβλημα σχεδιασμού για την μονοπωλιακή αγορά ενέργειας των Σκανδιναβικών χωρών Nord Pool (the Nordic Power Exchange). Παρόμοιες εξαρτήσεις παρουσιάζουν γενικά όλες οι χώρες.



Διάγραμμα -4.2- Αβεβαιότητες και οι εξαρτήσεις τους στο πρόβλημα σχεδιασμού της εμπορίας των εκπομπών κατά την Nord Pool

Η ζήτηση θερμότητας εξαρτάται σχεδόν αποκλειστικά από τις τοπικές συνθήκες. Δημοτικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας παράγουν κυρίως θερμότητα για τον δήμο. Η αβεβαιότητα στην τοπική ζήτηση θερμότητας οφείλεται σχεδόν αποκλειστικά στις τοπικές καιρικές συνθήκες, όπως η θερμοκρασία, ο άνεμος, κ.λπ. Οι βιομηχανικές εγκαταστάσεις ισχύος παράγουν θερμότητα κατά την παραγωγική διαδικασία. Αυτή η ζήτηση εξαρτάται από τον τρόπο με τον οποίο εκτελείται η παραγωγική διαδικασία.

Η τιμή της ενέργειας κάθε χρονική στιγμή διαμορφώνεται στην αγορά από την ισορροπία μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης ισχύος. Στην σκανδιναβική αγορά ενέργειας (Nord Pool, 2004) ο σημαντικότερος παράγοντας που επηρεάζει την τιμή της ενέργειας κάθε χρονική στιγμή στην αγορά είναι ο βαθμός διείσδυσης των υδροηλεκτρικών συστημάτων. Άλλοι σημαντικοί παράγοντες είναι οι εποχιακές διακυμάνσεις, οι διακυμάνσεις των τιμών των καυσίμων, οι αποφάσεις των παραγωγών, η συμπεριφορά των καταναλωτών, καθώς και οι εισαγωγές και οι εξαγωγές. Η ζήτηση θερμότητας και η ισχύουσα τιμή της ενέργειας κατά κάποιο τρόπο συσχετίζονται. Ο ψυχρός καιρός θα αυξήσει τη ζήτηση τόσο για ηλεκτρική ενέργεια όσο και για θερμότητα, και κατά συνέπεια την ισχύουσα τιμή ενέργειας. Ωστόσο, η εξάρτηση αυτή δεν είναι πολύ ισχυρή, διότι η ζήτηση θερμότητας προσδιορίζεται σε τοπικό επίπεδο ενώ η τιμή της ενέργειας σε ολόκληρη την αγορά.

Η τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών θα καθοριστεί από την προσφορά και τη ζήτηση τους και τις τοπικές αποφάσεις των μεμονωμένων εμπόρων σε όλη την Ευρωπαϊκή Ένωση. Αν όλοι οι παράγοντες της αγοράς δικαιωμάτων έχουν τις ίδιες πληροφορίες, η τιμή των δικαιωμάτων θα πρέπει πάντα να αντικατοπτρίζει την κοινή τους αντίληψη σχετικά με τη μελλοντική εξέλιξη των τιμών. Αυτό σημαίνει ότι η ισχύουσα τιμή για τα δικαιώματα είναι η καλύτερη δυνατή εκτίμηση και για τις μελλοντικές τιμές. Παράγοντες που επηρεάζουν την πανευρωπαϊκή αγορά δικαιωμάτων είναι η κατανάλωση ενέργειας, η αξιοποίηση του Προγράμματος από Κοινού (ΠΚ) και του Μηχανισμού Καθαρής Ανάπτυξης (ΜΚΑ) και οι πολιτικές αποφάσεις σχετικά με την προώθηση ή μη ορισμένων μορφών ενέργειας. Τα κόστη των δικαιωμάτων θα αυξήσουν το οριακό κόστος της παραγωγής ενέργειας που βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, πράγμα που καθιστά την τιμή των δικαιωμάτων και την τιμή της ενέργειας κατά κάποιο τρόπο συσχετιζόμενες.

4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ CHP ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ

4.3.1 Μοντέλο σχεδιασμού της παραγωγής ΣΗΘ

Υποθέτουμε ότι οι αποφασίζοντες (DMs) αποφεύγουν το ρίσκο, και το σύνολο των προτιμήσεων τους όσον αφορά στο κέρδος εκπροσωπείται από μία αυξανόμενη κοίλη συνάρτηση χρησιμότητας $U(\cdot)$. Η περίοδος σχεδιασμού της εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ χωρίζεται σε υποπεριόδους $t = 1, \dots, \tau$. Οι περίοδοι εμπορίας μπορεί να είναι, για παράδειγμα, εβδομάδες ή μήνες. Κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου εμπορίας, το επίπεδο των εκπομπών μπορεί να επηρεαστεί από την αναπροσαρμογή του μείγματος καυσίμων και του επιπέδου της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και να εξισορροπηθεί από την εμπορία των εκπομπών. Ο δείκτης $t+1$ αναφέρεται στο χρόνο μετά την περίοδο σχεδιασμού, όταν οι παραγωγοί μπορούν ακόμη να πουλήσουν τα πλεονάζοντα δικαιώματά τους ή πρέπει να καλύψουν οποιοδήποτε έλλειμμα. Η CHP παραγωγή σε διαφορετικές εγκαταστάσεις πρέπει να σχεδιαστεί με μεγαλύτερη σχολαστικότητα από την εμπορία των εκπομπών η οποία έχει κατά κανόνα παρόμοια χαρακτηριστικά για όλες τις εγκαταστάσεις. Για το λόγο αυτό, κάθε περίοδος εμπορίας διαιρείται σε ώρες $h \in H_t$. Στην αρχή της περιόδου σχεδιασμού, η παραγωγή πολλαπλών περιόδων και ο σχεδιασμός της εμπορίας των εκπομπών για την μεγιστοποίηση της αναμενόμενης χρησιμότητας του κέρδους μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\max E \left[U \left(\sum_{t=1}^{\tau} \sum_{h \in H_t} z^{pr} (x_h, c_h^p) + \sum_{t=1}^{\tau} z^{tr} (f_t, c_t^f) + z^{tr} (f_{\tau+1}, c_{\tau+1}^f) \right) \right] \quad (4.1)$$

$$\text{όπου } \langle x, E \rangle \in \mathbf{X}(\mathbf{Q}) \quad (4.2)$$

$$\langle f, E \rangle \in \mathbf{F} \quad (4.3)$$

Στις παραπάνω σχέσεις, η συνάρτηση $z^{pr}(\cdot)$ είναι το καθαρό κέρδος για ωριαία CHP παραγωγή και $z^{tr}(\cdot)$ είναι το καθαρό κέρδος από την εμπορία των εκπομπών κατά τη διάρκεια μιας περιόδου εμπορίας. Οι μεταβλητές στο μοντέλο είναι οι \mathbf{x} , \mathbf{F} και E . Το διάνυσμα \mathbf{x} καθορίζει την CHP παραγωγή κάθε ώρα, το διάνυσμα \mathbf{F} καθορίζει την εμπορία των δικαιωμάτων σε κάθε περίοδο εμπορίας και η μονοδιάστατη μεταβλητή E είναι οι συσσωρευμένες εκπομπές σε όλη τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού. Οι c_h^p, c_t^f και \mathbf{Q} είναι οι στοχαστικές παράμετροι. Η c_h^p είναι η ωριαία τιμή ενέργειας, η c_t^f είναι η τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών κατά την περίοδο t και το διάνυσμα \mathbf{Q} περιέχει την ζήτηση θερμότητας για κάθε ώρα στην περίοδο σχεδιασμού. Το σύνολο $\mathbf{X}(\mathbf{Q})$ αντιπροσωπεύει τους περιορισμούς της CHP παραγωγικής διαδικασίας που εξαρτώνται από τη ζήτηση θερμότητας. Το σύνολο \mathbf{F} αντιπροσωπεύει τους περιορισμούς της διαδικασίας της εμπορίας των εκπομπών.

4.3.2 Συμβολισμοί μοντέλου

Για να καθορίσουμε τις λεπτομέρειες του μοντέλου, εισάγουμε τους ακόλουθους συμβολισμούς:

Σύνολα δεικτών

- B Σύνολο των μονάδων CHP και άλλων συνιστωσών προσφοράς ή ζήτησης που μοντελοποιούνται σαν CHP μονάδες
- H, H_t Σύνολο ωρών της περιόδου σχεδιασμού και κάθε υποπεριόδου εμπορίας $t = 1, \dots, T$ αντίστοιχα
- J, J_b Σύνολο των ακραίων σημείων της περιοχής λειτουργίας της χαρακτηριστικής σε όλες τις μονάδες και στην μονάδα $b \in B$
- K Σύνολο καυσίμων

Παράμετροι

- δ Αναλογία του κόστους εμπορίας δικαιωμάτων προς την τιμή των δικαιωμάτων
- η_k Ειδικές εκπομπές CO₂ των καυσίμων $k \in K$
- Q, Q_h Διάνυσμα της ζήτησης θερμότητας κατά της διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού και της ωριαίας ζήτησης $h \in H$
- $c^{F\#}$ Ποινή για υπερβολικές εκπομπές κατά το τέλος της περιόδου σχεδιασμού (περίοδος $t+1$)
- c^{F+} Τιμή αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού
 $c^{F+} = c_{\tau+1}^{f+}$
- c^{F-} Τιμή πώλησης δικαιωμάτων εκπομπών στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού
 $c^{F-} = c_{\tau+1}^{f-}$
- c_t^f Τιμή των δικαιωμάτων εκπομπών κατά την περίοδο $t = 1, \dots, T+1$

- c_t^{f+} Τιμή αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών $c_t^{f+} = (1 + \delta)c_t^f$ για τις περιόδους $t = 1, \dots, T$, συμπεριλαμβανομένης της ποινής για περίοδο μετά την τελευταία $c_{T+1}^{f+} = (1 + \delta)c_{T+1}^f + c^{F\#}$
- c_t^{f-} Τιμή πώλησης δικαιωμάτων κατά την περίοδο $t = 1, \dots, T+1$ $c_t^{f-} = (1 - \delta)c_t^f$
- c_h^p Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας κατά την ώρα $h \in H$
- c_h^q Τιμή θερμικής ενέργειας κατά την ώρα $h \in H$
- $c_{k,h}^r$ Τιμή καυσίμου $k \in K$ κατά την ώρα $h \in H$
- $p_{j,h}$ Χαρακτηριστική συνιστώσας ηλεκτρικής ενέργειας $j \in J$ κατά την ώρα $h \in H$
- $q_{j,h}$ Χαρακτηριστική συνιστώσας θερμικής ενέργειας $j \in J$ κατά την ώρα $h \in H$
- $r_{k,j,h}$ Κατανάλωση καυσίμου $k \in K$ σε ακραίο σημείο $j \in J$ κατά την ώρα $h \in H$

Μεταβλητές

- f, f_t Διάνυσμα του εμπορίου δικαιωμάτων κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού και του εμπορίου την περίοδο $t = 1, \dots, T+1$
- f_t^+, f_t^- Αγορά και πώληση δικαιωμάτων εκπομπών για περίοδο εμπορίας $t = 1, \dots, T+1$
- x, x_h Διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης που καθορίζουν την παραγωγή κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού κατά την ώρα $h \in H$, $x_h = [x_{1,h}, \dots, x_{|J|,h}]$
- $x_{j,h}$ Συνεισφορά των ακραίων σημείων $j \in J$ στην CHP παραγωγή κατά την ώρα $h \in H$
- x_h^p Παραγωγή ισχύος κατά την ώρα $h \in H$
- E Συσσωρευμένες εκπομπές κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού

E^+, E^-	Υπερβαίνουσες και υπολειπόμενες συσσωρευμένες εκπομπές του τελικού επιπέδου δικαιωμάτων F_t
F_0, F_t	Αρχική κατανομή και επίπεδο συσσωρευμένων δικαιωμάτων εκπομπών κατά το τέλος της περιόδου εμπορίας $t = 1, \dots, t$

4.3.3 Το μοντέλο παραγωγής

Το μοντέλο παραγωγής $\mathbf{X}(\mathbf{Q})$ καθορίζει την ωριαία παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας ως το άθροισμα σε διαφορετικές μονάδες CHP και πιθανή εμπορία εκπομπών χρησιμοποιώντας ποικίλες συμβάσεις αγοράς και πώλησης αυτών. Κάθε μοντέλο εγκατάστασης αποτελείται από μια αλληλουχία ωριαίων υπομοντέλων πιθανά συνδεδεμένων μεταξύ τους με δυναμικούς περιορισμούς όπως περιορισμούς εκκίνησης και διακοπής, 'κατά την διάρκεια' περιορισμούς και περιορισμούς αποθήκευσης. Το μοντέλο παραγωγής $\mathbf{X}(\mathbf{Q})$ υποδιαιρείται σε ωριαία υπομοντέλα $\mathbf{X}_t(Q_t)$, τα οποία μπορούν να επιλυθούν ξεχωριστά χρησιμοποιώντας κατάλληλες τεχνικές αποσύνθεσης και συντονισμού. Οι εφαρμοζόμενες τεχνικές αποσύνθεσης εξαρτώνται από το είδος των παρόντων δυναμικών περιορισμών. Σε αυτή την εφαρμογή υποθέτουμε ότι δεν υφίστανται δυναμικοί περιορισμοί και ότι τα ωριαία μοντέλα των μονάδων είναι κυρτά. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε να επιλύσουμε το μοντέλο παραγωγής, επιλύοντας ανεξάρτητα τα ωριαία μοντέλα χρησιμοποιώντας την κυρτή μέθοδο επίλυσης. Οι καταλληλότερες μέθοδοι επίλυσης για προβλήματα σχεδιασμού ωριαίας, κυρτής CHP παραγωγής είναι η μέθοδος Power Simplex (PS) (Lahdelma και Hakonen, 2003) και οι envelope-based αλγόριθμοι ECON & ECOFF (Rong και Lahdelma, στον τύπο). Η PS έχει υλοποιηθεί ως μέρος του συστήματος βελτιστοποίησης ενέργειας EHTON NEXUS (Lahdelma και Makkonen, 1996), η οποία βρίσκεται σε εμπορική χρήση σε διάφορες Φινλανδικές εταιρίες ενέργειας. Δυναμικοί περιορισμοί και μη κυρτά μοντέλα CHP θα απαιτούσαν πιο εξελιγμένες τεχνικές επίλυσης για το μοντέλο παραγωγής, παρ' όλα αυτά δεν θα επηρέαζαν το μοντέλο εμπορίας εκπομπών ή την συνολική προσέγγιση της λύσης. Μη κυρτά προβλήματα σχεδιασμού παραγωγής μπορούν να επιλυθούν π.χ με την χρήση της τεχνικής Branch & Bound (BB). Οι Makkonen και Lahdelma (2006) επέλυσαν μη κυρτά προβλήματα σχεδιασμού παραγωγής με PS προσέγγιση της τεχνικής BB (PBB) και οι Rong και Lahdelma (2005c) ανέπτυξαν envelope-based BB αλγόριθμο (EBB) για μη κυρτά μοντέλα. Οι Rong και Lahdelma (2005b) ανέλυσαν το εμπλεκόμενο ρίσκο στον σχεδιασμό επέκτασης CHP παραγωγής κάτω από το πλαίσιο της εμπορίας των εκπομπών, χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο παραγωγής παρόμοιο με αυτό των Rong και Lahdelma. Το μοντέλο των Rong και Lahdelma αντιμετωπίζει την CHP παραγωγή κάτω από την απελευθερωμένη αγορά ενέργειας και η τεχνική μοντελοποίησης είναι παρόμοια με αυτή των Lahdelma και Hakonen (2003). Η ωριαία

παραγωγή CHP μοντελοποιείται ως ένας κυρτός συνδυασμός ακραίων χαρακτηριστικών σημείων για κάθε ώρα $h \in H$:

$$\sum_{j \in J_b} x_{j,h} = 1, \quad b \in B \quad (4.4)$$

$$\sum_{j \in J} p_{j,h} x_{j,h} - x_h^p = 0, \quad (4.5)$$

$$\sum_{j \in J} q_{j,h} x_{j,h} = Q_h, \quad (4.6)$$

$$x_{j,h} \geq 0, \quad j \in J \quad (4.7)$$

Στην παρούσα διαμόρφωση, ο κυρτός συνδυασμός κάθε μονάδας κωδικοποιείται από ένα σύνολο μεταβλητών $x_{j,h}$, υποδεικνύοντας το επίπεδο λειτουργίας κάθε μονάδας όσον αφορά στα ακραία σημεία της περιοχής λειτουργίας, των οποίων το άθροισμα ισούται με 1 (4.4) και οι οποίες είναι μη αρνητικές (4.7). Το ισοζύγιο ισχύος (4.5) προσδιορίζει το καθαρό ποσό της ισχύος x_h^p το οποίο μπορεί να γίνει αντικείμενο εμπορίας στην αγορά σε τιμή c_h^p . Το ισοζύγιο θερμότητας (4.6) αναφέρει ότι η ζήτηση Q_h πρέπει να ικανοποιείται. Οι εκπομπές κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού είναι το άθροισμα των ωριαίων εκπομπών από τα καταναλισκόμενα καύσιμα:

$$E = \sum_{h \in H} \sum_{j \in J} \left(\sum_{k \in K} \eta_k r_{k,j,h} \right) x_{j,h} \quad (4.8)$$

Το ωριαίο κέρδος από την CHP παραγωγή είναι η διαφορά των εσόδων της πώλησης της ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας και του κόστους παραγωγής. Τα κόστη παραγωγής υπολογίζονται ως ο κυρτός συνδυασμός του κόστους των καυσίμων στα ακραία σημεία.

$$z^{pr}(x_h, c_h^p) = c_h^p x_h^p + c_h^q Q_h - \sum_{j \in J} \left(\sum_{k \in K} c_{k,h}^r r_{k,j,h} \right) x_{j,h} \quad (4.9)$$

4.3.4 Το μοντέλο εμπορίας

Το μοντέλο εμπορίας F καθορίζει την εμπορία των δικαιωμάτων κάθε περίοδο εμπορίας ως εξής:

$$F_t = F_{t-1} + f_t \quad t = 1, \dots, T \quad (4.10)$$

$$E = F_T + f_{T+1} \quad (4.11)$$

$$f_t^+ = \max \{ 0, f_t \} \quad t = 1, \dots, T+1 \quad (4.12)$$

$$f_t^- = \max \{ 0, -f_t \} \quad t = 1, \dots, T+1 \quad (4.13)$$

$$E^+ = \max \{ 0, E - F_T \} \quad (4.14)$$

$$E^- = \max \{ 0, F_T - E \} \quad (4.15)$$

Ο περιορισμός (4.10) καθορίζει τα συσσωρευμένα δικαιώματα στο τέλος κάθε περιόδου εμπορίας. Ο περιορισμός (4.11) απαιτεί η εμπορία των εκπομπών μετά την τελευταία περίοδο να ισορροπεί τις εκπομπές. Οι περιορισμοί (4.12) και (4.13) καθορίζουν την ποσότητα των δικαιωμάτων που αγοράζονται και πωλούνται κατά τη διάρκεια κάθε περιόδου εμπορίας. Ο συνδυασμός των περιορισμών (4.12) και (4.13) προφυλάσσει από την ταυτόχρονη αγορά και πώληση δικαιωμάτων. Οι περιορισμοί (4.14) και (4.15) καθορίζουν την ποσότητα των εκπομπών που υπερβαίνουν ή υπολείπονται τα επιτρεπτά όρια δικαιωμάτων στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού. Από τον συνδυασμό των περιορισμών (4.14) και (4.15) συνεπάγεται ότι $E^+ E^- = 0$ και ότι τα αποτελέσματα της εμπορίας των εκπομπών στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού οδηγούν σε ένα από τα εξής 3 δυνατά αποτελέσματα: ακριβής ισορροπία, υπέρβαση ή υπόβαση των πραγματικών εκπομπών.

Το εμπορικό κέρδος κατά τη διάρκεια μιας περιόδου είναι είτε τα έσοδα από την πώληση είτε μηδενικά κόστη αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών. Η τιμή αγοράς μετά το τέλος της περιόδου σχεδιασμού (CF^+) περιλαμβάνει την ποινή για υπερβολικές εκπομπές.

$$z^tr(f_t, c_t^f) = -c_t^{f+} f_t^+ + c_t^{f-} f_t^- \quad t = 1, \dots, T \quad (4.16)$$

$$z^tr(f_{\tau+1}, c_{\tau+1}^f) = -c_{\tau+1}^{f+} f_{\tau+1}^+ + c_{\tau+1}^{f-} f_{\tau+1}^- = -c^{F+} E^+ + c^{F-} E^- \quad (4.17)$$

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5
ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΛΥΣΗΣ

Το πρόβλημα παραγωγής και εμπορίας επιλύεται με ανάλυση σεναρίων. Η ανάλυση σεναρίων έχει αποδειχθεί ως μια αποτελεσματική προσέγγιση για την αντιμετώπιση προβλημάτων σχεδιασμού υπό αβεβαιότητα (Maranas et al., 1997 - Mulvey και Shetty, 2004). Θέλουμε να λύσουμε το μοντέλο σχεδιασμού παραγωγής και εμπορίας σε κάθε περίοδο εμπορίας $t^* \in H$ ($t = 1, \dots, T$) κατά την διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού. Αυτό σημαίνει ότι για τις περιόδους $1, \dots, t^*-1$, οι μεταβλητές απόφασης και οι στοχαστικές παράμετροι του μοντέλου (3.1) – (3.17) παραμένουν στις πραγματικές τιμές τους. Έτσι, η βελτιστοποίηση θεωρεί μεταβολές στις μεταβλητές και στοχαστικές παραμέτρους μόνον για τις περιόδους t^*, \dots, T .

5. 1 ΣΕΝΑΡΙΑΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

Οι αβεβαιότητες του περιβάλλοντος λειτουργίας εκπροσωπήθηκαν στο υπόδειγμα (4.1) - (4.17) από στοχαστικές παραμέτρους με κάποια κοινή κατανομή πιθανοτήτων. Κατά την εξέταση του προβλήματος σχεδιασμού της παραγωγής και εμπορίας, στην αρχή της περιόδου εμπορίας t^* , οι μελλοντικές αβεβαιότητες προσεγγίζονται με ένα σύνολο σεναρίων. Κάθε σενάριο ορίζει ένα σύνολο τιμών για τις στοχαστικές παραμέτρους για κάθε μελλοντική περίοδο. Το σύνολο των σεναρίων καταγράφει τόσο την αβεβαιότητα κάθε στοχαστικής παραμέτρου όσο και την πληροφορία εξάρτησης μεταξύ τους. Για να διευκολυνθεί η ρεαλιστική απεικόνιση, τα σενάρια επεκτείνονται και για τις παρελθούσες περιόδους $1, \dots, t^*-1$, έτσι ώστε να συμπέσουν με τις παρατηρημένες τιμές. Στην παρούσα εφαρμογή οι στοχαστικές παράμετροι είναι χρονοσειρές (διανύσματα) για τη ζήτηση θερμότητας (\mathbf{Q}), τιμή ισχύος (\mathbf{C}^P), και την τιμή των δικαιωμάτων (\mathbf{C}^f). Η ζήτηση θερμότητας και η τιμή της ισχύος περιλαμβάνουν ωριαίες τιμές, ενώ οι τιμές των δικαιωμάτων περιλαμβάνουν ημερήσιες, εβδομαδιαίες ή μηνιαίες τιμές.

Για την απεικόνιση του σεναριακού μοντέλου που σχηματίστηκε κατά την περίοδο t^* , ο προηγούμενος συμβολισμός επεκτείνεται εισάγοντας τόσο έναν δείκτη σεναρίου S όσο και έναν δείκτη περιόδου t^* , ως τους τελευταίους δύο δείκτες των στοχαστικών παραμέτρων και μεταβλητών του μοντέλου. Για παράδειγμα $Q_h \rightarrow Q_{h,s,t^*}$ συμβολίζει την ζήτηση θερμότητας κατά την ώρα h στο σενάριο s που δημιουργήθηκε στο ξεκίνημα της περιόδου εμπορίας t^* . Έστω ότι το s συμβολίζει τον αριθμό των σεναρίων που δημιουργήθηκαν σε κάθε περίοδο. Στην αναπαράσταση του σεναρίου η αντικειμενική συνάρτηση για την μεγιστοποίηση της αντικειμενικής χρησιμότητας γίνεται:

$$\begin{aligned}
& \max \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S U \left[\sum_{t=1}^{\tau} \sum_{h \in H_t} (c_{h,s,t^*}^p x_{h,s,t^*}^p + c_h^q Q_{h,s,t^*} - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{k,h}^r r_{k,j,h} x_{j,h,s,t^*}) E_{s,t^*}^- + \right. \\
& \left. + \sum_{t=1}^{\tau} (-c_{t,s,t^*}^{f+} f_{t,s,t^*}^+ + c_{t,s,t^*}^{f-} f_{t,s,t^*}^-) - c_{s,t^*}^{F+} E_{s,t^*}^+ + c_{s,t^*}^{F-} \right] \quad (5.1)
\end{aligned}$$

Οι περιορισμοί παραγωγής και εμπορίας για το σενάριο S που δημιουργήθηκε κατά την περίοδο t^* γίνονται:

$$\langle x_{s,t^*}, E_{s,t^*} \rangle \in X(Q_{s,t^*}) \quad s = 1, \dots, S \quad (5.2)$$

$$\langle f_{s,t^*}, E_{s,t^*} \rangle \in F \quad s = 1, \dots, S \quad (5.3)$$

Όπως και να έχει, δεν έχει ιδιαίτερο νόημα η επίλυση των σχέσεων (5.1) – (5.3) ως ένα αυτόνομο πρόβλημα καθώς θα επέτρεπε στην εμπορική διαδικασία να προβλέψει το μέλλον σε κάθε σενάριο επιφέροντας απεριόριστο κέρδος από κατ' εκτίμηση εμπορικές πράξεις. Αυτό είναι φυσικά ανέφικτο στην πραγματικότητα. Αντ' αυτού, πρέπει να σχεδιαστεί ένα σχήμα βελτιστοποίησης που να έχει πραγματικές διαστάσεις.

5.2 ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΠΟΣΥΝΘΕΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

5.2.1 Αποσύνθεση της CHP παραγωγικής και εμπορικής διαδικασίας

Από τις σχέσεις (5.1) – (5.3) φαίνεται ότι η διαδικασία παραγωγής και εμπορίας αλληλεπιδρούν μόνο μέσω της μεταβλητής εκπομπών E . Ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο εκτελείται η διαδικασία εμπορίας, η παραγωγική διαδικασία πρέπει να ικανοποιεί την ζήτηση θερμότητας και να στοχεύει στην μεγιστοποίηση της διαφοράς του κέρδους παραγωγής και του κόστους των εκπομπών. Πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν ότι η τελευταία γνωστή τιμή των δικαιωμάτων είναι η καλύτερη εκτίμηση για τις μελλοντικές τιμές. Γι' αυτό καθώς βελτιστοποιούμε την ωριαία παραγωγή, η τελευταία γνωστή τιμή των δικαιωμάτων είναι το αναμενόμενο οριακό κόστος των προκαλούμενων εκπομπών. Έτσι, η ωριαία CHP παραγωγή θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί εισάγοντας την τελευταία γνωστή τιμή των δικαιωμάτων ως πρόστιμο για τις προκαλούμενες εκπομπές. Αυτό το πρόστιμο προστίθεται στις τιμές των καυσίμων βασιζόμενοι στις ειδικές εκπομπές CO_2 . Η ποινικοποιημένη τιμή καυσίμου για καύσιμο k κατά την ώρα h για το σενάριο s στην αρχή της περιόδου εμπορίας t^* θα είναι στην περίπτωση αυτή:

$$C_{k,h,s,t^*}^r = C_{k,h}^r + C_{t,s,t^*}^f \eta_k, \quad h \in H_t \quad (5.4)$$

Κατόπιν, η CHP παραγωγή για το σενάριο s που δημιουργήθηκε κατά την περίοδο t^* μπορεί να βελτιστοποιηθεί ανεξάρτητα από την εμπορική διαδικασία:

$$\max \sum_{t=t^*}^{\tau} \sum_{h \in H_t} \left(c_{h,s,t^*}^p x_{h,s,t^*}^p + c_h^q Q_{h,s,t^*} - \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} c_{k,h,s,t^*}^k r_{k,j,h} x_{j,h,s,t^*} \right) \quad (5.5)$$

$$\langle x_{s,t^*}, E_{s,t^*} \rangle \in X(Q_{s,t^*}) \quad (5.6)$$

Η λύση αυτού του προβλήματος σε συνδυασμό με τα πραγματικά δεδομένα για τις περιόδους $1, \dots, t^*-1$ καθορίζει άμεσα τις συσσωρευμένες εκπομπές E_{s,t^*} και το κέρδος της παραγωγής κατά την διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού για το σενάριο s που δημιουργήθηκε κατά την περίοδο t^* .

5.2.2. Συντονισμός μεταξύ των διεργασιών παραγωγής και εμπορίας εκπομπών

Ανεξάρτητα από τον τρόπο με τον οποίο εκτελείται η παραγωγική διαδικασία, η διαδικασία εμπορίας πρέπει να εξισορροπεί τα δικαιώματα με τις προκαλούμενες εκπομπές μετά το τέλος της περιόδου σχεδιασμού και να προσπαθεί να το κάνει αυτό με τον πιο οικονομικό τρόπο. Κατά κανόνα είναι δυνατόν τα δικαιώματα να αποτελούν αντικείμενο εμπορίας αυθαίρετα κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού. Ωστόσο,

επειδή ο DM αποφεύγει το ρίσκο η εμπορική διαδικασία μπορεί να περιορισθεί σημαντικά. Ένας DM που αποφεύγει το ρίσκο προτιμά ένα βέβαιο αποτέλεσμα από ένα αβέβαιο με την ίδια αναμενόμενη τιμή. Ως εκ τούτου, ο DM δεν μπορεί να περιμένει να κερδίσει από την αγορά ή πώληση της περίσσειας των δικαιωμάτων μέσα από έναν κατ' εκτίμηση τρόπο, επειδή η σημερινή (γνωστή) τιμή των δικαιωμάτων αποτελεί την καλύτερη δυνατή εκτίμηση για τη μελλοντική (αβέβαιη) τιμή. Εάν οι μελλοντικές εκπομπές είναι γνωστές με ακρίβεια, αλλά υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά με τη μελλοντική τιμή των δικαιωμάτων, ο DM θα πρέπει να εμπορεύεται τα δικαιώματα νωρίς για να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις εκπομπών και να μειωθεί ο κίνδυνος να πρέπει να πληρώσει υψηλότερη τιμή. Αντίθετα, αν η μελλοντική τιμή των δικαιωμάτων είναι γνωστή με ακρίβεια, αλλά υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα σχετικά με τις μελλοντικές εκπομπές, ο DM θα πρέπει να καθυστερήσει την εμπορία, ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος να έχει λανθασμένους στόχους και να πρέπει να επανεκτιμήσει την ισορροπία των δικαιωμάτων ξανά στις επόμενες περιόδους εμπορίας. Η τελευταία περίπτωση είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν το κόστος των συναλλαγών λαμβάνεται υπ' όψιν στην εμπορία. Στην πράξη, χρειάζεται ένα πλαίσιο εμπορίας το οποίο θα προσαρμόζεται ταυτόχρονα σε διαφορετικούς βαθμούς αβεβαιότητας τόσο για την μελλοντική τιμή των δικαιωμάτων όσο και για την ποσότητα των προκαλούμενων εκπομπών. Ένα τέτοιο πλαίσιο θα συμβιβάζει την νωρίτερη και την καθυστερημένη εμπορία για να εξισορροπήσει τα δικαιώματα με τις προκαλούμενες εκπομπές.

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου είναι η εξισορρόπηση των δικαιωμάτων με τις εκπομπές που εκτιμώνται με τη χρήση του σεναριακού μοντέλου παραγωγής. Επειδή το κόστος των εκπομπών και όχι τόσο η ποσότητα είναι αυτό που έχει σημασία, οι εκπομπές υπολογίζονται χρησιμοποιώντας ως βάρη τις τιμές των δικαιωμάτων C_{t,s,t^*}^f για διαφορετικές περιόδους και σεσενάρια. Η τεχνική αυτή θεωρεί, ταυτόχρονα, την αβεβαιότητα τόσο στην τιμή όσο και στην ποσότητα. Για να αποφευχθεί η πώληση και η αγορά μεγάλων ποσοτήτων δικαιωμάτων στις επόμενες περιόδους, λόγω των διακυμάνσεων στις εκτιμήσεις των εκπομπών, τα δικαιώματα αποτελούν αντικείμενο εμπορίας έως ότου να καταλήξουν σε ένα διάστημα εμπιστοσύνης $[E_{t^*}^{low}, E_{t^*}^{up}]$, αντί να φτάσουν την (σταθμισμένη) αναμενόμενη τιμή $\mu(E_{t^*})$. Το διάστημα εμπιστοσύνης μπορεί να καθοριστεί είτε απευθείας από το διακεκριμένο σύνολο των σεναρίων, ή να βασίζεται σε μία κατάλληλη κατανομή πιθανότητας (όπως η κανονική κατανομή) των οποίων οι παράμετροι υπολογίζονται με βάση τα σεσενάρια. Στον αλγόριθμο 1 που ακολουθεί, εφαρμόζεται η τελευταία τεχνική. Εδώ το $\sigma(E_{t^*})$ δηλώνει την σταθμισμένη τυπική απόκλιση των συσσωρευμένων εκπομπών στα σεσενάρια κατά τη διάρκεια της περιόδου σχεδιασμού και ο παράγοντας εμπιστοσύνης η είναι ο αριθμός των τυπικών αποκλίσεων που αντιστοιχούν σε κάποιο επίπεδο εμπιστοσύνης $(1 - \alpha)$.

Αλγόριθμος 1

Ρουτίνα για τον καθορισμό της εμπορίας των εκπομπών κατά την περίοδο t^* .

Βήμα 1. Υπολογίζονται τα όρια εμπιστοσύνης για το κόστος των εκπομπών.

$$E_{t^*}^{low} = \mu(E_{t^*}) - n\sigma(E_{t^*})$$

$$E_{t^*}^{up} = \mu(E_{t^*}) + n\sigma(E_{t^*})$$

Βήμα 2. Προσδιορίζεται ο στόχος για το επίπεδο των συνολικών δικαιωμάτων στο τέλος της περιόδου t^* .

$$F_{t^*} = \max\{E_{t^*}^{low}, \min\{F_{t^*-1}, E_{t^*}^{up}\}\}$$

Βήμα 3. Προσδιορίζεται η εμπορία των δικαιωμάτων f_{t^*} κατά την περίοδο t^* .

$$f_{t^*} = F_{t^*} - F_{t^*-1}$$

Όταν υπάρχει κόστος συναλλαγών είναι σημαντικό να λαμβάνεται υπ' όψιν το διάστημα εμπιστοσύνης για τις εκτιμήσεις των εκπομπών. Ο παράγοντας εμπιστοσύνης καθορίζει την αλληλεπίδραση μεταξύ της συχνότητας των συναλλαγών και της ταχείας αντίδρασης στην μεταβαλλόμενη τιμή των δικαιωμάτων. Ένας μικρός παράγοντας εμπιστοσύνης θα προκαλέσει επιθετικές αγορές και τις πωλήσεις να ακολουθούν τυχαίες διακυμάνσεις στις εκτιμήσεις των εκπομπών. Αυτό μπορεί να επιφέρει υπερβολικό κόστος συναλλαγών. Ωστόσο, ένας παράγοντας εμπιστοσύνης που θα είναι πολύ μεγάλος θα απενεργοποιήσει την εμπορική δραστηριότητα. Γενικά, ο παράγοντας εμπιστοσύνης θα πρέπει να σχετίζεται με το κόστος των συναλλαγών: όσο υψηλότερο είναι το κόστος των συναλλαγών, τόσο μεγαλύτερος θα πρέπει να είναι και ο παράγοντας εμπιστοσύνης.

5.2.3. Διαχείριση της ποινής υπερβολικών εκπομπών

Η εμπορία στην τελευταία περίοδο t είναι διαφορετική από τις προηγούμενες περιόδους, γιατί αυτή είναι η τελευταία ευκαιρία να ληφθεί η απόφαση της εξισσορόπησης των δικαιωμάτων με τις συνολικές εκπομπές. Η εμπορία μετά την τελευταία περίοδο είναι αναγκαστική και εξαρτάται από το στοχαστικό αποτέλεσμα της τελευταίας περιόδου. Ως εκ τούτου, δεν θα είναι επαρκές να αποτελεί στόχο για τις εκπομπές το διάστημα εμπιστοσύνης. Αντίθετα, ο παραγωγός θα πρέπει να προσπαθήσει να ικανοποιήσει τους στόχους των εκπομπών, με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια στα διάφορα στοχαστικά αποτελέσματα, λαμβάνοντας υπ' όψιν την ποινή για υπερβολικές εκπομπές και το κοίλο σχήμα της συνάρτησης χρησιμότητας. Στην σεναριακή αναπαράσταση, αυτό σημαίνει ότι ο παραγωγός θα πρέπει να καθορίζει το επίπεδο των συναλλαγών f_t που μεγιστοποιεί την αναμενόμενη χρησιμότητα του

κέρδους. Παραλείποντας την περίοδο $t^*=\tau$ από τους συμβολισμούς, η αντικειμενική συνάρτηση (5.1) μπορεί να εκφραστεί κατά την τελευταία περίοδο ως:

$$\max \bar{U}(f_\tau) = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S U(z_s(f_\tau)) \quad (5.7)$$

όπου

$$z_s(f_\tau) = z_s^0 + c_{\tau,s}^{f^-} f_\tau^- - c_{\tau,s}^{f^+} f_\tau^+ + c_s^{F^-} E_s^- - c_s^{F^+} E_s^+ \quad (5.8)$$

είναι το συνολικό κέρδος στο σενάριο s . Εδώ το z_s^0 είναι το μέρος του κέρδους που δεν εξαρτάται από το f_τ , δηλαδή, το πραγματικό κέρδος των προηγούμενων περιόδων συν το κέρδος της παραγωγής για την τελευταία περίοδο στο σενάριο s . Με βάση τις σχέσεις (4.10) - (4.15) η συνάρτηση κέρδους μπορεί να εκφραστεί ως:

$$z_s(f_\tau) = z_s^0 + c_{\tau,s}^{f^-} \max\{0, -f_\tau^-\} - c_{\tau,s}^{f^+} \max\{0, f_\tau^+\} + c_s^{F^-} \max\{0, F_{\tau-1} + f_\tau^- - E_s^-\} - c_s^{F^+} \max\{0, E_s^+ - F_{\tau-1} - f_\tau^+\} \quad (5.9)$$

Όπως φαίνεται, το κέρδος σε κάθε σενάριο s είναι τοπικά μια γραμμική συνάρτηση με σημεία καμπής τα $f_\tau=0$ και $f_\tau=E_s-F_{\tau-1}$. Επιπλέον, η συνάρτηση κέρδους είναι κοίλη, επειδή η τιμή αγοράς των δικαιωμάτων είναι υψηλότερη από την τιμή πώλησης, δηλαδή $c_{\tau,s}^{f^-} < c_{\tau,s}^{f^+}$ και $c_s^{F^-} < c_s^{F^+}$. Επειδή η συνάρτηση χρησιμότητας είναι μία αυξανόμενη κοίλη συνάρτηση, συνεπάγεται ότι και η $U(z_s(f_\tau))$ είναι κοίλη. Τότε, επίσης, και η αναμενόμενη χρησιμότητα (5.7) είναι μια κυρτή συνάρτηση του f_τ , επειδή υπολογίζεται ως μέσος όρος των χρησιμοτήτων όλων των σεναρίων. Υποθέτοντας ότι η συνάρτηση χρησιμότητας είναι λεία (έχει συνεχή παράγωγο), τότε η αναμενόμενη συνάρτηση χρησιμότητας θα είναι ομαλή, εκτός από τα σημεία καμπής ($f_\tau=0$ και $f_\tau=E_s-F_{\tau-1}$).

Οι συνθήκες βελτιστοποίησης (Taha, 1992) αναφέρουν ότι το μέγιστο μίας κοίλης, τοπικά ομαλής συνάρτησης είναι είτε όπου η παράγωγος γίνεται μηδέν, ή σε ένα σημείο καμπής όπου η παράγωγος αλλάζει πρόσημο. Η παράγωγος προκύπτει απλά ως η μέση τιμή των παραγώγων του κάθε σεναρίου:

$$\lambda = \frac{d\bar{U}(f_\tau)}{df} = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S \lambda_s = 0 \quad (5.10)$$

$$\text{όπου } \lambda_s = \frac{dU(z_s(f_\tau))}{df_\tau} \quad (5.11)$$

Οι παράγωγοι κάθε σεναρίου εξαρτώνται από το πρόσημο της τελευταίας περιόδου εμπορίας και από το αν οι εκπομπές υπερβαίνουν ή υπολείπονται των δικαιωμάτων:

$$\lambda_s = U'(z_s(f_\tau))(c_s^{F^-} - c_{\tau,s}^{f^+}) \quad \text{όταν } f_\tau > 0, \quad E_s^- > 0 \quad (5.12)$$

$$\lambda_s = -U'(z_s(f_\tau))(c_{\tau,s}^{f^+} - c_s^{F^+}) \quad \text{όταν } f_\tau > 0, \quad E_s^+ > 0 \quad (5.13)$$

$$\lambda_s = -U'(z_s(f_\tau))(c_{\tau,s}^{f^-} - c_s^{F^-}) \quad \text{όταν } f_\tau < 0, \quad E_s^- > 0 \quad (5.14)$$

$$\lambda_s = U'(z_s(f_\tau))(c_s^{F^+} - c_{\tau,s}^{f^-}) \quad \text{όταν } f_\tau < 0, \quad E_s^+ > 0 \quad (5.15)$$

Εδώ $U'(\cdot)$ είναι η παράγωγος της $U(\cdot)$ ως προς το z_s . Το αν το $\lambda(f_\tau)$ θα έχει μηδενική τιμή εξαρτάται από τους συντελεστές των τιμών σε διαφορετικά σενάρια. Κανονικά, η ποινή για υπερβολικές εκπομπές είναι μεγάλη, γεγονός που σημαίνει ότι $c_s^{F^+} - c_{\tau,s}^{f^-} > 0$ στην σχέση (5.15). Επειδή η $U'(\cdot)$ είναι θετική, αυτό σημαίνει ότι η $\lambda(f_\tau)$ είναι θετική για τις μεγάλες αρνητικές τιμές του f_τ . Αν η $\lambda(f_\tau)$ λαμβάνει αρνητικές τιμές για $f_\tau \rightarrow -\infty$, τότε θα υπάρχει ένα μηδενικό στην περιοχή $f_\tau \in (-\infty, \infty)$. Σε αντίθετη περίπτωση, η βέλτιστη λύση είναι να αγοραστεί άπειρη ποσότητα δικαιωμάτων εκπομπών κατά την τελευταία περίοδο σε τιμή $c_{\tau,s}^{f^+}$ και να πωληθεί σε τιμή $c_s^{F^-}$ μετά την τελευταία περίοδο. Η λύση αυτή δεν είναι πολύ πιθανό να συμβεί στην πραγματικότητα, διότι θα απαιτούσε καλύτερες πληροφορίες για τη μελλοντική τιμή των δικαιωμάτων από τους άλλους παράγοντες της αγοράς.

Για να εξασφαλιστεί μία φραγμένη λύση και να αποφευχθούν οι κατ' εκτίμηση συναλλαγές, η τιμή της f_τ περιορίζεται μεταξύ f_{\min} , η οποία είναι η μεγαλύτερη τιμή που καθιστά $E_s^+ \geq 0$ για όλα τα σενάρια που δημιουργούνται, και f_{\max} , που είναι η μικρότερη τιμή που εξασφαλίζει ότι $E_s^- \geq 0$ για όλα τα σενάρια που δημιουργούνται. Αν η $\lambda(f_\tau)$ δεν αλλάζει πρόσημο σε αυτή την περιοχή, τότε ως λύση χρησιμοποιείται το τελευταίο σημείο της περιοχής. Διαφορετικά, η βέλτιστη λύση του προβλήματος της εμπορίας της τελευταίας περιόδου βρίσκεται με έναν αλγόριθμο τροποποιημένης δυαδικής αναζήτησης (Brassard και Bratley, 1996). Η δυαδική αναζήτηση πρέπει να συμπεριλάβει τις ασυνέχειες της $\lambda(f_\tau)$. Η συνθήκη τερματισμού της δυαδικής αναζήτησης

πρέπει να καταλήξει σε μια λύση όταν ένα αρκετά περιορισμένο φάσμα για την f_T έχει βρεθεί. Ο αλγόριθμος για την εύρεση του f_T παρουσιάζεται ακριβώς από κάτω.

Αλγόριθμος 2

Εύρεση της βέλτιστης λύσης με το κόστος της ποινής υπερβολικών εκπομπών.

Βήμα 1. Προσδιορίζεται το αρχικό διάστημα $[f_{\min}, f_{\max}]$ για τη δυαδική αναζήτηση.

$$f_{\max} = \max_s \{E_s - F_{\tau-1}\}$$

$$f_{\min} = \min_s \{E_s - F_{\tau-1}\}$$

Βήμα 2. Αναζήτηση της βέλτιστης εμπορίας δικαιωμάτων f_T

if $(\lambda(f_{\max}) > 0)$

$$f_T = f_{\max}$$

else if $(\lambda(f_{\min}) < 0)$

$$f_T = f_{\min}$$

else το f_T βρίσκεται με δυαδική αναζήτηση για να ικανοποιήσει είτε το $\lambda(f_T)=0$ είτε οι αριστερές και οι δεξιές τιμές για την δυαδική αναζήτηση να είναι αρκετά κοντά.

Βήμα 3. Προσδιορίζεται το επίπεδο δικαιωμάτων f_T στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού.

5.3 ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΚΑΙ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟΥ

Εδώ συνοψίζεται η προσέγγιση της λύσης του προβλήματος σχεδιασμού για την συντονισμένη CHP παραγωγή και το εμπόριο των εκπομπών.

Στο Διάγραμμα -5.1-, απεικονίζεται ο συνδυασμός ανάμεσα στην παραγωγή και στις εμπορικές διαδικασίες στον αλγόριθμο. Καθώς περνάει ο χρόνος, η παραγωγική διαδικασία λαμβάνει χώρα ώστε να ικανοποιεί την μεταβαλλόμενη ζήτηση θερμότητας και να αντιδρά τόσο στις μεταβαλλόμενες τιμές ισχύος όσο και δικαιωμάτων, που με την σειρά τους ενημερώνουν τις εκτιμήσεις των εκπομπών. Στην εμπορική διαδικασία, η εμπορία των δικαιωμάτων καθορίζεται ώστε να ανταποκρίνεται στις αλλαγμένες εκτιμήσεις εκπομπών και έτσι ενημερώνεται το επίπεδο των δικαιωμάτων. Οι ειδικές διαδικασίες για τον αλγόριθμο είναι οι παρακάτω. Οι συμβολισμοί που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο είναι οι ίδιοι με αυτούς των σχέσεων (3.1) - (3.20).

Αλγόριθμος 3

Αλγόριθμος στοχαστικής προσομοίωσης και συντονισμού για το πρόβλημα σχεδιασμού της συνδυασμένης CHP παραγωγής και της εμπορίας των εκπομπών.

Βήμα 1. Αρχικοποίηση: $F_0 =$ (αρχική κατανομή δικαιωμάτων).

Βήμα 2. Προσδιορίζεται η εμπορία των δικαιωμάτων f_{t^*} και το συνολικό επίπεδο δικαιωμάτων F_{t^*} σε κάθε περίοδο t^* .

for $t^* \leftarrow 1$ έως T

Βήμα 2.1. Δημιουργία σεναρίων (χρονοσειρές) $\{ \}$ που καλύπτουν την περίοδο σχεδιασμού για στοχαστικές παραμέτρους όπως η ζήτηση της θερμότητας, η τιμή της ισχύος και η τιμή των δικαιωμάτων των εκπομπών. (οι τιμές των παραμέτρων για $1, \dots, t^*-1$ στα σενάρια συμπίπτουν με τα πραγματικά δεδομένα).

Βήμα 2.2. Για κάθε σενάριο επιλύεται το μοντέλο της CHP παραγωγής με ποινικοποιημένη τιμή καυσίμου [Σχέσεις (5.4) - (5.6)] και βρίσκονται οι προκαλούμενες εκπομπές.

Βήμα 2.3. Προσδιορίζεται η εμπορία των δικαιωμάτων f_{t^*} και το συνολικό επίπεδο δικαιωμάτων F_{t^*}

if ($t^* < \tau$)

Προσδιορισμός f_{t^*} και F_{t^*} με βάση τον **αλγόριθμο 1**.

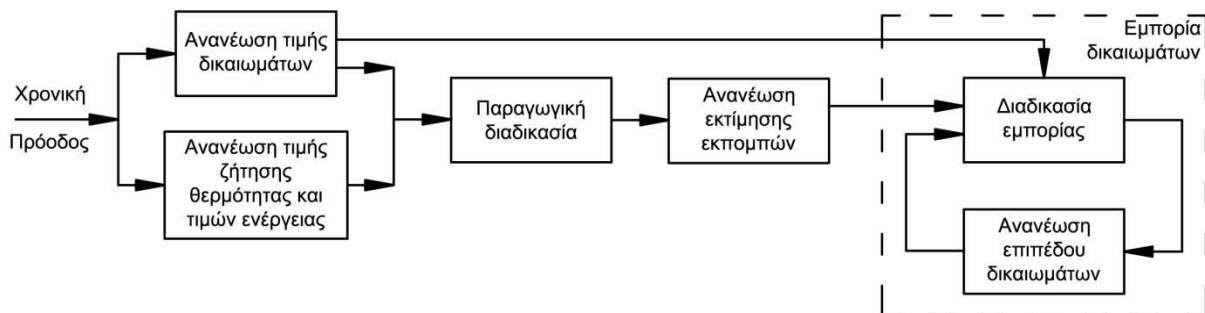
else

Προσδιορισμός f_{t^*} και F_{t^*} με βάση τον **αλγόριθμο 2**.

end for

Βήμα 3. Εξετάζεται η ισορροπία ανάμεσα στο επίπεδο των εκπομπών και στο επίπεδο των δικαιωμάτων στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού.

Βήμα 4. Υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης με βάση τις σχέσεις (4.1), (4.9), (4.16) & (4.17).

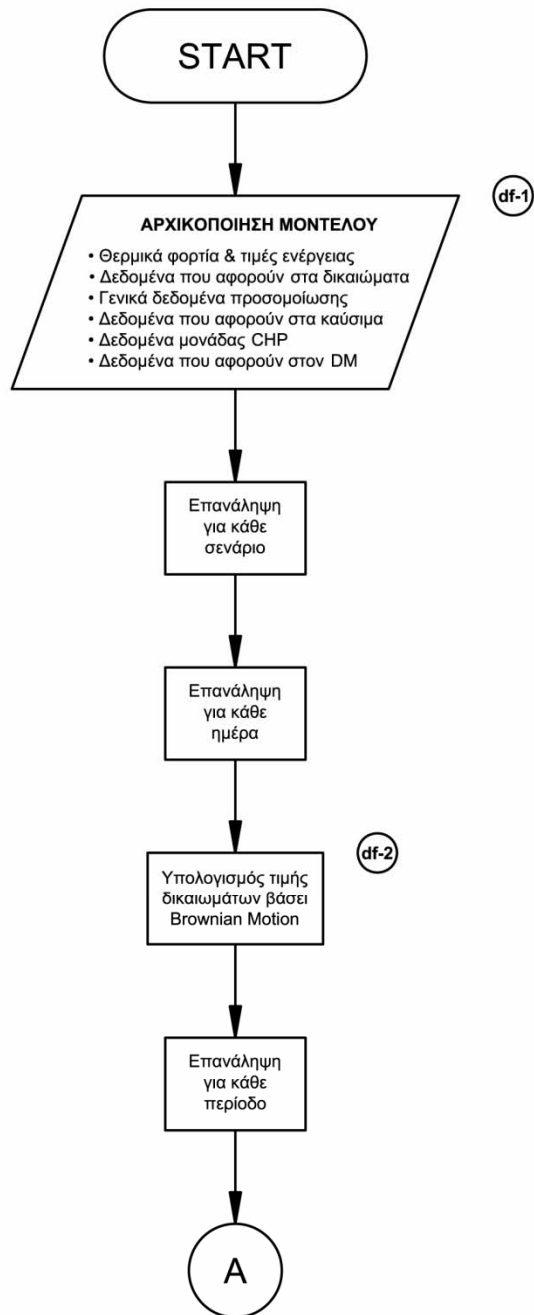


Διάγραμμα -5.1- Συντονισμός διαδικασίας παραγωγής και εμπορίας

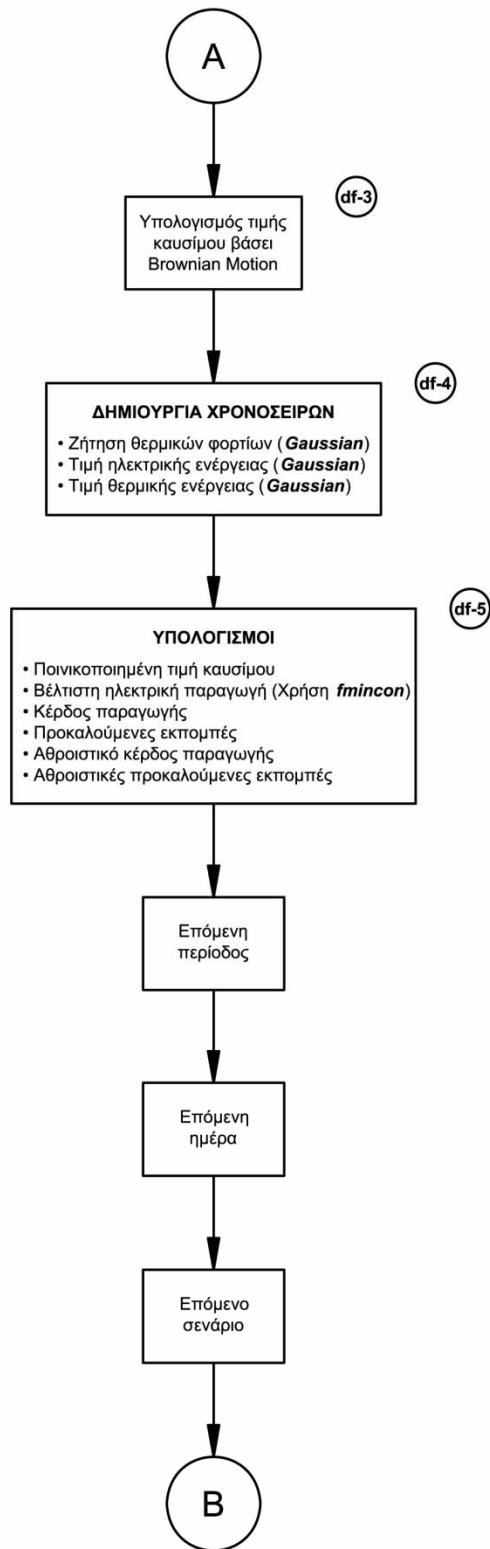
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΗΡ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΠΕΡΙΟΔΩΝ ΚΑΙ ΤΗΣ ΕΜΠΟΡΙΑΣ

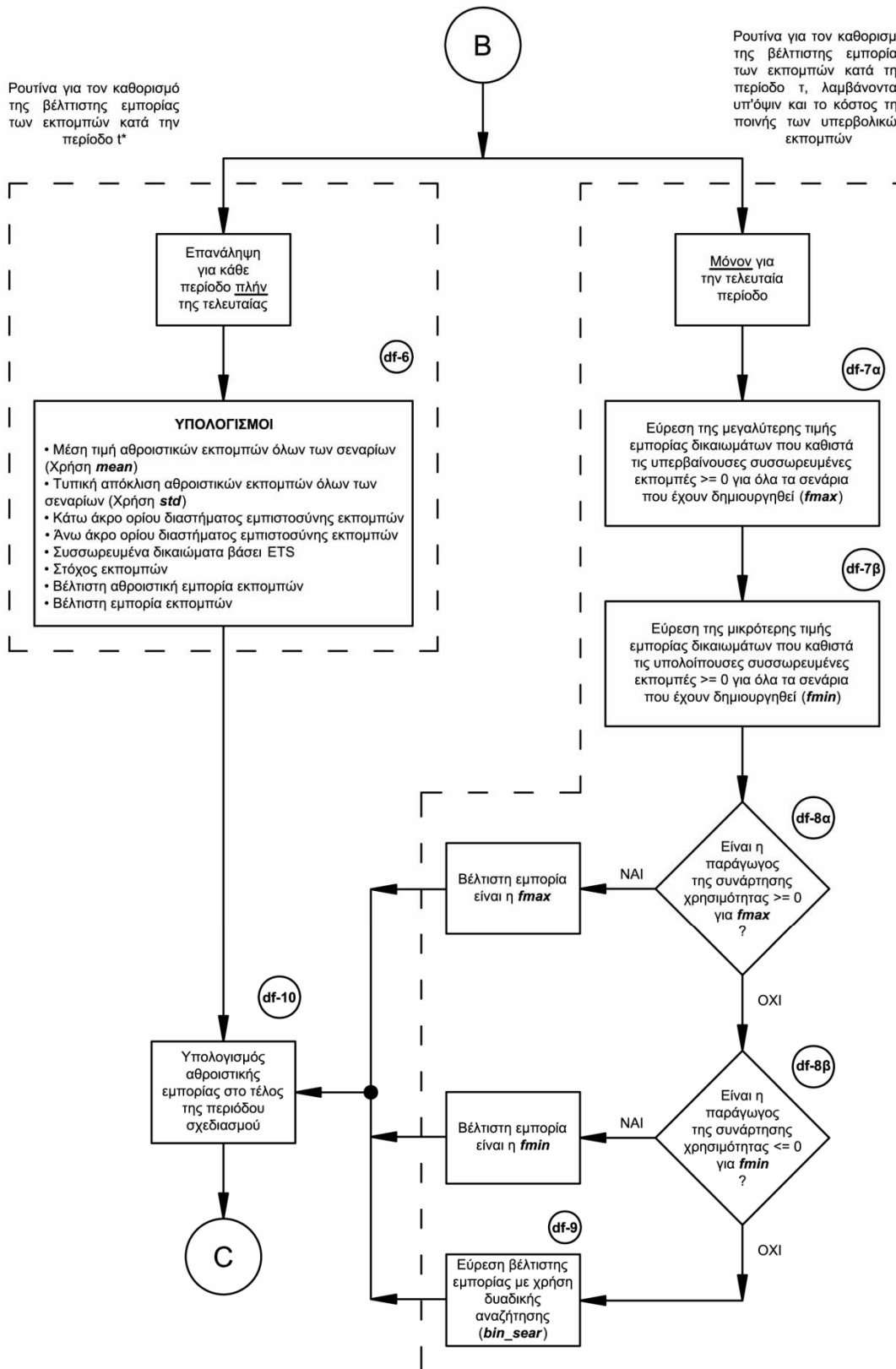
6.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΡΟΗΣ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ (DATA FLOW DIAGRAM)



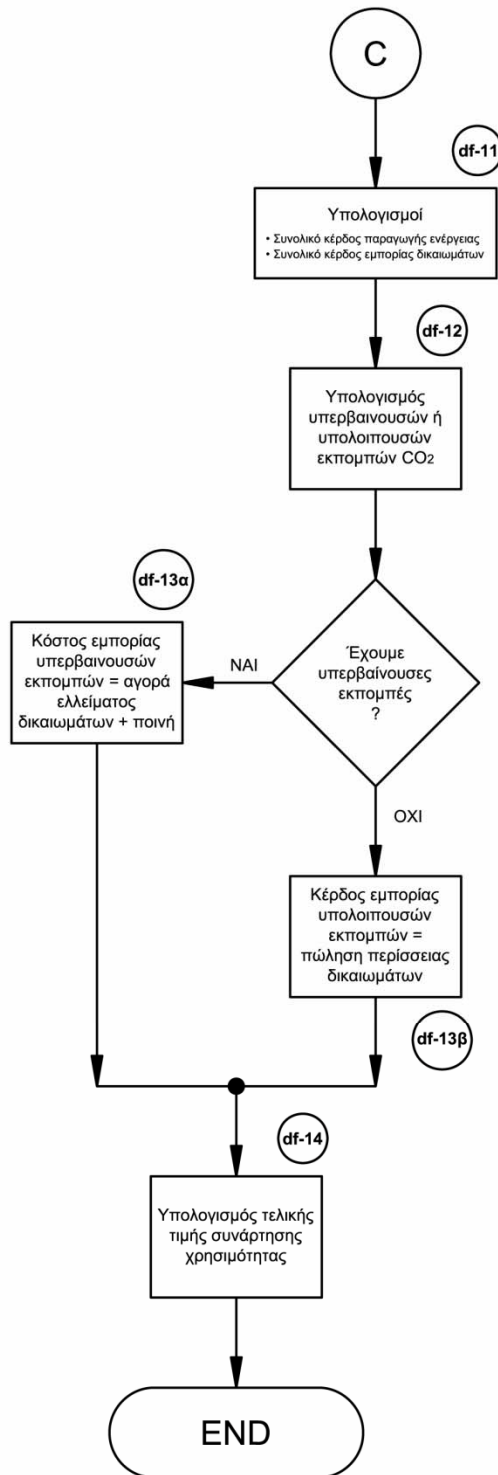
Διάγραμμα -6.1.α- Διάγραμμα ροής δεδομένων (Data flow diagram)



Διάγραμμα -6.1.β- Διάγραμμα ροής δεδομένων (Data flow diagram)



Διάγραμμα -6.1.γ- Διάγραμμα ροής δεδομένων (Data flow diagram)



Διάγραμμα -6.1.δ- Διάγραμμα ροής δεδομένων (Data flow diagram)

6.2 ΚΩΔΙΚΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Ο κώδικας του προγράμματος παρατίθεται στο Παράρτημα Β

6.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

Αρχικά δηλώνονται τα διάφορα δεδομένα που χρησιμοποιεί το μοντέλο (βλ. διαδικασία *df-1* στο Data Flow Diagram) και τα οποία ομαδοποιούνται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Δεδομένα θερμικών φορτίων και τιμών ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας**

Τα δεδομένα δίνονται με την μορφή πινάκων. Τα θερμικά φορτία εισάγονται στον πίνακα *thermal_load* (σε MW) ο οποίος είναι ένας 6X3 πίνακας, μία γραμμή για κάθε περίοδο μέσα στην ημέρα (έχουν υποτεθεί τετράωρες περίοδοι, δηλαδή τα θερμικά φορτία αλλάζουν κάθε τέσσερις ώρες). Για κάθε περίοδο δίνεται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των θερμικών φορτίων βάσει πραγματικών δεδομένων. Με την ίδια λογική εισάγεται και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στον πίνακα *electrical_energy_price* (σε €/MWh) και η τιμή της θερμικής ενέργειας στον πίνακα *thermal_energy_price* (σε €/MWh).

- **Δεδομένα που αφορούν στα δικαιώματα**

Δηλώνεται η αρχική κατανομή δικαιωμάτων όπως αυτή καθορίζεται από το ETS για την περίοδο σχεδιασμού (*F0* σε ton CO₂), καθώς επίσης και η τελευταία γνωστή τιμή των δικαιωμάτων (*last_known_price_of_advantages* σε €/ton). Καθώς οι μελλοντικές προβλέψεις της τιμής των δικαιωμάτων για κάθε περίοδο προκύπτουν με χρήση της Brownian motion (βλ. Παράρτημα A.1.3) εισάγεται η μεταβλητή *sigma_advantages* η οποία αντιπροσωπεύει την μεταβλητότητα της τιμής των δικαιωμάτων. Ορίζονται ένα ανώτερο (*upper_bound_of_advantages* σε €/ton) και ένα κατώτερο (*lower_bound_of_advantages* σε €/ton) όριο της τιμής των δικαιωμάτων βάση παρελθουσών τιμών και εκτιμήσεων για το μέλλον και εισάγεται η ποινή για υπερβαίνουσες εκπομπές στο τέλος της σχεδιαστικής περιόδου όπως αυτή καθορίζεται από το ETS (*penalty_for_excessive_emissions* σε €/ton). Τέλος η μεταβλητή *delta* αντιπροσωπεύει το ποσοστό του κόστους των συναλλαγών σε σχέση με την τιμή των δικαιωμάτων. Τα τρία επίπεδα του κόστους συναλλαγής είναι $\delta=0$ (κανένα κόστος συναλλαγής), $\delta=5\%$ (μέτριο κόστος συναλλαγών) και $\delta=10\%$ (υψηλό κόστος συναλλαγών).

- **Γενικά δεδομένα προσομοίωσης**

Εδώ δηλώνεται ο αριθμός των σεναρίων βάσει των οποίων επιλύεται το πρόβλημα παραγωγής της CHP και εμπορίας των προκαλούμενων εκπομπών (*number_of_scenarios*), ο αριθμός των εβδομάδων (*number_of_weeks*) της σχεδιαστικής περιόδου και τέλος ο αριθμός των περιόδων μέσα στην ημέρα (*number_of_periods*).

- **Δεδομένα που αφορούν στα καύσιμα**

Εισάγεται η τελευταία γνωστή τιμή των καυσίμων (*last_known_fuel_price_k1* σε €/MWh) και οι ειδικές εκπομπές των καυσίμων (*fuel_k1_specific_CO2_emissions* σε ton/MWh). Καθώς οι μελλοντικές προβλέψεις της τιμής των καυσίμων για κάθε περίοδο προκύπτουν με χρήση της Brownian motion (βλ. Παράρτημα A.1.3) εισάγεται η μεταβλητή *sigma_k1* η οποία αντιπροσωπεύει την μεταβλητότητα της τιμής των καυσίμων. Ορίζονται ένα ανώτερο (*upper_bound_of_fuel_price_k1* σε €/ton) και ένα κατώτερο (*lower_bound_of_fuel_price_k1* σε €/ton) όριο της τιμής των καυσίμων βάση παρελθουσών τιμών και εκτιμήσεων για το μέλλον.

- **Δεδομένα που αφορούν στην μονάδα συμπαραγωγής**

Η χαρακτηριστική κόστους της μονάδας συμπαραγωγής είναι της μορφής:

$$C(P,Q) = \alpha + \beta \cdot P + \gamma \cdot P^2 + \delta \cdot Q + \varepsilon \cdot Q^2 + \zeta \cdot P \cdot Q \quad (6.1)$$

όπου $\alpha, \beta, \gamma, \delta, \varepsilon$ & ζ , είναι οι συντελεστές της χαρακτηριστικής κόστους και αντιστοιχούν στις global μεταβλητές του προγράμματος,

$\alpha = \text{CONSTANT}$

$\beta = P_COEFFICIENT$

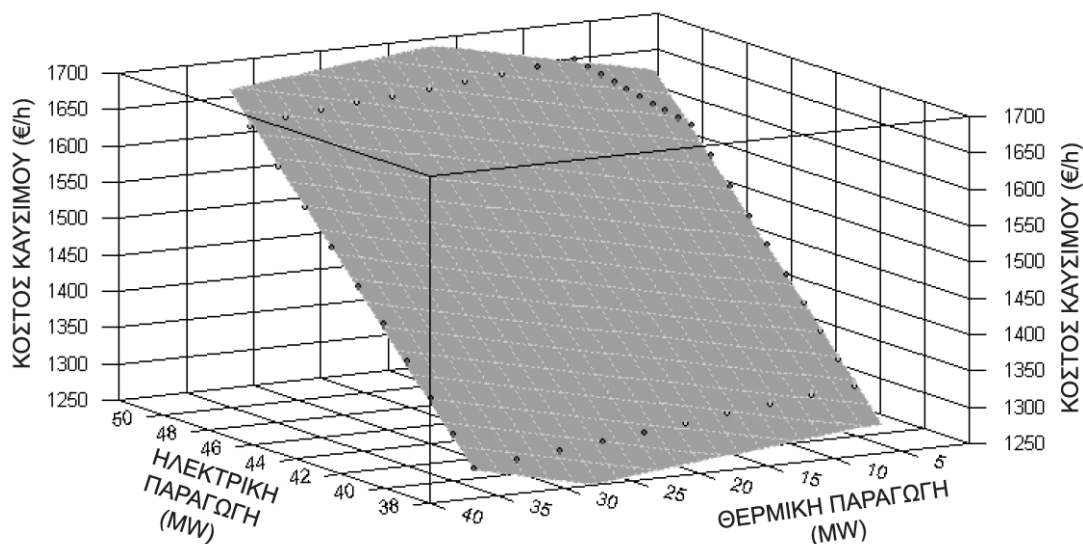
$\gamma = P_SQUARED_COEFFICIENT$

$\delta = Q_COEFFICIENT$

$\varepsilon = Q_SQUARED_COEFFICIENT$

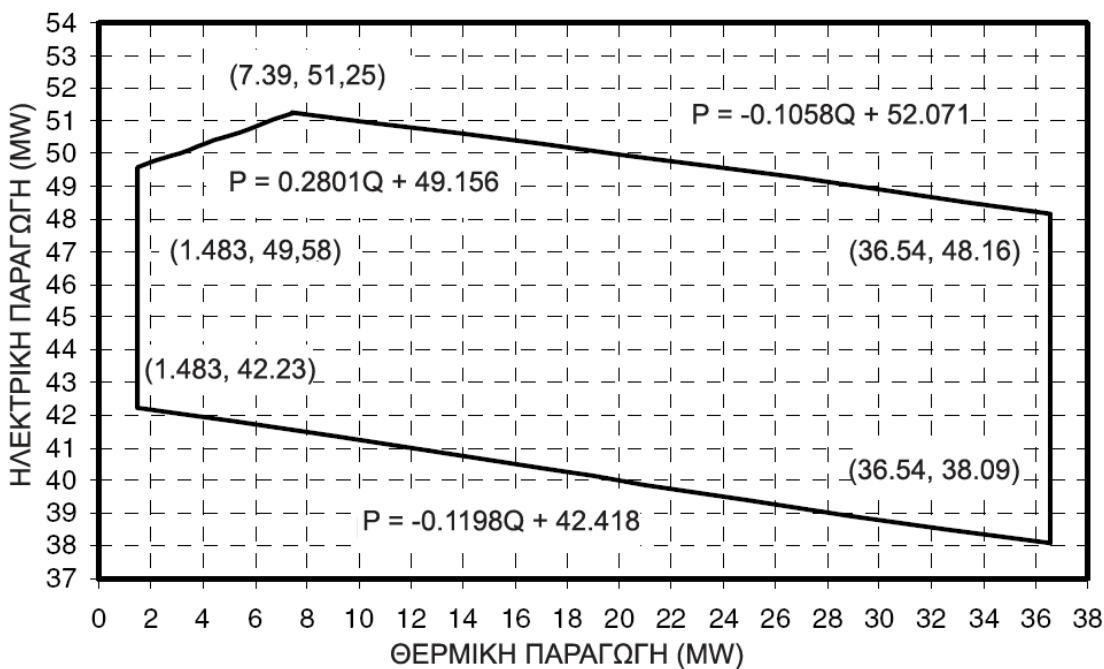
$\zeta = P_Q_COEFFICIENT$

Η χαρακτηριστική κόστους απεικονίζεται στο Διάγραμμα 6.2- που φαίνεται στην επόμενη σελίδα.



Διάγραμμα -6.2- Χαρακτηριστική κόστους της μονάδας συμπαραγωγής

Οι κύριοι περιορισμοί της χαρακτηριστικής κόστους (περιοχή λειτουργίας) απεικονίζονται στο Διάγραμμα -6.3-.



Διάγραμμα -6.3- Περιοχή λειτουργίας της μονάδας συμπαραγωγής

Από το Διάγραμμα -6.3- προκύπτουν οι πίνακες A & B του προγράμματος ως εξής:

$$1P \leq -0,1058Q + 52,071$$

$$1P \leq 0,2801Q + 49,156$$

$$-1P \leq 0,1198Q - 42,418$$

$$0P \leq 1Q - 1,483$$

$$0P \leq -1Q + 36,54$$

όπου ο πίνακας **A** περιέχει τους συντελεστές του **P** και ο **B** περιέχει τους συντελεστές του **Q** και τους σταθερούς όρους. Οι πίνακες αυτοί απαιτούνται κατά την χρήση της matlab function **fmincon** (βλέπε παράρτημα A.2.3) για την βελτιστοποίηση της παραγωγής. Η χαρακτηριστική κόστους και η περιοχή λειτουργίας είναι μοναδική για κάθε μονάδα συμπαραγωγής και ενδέχεται κατά την διάρκεια των προσομοιώσεων να μεταβληθούν.

Στις μεταβλητές, *lower_thermal_production* & *upper_thermal_production*, ανατίθενται το κατώτερο και το ανώτερο όριο της θερμικής παραγωγής αντίστοιχα (σε MW), έτσι ώστε να εξασφαλιστεί ότι οι μελλοντικές τιμές ζήτησης θερμικής ισχύος δεν υπολείπεται ή υπερβαίνει την δυνατότητα παραγωγής της μονάδας.

Δίνεται ο συντελεστής γ ο οποίος καθορίζει τις προκαλούμενες εκπομπές CO₂ της μονάδας συναρτήσει της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (*gamma_coefficient_k1* σε ton CO₂/MWh).

- **Δεδομένα που αφορούν στον Decision Maker (DM)**

Εδώ εισάγεται ο παράγοντας εμπιστοσύνης (n) ο οποίος απεικονίζει την βεβαιότητα του DM κατά την πρόβλεψη της εμπορίας των εκπομπών. Όσο μεγαλύτερος είναι ο παράγοντας εμπιστοσύνης, τόσο μεγαλύτερη βεβαιότητα ενυπάρχει στην διαδικασία της εμπορίας. Το n μπορεί να πάρει τις τιμές 1,2 ή 3.

Σε αυτό το σημείο έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία εισαγωγής δεδομένων του μοντέλου. Στην συνέχεια, και με χρήση της Brownian Motion (βλ. Παράρτημα A.1.3) υπολογίζεται η τιμή των δικαιωμάτων (βλ. διαδικασία *df-2* στο Data Flow Diagram) , μία τιμή για κάθε ημέρα της περιόδου σχεδιασμού. Με τον ίδιο τρόπο υπολογίζεται και η τιμή των καυσίμων (βλ. διαδικασία *df-3* στο Data Flow Diagram) μόνο που εδώ υπολογίζεται μία διαφορετική τιμή για κάθε περίοδο μέσα στην ημέρα. Και στις δύο περιπτώσεις γίνεται έλεγχος για την τήρηση των ανώτερων και κατώτερων ορίων. Έπειτα, δημιουργούνται χρονοσειρές (βλ. διαδικασία *df-4* στο Data Flow Diagram) όπου για κάθε περίοδο μέσα στην ημέρα λαμβάνεται μία τιμή για την ζήτηση των θερμικών φορτίων, την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας & την τιμή της θερμικής ενέργειας με βάση την κατανομή Gauss (χρήση της matlab function ***normrnd*** βλ. Παραρτήματα A.1.1 & A.2.2). Οι χρονοσειρές αυτές προκύπτουν με χρήση πραγματικών δεδομένων που αποτελούν και την καλύτερη πρόβλεψη για το μέλλον.

Με χρήση των παραπάνω στοιχείων ακολουθούν υπολογισμοί (βλ. διαδικασία *df-5* στο Data Flow Diagram) για κάθε περίοδο μέσα στην ημέρα και για όλη την σχεδιαστική περίοδο, τα αποτελέσματα των οποίων αποθηκεύονται σε έναν πίνακα (*planning_horizon_matrix*) $m \times 14$, όπου m είναι ο αριθμός των συνολικών περιόδων που αποτελούν αντικείμενο μελέτης. Στον Πίνακα -6.1- που ακολουθεί στην επόμενη σελίδα παρουσιάζεται η βασική μορφή αυτού του πίνακα όπου φαίνεται το περιεχόμενο κάθε στήλης και η διαδικασία υπολογισμού της. Έτσι, και με χρήση της matlab function ***fmincon*** (βλ. Παράρτημα A.2.3), γίνεται βελτιστοποίηση ως προς την ηλεκτρική παραγωγή (x σε MW) της συνάρτησης κέρδους:

$$C(P,Q)=-287.582+37.32778*P+0.0005*P^2+3.898043*Q+0.005*Q^2+0.0025*P*Q \quad (6.2)$$

Η παραπάνω συνάρτηση είναι μία συνάρτηση εσόδων από την πώληση της ενέργειας μείον το κόστος της παραγωγής. Σημειώνεται ότι στον υπολογισμό του κόστους λαμβάνεται υπ' όψιν η ποινικοποιημένη τιμή του καυσίμου. Με δεδομένη την βέλτιστη ηλεκτρική παραγωγή, υπολογίζονται το κέρδος ανά περίοδο (στήλη 11 στον *planning_horizon_matrix* σε €), οι προκαλούμενες εκπομπές (στήλη 13 σε ton CO_2) καθώς επίσης και οι αθροιστικές τιμές τους (στήλες 12 & 14 αντίστοιχα).

Χρησιμοποιώντας την στήλη 14 του *planning_horizon_matrix* δημιουργούνται οι στήλες 1... n του *normalised_planning_horizon_matrix* (Πίνακας -6.2.α- & -6.2.β-) που περιέχουν τις αθροιστικές προκαλούμενες εκπομπές για το σύνολο των σεναρίων 1... n . Για όλες τις περιόδους πλην της τελευταίας, και με χρήση των matlab functions ***mean*** &

α/α Στήλης	1	2	3	4	5	6	7
Περιεχόμενο	Αύξων Αριθμός Περιόδου	Αριθμός Περιόδου Ημέρας	Αριθμός Σεναρίου	Ζήτηση Θερμικής Ισχύος (MW)	Τιμή Πώλησης Ηλεκτρικής Ενέργειας (€/MWh)	Τιμή Πώλησης Θερμικής Ενέργειας (€/MWh)	Τιμή Δικαιώματος (€/ton CO2)
Ανανέωση Τιμής	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Σενάριο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Ημέρα
Τρόπος υπολογισμού	-	-	-	Κατανομή Gauss	Κατανομή Gauss	Κατανομή Gauss	Κίνηση κατά Brown

α/α Στήλης	8	9	10	11	12	13	14
Περιεχόμενο	Τιμή Καυσίμου (€/MWh)	Ποινικοποιημένη Τιμή Καυσίμου (€/MWh)	Βέλτιστη Ηλεκτρική Παραγωγή (MW)	Κέρδος Παραγωγικής Διαδικασίας (€)	Αθροιστικό Κέρδος Παραγωγικής Διαδικασίας (€)	Προκαλούμενες Εκπομπές CO2 (ton)	Αθροιστικές Προκαλούμενες Εκπομπές CO2 (ton)
Ανανέωση Τιμής	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο
Τρόπος υπολογισμού	Κίνηση κατά Brown	Τιμή Καυσίμου + (Ειδικές Εκπομπές n * Τιμή Δικαιώματος)	Βελτιστοποίηση με χρήση της Matlab Function fmincon	Κέρδος από Πώληση Ενέργειας - Λειτουργικό Κόστος	Αθροιστικό Κέρδος Περιόδου (t-1) + Κέρδος Παραγωγικής Διαδικασίας κατά την Περίοδο t	Συντελεστής Εκπομπών γ *	Αθροιστικές Προκαλούμενες Εκπομπές Περιόδου (t-1) + Προκαλούμενες Εκπομπές κατά την Περίοδο t

Πίνακας -6.1- planning horizon matrix

α/α Στήλης	1...n	n+1	n+2	n+3	n+4	n+5
Περιεχόμενο	Αθροιστικές Προκαλούμενες Εκπομπές CO2 για τα σενάρια 1...n (ton)	Μέση Τιμή Αθροιστικών Προκαλούμενων Εκπομπών CO2 (ton)	Απόκλιση Αθροιστικών Προκαλούμενων Εκπομπών CO2 (ton)	Κάτω Άκρο Ορίου Εμπιστοσύνης Εκπομπών (ton CO2)	Άνω Άκρο Ορίου Εμπιστοσύνης Εκπομπών (ton CO2)	Συσσωρευμένα Δικαιώματα CO2 που Προβλέπονται από EU (ton)
Ανανέωση Τιμής	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο
Τρόπος υπολογισμού	Προέρχονται από την στήλη 14 του planning_horizon_matrix	Εύρεση με χρήση της Matlab Function mean για τις Στήλες 1...n	Εύρεση με χρήση της Matlab Function std για τις Στήλες 1...n	Μέση Τιμή Αθροιστικών Προκαλούμενων Εκπομπών CO2 - (Παράγοντας Εμπιστοσύνης * Απόκλιση Αθροιστικών Προκαλούμενων Εκπομπών)	Μέση Τιμή Αθροιστικών Προκαλούμενων Εκπομπών CO2 + (Παράγοντας Εμπιστοσύνης * Απόκλιση Αθροιστικών Προκαλούμενων Εκπομπών)	Αρχική Κατανομή Δικαιωμάτων από την EU Ανοιγμένη σε Κάθε Περίοδο
α/α Στήλης	n+6	n+7	n+8	n+9	n+10	n+11
Περιεχόμενο	Προσαρμοσμένος Στόχος Εκπομπών CO2 (ton)	Αθροιστική Εμπορία Εκπομπών CO2 (ton)	Εμπορία Εκπομπών CO2 (ton)	Μέση Τιμή Πώλησης Δικαιώματος (€/ton CO2)	Μέση Τιμή Αγοράς Δικαιώματος (€/ton CO2)	Μέση Τιμή Πώλησης Δικαιώματος (€/ton CO2)
Ανανέωση Τιμής	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο
Τρόπος υπολογισμού	max [Κάτω Άκρο Ορίου Εμπιστοσύνης, min (Συσσωρευμένα Δικαιώματα CO2 που Προβλέπονται από EU , Άνω Άκρο Ορίου Εμπιστοσύνης)]	Προσαρμοσμένος Στόχος Εκπομπών CO2 - Συσσωρευμένα Δικαιώματα CO2 που Προβλέπονται από EU	Αθροιστική Εμπορία Εκπομπών CO2 Περιόδου t - Αθροιστική Εμπορία Εκπομπών CO2 Περιόδου (t-1)	Εύρεση με χρήση της Matlab Function mean για όλες τις Στήλες του trading_matrix	Μέση Τιμή Δικαιώματος * (1+ δ)	Μέση Τιμή Δικαιώματος * (1- δ)

Πίνακας -6.2.α- normalized planning horizon matrix

α/α Στήλης	n+12	n+13	n+14	n+15	n+16
Περιεχόμενο	Κέρδος Εμπορίας Εκπομπών CO ₂ (€)	Αθροιστικό Κέρδος Εμπορίας Εκπομπών CO ₂ (€)	Μέση Τιμή Κέρδους Παραγωγικής Διαδικασίας (€)	Αθροιστική Μέση Τιμή Κέρδους Παραγωγικής Διαδικασίας (€)	Συνολικό Αθροιστικό Κέρδος (€)
Ανανέωση Τιμής	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο	Ανά Περίοδο
Τρόπος υπολογισμού	Υπερβαίνουσες Εκπομπές: Τιμή Αγοράς Δικαιώματος * Ποσότητα Εκπομπών Υπολοίπουσες Εκπομπές: Τιμή Πώλησης Δικαιώματος * Ποσότητα Εκπομπών	Αθροιστικό Κέρδος Εμπορίας Εκπομπών Περιόδου (t-1) + Κέρδος Εμπορίας Εκπομπών Περιόδου t	Εύρεση με χρήση της Matlab Function mean για όλες τις στήλες του production_income	Αθροιστική Μέση Τιμή Κέρδους Παραγωγικής Διαδικασίας Περιόδου (t-1) + Μέση Τιμή Κέρδους Παραγωγικής Διαδικασίας Περιόδου t	Αθροιστικό Κέρδος Παραγωγικής Διαδικασίας + Αθροιστικό Κέρδος Εμπορίας Εκπομπών CO ₂

Πίνακας -6.2.β- normalized planning horizon matrix

std (βλ. Παραρτήματα A.2.4 & A.2.5), υπολογίζονται η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση των αθροιστικών προκαλούμενων εκπομπών οι τιμές των οποίων αποθηκεύονται στις στήλες n+1 και n+2 του *normalised_planning_horizon_matrix* (βλ. διαδικασία df-6 στο Data Flow Diagram).

Στις στήλες n+3 και n+4 του *normalised-planning_horizon_matrix* υπολογίζονται αντίστοιχα το κάτω και το άνω άκρο του ορίου εμπιστοσύνης των εκπομπών (σε ton CO₂) που εξαρτώνται από τον παράγοντα εμπιστοσύνης *n*. Για να καταστεί δυνατή η εφαρμογή της αρχικής κατανομής δικαιωμάτων στον μακροπρόθεσμο σχεδιασμό της λειτουργίας της μονάδας, γίνεται αναγωγή της σε κάθε περίοδο και προκύπτουν τα συσσωρευμένα δικαιώματα (στήλη n+5 σε ton CO₂). Οι παραπάνω τιμές συνδυάζονται για τον προσδιορισμό του στόχου όσον αφορά στις προκαλούμενες εκπομπές της μονάδας (στήλη n+6 σε ton CO₂). Αφαιρώντας την τιμή αυτή από τα συσσωρευμένα δικαιώματα προκύπτει η βέλτιστη αθροιστική εμπορία των εκπομπών CO₂ (στήλη n+7 σε ton CO₂).

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω όλη αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για όλες τις περιόδους πλην της τελευταίας καθώς αυτή είναι η τελευταία ευκαιρία να ληφθεί η απόφαση της εξισορρόπησης των δικαιωμάτων με τις συνολικές εκπομπές. Η εμπορία στην τελευταία περίοδο είναι αναγκαστική και εξαρτάται από το στοχαστικό αποτέλεσμα των εκπομπών. Δεν είναι επαρκές να αποτελεί στόχο για τις εκπομπές το διάστημα εμπιστοσύνης καθώς ο στόχος των εκπομπών θα πρέπει να ικανοποιηθεί με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια.

Για την τελευταία περίοδο σχεδιασμού τ , βρίσκουμε για όλα τα σενάρια $1...n$, την διαφορά των αθροιστικών εκπομπών της τελευταίας περιόδου (στήλη 14 του *planning_horizon_matrix*) και του επιπέδου των συσσωρευμένων δικαιωμάτων της περιόδου $\tau-1$. Το αποτέλεσμα αποθηκεύεται σε ένα πίνακα $1 \times n$ τον *f_max_min_set*. Η μεγαλύτερη τιμή αυτού του πίνακα είναι αυτή που εξασφαλίζει ότι οι υπερβαίνουσες συσσωρευμένες εκπομπές είναι μη αρνητικές ($E_s^+ \geq 0$) και η μικρότερη τιμή του είναι αυτή που εξασφαλίζει ότι οι υπολειπόμενες συσσωρευμένες εκπομπές είναι μη αρνητικές ($E_s^- \geq 0$). Οι τιμές αυτές αποθηκεύονται στις μεταβλητές *f_max* και *f_min* αντίστοιχα (βλ. διαδικασίες *df-7α* & *df-7β* στο Data Flow Diagram) και τα σενάρια από τα οποία προέρχονται στις μεταβλητές *fmax_scenario* και *fmin_scenario*. Επιστρέφοντας στον *planning_horizon_matrix* βρίσκουμε την αντίστοιχη απόκλιση από την αρχική κατανομή δικαιωμάτων *fmax_emissions* και *fmin_emissions* στα αντίστοιχα σενάρια.

Η τιμή αγοράς και η τιμή πώλησης των δικαιωμάτων εκπομπών προκύπτουν από την τιμή των δικαιωμάτων (*price_of_advantages*) αυξανόμενη ή μειούμενη αντίστοιχα κατά ένα ποσοστό δ (*delta*) το οποίο απεικονίζει το κόστος των συναλλαγών της εμπορίας των εκπομπών. Έτσι, η τιμή αγοράς δικαιωμάτων εκπομπών δίνεται από τον τύπο $C_t^{f+} = (1 + \delta)C_t^f$ για τις περιόδους $t = 1, \dots, \tau$, και η τιμή πώλησης κατά την περίοδο $t = 1, \dots, \tau+1$ θα είναι αντίστοιχα $C_t^{f-} = (1 - \delta)C_t^f$. Για την περίοδο στο πέρας του ορίζοντα σχεδιασμού $\tau+1$, επειδή πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν και η ποινή για υπερβολικές εκπομπές (*penalty_for_excessive_emissions*) οπότε η τιμή αγοράς δίνεται από την σχέση $C_{\tau+1}^{f+} = (1 + \delta)C_{\tau+1}^f + C^{F\#}$. Γίνεται προφανές από την τελευταία σχέση ότι είναι αναγκαία η τιμή των δικαιωμάτων για την περίοδο $\tau+1$, η οποία προκύπτει με χρήση της Brownian motion.

Η αναζήτηση της βέλτιστης εμπορίας δικαιωμάτων *ft* θα είναι ίση με το *f_max* όταν η παράγωγος της συνάρτησης χρησιμότητας είναι θετική (βλ. διαδικασία *df-8α* στο Data Flow Diagram) και ίση με το *f_min* όταν η παράγωγος της συνάρτησης χρησιμότητας

είναι αρνητική (βλ. διαδικασία *df-8β* στο Data Flow Diagram). Εάν καμία από τις δύο παραπάνω συνθήκες δεν ισχύει, τότε εφαρμόζεται μία τροποποιημένη δυαδική αναζήτηση για όλα τα σενάρια χρησιμοποιώντας την function *bin_sear* η οποία έχει αναπτυχθεί για τον συγκεκριμένο σκοπό. Για τον σκοπό αυτό έχει κατασκευαστεί ο πίνακας *trading_matrix_for_period_t* (Πίνακας 6.3) στον οποίο περιέχονται οι τιμές αγοράς και πώλησης δικαιωμάτων κατά τις περιόδους t και $t+1$ οι οποίες είναι απαραίτητες για τον υπολογισμό της παραγώγου της συνάρτησης χρησιμότητας. Οι παράγωγοι που προκύπτουν αποθηκεύονται στον $1 \times n$ πίνακα *ls_vector* ο οποίος αφού διαταχθεί σε αύξουσα σειρά (πίνακας X) με χρήση της matlab function **sort** (βλ. Παράρτημα A.2.6) υπόκειται σε δυαδική αναζήτηση. Η ρουτίνα της δυαδικής αναζήτησης (βλ. Παράρτημα A.1.4) εντοπίζει την τιμή της εμπορίας η οποία είτε μηδενίζει την παράγωγο της συνάρτησης χρησιμότητας είτε της δίνει την πλησιέστερη στο 0 τιμή (βλ. διαδικασία *df-9* στο Data Flow Diagram). Η τιμή αυτή αποτελεί το τελευταίο στοιχείο της στήλης $n+8$ του *normalized_planning_horizon_matrix* και βάση αυτής διορθώνεται και η τιμή της αθροιστικής εμπορίας (στήλη $n+7$ του *normalized_planning_horizon_matrix*). Εξετάζεται η ισορροπία ανάμεσα στο επίπεδο των εκπομπών και στο επίπεδο των δικαιωμάτων στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού και προκύπτουν οι υπερβαίνουσες ή οι υπολοίπουσες εκπομπές.

α/α Στήλης	1	2	3	4	5
Περιεχόμενο	Αύξων Αριθμός Σεναρίου	Εμπορία Δικαιωμάτων κατά την Τελευταία Περίοδο t (ton CO ₂)	Υπερβαίνουσες ή Υπολοίπουσες Εκπομπές (ton CO ₂)	Τιμή Δικαιωμάτων κατά την Τελευταία Περίοδο t (€/ton CO ₂)	Τιμή Πώλησης Δικαιωμάτων κατά την Τελευταία Περίοδο t (€/ton CO ₂)
Τρόπος υπολογισμού	-	Τιμές του 1 ^{ου} πίνακα <i>f_max_min_set</i>	Αθροιστικές Προκαλούμενες Εκπομπές Τελευταίας Περιόδου t - Αρχική Κατανομή Δικαιωμάτων F_0	Στήλη 7 για την τελευταία περίοδο t του πίνακα <i>planning_horizon_matrix</i>	Τιμή Δικαιωμάτων κατά την Τελευταία Περίοδο $t * (1 - \delta)$

α/α Στήλης	6	7	8	9	10
Περιεχόμενο	Τιμή Αγοράς Δικαιωμάτων κατά την Τελευταία Περίοδο t (€/ton CO ₂)	Τιμή Δικαιωμάτων κατά την Περίοδο $t+1$ (€/ton CO ₂)	Τιμή Πώλησης Δικαιωμάτων κατά την Περίοδο $t+1$ (€/ton CO ₂)	Τιμή Αγοράς Δικαιωμάτων κατά την Περίοδο $t+1$ (€/ton CO ₂)	Παράγωγος Συνάρτησης Χρησιμότητας
Τρόπος υπολογισμού	Τιμή Δικαιωμάτων κατά την Τελευταία Περίοδο $t * (1 + \delta)$	Κίνηση κατά Brown	Τιμή Δικαιωμάτων κατά την Περίοδο $t+1 * (1 - \delta)$	Τιμή Δικαιωμάτων κατά την Περίοδο $t+1 * (1 + \delta) +$ Ποινή Υπερβαίνουσών Εκπομπών	Σχέσεις 3.29 - 3.32

Πίνακας -6.3- trading matrix for period t

Έχοντας βρει την βέλτιστη εμπορία για όλες τις περιόδους, συμπεριλαμβανομένης και της τελευταίας, υπολογίζεται η αθροιστική εμπορία στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού (βλ. διαδικασία *df-10* στο Data Flow Diagram).

Η τελική τιμή της συνάρτησης χρησιμότητας προκύπτει ως το άθροισμα του συνολικού κέρδους παραγωγής ενέργειας, του συνολικού κέρδους της εμπορίας των δικαιωμάτων και του κόστους/κέρδους της εμπορίας των υπερβαινουσών/υπολοιπουσών εκπομπών (βλ. διαδικασία *df-14* στο Data Flow Diagram). Για τον υπολογισμό των δύο πρώτων μεγεθών καταρτίζονται οι πίνακες *trading_matrix* και *production_income*, οι οποίοι περιέχουν την τιμή των δικαιωμάτων και τα έσοδα από την παραγωγή ενέργειας, αντίστοιχα, για όλες τις περιόδους και για όλα τα σενάρια. Με χρήση της matlab function **mean** (βλ. Παράρτημα A.2.4) υπολογίζονται οι μέσες τιμές των μεγεθών αυτών οι οποίες αποθηκεύονται στις στήλες $n+9$ και $n+14$ αντίστοιχα του *normalized_planning_horizon_matrix*. Στις στήλες $n+10$ και $n+11$ του ίδιου πίνακα καταχωρούνται οι μέσες τιμές αγοράς και πώλησης δικαιωμάτων (σε €/ ton CO₂) οι οποίες χρησιμοποιούνται στον υπολογισμό των εσόδων ανά περίοδο και των αθροιστικών εσόδων από την εμπορία των εκπομπών (στήλες $n+12$ και $n+13$ αντίστοιχα του *normalized_planning_horizon_matrix*). Τα αθροιστικά έσοδα παραγωγής αποθηκεύονται στην στήλη $n+15$. Το συνολικό κέρδος ανά περίοδο (σε €) βρίσκεται ως το άθροισμα των εσόδων παραγωγής και των εσόδων εμπορίας των δικαιωμάτων (στήλες $n+13$ και $n+15$ αντίστοιχα του *normalized_planning_horizon_matrix*) και αποθηκεύεται στην στήλη $n+16$. Για την τελευταία περίοδο μόνον προστίθεται το κόστος/κέρδος της εμπορίας των υπολοιπουσών/υπερβαινουσών εκπομπών. Η τελική τιμή του συνολικού κέρδους στο τέλος της περιόδου σχεδιασμού, καταχωρείται στην μεταβλητή *total_benefit*.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ

7.1 ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Δεδομένα που αφορούν στα φορτία και στις τιμές ενέργειας:

Χρονική περίοδος	Μέσος όρος θερμικών φορτίων (MW)	Απόκλιση (MW)
1	38,068	1,628
2	41,622	2,941
3	43,713	1,975
4	49,503	2,958
5	49,170	2,881
6	43,325	2,992

Πίνακας -7.1- Θερμικά φορτία

Χρονική περίοδος	Μέσος όρος τιμής θερμικής ενέργειας (€/MWh)	Απόκλιση (€/MWh)	Μέσος όρος τιμής ηλεκτρικής ενέργειας (€/MWh)	Απόκλιση (€/MWh)
1	24	2	40	2
2	31	3	51	3
3	27	2,5	45	2,5
4	25	2	41	2
5	29	2,4	48	2,4
6	30	3	51	3

Πίνακας -7.2- Τιμές θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας

Δεδομένα που αφορούν στα δικαιώματα

- Αρχική κατανομή δικαιωμάτων F_0 : 75000 ton CO₂
- Τελευταία γνωστή τιμή δικαιωμάτων: 12 €/ton CO₂
- noise της τιμής δικαιωμάτων: 1
- Κάτω όριο τιμής δικαιωμάτων: 5 €/ton CO₂
- Άνω όριο τιμής δικαιωμάτων: 25 €/ton CO₂
- Κόστος συναλλαγών: 0.05 (ποσοστό της τιμής των δικαιωμάτων)
- Ποινή για υπερβολικές εκπομπές: 60 €/ton CO₂

Δεδομένα που αφορούν στα καύσιμα

- Τελευταία γνωστή τιμή καυσίμου κ1: 55 €/MWh
- Ειδικές εκπομπές καυσίμου κ1: 0,264 ton CO₂/MWh
- noise καυσίμου κ1: 2
- Κάτω όριο τιμής καυσίμου κ1: 40 €/ton
- Άνω όριο τιμής καυσίμου κ1: 90 €/ton

Δεδομένα που αφορούν στην μονάδα συμπαραγωγής

- Χαρακτηριστική κόστους της μονάδας συμπαραγωγής: $C(P,Q) = -287.582 + 37.32778 * P + 0.0005 * P^2 + 3.898043 * Q + 0.005 * Q^2 + 0.0025 * P * Q$
- Περιοχή λειτουργίας της μονάδας συμπαραγωγής:
 - $1P \leq -0,1058Q + 52,071$
 - $1P \leq 0,2801Q + 49,156$
 - $-1P \leq 0,1198Q - 42,418$
 - $0P \leq 1Q - 1,483$
 - $0P \leq -1Q + 36,54$

- Κάτω όριο θερμικής παραγωγής της CHP μονάδας βάσει της χαρακτηριστικής κόστους: 1.483 MW
- Άνω όριο θερμικής παραγωγής της CHP μονάδας βάσει της χαρακτηριστικής κόστους: 36.54 MW
- Συντελεστής εκπομπών μονάδας CHP γ : 0.8 * Ειδικές εκπομπές καυσίμου κ1 ton CO₂/MWh

Δεδομένα που αφορούν στον DM

- Παράγοντας εμπιστοσύνης: 2

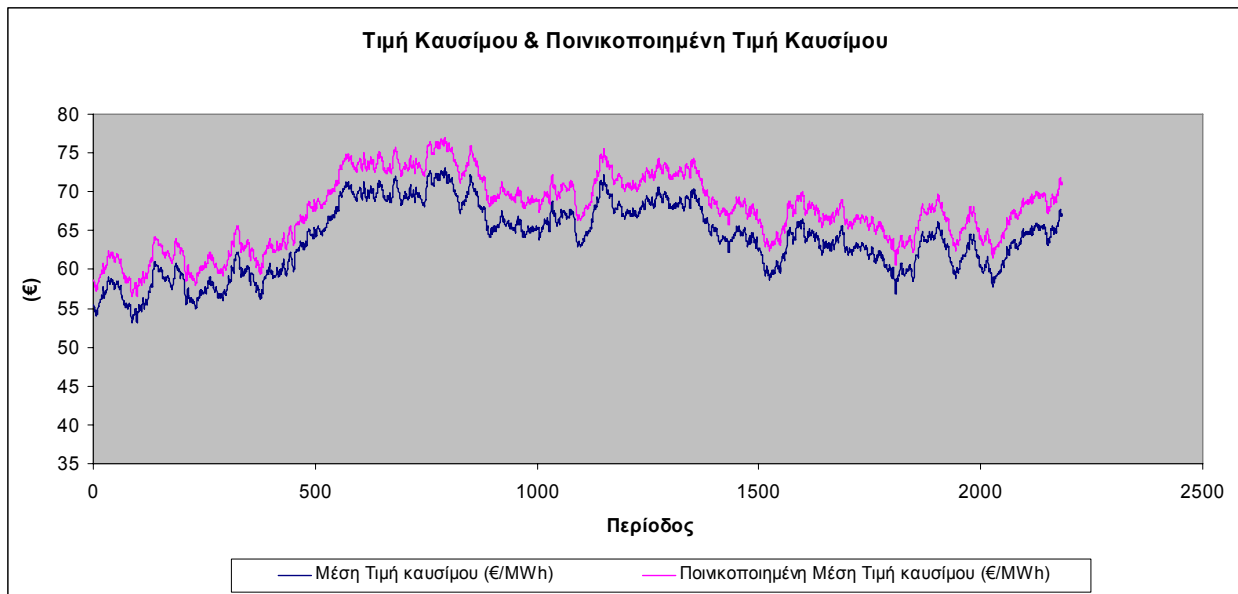
Γενικά δεδομένα προσομοίωσης

- Αριθμός σεναρίων: 20
- Αριθμός εβδομάδων στην σχεδιαστικά περίοδο: 52
- Αριθμός περιόδων στην ημέρα: 6

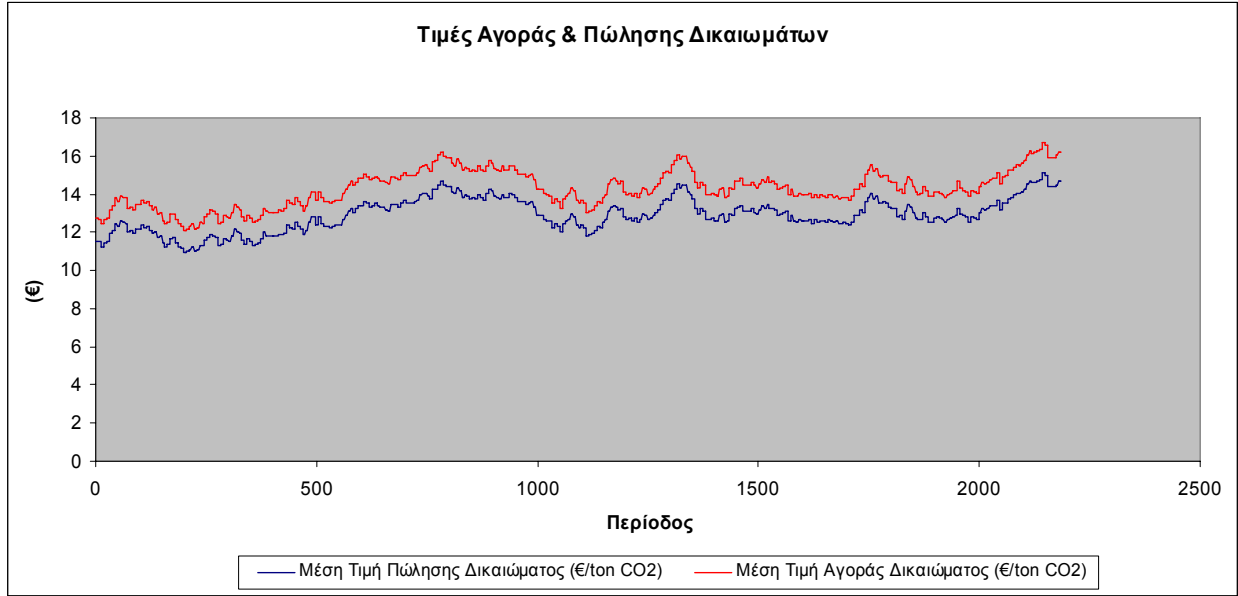
7.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Καθώς οι πίνακες των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης είναι πολύ μεγάλοι προς παράθεση στην παρούσα εργασία, παρατίθενται μόνο τα διαγράμματα -7.1- έως -7.5-, και οι πίνακες των αποτελεσμάτων περιέχονται στο συνοδευτικό cd.

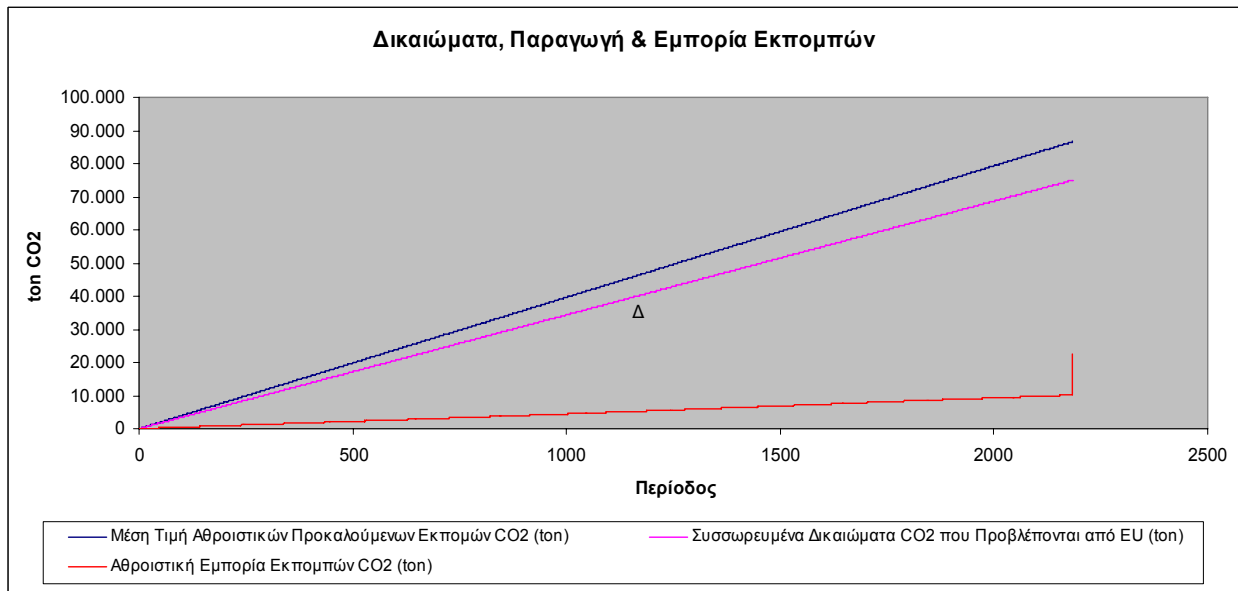
Στα διαγράμματα -7.1- & -7.2- παρουσιάζονται οι μεταβολές της τιμής και της ποινικοποιημένης τιμής καυσίμου, καθώς και των τιμών αγοράς και πώλησης δικαιωμάτων κατά την διάρκεια του χρόνου. Σημειώνεται ότι το noise των καυσίμων λαμβάνει την τιμή 2 κατά την διάρκεια της προσομοίωσης, ενώ το noise των δικαιωμάτων την τιμή 1, γεγονός που οδηγεί σε μεγαλύτερη μεταβλητότητα των τιμών καυσίμου όπως παρουσιάζεται και στα διαγράμματα.



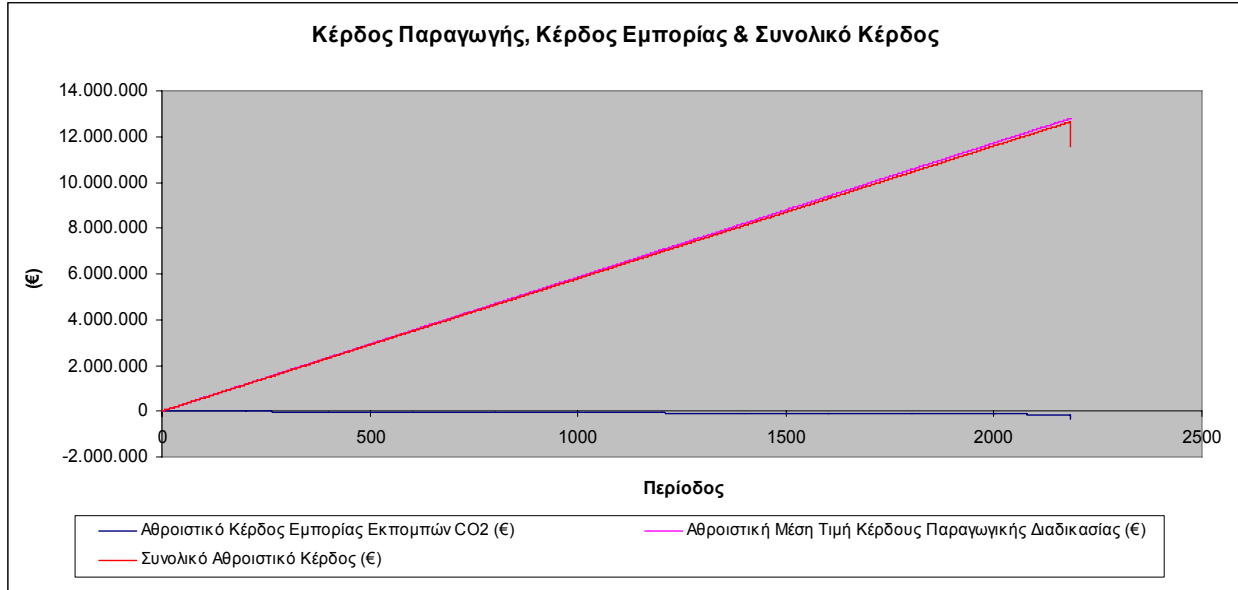
Διάγραμμα -7.1- Τιμή καυσίμου & ποινικοποιημένη τιμή καυσίμου



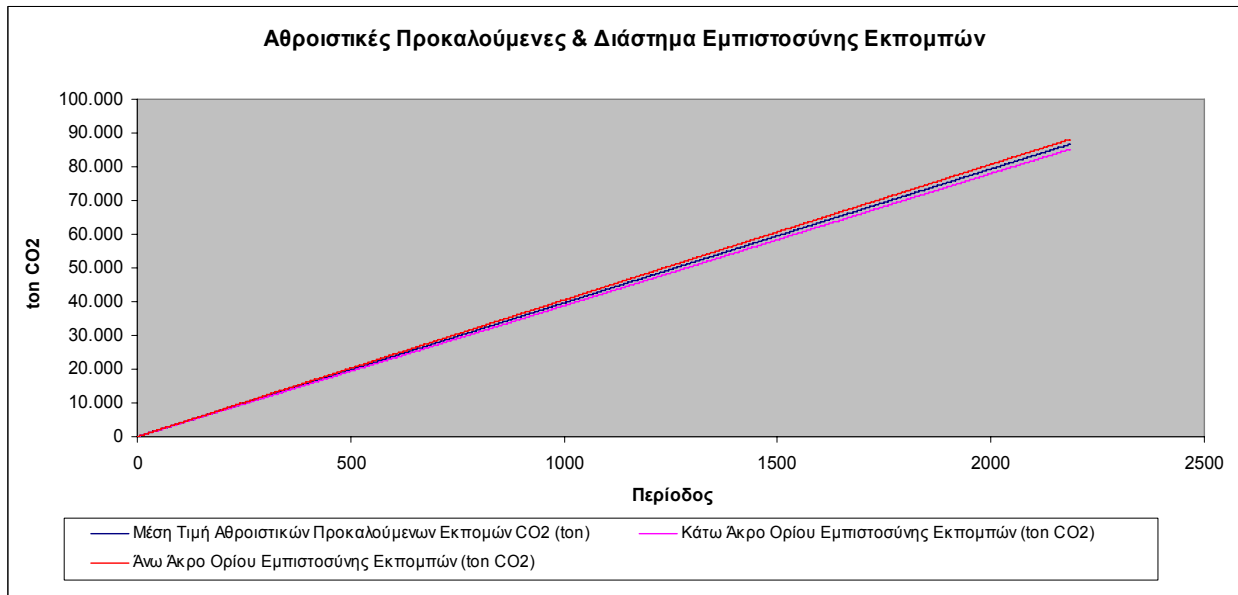
Διάγραμμα -7.2- Τιμές αγοράς & πώλησης δικαιωμάτων



Διάγραμμα -7.3- Συσσωρευμένα δικαιώματα, παραγωγή και εμπορία εκπομπών



Διάγραμμα -7.4- Κέρδος παραγωγής, εμπορίας & συνολικό κέρδος



Διάγραμμα -7.5- Αθροιστικές προκαλούμενες εκπομπές, άνω & κάτω άκρο διαστήματος εμπιστοσύνης εκπομπών

Στο διάγραμμα -7.3- παρουσιάζονται οι αθροιστικές προκαλούμενες εκπομπές της μονάδας συμπαραγωγής σε αντιπαραβολή με τα συσσωρευμένα δικαιώματα, όπως αυτά καθορίζονται από το ETS, με τον συνδυασμό τους να οδηγεί στον υπολογισμό της εμπορίας των εκπομπών. Το κατακόρυφο ευθύγραμμο τμήμα στην τελευταία περίοδο, εξηγείται από το γεγονός ότι η εμπορία κατά την τελευταία περίοδο πρέπει να είναι πολύ πιο ακριβής σε σχέση με τις προηγούμενες περιόδους, και να προσεγγίσει όσο το δυνατόν περισσότερο τον καθορισμένο στόχο.

Αντίστοιχα, στο διάγραμμα -7.4- παρουσιάζονται τα κέρδη παραγωγής και εμπορίας εκπομπών, καθώς και το συνολικό κέρδος. Αρχικά, παρατηρείται ότι το κέρδος παραγωγής (12.790.552,320€) είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της εμπορίας (-348469,068€), καθώς οι τιμές πώλησης ηλεκτρικής (της τάξεως των 50€) και θερμικής ενέργειας (της τάξεως των 30€) είναι κατά πολύ μεγαλύτερες σε σχέση με την τιμή των δικαιωμάτων (της τάξεως των 15€), και, επιπλέον, η εμπορία εκπομπών αφορά σημαντικά μικρότερες ποσότητες δικαιωμάτων σε σχέση με τις παραγόμενες MWh. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς ο καθορισμένος στόχος εκπομπών (75.000 ton CO₂) είναι μικρότερος σε σχέση με τις προκαλούμενες εκπομπές (86618,271 ton CO₂), οπότε η εγκατάσταση θα πρέπει να προχωρήσει σε αγορά δικαιωμάτων, το κέρδος εμπορίας λαμβάνει αρνητικές τιμές (δηλαδή πρόκειται για ζημιά). Το κατακόρυφο ευθύγραμμο τμήμα που παρατηρείται κατά την τελευταία περίοδο του συνολικού κόστους οφείλεται στην πληρωμή ποινών υπερβολικών εκπομπών από την εγκατάσταση, καθώς υπήρξε αδυναμία πλήρους συμμόρφωσης με τον στόχο.

Τέλος, στο διάγραμμα -7.5- παρουσιάζονται οι αθροιστικές προκαλούμενες εκπομπές σε συνδυασμό με το διάστημα εμπιστοσύνης των εκπομπών. Το διάστημα εμπιστοσύνης απεικονίζει το διάστημα κατά το οποίο μπορούν να μεταβληθούν οι προκαλούμενες εκπομπές, βάσει της οικονομικής λειτουργίας της μονάδας αλλά και της στάσης του αποφασίζοντα (DM), ο οποίος καθορίζει το εύρος του διαστήματος (παράγοντας εμπιστοσύνης 1, 2 ή 3). Το συνολικό ετήσιο κέρδος από την παραγωγή ενέργειας και την εμπορία των εκπομπών είναι 11.541.462,764€.

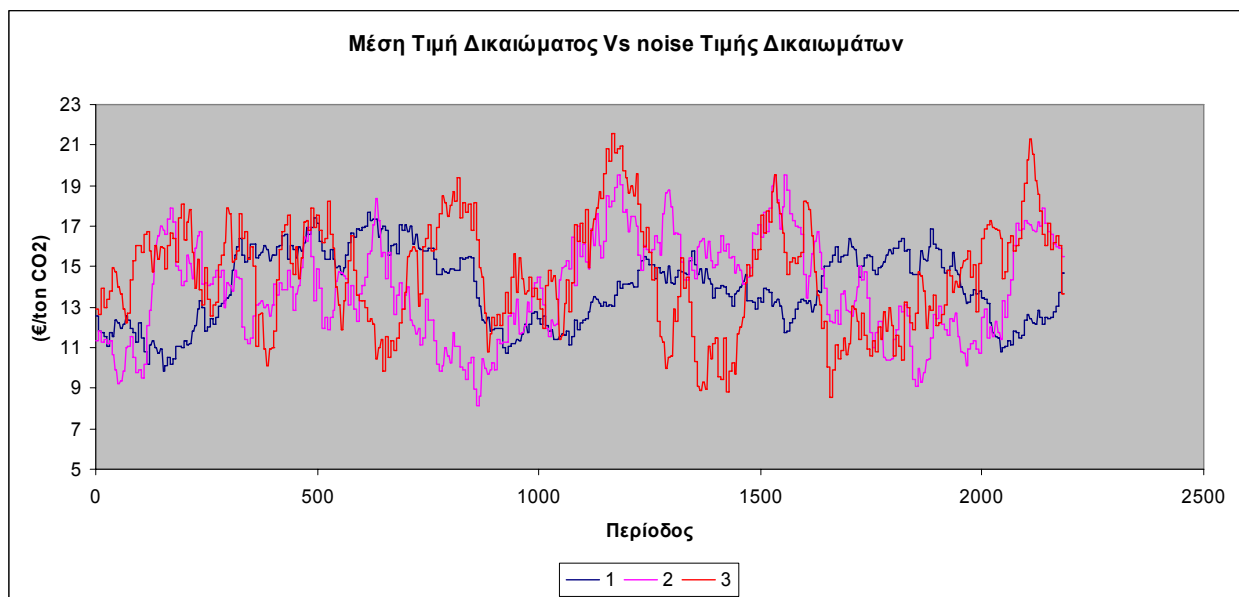
7.3 ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΩΝ (CASE STUDY)

Για την πλήρη κατανόηση των διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας και της εμπορίας των εκπομπών μελετήθηκαν διάφορες περιπτώσεις (case studies), μεταβάλλοντας ελεγχόμενα, μείζονος σημασίας, παραμέτρους.

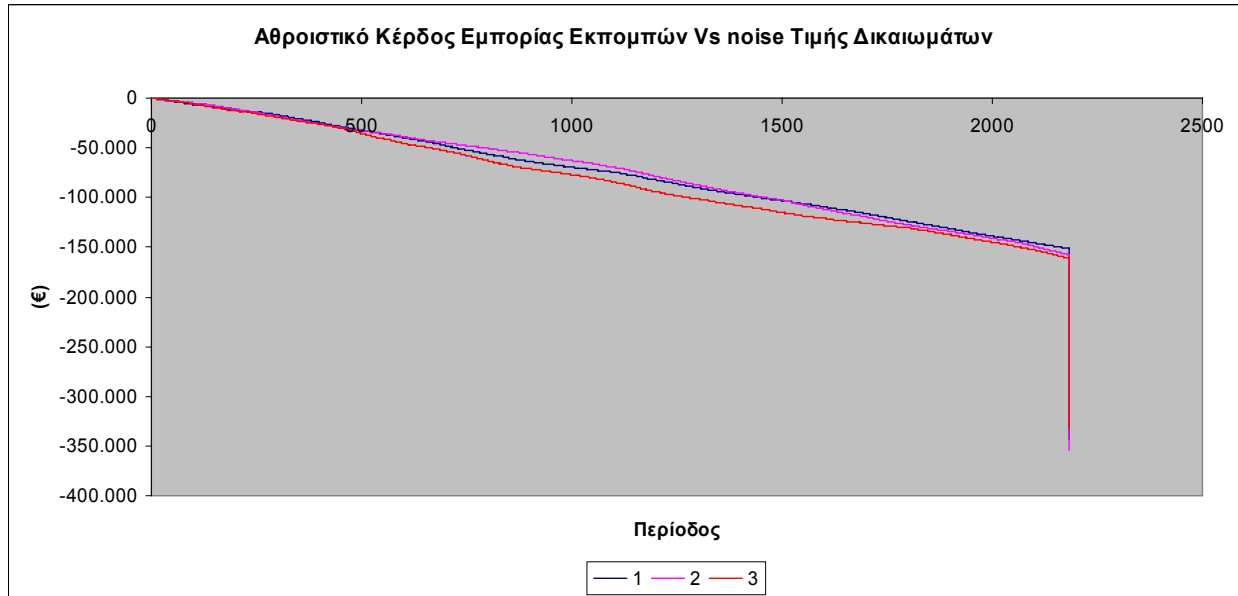
7.3.1 Case study 1 Μεταβολή noise τιμής δικαιωμάτων

Το noise της τιμής των δικαιωμάτων (παράμετρος της Brownian motion) επηρεάζει την μεταβλητότητα της τιμής τους και, κατά συνέπεια, τα κέρδη της εμπορίας των εκπομπών, οπότε κρίνεται σκόπιμη η μελέτη της μεταβολής των βασικών μεγεθών του προβλήματος καθώς η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται. Οι τιμές που παίρνει είναι 1, 2 και 3 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα -7.6- έως -7.8-.

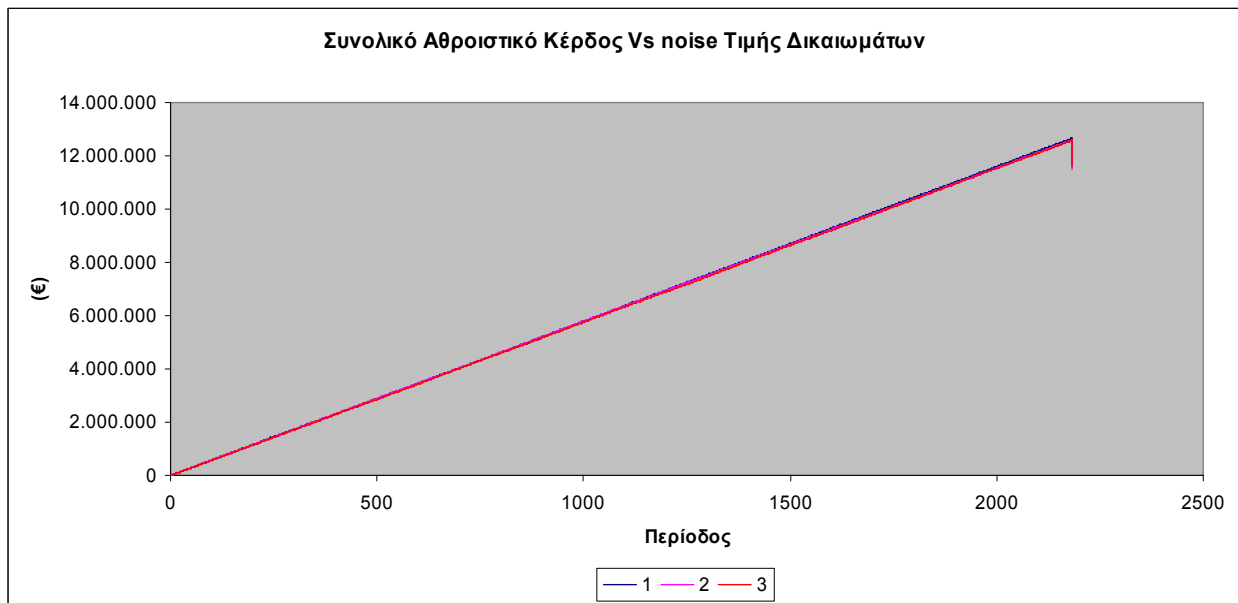
Οι μεταβολές που επιφέρει η μεταβολή του noise της τιμής των δικαιωμάτων στις συσσωρευμένες προκαλούμενες εκπομπές, στην εμπορία εκπομπών και στο κέρδος της παραγωγικής διαδικασίας είναι τόσο μικρές, ώστε δεν κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση των αντίστοιχων διαγραμμάτων. Παρόλα αυτά περιέχονται στο συνοδευτικό cd.



Διάγραμμα -7.6- Μέση τιμή δικαιώματος Vs noise τιμής δικαιωμάτων



Διάγραμμα -7.7- Αθροιστικό κέρδος εμπορίας εκπομπών Vs noise τιμής δικαιωμάτων

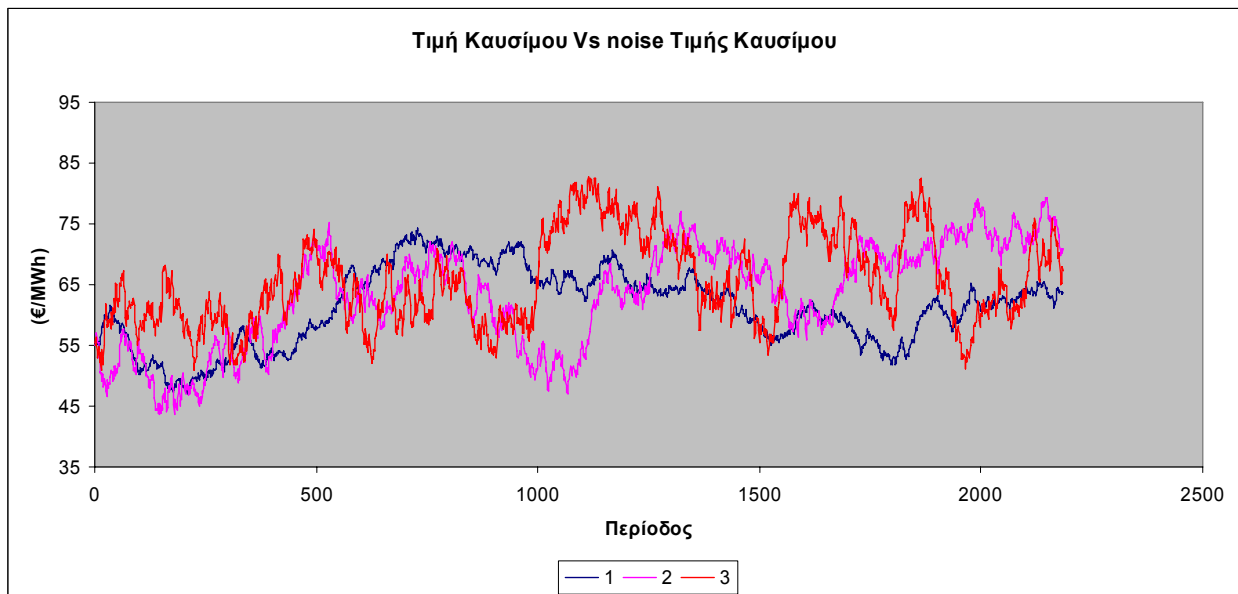


Διάγραμμα -7.8- Συνολικό αθροιστικό κέρδος Vs noise τιμής δικαιωμάτων

Το πρώτο συμπέρασμα από το διάγραμμα -7.6- είναι ότι όσο αυξάνεται το noise της τιμής των δικαιωμάτων, τόσο μεγαλύτερη μεταβλητότητα παρουσιάζει αυτή. Από την άλλη, η εμπορία των εκπομπών φαίνεται να επηρεάζεται, έστω και σε μικρό βαθμό, με τις μεταβολές να εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από τις προκαλούμενες εκπομπές και λιγότερο από τις τιμές των δικαιωμάτων, οι οποίες, παρά την μεταβλητότητα τους, δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους. Λαμβάνοντας υπ' όψιν το γεγονός ότι οι τιμές των δικαιωμάτων συγκλίνουν κατά την τελευταία περίοδο σε πολύ κοντινές τιμές για διαφορετικές τιμές του noise (διαφέρουν κατά περίπου 1€/ton CO₂) και, επιπλέον ότι τα τελικά ευθύγραμμα τμήματα επηρεάζονται κυρίως από τις ποινές υπερβολικών εκπομπών (60€/ton CO₂), είναι κατανοητές οι πολύ μικρές διαφορές στο κέρδος εμπορίας (διάγραμμα -7.7-). Ακριβώς, επειδή το κέρδος εμπορίας (περίπου 350.000€ ανάλογα με την περίπτωση) είναι πολύ μικρό σε σχέση με το κέρδος της παραγωγικής διαδικασίας (περίπου 12.800.000€ ανάλογα με την περίπτωση), οι μεταβολές που επιφέρουν οι διαφορετικές τιμές noise στο συνολικό κέρδος είναι ελάχιστες (περίπου 100.000€, διάγραμμα -7.8-).

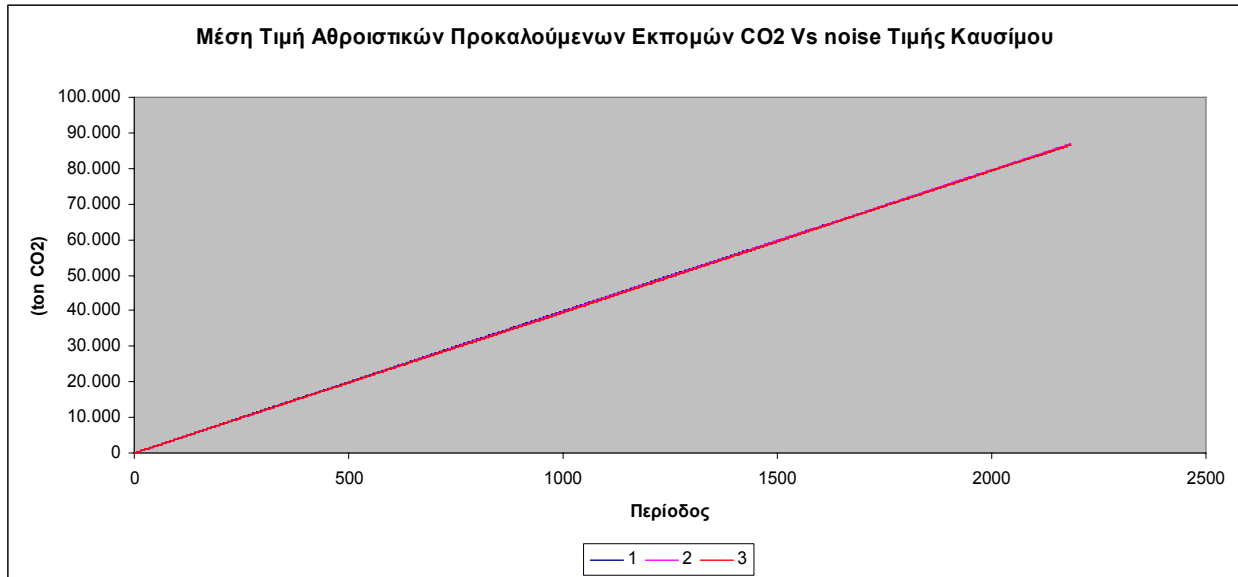
7.3.2 Case study 2 Μεταβολή noise τιμής καυσίμου

Το noise της τιμής των καυσίμων (παράμετρος της Brownian motion) επηρεάζει την μεταβλητότητα της τιμής τους και, κατά συνέπεια, το κόστος της παραγωγικής διαδικασίας, οπότε κρίνεται σκόπιμη η μελέτη της μεταβολής των βασικών μεγεθών του προβλήματος καθώς η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται. Οι τιμές που παίρνει είναι 1, 2 και 3 και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα -7.9- έως -7.14-.

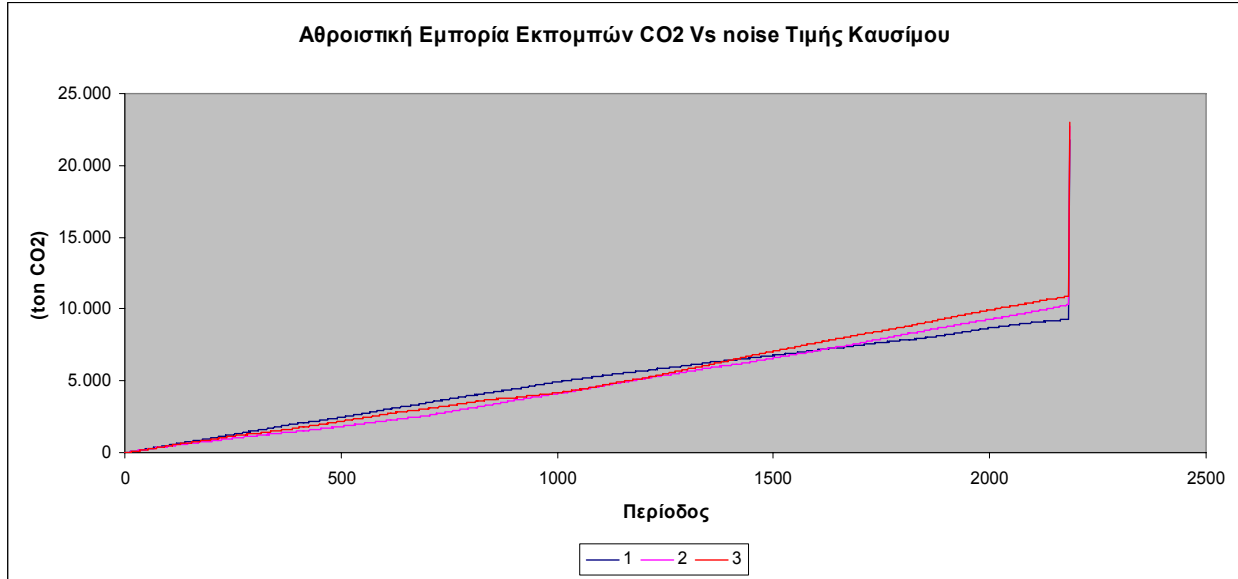


Διάγραμμα -7.9- Τιμή καυσίμου Vs noise τιμής καυσίμου

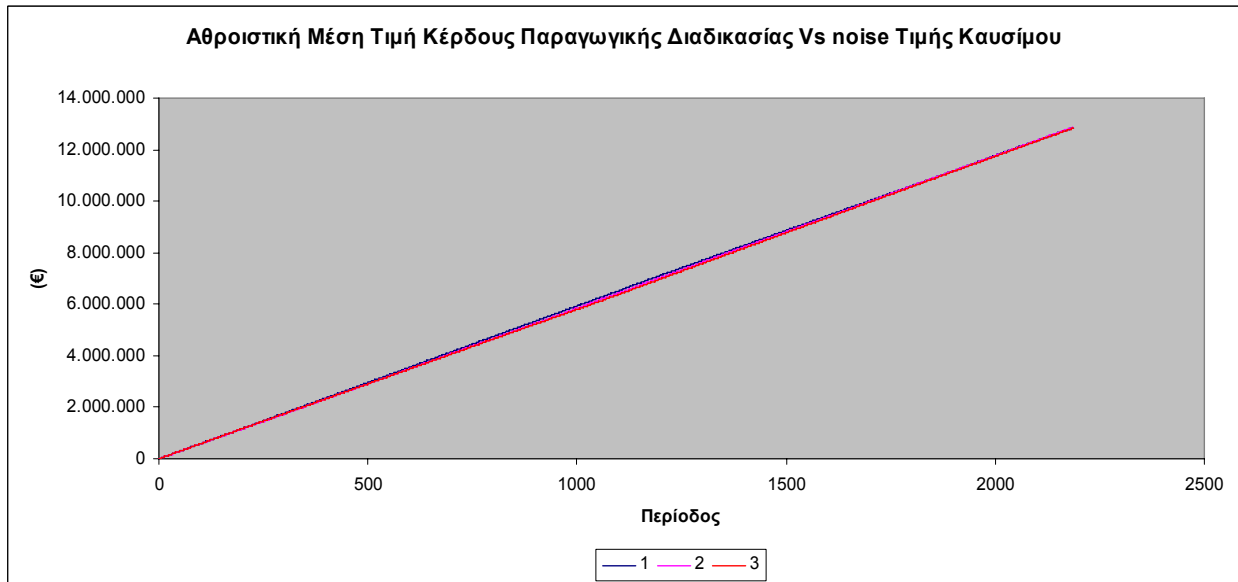
Στο διάγραμμα -7.9- είναι εμφανές ότι όσο αυξάνεται το noise της τιμής των καυσίμων, τόσο αυξάνεται και η μεταβλητότητα της τιμής τους. Καθώς τα διάφορα σενάρια κανονικοποιούνται μεταξύ τους, οι διαφορές στις αθροιστικές προκαλούμενες εκπομπές είναι μικρές και, πιθανότατα δεν μπορούν να παρατηρηθούν λόγω της κλίμακας του άξονα (βλ. διάγραμμα -7.10-). Αντίθετα, παρά τις τυχαίες μεταβολές της εμπορίας των εκπομπών κατά την διάρκεια της περιόδου μελέτης, οι οποίες οφείλονται στην στοχαστικότητα του μοντέλου, το τελικό επίπεδο της εμπορίας των εκπομπών είναι μεγαλύτερο όσο αυξάνεται το noise, καθώς αυξάνονται οι προκαλούμενες εκπομπές, έστω και σε μικρό βαθμό (βλ. διάγραμμα -7.11-).



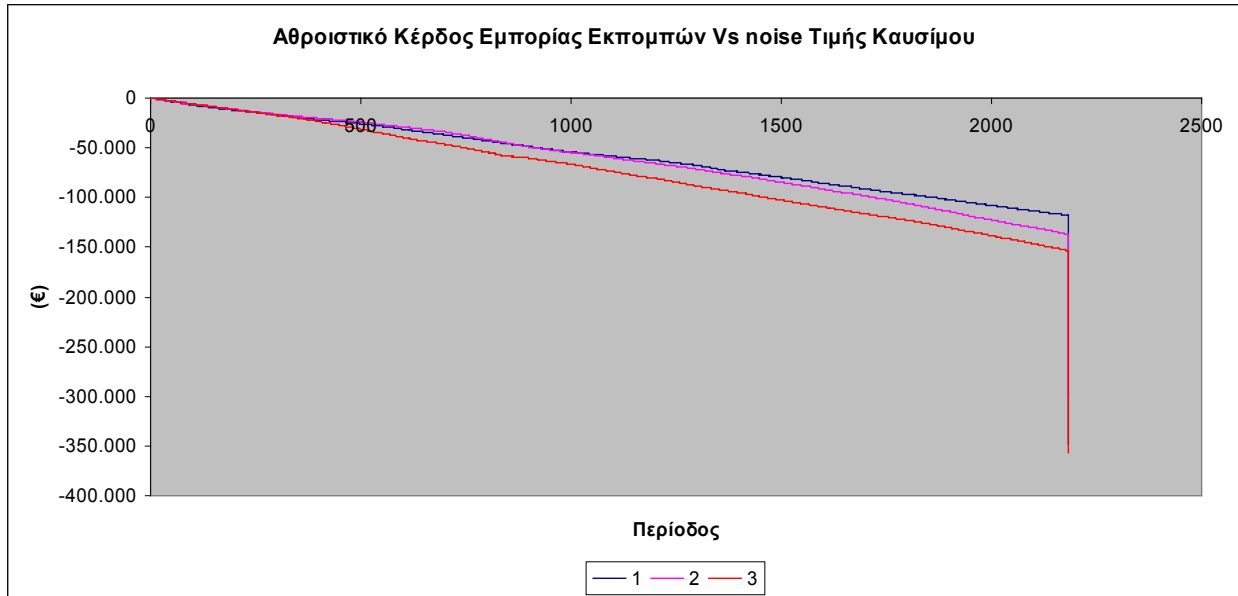
Διάγραμμα -7.10- Μέση τιμή αθροιστικών προκαλούμενων εκπομπών Vs noise τιμής καυσίμου



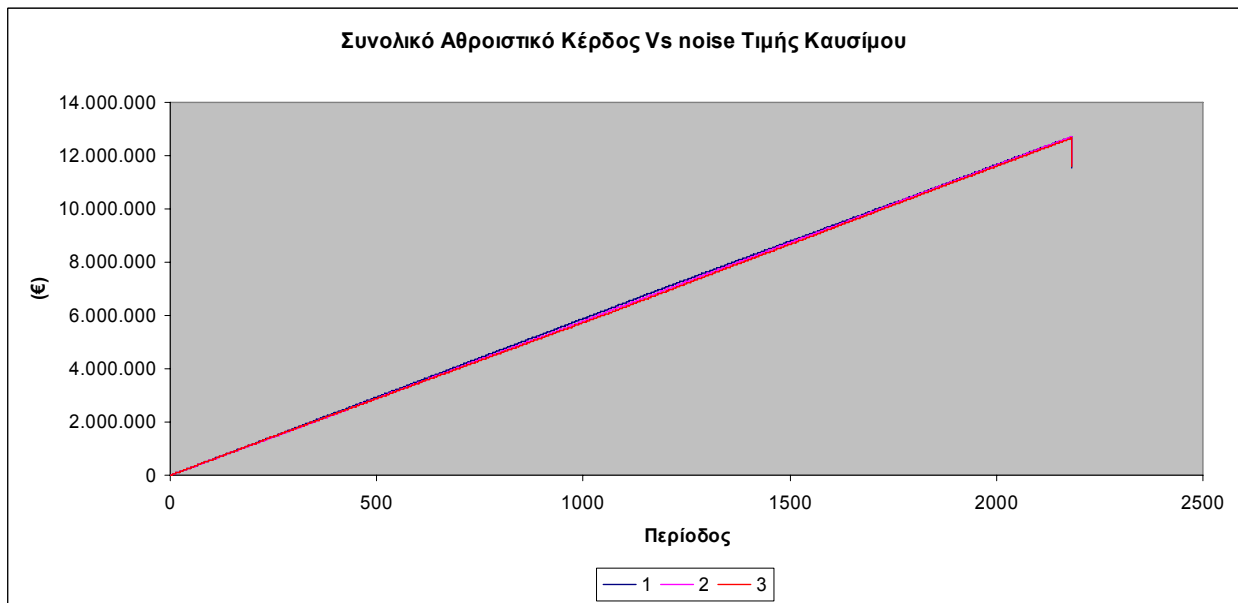
Διάγραμμα -7.11- Αθροιστική εμπορία εκπομπών CO₂ Vs noise τιμής καυσίμου



Διάγραμμα -7.12- Αθροιστική μέση τιμή κέρδους παραγωγικής διαδικασίας Vs noise τιμής καυσίμου



Διάγραμμα -7.13- Αθροιστικό κέρδος εμπορίας εκπομπών Vs noise τιμής καυσίμου

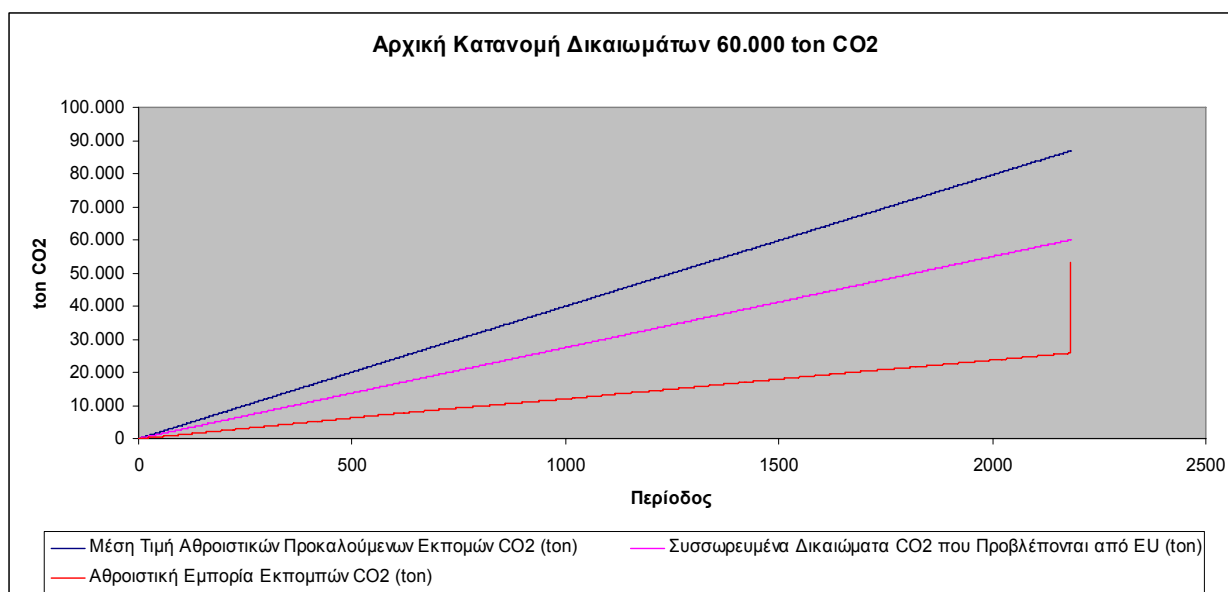


Διάγραμμα -7.14- Συνολικό αθροιστικό κέρδος Vs noise τιμής καυσίμου

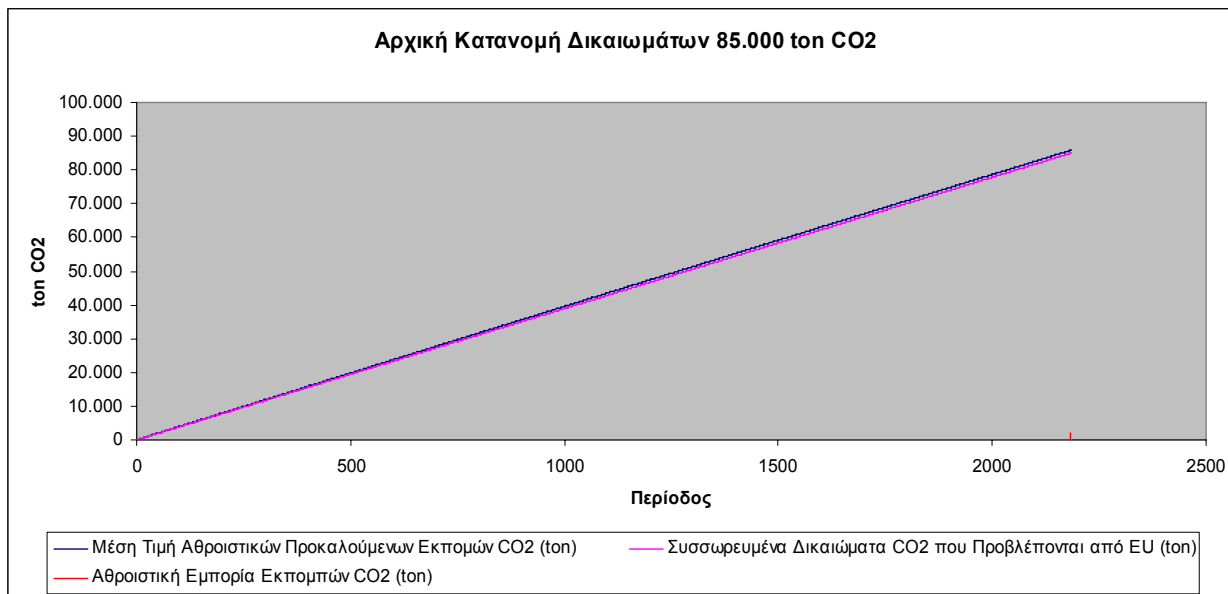
Αντίστοιχα, πολύ μικρές είναι οι διαφορές που παρουσιάζονται και στο κέρδος της παραγωγικής διαδικασίας, καθώς παρά την μεταβλητότητα της τιμής των καυσίμων, κατά μέσο όρο αυτή βρίσκεται στα ίδια επίπεδα (απλά μεταβάλλεται με πιο ταχείς ρυθμούς) και η βελτιστοποίηση της παραγωγής κυμαίνεται στα ίδια περίπου επίπεδα (βλ. διάγραμμα -7.12-). Το αθροιστικό κέρδος εμπορίας εκπομπών παρουσιάζει μικρές αυξήσεις όσο αυξάνεται το ποίσε της τιμής, και είναι πιο εμφανές στο διάγραμμα -7.13- λόγω της κλίμακας του άξονα. Τέλος, το συνολικό κέρδος μεταβάλλεται ελάχιστα (λιγότερο από 100.000€) κυρίως επειδή το αντίστοιχο κέρδος παραγωγής (της τάξης των 12.800.000€) είναι κατά πολύ μεγαλύτερο από το κέρδος εμπορίας (της τάξης των 350.000€), όπως φαίνεται και στο διάγραμμα -7.14-.

7.3.3 Case study 3 Μεταβολή αρχικής κατανομής δικαιωμάτων

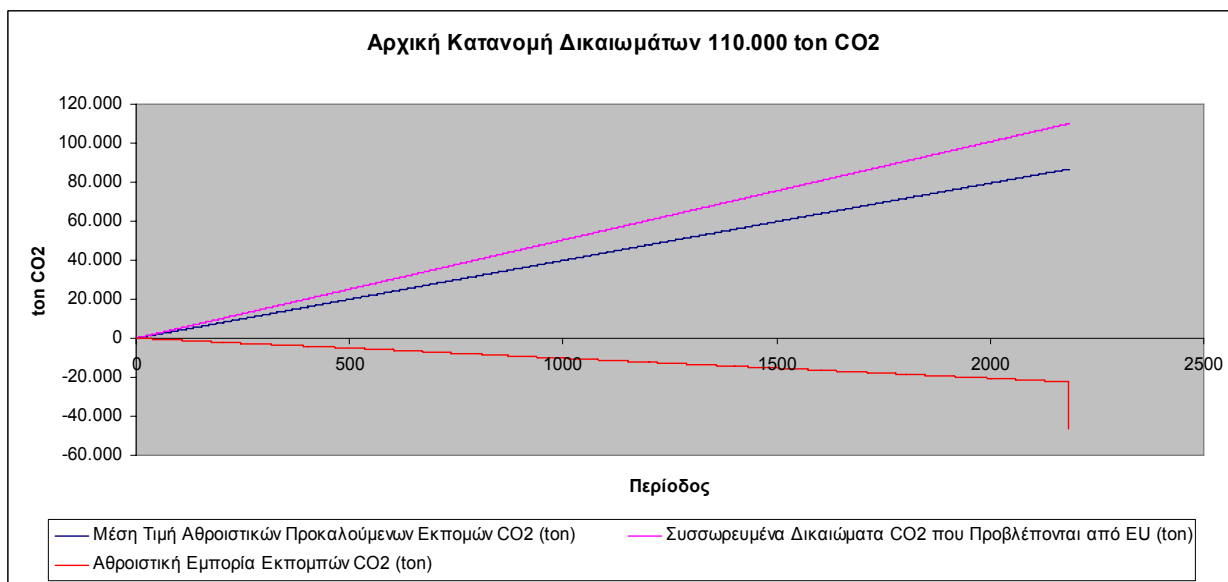
Η αρχική κατανομή των δικαιωμάτων επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τον σχεδιασμό της παραγωγής της εγκατάστασης, μέσω της προσαρμογής του στόχου των εκπομπών, καθώς και την εμπορία εκπομπών και το επαγόμενα κέρδη, οπότε κρίνεται σκόπιμη η μελέτη της μεταβολής των βασικών μεγεθών του προβλήματος καθώς η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται. Οι τιμές που παίρνει είναι 60.000 ton CO₂, 85.000 ton CO₂ και 110.000 ton CO₂ και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα -7.15- έως -7.20-.



Διάγραμμα -7.15- Προκαλούμενες εκπομπές, εμπορία εκπομπών και συσσωρευμένα δικαιώματα για αρχική κατανομή δικαιωμάτων 60.000 ton CO₂

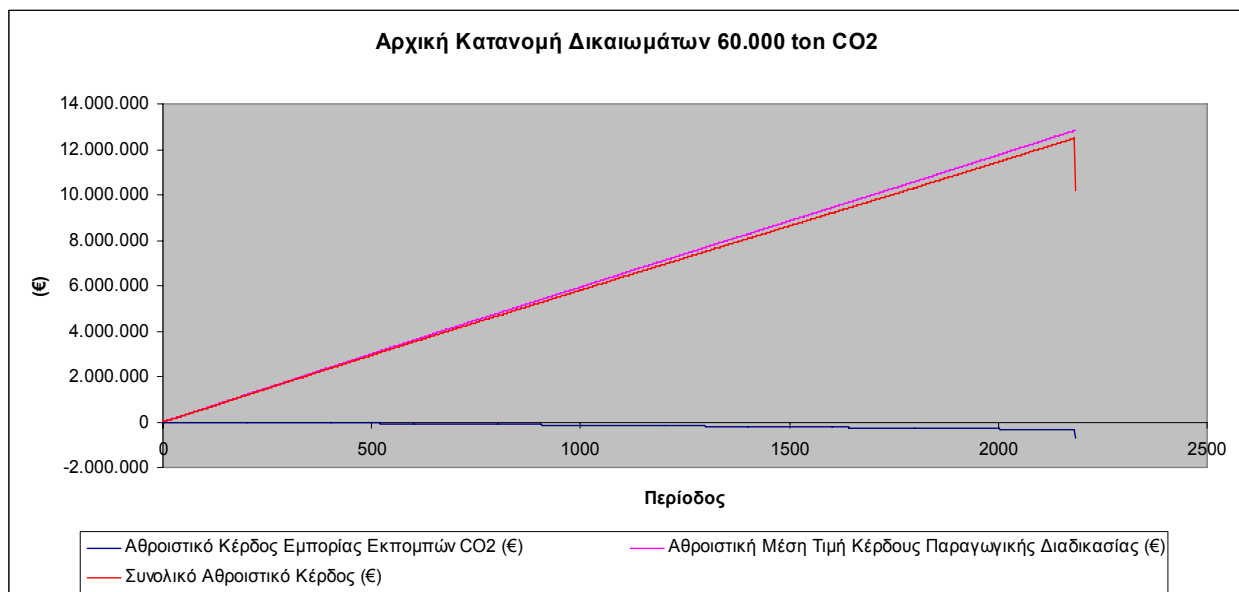


Διάγραμμα -7.16- Προκαλούμενες εκπομπές, εμπορία εκπομπών και συσσωρευμένα δικαιώματα για αρχική κατανομή δικαιωμάτων 85.000 ton CO₂

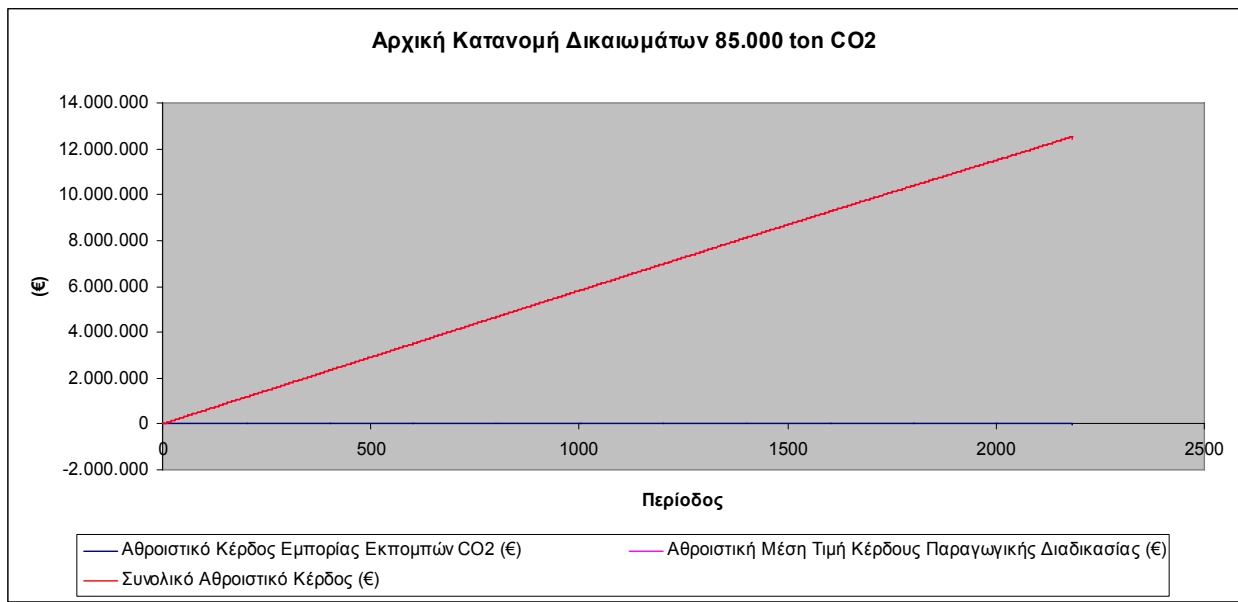


Διάγραμμα -7.17- Προκαλούμενες εκπομπές, εμπορία εκπομπών και συσσωρευμένα δικαιώματα για αρχική κατανομή δικαιωμάτων 110.000 ton CO₂

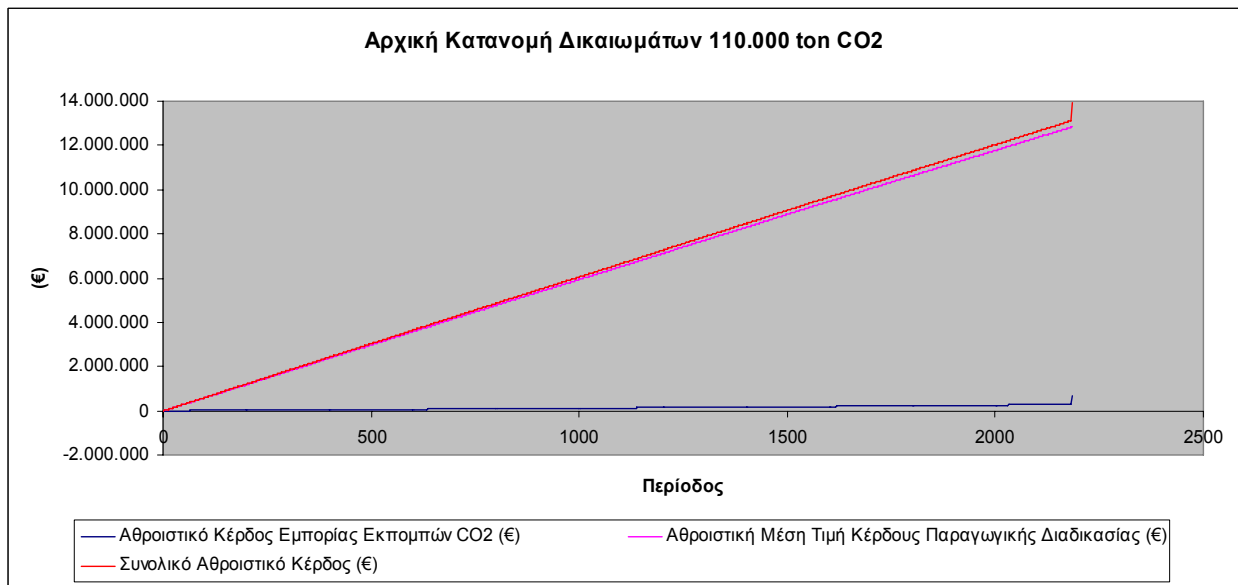
Η αρχική κατανομή δικαιωμάτων δεν επηρεάζει τις προκαλούμενες εκπομπές (περίπου 86.000 ton CO₂), αλλά επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την εμπορία των εκπομπών. Όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα -7.15- έως -7.17- η αρχική κατανομή καθορίζει το αν θα υπάρξει πώληση ή αγορά δικαιωμάτων. Λαμβάνοντας υπ' όψιν το γεγονός ότι οι προκαλούμενες εκπομπές είναι περίπου 86.000, είναι λογικό όταν η αρχική κατανομή είναι 60.000 ton CO₂ να είναι απαραίτητη η αγορά δικαιωμάτων για την συμμόρφωση με τον στόχο εκπομπών, όταν η αρχική κατανομή είναι 85.000 ton CO₂ να μην απαιτείται καμία αγοραπωλησία, καθώς είναι εφικτή η προσαρμογή της παραγωγής στον συγκεκριμένο στόχο και όταν η αρχική κατανομή είναι 110.000 ton CO₂ να είναι δυνατή η πώληση οποιασδήποτε περίσσειας δικαιωμάτων. Τα παραπάνω έχουν άμεσο αντίκτυπο και στα κέρδη της εγκατάστασης. Το κέρδος της παραγωγικής διαδικασίας δεν μεταβάλλεται, σε αντίθεση με το κέρδος της εμπορίας των δικαιωμάτων. Συγκεκριμένα, όταν η αρχική κατανομή είναι 60.000 ton CO₂, το κέρδος παίρνει αρνητικές τιμές (-690.712,578€) καθώς απαιτείται αγορά δικαιωμάτων, όταν η αρχική κατανομή είναι 85.000 ton CO₂ η εμπορία είναι ελάχιστη (-36.358,335€) και λαμβάνει αρνητική τιμή λόγω των ποινών υπερβολικών εκπομπών για τους περίπου 1.000 υπερβαίνοντες ton CO₂ και όταν είναι 110.000 ton CO₂ λαμβάνει θετικές λόγω της πώλησης της περίσσειας δικαιωμάτων (701.910,270€). Παρόμοια μεταβολή παρατηρείται και στο συνολικό κέρδος μόνο που η ζημιά της τελευταίας περιόδου, στην περίπτωση αγοράς είναι μεγαλύτερη από τον αντίστοιχο κέρδος στην περίπτωση πώλησης, λόγω των ποινών υπερβολικών εκπομπών (βλ. διαγράμματα -7.18- έως -7.20-).



Διάγραμμα -7.18- Κέρδος παραγωγής, εμπορίας και συνολικό κέρδος για αρχική κατανομή δικαιωμάτων 60.000 ton CO₂



Διάγραμμα -7.19- Κέρδος παραγωγής, εμπορίας και συνολικό κέρδος για αρχική κατανομή δικαιωμάτων 85.000 ton CO₂

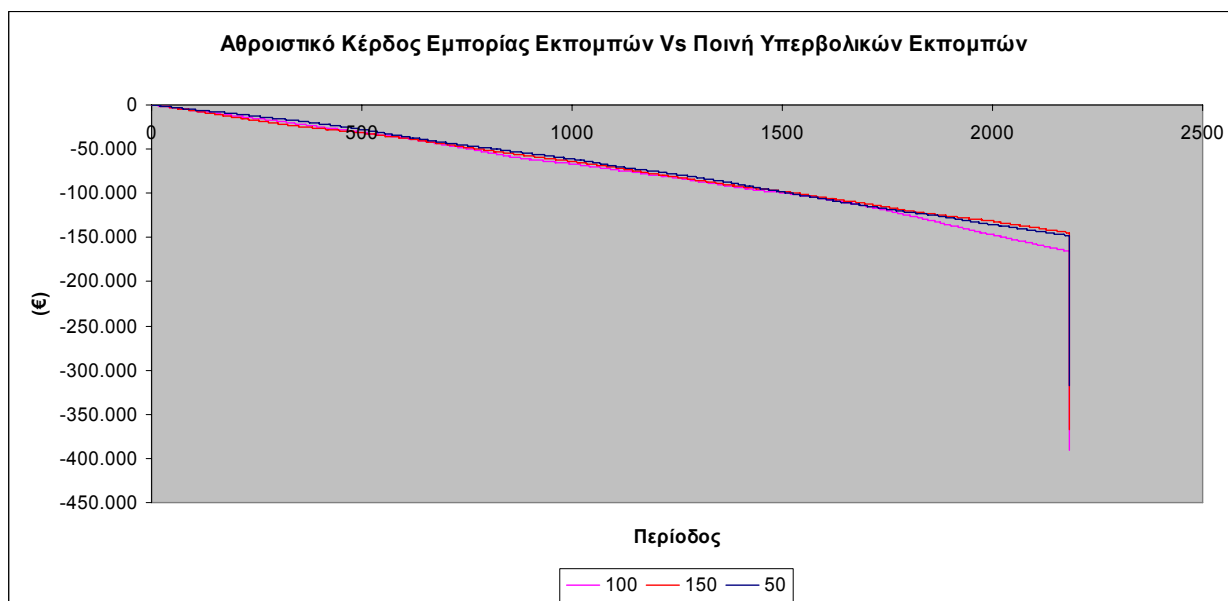


Διάγραμμα -7.20- Κέρδος παραγωγής, εμπορίας και συνολικό κέρδος για αρχική κατανομή δικαιωμάτων 110.000 ton CO₂

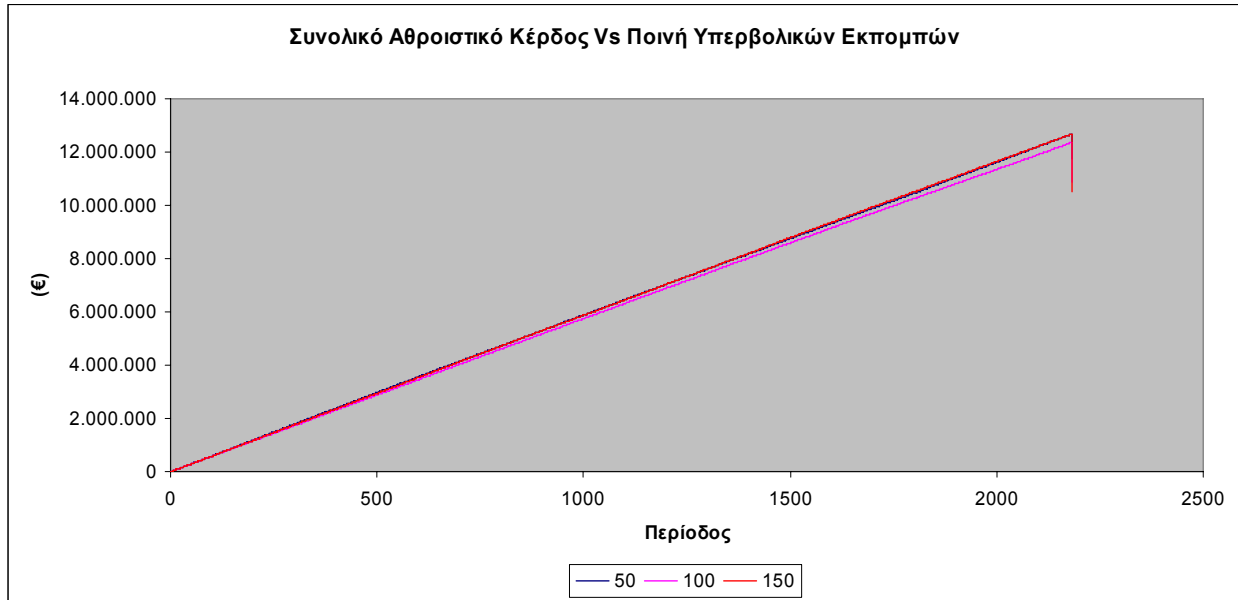
7.3.4 Case study 4 Μεταβολή ποινής υπερβολικών εκπομπών

Η ποινή υπερβολικών εκπομπών επηρεάζει τα κόστη εμπορίας της τελευταίας περιόδου στην περίπτωση που υπάρχει υπέρβαση του προκαθορισμένου στόχου και αγορά δικαιωμάτων, οπότε κρίνεται σκόπιμη η μελέτη της μεταβολής των βασικών μεγεθών του προβλήματος καθώς η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται. Οι τιμές που παίρνει είναι 50 €/ton CO₂, 100 €/ton CO₂ και 150 €/ton CO₂ και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα -7.21- έως -7.22-.

Καθ' όλες τις περιόδους πλην της τελευταίας, το κέρδος εμπορίας εκπομπών και το συνολικό κέρδος δεν επηρεάζονται από την μεταβολή της ποινής υπερβολικών εκπομπών και όποιες πολύ μικρές μεταβολές παρατηρούνται οφείλονται αποκλειστικά στις επιμέρους ιδιαιτερότητες της κάθε προσομοίωσης. Κατά την τελευταία περίοδο και με την προϋπόθεση ότι απαιτείται αγορά δικαιωμάτων (όπως συμβαίνει στην παρούσα προσομοίωση) όσο μεγαλύτερη είναι η ποινή, τόσο μεγαλύτερο είναι και το κόστος εμπορίας (βλ. διαγράμματα -7.21- & -7.22-).



Διάγραμμα -7.21- Αθροιστικό κέρδος εμπορίας εκπομπών Vs ποινή υπερβολικών εκπομπών



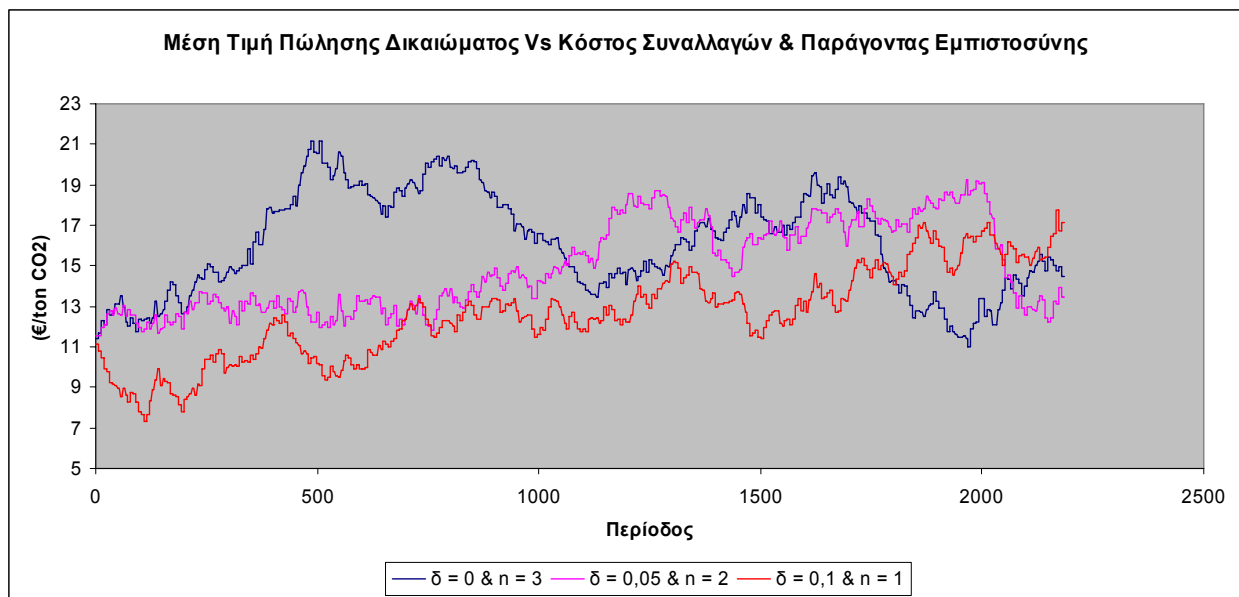
Διάγραμμα -7.22- Συνολικό αθροιστικό κέρδος Vs ποινή υπερβολικών εκπομπών

7.3.5 Case study 5 Μεταβολή κόστους συναλλαγών & παράγοντα εμπιστοσύνης

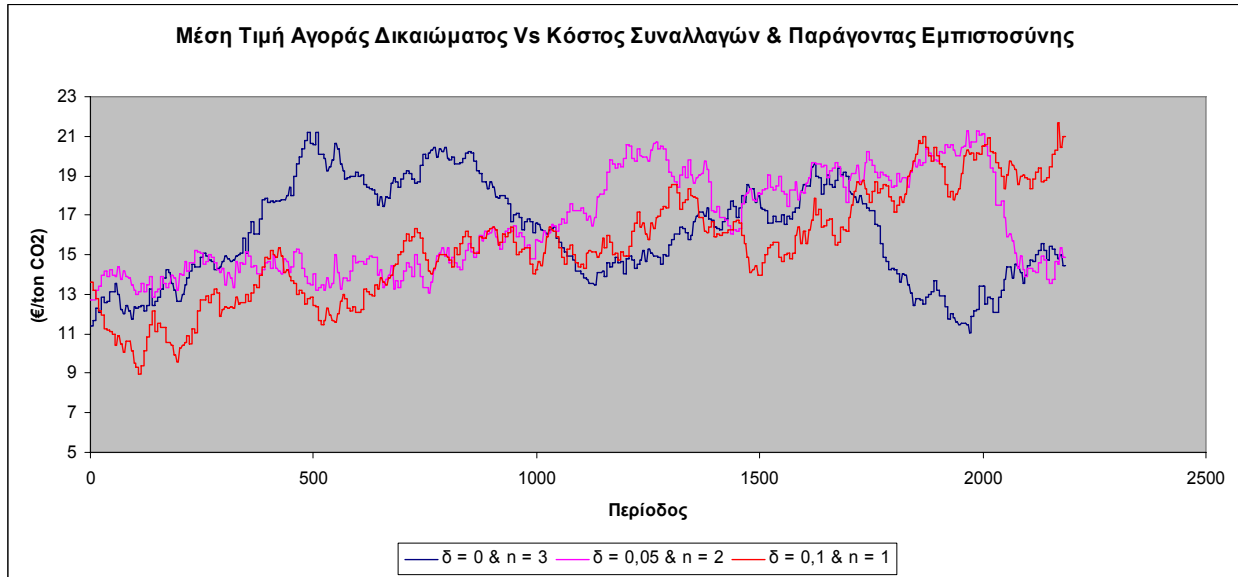
Το κόστος των συναλλαγών επηρεάζει την τιμή αγοράς και πώλησης των δικαιωμάτων (και τις διαφοροποιεί από την γενική τιμή του δικαιώματος), ενώ ο παράγοντας εμπιστοσύνης επηρεάζει το διάστημα εμπιστοσύνης σχετικά βάσει του οποίου γίνεται ο υπολογισμός του προσαρμοσμένου στόχου, οπότε κρίνεται σκόπιμη η μελέτη της μεταβολής των βασικών μεγεθών του προβλήματος καθώς η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται. Πρέπει να σημειωθεί ότι η μεταβολή των δύο μεγεθών είναι αντίστροφη, καθώς όσο μειώνεται το διάστημα εμπιστοσύνης, απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στους οποιουδήποτε υπολογισμούς με άμεση συνέπεια το αυξημένο κόστος συναλλαγών. Οι συνδυασμένες τιμές για τα δύο μεγέθη είναι $\delta=0$ & $n=3$, $\delta=0,05$ & $n=2$ και $\delta=0,1$ & $n=1$ και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα -7.23- έως -7.26-.

Στα διαγράμματα -7.23- & -7.24- παρουσιάζονται οι μεταβολές στην την τιμή αγοράς και πώλησης των δικαιωμάτων, καθώς μεταβάλλεται το κόστος των συναλλαγών. Όσο αυτό αυξάνεται, παρατηρείται αύξηση της τιμής αγοράς των δικαιωμάτων και μείωση της τιμής πώλησης τους. Στην συγκεκριμένη προσομοίωση η εγκατάσταση έχει περισσότερες προκαλούμενες εκπομπές σε σχέση με τον καθορισμένο στόχο, οπότε λαμβάνει χώρα αγορά δικαιωμάτων. Είναι, λοιπόν αναμενόμενο όσο αυξάνεται το κόστος των συναλλαγών, να αυξάνεται αντίστοιχα και η τιμή αγοράς, γεγονός που οδηγεί σε αυξημένα κόστη εμπορίας. Από την άλλη, όσο αυξάνεται ο παράγοντας

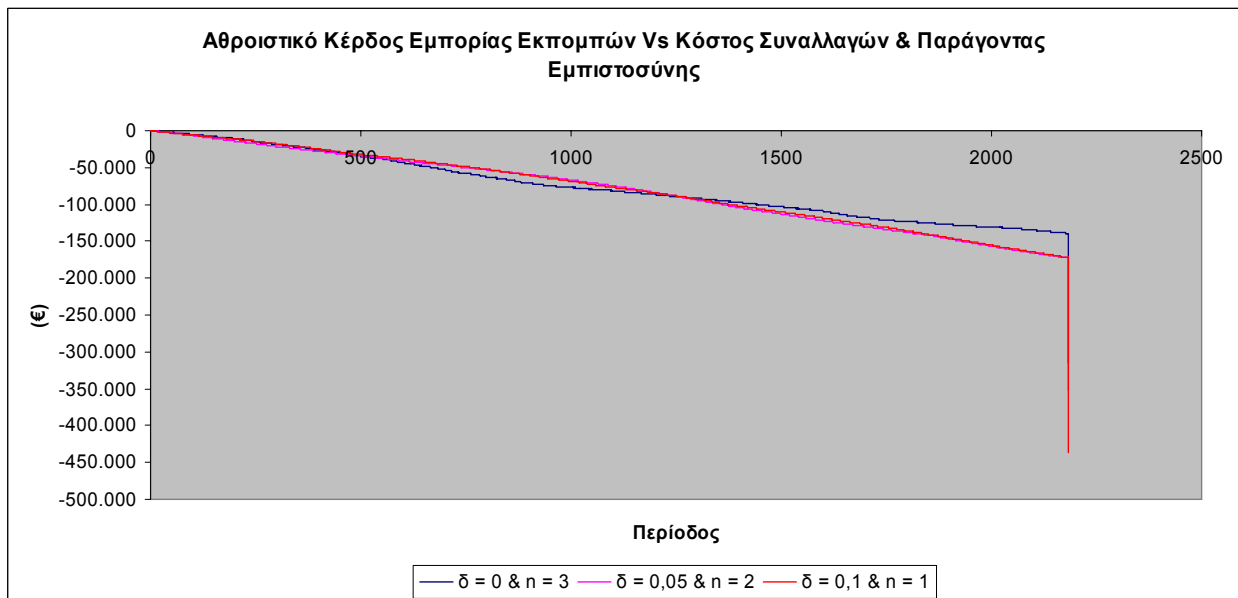
εμπιστοσύνης, τόσο αυξάνεται το διάστημα εμπιστοσύνης και υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα να προσεγγιστεί ο στόχος και να χρειαστεί αγορά μικρότερης ποσότητας δικαιωμάτων. Έτσι, παρατηρούνται αρκετές διακυμάνσεις στο κόστος εμπορίας, ανάλογα με τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κάθε προσομοίωσης, αλλά σε, γενικές γραμμές, με την αύξηση του κόστους των συναλλαγών και την μείωση του παράγοντα εμπιστοσύνης έχουμε και αντίστοιχη αύξηση του κόστους (βλ. διάγραμμα -7.25-). Η αυξητική αυτή τάση είναι περισσότερο εμφανής στο συνολικό κόστος (βλ. διάγραμμα -7.26-).



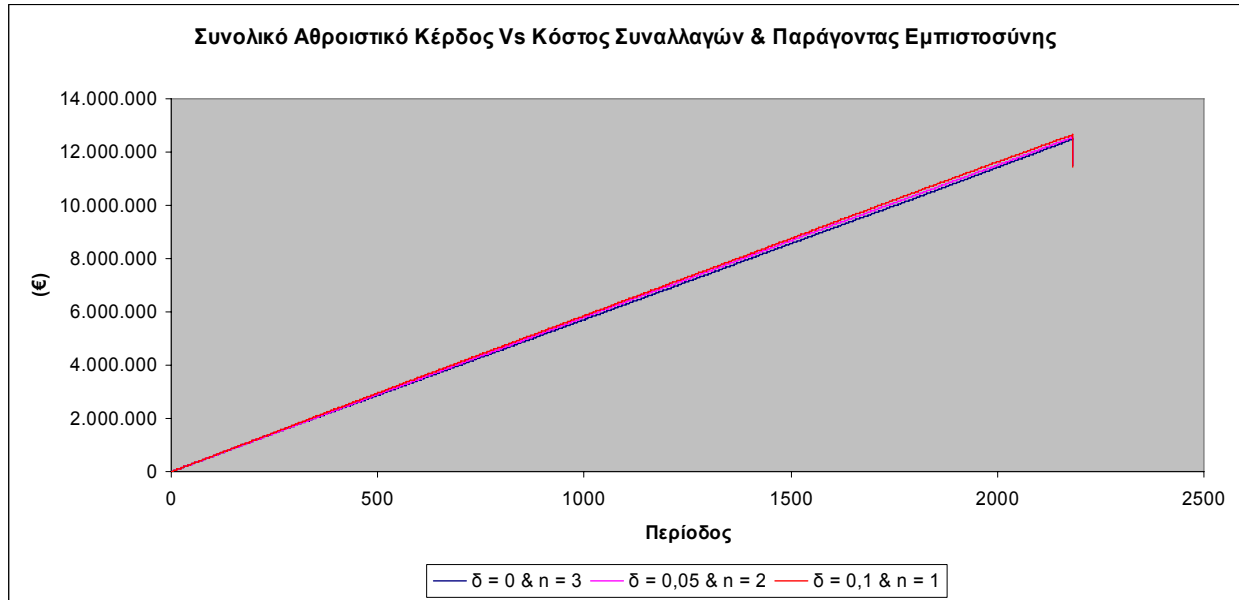
Διάγραμμα -7.23- Μέση τιμή πώλησης δικαιώματος Vs κόστος συναλλαγών & παράγοντας εμπιστοσύνης



Διάγραμμα -7.24- Μέση τιμή αγοράς δικαιώματος Vs κόστος συναλλαγών & παράγοντας εμπιστοσύνης



Διάγραμμα -7.25- Αθροιστικό κέρδος εμπορίας εκπομπών Vs κόστος συναλλαγών & παράγοντας εμπιστοσύνης



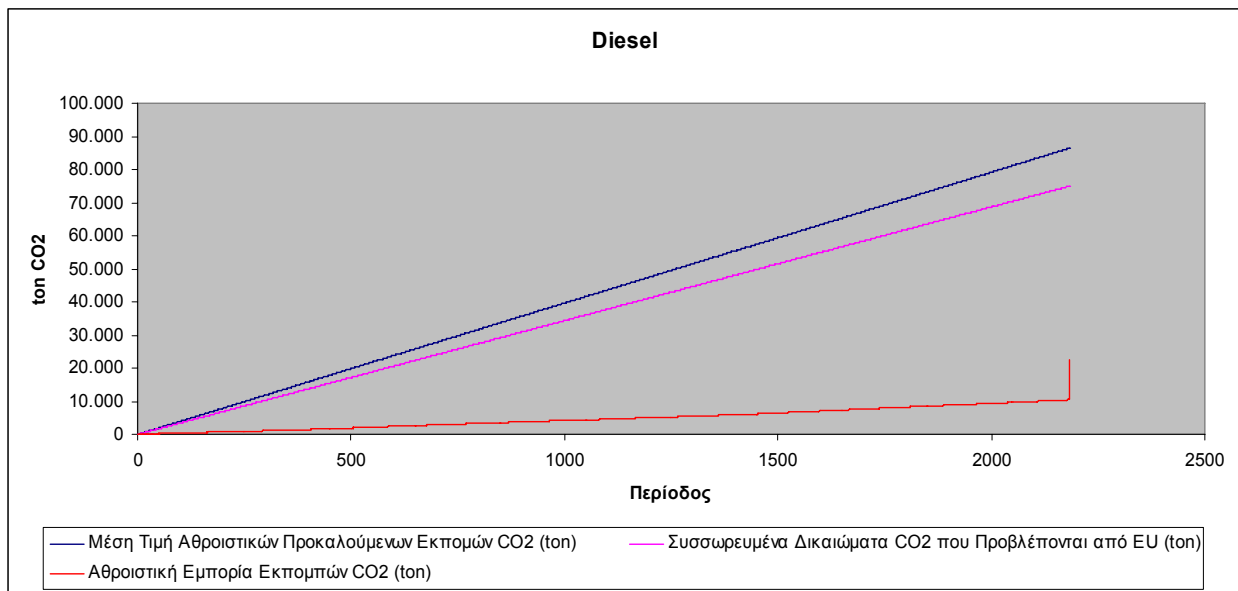
Διάγραμμα -7.26- Συνολικό αθροιστικό κέρδος Vs κόστος συναλλαγών & παράγοντας εμπιστοσύνης

7.3.6 Case study 6 Μεταβολή καυσίμου

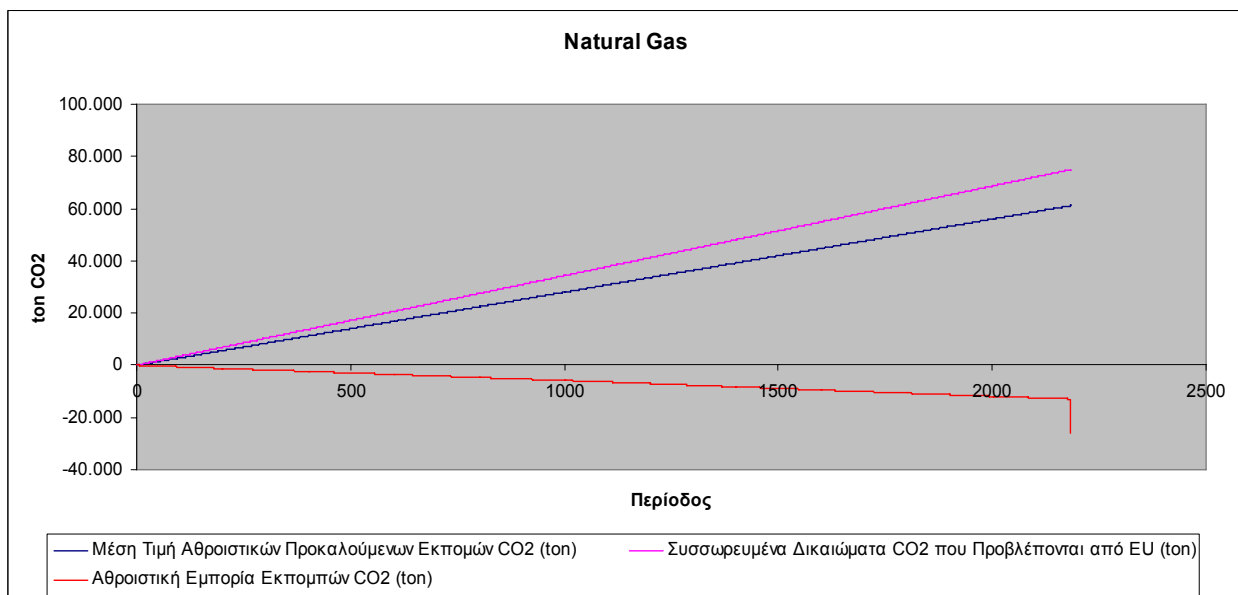
Το καύσιμο που χρησιμοποιεί η εγκατάσταση για την παραγωγή ενέργειας είναι, ίσως, η πιο σημαντική παράμετρος λειτουργίας. Με την μεταβολή του καυσίμου αλλάζει και το κόστος καυσίμου, το οποίο επηρεάζει σε πολύ μεγάλο βαθμό την διαδικασία της παραγωγής και τις ειδικές εκπομπές, οι οποίες επηρεάζουν και την παραγωγή, αλλά και την εμπορία των δικαιωμάτων, οπότε κρίνεται σκόπιμη η μελέτη της μεταβολής των βασικών μεγεθών του προβλήματος καθώς η παράμετρος αυτή μεταβάλλεται. Τα καύσιμα που θα εξεταστούν είναι το diesel με κόστος 55€/MWh και ειδικές εκπομπές 0,264 ton CO₂/MWh και το φυσικό αέριο (natural gas) με κόστος 36€/MWh και ειδικές εκπομπές 0,185 ton CO₂/MWh και τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στα διαγράμματα - 7.27- έως -7.35-.

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση ο στόχος εκπομπών έχει τεθεί 75.000 ton CO₂ και οι συνολικές προκαλούμενες εκπομπές για καύσιμο Diesel είναι 86.493,969 ton CO₂, ενώ για καύσιμο φυσικό αέριο είναι 61.167,74344 ton CO₂. Είναι, λοιπόν, ευθύς εξ αρχής εμφανές ότι με την αλλαγή του καυσίμου σε φυσικό αέριο οι συνολικές εκπομπές βρίσκονται κάτω από τον καθορισμένο στόχο και υπάρχει δυνατότητα πώλησης δικαιωμάτων (βλ. διαγράμματα -7.27- & -7.28-). Επιπλέον, με την μετάβαση από την αγορά στην πώληση αποφεύγεται η πληρωμή των ποινών υπερβολικών εκπομπών, γεγονός που απεικονίζεται και στο ευθύγραμμο τμήμα του συνολικού κόστους και του

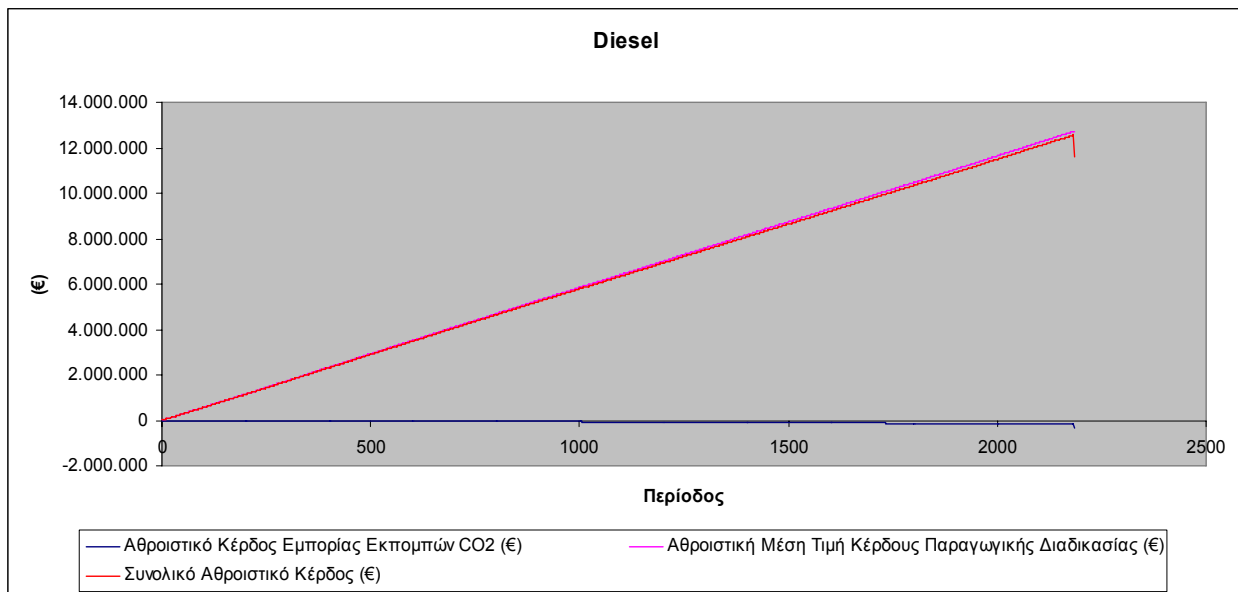
κόστους εμπορίας εκπομπών, όπου φαίνεται αρκετά μεγαλύτερο στην περίπτωση της αγοράς σε σχέση με αυτή της πώλησης (βλ. διαγράμματα -7.29- & -7.30-).



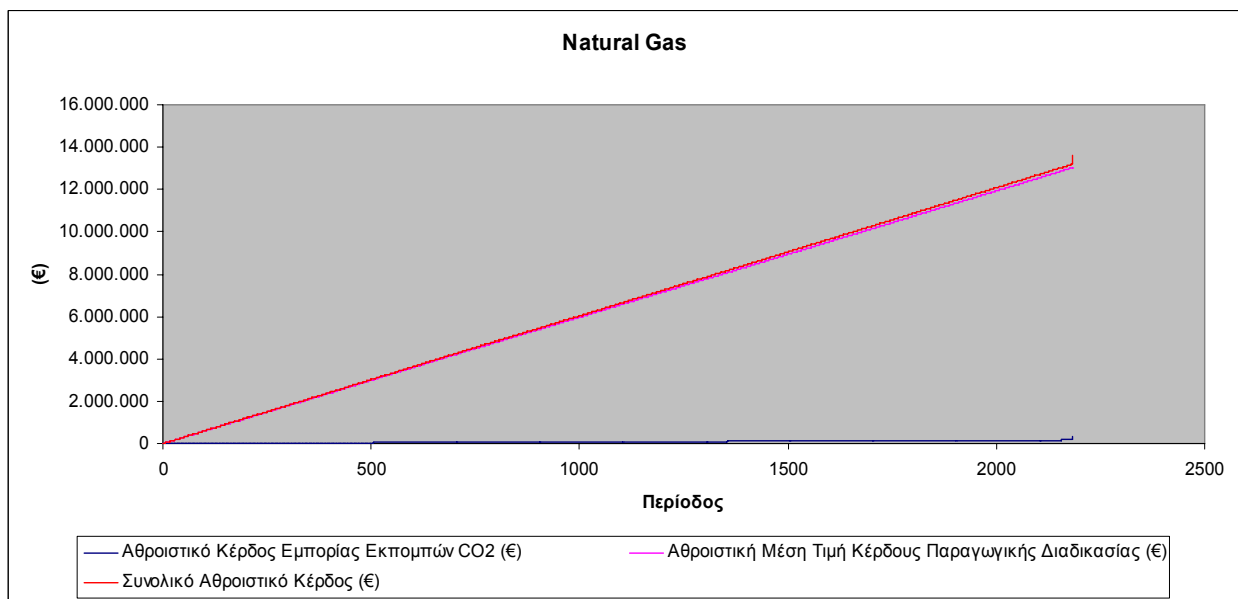
Διάγραμμα -7.27- Προκαλούμενες εκπομπές, εμπορία εκπομπών και συσσωρευμένα δικαιώματα για καύσιμο Diesel



Διάγραμμα -7.28- Προκαλούμενες εκπομπές, εμπορία εκπομπών και συσσωρευμένα δικαιώματα για καύσιμο φυσικό αέριο

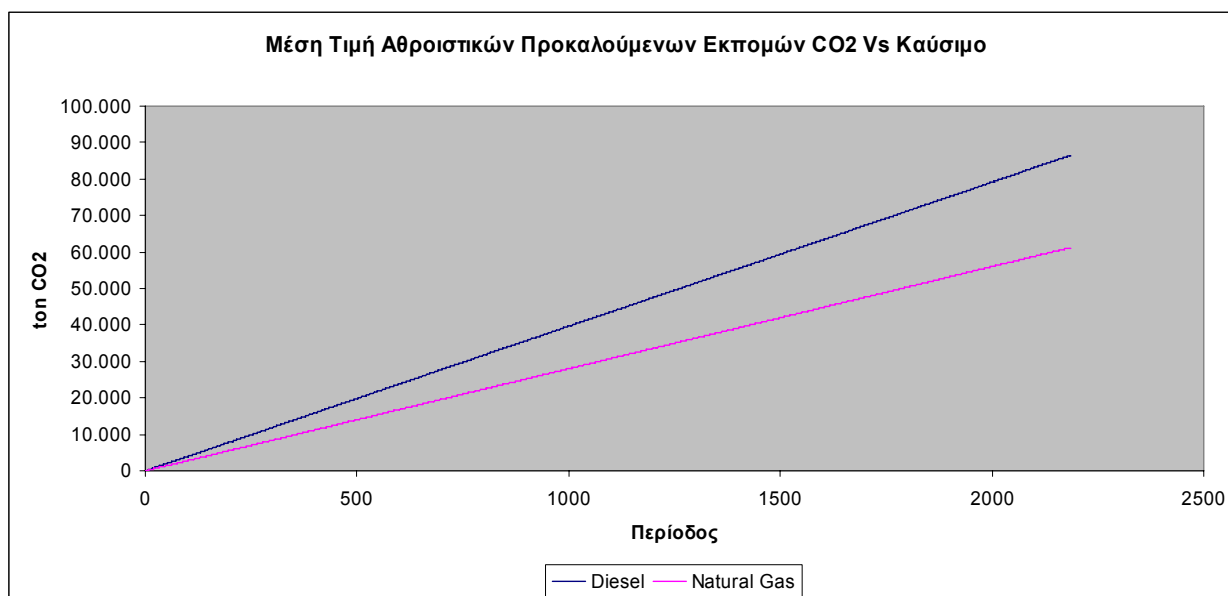


Διάγραμμα -7.29- Κέρδος παραγωγής, εμπορίας και συνολικό κέρδος για καύσιμο Diesel

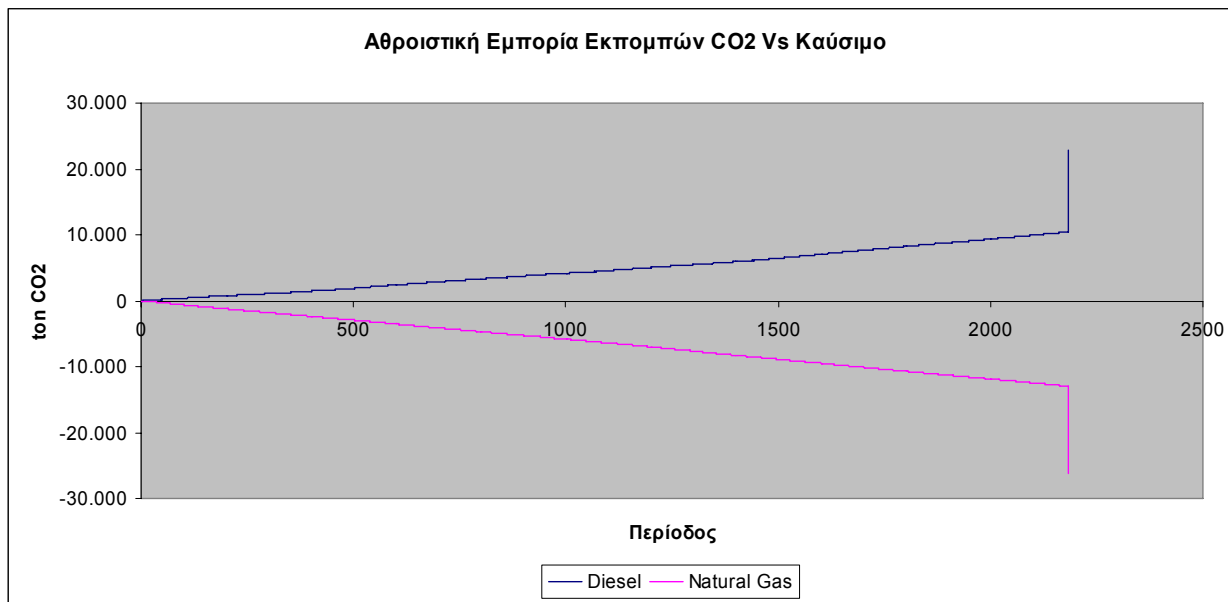


Διάγραμμα -7.30- Κέρδος παραγωγής, εμπορίας και συνολικό κέρδος για καύσιμο φυσικό αέριο

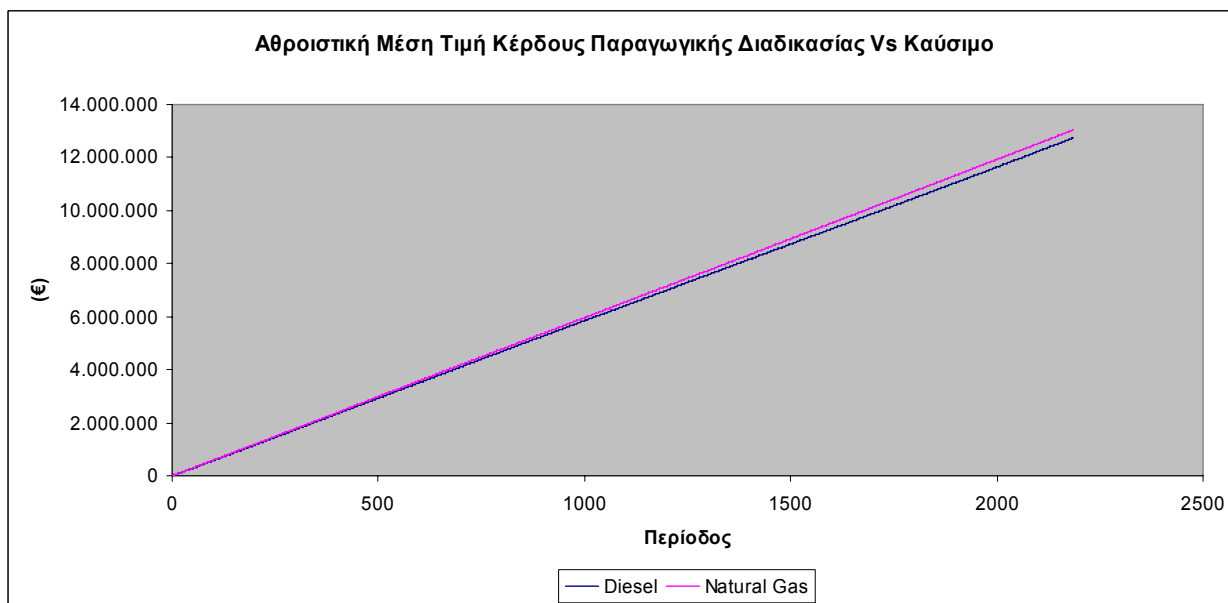
Τα παραπάνω γίνονται πιο εμφανή στα διαγράμματα που ακολουθούν και παρατίθενται τα αντίστοιχα μεγέθη συγκριτικά για τα δύο καύσιμα. Στο διάγραμμα -7.31- είναι ξεκάθαρη η διαφορά των προκαλούμενων εκπομπών των δύο καυσίμων. Στο διάγραμμα -7.32- απεικονίζεται η εμπορία των δικαιωμάτων, η οποία είναι θετική για το diesel (έχουμε αγορά δικαιωμάτων) και αρνητική για το φυσικό αέριο (έχουμε πώληση δικαιωμάτων). Κατά την τελευταία περίοδο, υπάρχει μεγαλύτερη πώληση σε σχέση με την αγορά καθώς τότε υπάρχουν περίπου 14.000 ton CO₂ διαθέσιμοι προς πώληση και μόνο 11.000 αντίστοιχα για αγορά. Το κέρδος της παραγωγικής διαδικασίας παρουσιάζει σχετικά μικρή μεταβολή και λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές για το φυσικό αέριο, εξαιτίας του σημαντικά μικρότερου κόστους του (βλ. διάγραμμα -7.33-). Παρόμοια μορφή με το διάγραμμα εμπορίας δικαιωμάτων έχει και το αντίστοιχο του κέρδους εμπορίας (βλ. διάγραμμα -7.34-). Τέλος το συνολικό κέρδος παρατηρείται πολύ μεγαλύτερο στην περίπτωση του φυσικού αερίου (11.573.622,394 € για καύσιμο diesel και 13.585.730,005 € για το φυσικό αέριο), εξαιτίας και του μεγαλύτερου κέρδους παραγωγής αλλά και των κερδών από την πώληση των δικαιωμάτων (βλ. διάγραμμα -7.35-).



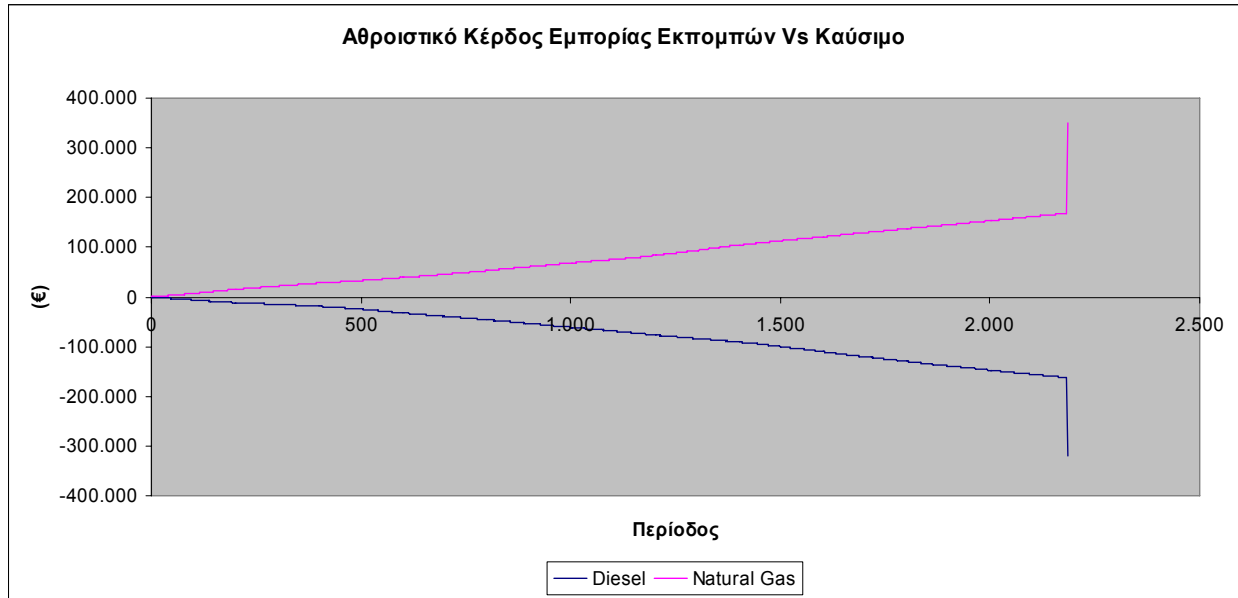
Διάγραμμα -7.31- Μέση τιμή αθροιστικών προκαλούμενων εκπομπών Vs καύσιμο



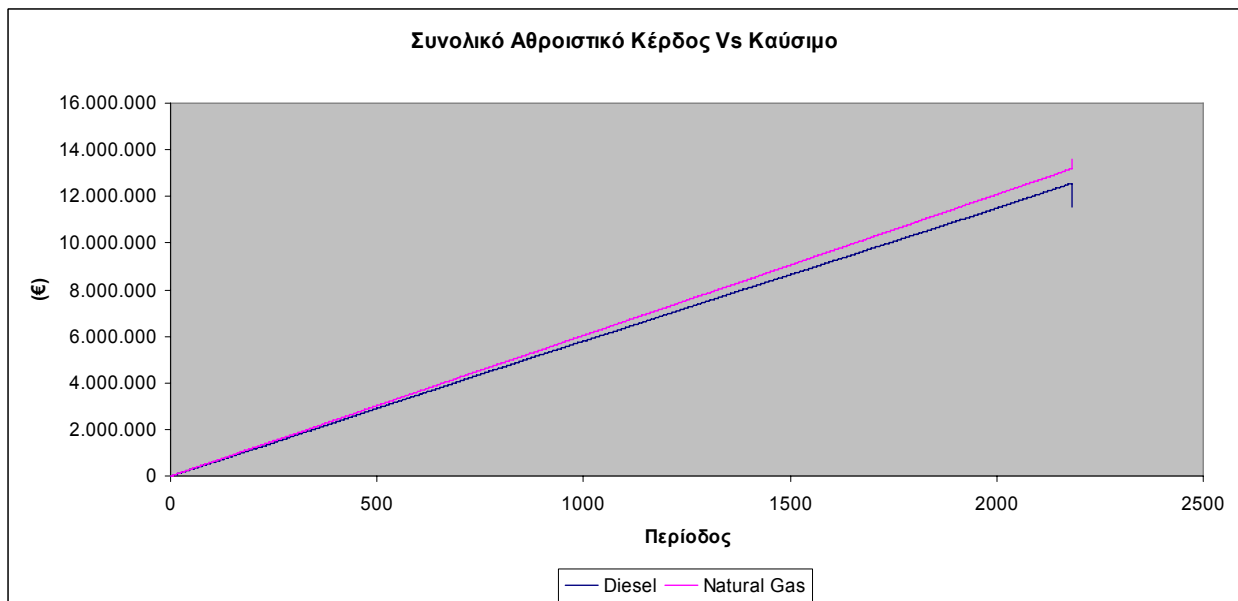
Διάγραμμα -7.32- Αθροιστική εμπορία εκπομπών Vs καύσιμο



Διάγραμμα -7.33- Αθροιστική μέση τιμή κέρδους παραγωγής Vs καύσιμο



Διάγραμμα -7.34- Αθροιστικό κέρδος εμπορίας Vs καύσιμο



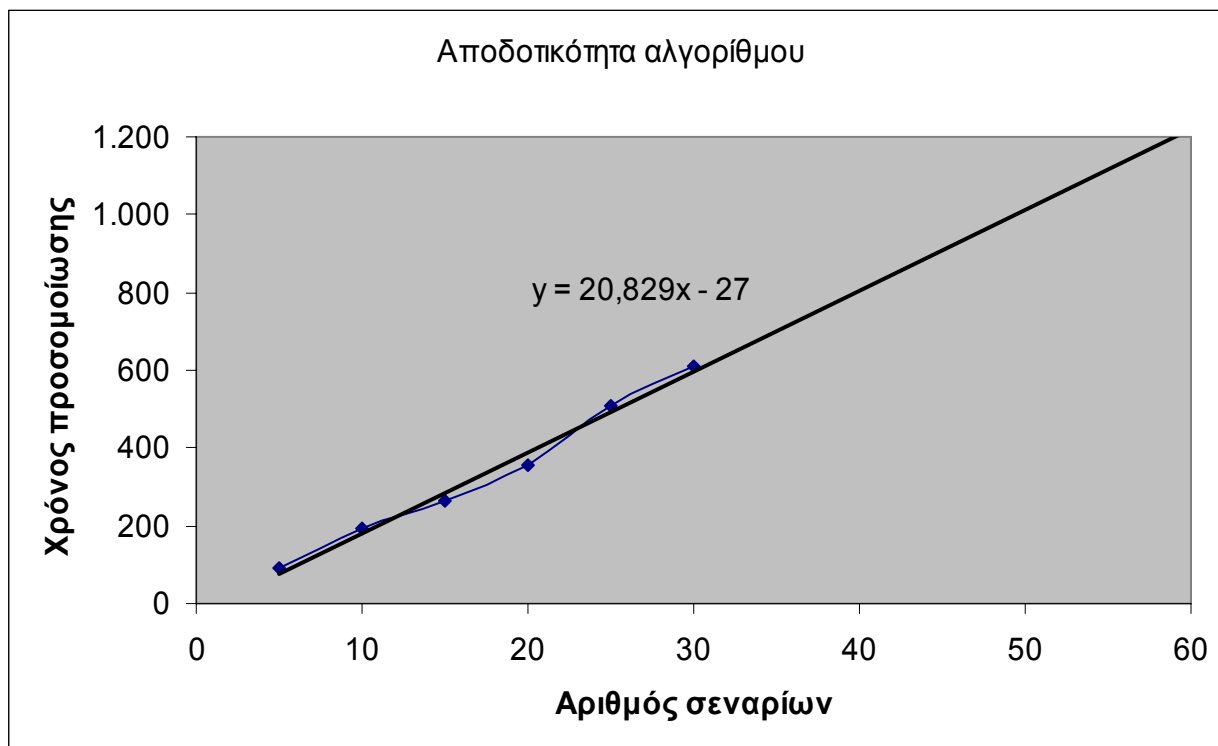
Διάγραμμα -7.35- Συνολικό αθροιστικό κέρδος Vs καύσιμο

7.4 ΑΠΟΔΟΤΙΚΟΤΗΤΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

Οι παραπάνω προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν σε υπολογιστή με τα ακόλουθα στοιχεία: CPU: 2 x 2,83GHz και RAM: 2GB. Μετά από διαφορετικό αριθμό προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν προέκυψε ο παρακάτω πίνακας, τα αποτελέσματα του οποίου απεικονίζονται και στο διάγραμμα -7.36-:

Αριθμός σεναρίων	Χρόνος προσομοίωσης
5	91
10	192
15	265
20	356
25	510
30	611

Πίνακας -7.3- Χρόνος προσομοίωσης



Διάγραμμα -7.36- Αποδοτικότητα αλγορίθμου

Η εξίσωση που προσεγγίζει την συγκεκριμένη καμπύλη είναι η εξής:

Χρόνος προσομοίωσης = $20,829 * \text{Αριθμός σεναρίων} - 27$, αριθμός σεναρίων ≥ 5

Με βάση την παραπάνω σχέση ο χρόνος προσομοίωσης για 50 σενάρια είναι 1014,45 sec, ενώ κατά την προσομοίωση για τον ίδιο αριθμό σεναρίων χρειάστηκαν 927 sec. Η προσεγγιστική εξίσωση εισάγει σφάλμα 9,43%, το οποίο κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8
ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή αυτής της εργασίας, η εκπομπή ρύπων από εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας συντελεί σημαντικά στην αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και συνεπώς στην αμετάκλητη καταστροφή του πλανήτη. Πρωταρχικό μέλημα του μηχανικού καθίσταται λοιπόν ο περιορισμός των εκπομπών τέτοιων εγκαταστάσεων, σε συνδυασμό με την οικονομική λειτουργία τους, καθώς το νομοθετικό πλαίσιο που έχει διαμορφωθεί από το ETS επιφέρει σημαντική οικονομική επιβάρυνση στις ρυπογόνες εγκαταστάσεις.

Παραπάνω περιγράφηκαν και μελετήθηκαν οι παράγοντες που επηρεάζουν την παραγωγή ενέργειας μίας εγκατάστασης 'βάσης' συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας και την εμπορία των δικαιωμάτων των εκπομπών. Μοντελοποιήθηκε ένας αριθμός σεναρίων μεταβάλλοντας ελεγχόμενα, μείζονος σημασίας, παραμέτρους οι οποίες κρίθηκε ότι μπορεί να επηρεάσουν σημαντικά το σχεδιασμό της παραγωγής της εγκατάστασης.

Η σπουδαιότερη παρατήρηση είναι ότι η επιλογή του καυσίμου παίζει σημαντικό ρόλο στην εκπομπή ρύπων και κατά συνέπεια στο συνολικό κέρδος που αποφέρει η εγκατάσταση στο τέλος της σχεδιαστικής περιόδου (1 Χρόνος). Κατέστη προφανές από την προσομοίωση ότι η επιλογή καυσίμου με λιγότερες ειδικές εκπομπές (Φυσικό Αέριο) απέφερε σημαντικό κέρδος από την εμπορία, 350.000,00 € σε αντίθεση με το πιο ρυπογόνο καύσιμο (Diesel) το οποίο απέφερε ζημία της τάξεως των 320.000,00 €. Συνολικά για την εγκατάσταση αυτό σημαίνει κέρδος 670.000,00 € δηλαδή ένα ποσοστό 6% επί των συνολικών κερδών (11.500.000,00 €). Αυτό το κέρδος καθιστά την επιλογή αλλαγής καυσίμου ιδιαίτερα ελκυστική για τον αποφασίζοντα (DM) καθώς όχι μόνον αποφέρει κέρδη για την επιχείρηση αλλά είναι και περισσότερο φιλικό προς το περιβάλλον.

Μία δεύτερη παρατήρηση είναι ότι το κέρδος επηρεάζεται σε μικρότερο βαθμό από την μεταβλητότητα της τιμής του καυσίμου και των δικαιωμάτων. Συγκεκριμένα παρατηρήθηκαν κέρδη ή ζημίες της τάξεως των 35.000,00 € για την παραγωγική διαδικασία και 55.000,00 € για την εμπορία, όσον αφορά στην μεταβλητότητα του καυσίμου, συνολικά 90.000,00 € ή 1% επί των συνολικών κερδών. Σε μικρότερο ακόμη βαθμό επηρεάζει η μεταβλητότητα των δικαιωμάτων στην εμπορία όπου παρατηρείται κέρδος ή ζημία της τάξεως των 25.000,00 €.

Η μεταβλητότητα της ποινής για υπερβολικές εκπομπές επιφέρει κέρδος ή ζημία της τάξεως των 80.000,00 € επί συνόλου 400.000,00 € όσον αφορά στην εμπορία,

ποσοστό 20%. Γίνεται προφανές ότι είναι ιδιαίτερα κρίσιμη η σωστή εκτίμηση του επιπέδου των ποινών από τον αποφασίζοντα καθώς μπορεί να αλλάξει άρδην τον γενικότερο σχεδιασμό της εγκατάστασης.

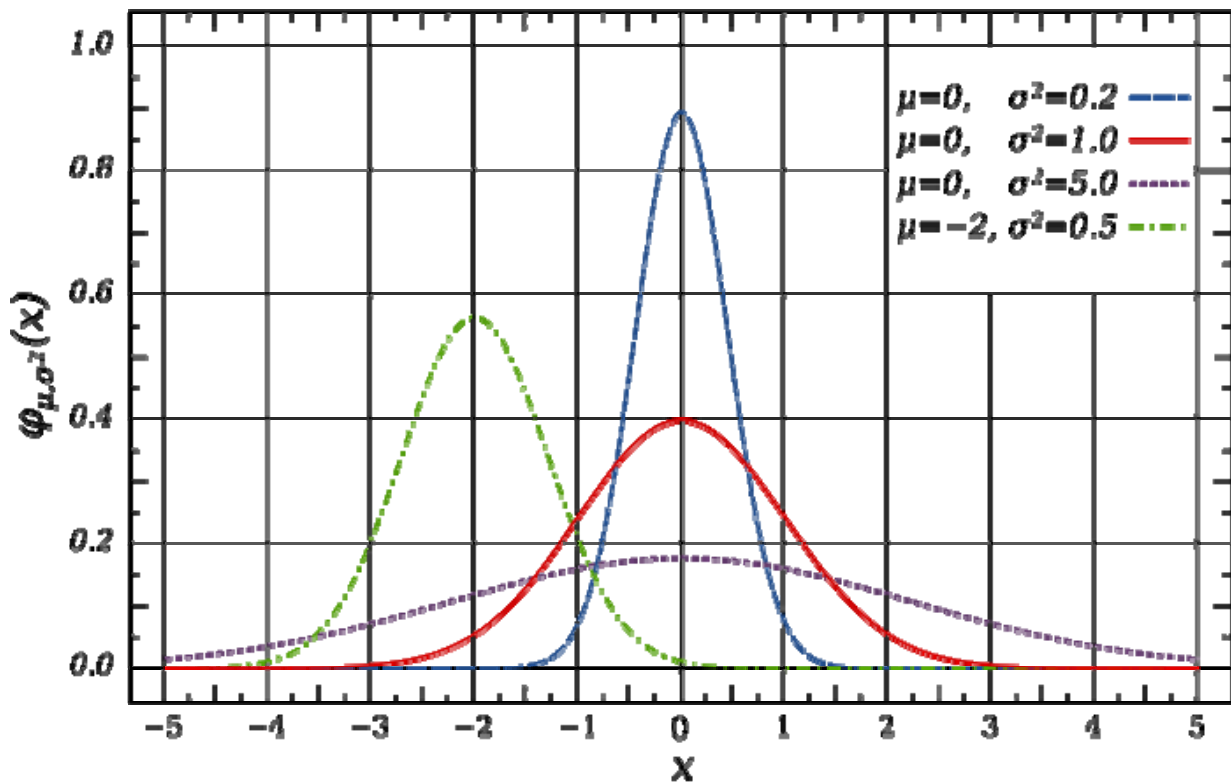
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

A.1 ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΟΥΜΕΝΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ

A.1.1 Κανονική κατανομή

A.1.1.1 Θεωρία κανονική κατανομής

Στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστικής, η κανονική κατανομή ή κατανομή Gauss είναι μία συνεχής κατανομή πιθανότητας που περιγράφει δεδομένα που συσπειρώνονται γύρω από μια μέση τιμή ή ένα μέσο όρο. Η γραφική παράσταση της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής έχει σχήμα καμπάνας, με μία αιχμή στη μέση, και είναι γνωστή ως συνάρτηση Gauss ή καμπύλη καμπάνας.



Διάγραμμα -A.1- Κανονική κατανομή για διάφορες μέσες τιμές και αποκλίσεις

Η κανονική κατανομή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να περιγράψει κάθε μεταβλητή που τείνει να συγκεντρώνεται γύρω από μία μέση τιμή. Για παράδειγμα, το ύψος των ενηλίκων ανδρών στις Ηνωμένες Πολιτείες κατανέμονται περίπου κανονικά, με μέσο όρο περίπου τις 70 ίντσες. Οι περισσότεροι άντρες έχουν ύψος κοντά στη μέση, αν και ένας μικρός αριθμός ακραίων τιμών έχει ύψος σημαντικά πάνω ή κάτω από τη μέση. Ένα ιστόγραμμα του ύψους των ανδρών θα είναι παρόμοιο με μία καμπύλη καμπάνας, με την αντιστοιχία να γίνεται στενότερη με την χρήση περισσότερων δεδομένων.

Για θεωρητικούς λόγους (όπως το θεώρημα κεντρικού ορίου), κάθε μεταβλητή που είναι το άθροισμα ενός μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων παραγόντων είναι πιθανό να είναι κανονικά κατανομημένη. Για το λόγο αυτό, η κανονική κατανομή χρησιμοποιείται στη στατιστική, τις φυσικές επιστήμες και τις κοινωνικές επιστήμες, ως ένα απλό μοντέλο για πολύπλοκα φαινόμενα. Για παράδειγμα, το σφάλμα παρατήρησης σε ένα πείραμα συνήθως θεωρείται ότι ακολουθεί μια κανονική κατανομή, και το εύρος της αβεβαιότητας υπολογίζεται με την υπόθεση αυτή.

Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για μία κανονική κατανομή δίνεται από τον τύπο:

$$p(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (\text{A.1})$$

όπου μ είναι ο μέσος όρος, σ είναι η τυπική απόκλιση (μέτρο του "πλάτους" της καμπάνας), και το \exp συμβολίζει την εκθετική συνάρτηση. Για μέση τιμή 0 και τυπική απόκλιση 1, αυτή η φόρμουλα απλοποιείται σε:

$$p(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} \quad (\text{A.2})$$

η οποία είναι γνωστή ως η τυπική κανονική κατανομή. Όταν είναι ορθά κλιμακωτή και μεταφρασμένη, η αντίστοιχη αθροιστική συνάρτηση κατανομής είναι γνωστή ως το σφάλμα της συνάρτησης.

Η κατανομή Gauss ονομάζεται έτσι από τον Carl Friedrich Gauss, που την χρησιμοποίησε για την ανάλυση αστρονομικών στοιχείων, και καθόρισε τον τύπο για την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας.

A.1.1.2 Ιστορία

Η κανονική κατανομή παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Abraham de Moivre σε ένα άρθρο του, κατά τη διάρκεια του έτους 1733, και επανεκδόθηκε στην δεύτερη έκδοση του έργου 'Το δόγμα των πιθανοτήτων', το 1738, στο πλαίσιο της προσέγγισης ορισμένων διωνυμικών κατανομών για μεγάλες τιμές του n . Το αποτέλεσμα αυτό επεκτάθηκε από τον Laplace στο βιβλίο του 'Αναλυτική Θεωρία Πιθανοτήτων' (1812), και τώρα ονομάζεται θεώρημα των de Moivre-Laplace.

Ο Laplace χρησιμοποίησε την κανονική κατανομή για την ανάλυση των σφαλμάτων των πειραμάτων. Η σημαντική μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων καθιερώθηκε από τον Legendre το 1805. Ο Gauss, ο οποίος ισχυρίστηκε ότι είχε χρησιμοποιήσει την μέθοδο

από το 1794, την δικαιολόγησε με αυστηρότητα το 1809 διατυπώνοντας μια κανονική κατανομή των σφαλμάτων. Το γεγονός ότι η κατανομή μερικές φορές καλείται Gaussian αποτελεί παράδειγμα του νόμου του Stigler.

Το όνομα "καμπύλη καμπάνας" έλκει την καταγωγή του από τον Esprit Jouffret ο οποίος πρώτος χρησιμοποίησε τον όρο "επιφάνεια καμπάνας" το 1872 για μια κανονική δύο μεταβλητών με ανεξάρτητες συνιστώσες. Το όνομα "κανονική κατανομή" επινοήθηκε ανεξάρτητα από τους Charles S. Peirce, Francis Galton και Wilhelm Lexis περίπου το 1875. Παρά την ορολογία αυτή, άλλες κατανομές πιθανότητας μπορεί να είναι πιο κατάλληλες σε ορισμένες περιπτώσεις.

A.1.1.3 Χαρακτηρισμός

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τον χαρακτηρισμό μιας κατανομής πιθανότητας. Η πιο οπτική είναι η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (PDF). Ισοδύναμοι τρόποι είναι η αθροιστική συνάρτηση κατανομής, τα στιγμιότυπα, τα υπόλοιπα, η χαρακτηριστική συνάρτηση, η γεννήτρια συνάρτηση στιγμιοτύπων, η γεννήτρια συνάρτηση υπολοίπων και το θεώρημα Maxwell.

Για να υποδηλώσουμε ότι μια πραγματική τυχαία μεταβλητή X είναι κανονικά κατανομημένη με μέση τιμή μ και διακύμανση $\sigma^2 \geq 0$, γράφουμε

$$X \sim N(\mu, \sigma^2) \quad (\text{A.3})$$

Αν και είναι σίγουρα χρήσιμο για ορισμένα θεωρήματα ορίων (π.χ. ασυμπτωτικής ομαλότητας των εκτιμητριών) και για τη θεωρία των διαδικασιών Gauss να εξετάζεται η κατανομή πιθανότητας συγκεντρωμένη στο μ (βλέπε μέτρο Dirac) ως κατανομή με μέση τιμή μ και διακύμανση $\sigma^2 = 0$, η εν λόγω εκφυλισμένη περίπτωση συχνά αποκλείεται από τις εκτιμήσεις, επειδή δεν υπάρχει καμιά πυκνότητα που να συμβαδίζει με το μέτρο Lebesgue.

Η κανονική κατανομή μπορεί επίσης να παραμετροποιηθεί χρησιμοποιώντας μια παράμετρο ακρίβειας τ , που ορίζεται ως το αμοιβαία του σ^2 . Αυτή η παραμετροποίηση έχει ένα πλεονέκτημα σε αριθμητικές εφαρμογές, όπου το σ^2 είναι πολύ κοντά στο μηδέν και είναι πιο βολικό να εργαστεί κανείς με το τ στην ανάλυση, καθώς το τ είναι φυσική παράμετρος της κανονικής κατανομής.

A.1.2 Διωνυμική κατανομή

A.1.2.1 Γενικά

Στη θεωρία πιθανοτήτων και στατιστικής, η διωνυμική κατανομή είναι η διακριτή κατανομή πιθανότητας του αριθμού των επιτυχιών σε μια ακολουθία n ανεξάρτητων πειραμάτων μορφής ΝΑΙ/ΟΧΙ, καθένα από τα οποία έχει πιθανότητα επιτυχίας p . Ένα τέτοιο πείραμα επιτυχίας/αποτυχίας ονομάζεται επίσης πείραμα ή δοκιμή Bernoulli. Στην πραγματικότητα, όταν $n=1$, η διωνυμική κατανομή καταλήγει σε κατανομή Bernoulli. Η διωνυμική κατανομή είναι η βάση για το δημοφιλές διωνυμικό πείραμα στατιστικής σημαντικότητας. Η διωνυμική κατανομή δεν πρέπει να συγχέεται με την διττή κατανομή.

Χρησιμοποιείται συχνά για την μοντελοποίηση του αριθμού των επιτυχιών της επιλογής ενός δείγματος μεγέθους n από ένα πληθυσμό μεγέθους N . Καθώς τα δείγματα δεν είναι ανεξάρτητα (πρόκειται για δειγματοληψία χωρίς αντικατάσταση), η κατανομή που προκύπτει είναι υπεργεωμετρική, και όχι διωνυμική. Ωστόσο, για N πολύ μεγαλύτερο από το n , η διωνυμική κατανομή αποτελεί μια καλή προσέγγιση, και χρησιμοποιείται ευρύτατα.

A.1.2.2 Παραδείγματα

Ένα στοιχειώδες παράδειγμα είναι το εξής: Ένα τυπικό ζάρι ρίχνεται δέκα φορές και μετρείται ο αριθμός των εξαριών. Η κατανομή του εν λόγω τυχαίου αριθμού είναι μια διωνυμική κατανομή με $n=10$ και $p=1/6$.

Ως άλλο παράδειγμα, υποθέτουμε ότι το 5% ενός πολύ μεγάλου πληθυσμού έχει πράσινα μάτια. Γίνεται τυχαία επιλογή 100 ατόμων. Ο αριθμός των ατόμων με πράσινα μάτια που επιλέχθηκαν είναι μια τυχαία μεταβλητή X , η οποία ακολουθεί περίπου μια διωνυμική κατανομή με $n=100$ και $p=0,05$ (αυστηρά ακολουθεί μια υπεργεωμετρική κατανομή).

A.1.2.3 Προσδιορισμός

A) Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

Σε γενικές γραμμές, αν η τυχαία μεταβλητή K ακολουθεί τη διωνυμική κατανομή με παραμέτρους n και p , γράφουμε $K \sim B(n, p)$. Η πιθανότητα εμφάνισης ακριβώς k επιτυχιών σε n δοκιμές δίνεται από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$\Pr(K = k) = f(k; n, p) \quad (\text{A.4})$$

$$\Pr(K = k) = \binom{n}{k} p^k (1-p)^{n-k} \quad \text{για } k=1,2,\dots,n \quad (\text{A.5})$$

όπου $\binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}$ είναι ο διωνυμικός συντελεστής (εξ ου και το όνομα της κατανομής) που σημαίνει 'από n επέλεξε k' και παριστάνεται, επίσης, ως $C(n,k)$, ${}_n C_k$, ή ${}^n C_k$. Ο παραπάνω τύπος μπορεί να γίνει κατανοητός ως εξής: θέλουμε k επιτυχίες (πιθανότητα p^k) και n-k αποτυχίες (πιθανότητα $(1-p)^{n-k}$). Ωστόσο, οι k επιτυχίες μπορούν να προκύψουν οπουδήποτε μεταξύ των n δοκιμών, και υπάρχουν $C(n,k)$ διαφορετικοί τρόποι κατανομής k επιτυχιών σε μια ακολουθία από n δοκιμές.

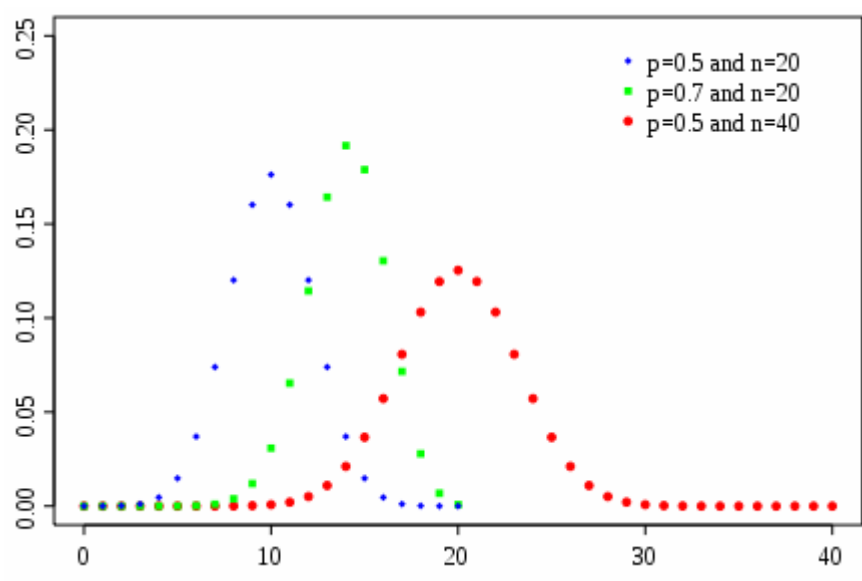
Κατά την δημιουργία πινάκων αναφοράς για την διωνυμική κατανομή πιθανότητας, συνήθως ο πίνακας συμπληρώνεται το πολύ με $n/2$ τιμές. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για $k > n/2$, η πιθανότητα μπορεί να υπολογιστεί από το συμπλήρωμά της ως εξής:

$$f(k;n,p) = f(n-k;n,1-p) \quad (A.6)$$

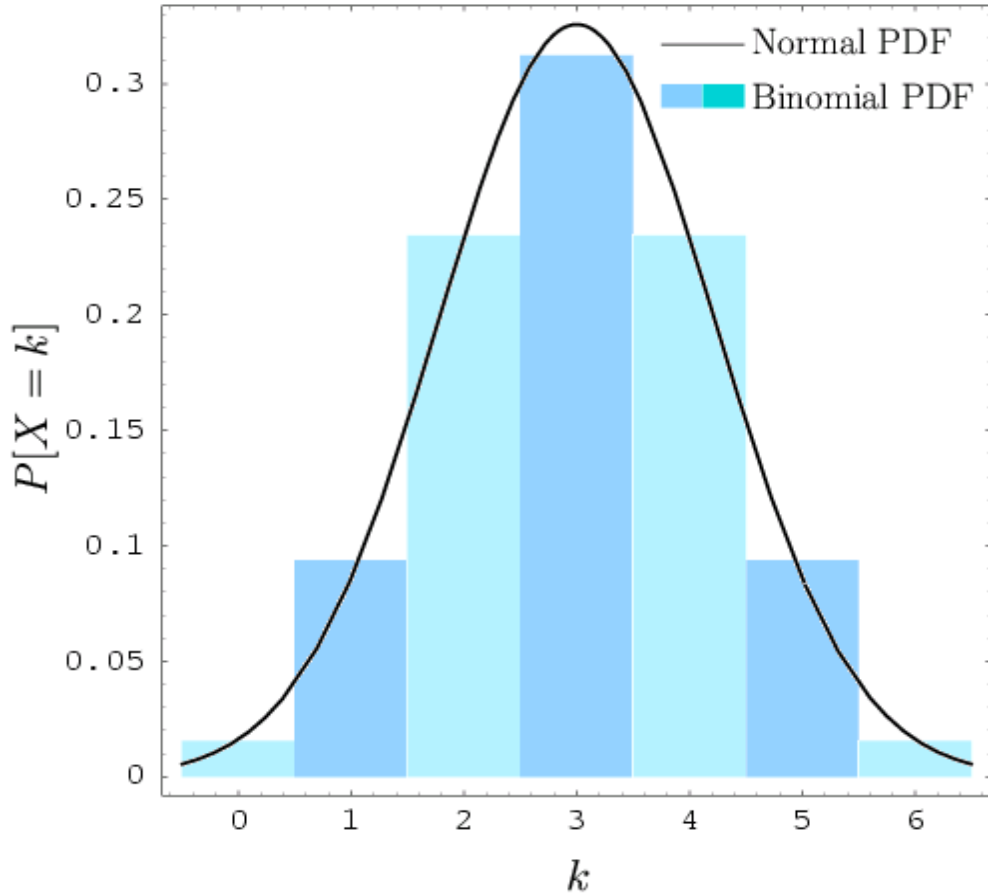
Έτσι, θα πρέπει να γίνει εξέταση σε διαφορετικά k, καθώς και σε διαφορετικά p (η διωνυμική κατανομή, σε γενικές γραμμές, δεν είναι συμμετρική). Ωστόσο, η συμπεριφορά της δεν είναι τυχαία. Υπάρχει πάντα ένας ακέραιος m, που να ικανοποιεί την σχέση:

$$(n+1)p - 1 \leq m \leq (n+1)p \quad (A.7)$$

Ως συνάρτηση του k, η έκφραση $f(k;n,p)$ είναι γνησίως αύξουσα για $k < m$ και γνησίως φθίνουσα για $k > m$, με εξαίρεση μια περίπτωση κατά την οποία το $(n+1)p$ είναι ακέραιος. Σε αυτή την περίπτωση, εμφανίζονται δύο μέγιστες τιμές για $m=(n+1)p$ και $m-1$. Το m είναι γνωστό ως το πιο πιθανό αποτέλεσμα των δοκιμών Bernoulli. Σημειώστε ότι η πιθανότητα εμφάνισής του μπορεί να είναι αρκετά μικρή.



Διάγραμμα -A.2- Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας



Διάγραμμα -A.3- Συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας και κανονική προσέγγιση για $n=6$ και $p=0,5$

B) Συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας

Η συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$F(x; n, p) = \Pr(X \leq x) = \sum_{i=0}^{\lfloor x \rfloor} \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \quad (\text{A.8})$$

όπου το $\lfloor x \rfloor$ είναι το όριο κάτω από το x , για παράδειγμα ο μεγαλύτερος ακέραιος που είναι μικρότερος ή ίσος με το x .

Επίσης, μπορεί να παρουσιαστεί με την βοήθεια της κανονικοποιημένης συνάρτησης βήτα ως εξής:

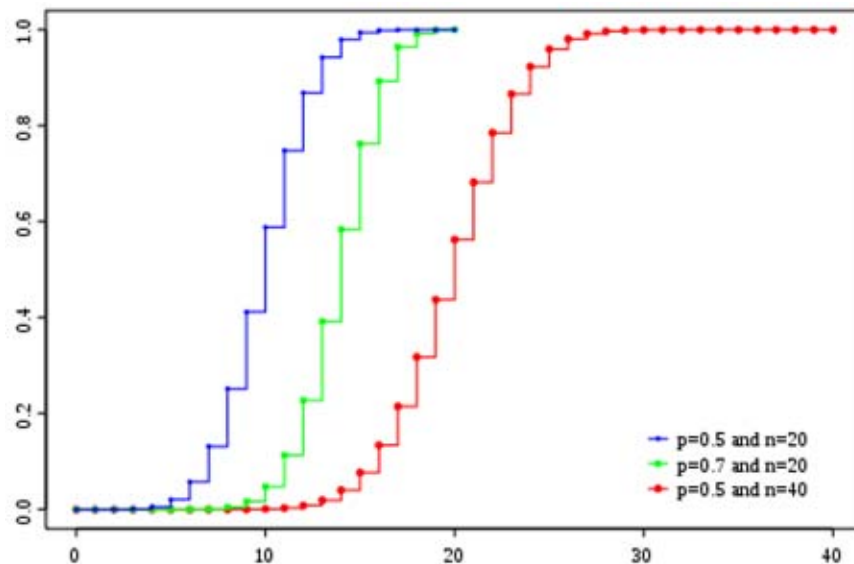
$$F(k; n, p) = \Pr(X \leq k) = I_{1-p}(n-k, k+1) = (n-k) \binom{n}{k} \int_0^{1-p} t^{n-k-1} (1-t)^k dt \quad (\text{A.9})$$

Για $k \leq np$, το ανώτερο όριο για το κάτω άκρο της συνάρτησης κατανομής μπορεί να προκύψουν με χρήση της ανισότητας του Hoeffding:

$$F(k; n, p) \leq \exp\left(-2 \frac{(np - k)^2}{n}\right) \quad (\text{A.10})$$

και με χρήση της ανισότητας του Chernoff:

$$F(k; n, p) \leq \exp\left(-\frac{1}{2p} \frac{(np - k)^2}{n}\right) \quad (\text{A.11})$$



Διάγραμμα -A.4- Συνάρτηση αθροιστικής πιθανότητας

A.1.2.4 Μέση τιμή και διακύμανση

Αν $X \sim B(n, p)$ (δηλαδή, X είναι μία τυχαία μεταβλητή με διωνυμική κατανομή), τότε η αναμενόμενη τιμή της X είναι:

$$E(X) = np \quad (\text{A.12})$$

και η διακύμανση:

$$\text{Var}(X) = np(1 - p) \quad (\text{A.13})$$

Η παραπάνω σχέση μπορεί να αποδειχθεί ως εξής. Υποθέσουμε, αρχικά, ότι έχουμε ακριβώς μια δοκιμή Bernoulli. Τα πιθανά αποτελέσματα είναι δύο, 1 και 0, με το πρώτο να έχει πιθανότητα p και το δεύτερο $1-p$. Ο μέσος όρος για αυτή τη δοκιμή δίνεται από την σχέση $\mu=p$. Χρησιμοποιώντας τον ορισμό της διασποράς, έχουμε:

$$\sigma^2 = (1-p)^2 p + (0-p)^2 (1-p) = p(1-p) \quad (\text{A.14})$$

Τώρα, υποθέτουμε ότι θέλουμε τη διακύμανση για n τέτοιες δοκιμές (δηλαδή για την γενική περίπτωση διωνυμικής κατανομής). Δεδομένου ότι οι δοκιμές είναι ανεξάρτητες, μπορούν να προσθέτουν οι διακυμάνσεις κάθε δοκιμής, δίνοντας:

$$\sigma_v^2 = \sum_{k=1}^n np(1-p) \quad (\text{A.15})$$

A.1.3 Κίνηση κατά Brown

A.1.3.1 Γενικά

Η κίνηση κατά Brown, η οποία πήρε το όνομά της από τον Σκωτσέζο βοτανολόγο Robert Brown, είναι η φαινομενικά τυχαία κίνηση των σωματιδίων που αιωρούνται σε ένα ρευστό (δηλαδή ένα υγρό ή αέριο) ή το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τέτοιες τυχαίες κινήσεις και συχνά αποκαλείται σωματιδιακή θεωρία.

Το μαθηματικό μοντέλο της κίνησης κατά Brownian έχει διάφορες εφαρμογές στον πραγματικό κόσμο. Ένα παράδειγμα που αναφέρεται συχνά είναι οι διακυμάνσεις στην χρηματιστηριακή αγορά.

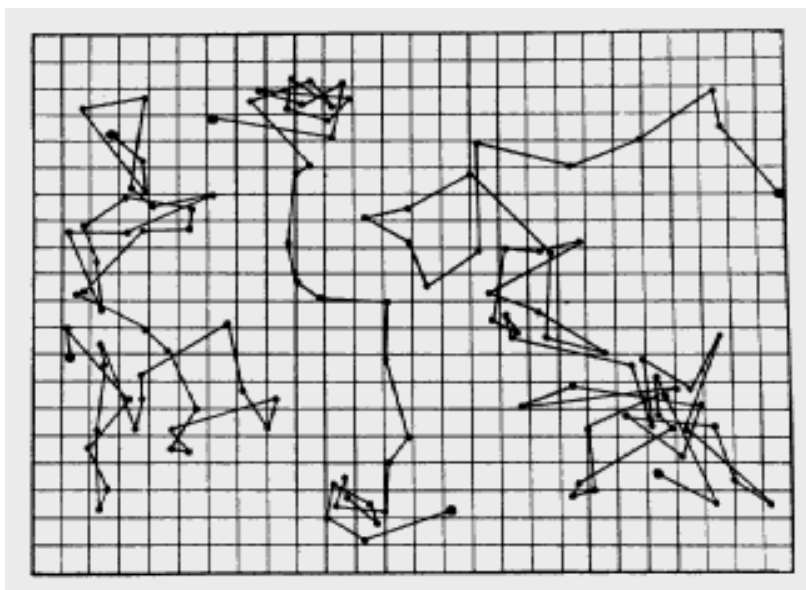
Η κίνηση κατά Brown είναι από τις πιο απλές στοχαστικές (ή τυχαίες) συναρτήσεις συνεχούς χρόνου, και αποτελεί το όριο ανάμεσα σε απλούστερες και πιο πολύπλοκες συναρτήσεις (βλέπε τυχαία όδευση και θεώρημα Donsker). Αυτή η καθολικότητα είναι στενά συνδεδεμένη με την καθολικότητα της κανονικής κατανομής. Και στις δύο περιπτώσεις, είναι συχνά η μαθηματική ευκολία και όχι η ακρίβεια των μοντέλων που θα οδηγήσει στην χρήση τους.

A.1.3.2 Ιστορική Αναδρομή

Το ποίημα του Ρωμαίου επιστημονικού ποιητή Lucretius 'Για τη φύση των πραγμάτων' (On the nature of things) περί το 60 π.Χ., έχει μια αξιοθαύμαστη περιγραφή της κίνησης κατά Brown των σωματιδίων σκόνης. Χρησιμοποιεί το γεγονός αυτό ως απόδειξη της ύπαρξης των ατόμων: «Παρατηρήστε τι συμβαίνει όταν ακτίνες ήλιου εισάγονται σε ένα κτίριο και ρίχνουν φως σε σκιερούς χώρους. Θα παρατηρήσετε ένα πλήθος από μικροσκοπικά σωματίδια να κινούνται με πληθώρα τρόπων... ο χορός τους είναι μια πραγματική ένδειξη των σχετικών κινήσεων της ύλης που δεν είναι ορατές με γυμνό μάτι... προέρχεται από τα άτομα που μετακινούνται από μόνα τους (δηλαδή αυθόρμητα). Στη συνέχεια, αυτά τα μικρά σύνθετα σώματα που μετακινούνται ελάχιστα εξαιτίας της ώθησης των ατόμων που βρίσκονται σε κίνηση, λόγω αυτών των αόρατων ωθήσεων βάλλονται με την σειρά τους κατά λίγο μεγαλύτερων σωματιδίων. Έτσι, η κίνηση αυτή που ξεκινά από τα άτομα σταδιακά αναδύεται στο επίπεδο των αισθήσεών μας, με αποτέλεσμα αυτά τα σωματίδια να είναι σε κίνηση όπως βλέπουμε στις ακτίνες του ηλίου, υποκινούμενες από ωθήσεις οι οποίες παραμένουν αόρατες. Αν και η τυχαία κίνηση των σωματιδίων σκόνης οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στα ρεύματα αέρα, η ακανόνιστη κίνηση μικρών σωματιδίων σκόνης πράγματι προκαλείται κυρίως από την πραγματικές δυναμικές Brown.

Ο Jan Ingenhousz είχε περιγράψει την αντικανονική κίνηση των σωματιδίων σκόνης άνθρακα, στην επιφάνεια του αλκοόλ το 1785. Ωστόσο, η κίνηση κατά Brown παραδοσιακά θεωρείται ότι ανακαλύφθηκε από τον βοτανολόγο Robert Brown το 1827. Θεωρείται ότι ο Brown μελετούσε στο μικροσκόπιο σωματίδια γύρης επιπλέοντα στο νερό. Στη συνέχεια παρατήρησε λεπτά σωματίδια εντός του κυτταρικού κενού των κόκκων γύρης να εκτελούν μια τυχαία κίνηση. Επαναλαμβάνοντας το πείραμα με σωματίδια σκόνης, ήταν σε θέση να αποκλείσει το γεγονός ότι η κίνηση αυτή οφείλεται στο ότι τα σωματίδια γύρης ήταν "ζωντανά", αν και η προέλευση της κίνησης έμενε ακόμα ανεξήγητη.

Ο πρώτος που περιέγραψε τα μαθηματικά πίσω από την κίνηση κατά Brown ήταν ο Thorvald N. Thiele το 1880 σε ένα έγγραφο του σχετικά με τη μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων. Τα παραπάνω ακολούθησε ανεξάρτητα ο Louis Bachelier το 1900 στη διδακτορική του διατριβή με τίτλο "Η θεωρία της κερδοσκοπίας", στην οποία παρουσίασε μια στοχαστική ανάλυση των χρηματιστηριακών και προθεσμιακών αγορών. Ωστόσο, ήταν η ανεξάρτητη μελέτη του προβλήματος από τον Albert Einstein (1905) και την Marian Smoluchowski (1906) που ώθησε τους φυσικούς να προσέξουν την συγκεκριμένη λύση, και την παρουσίασε ως ένα τρόπο για την έμμεση επιβεβαίωση της ύπαρξης των ατόμων και μορίων.



Διάγραμμα -Α.5- Τρεις ιχνογραφήσεις της κίνησης των κolloειδών σωματιδίων ακτίνας 0,53 μm, όπως φαίνονται από το μικροσκόπιο.

A.1.3.3 Διαισθητική μεταφορά

Θεωρείστε ένα μεγάλο μπαλόνι με διάμετρο 10 μέτρα. Φανταστείτε αυτό το μεγάλο μπαλόνι σε ένα γήπεδο ποδοσφαίρου. Το μπαλόνι είναι τόσο μεγάλο που βρίσκεται πάνω από πολλά άτομα του πλήθους. Επειδή είναι ενθουσιασμένοι, αυτοί οι φίλαθλοι χτυπούν το μπαλόνι σε διαφορετικές χρονικές στιγμές και με διαφορετικές κατευθύνσεις, με τις κινήσεις να είναι εντελώς τυχαίες. Στο τέλος, το μπαλόνι ωθείται σε τυχαίες κατευθύνσεις, έτσι ώστε κατά μέσο όρο να μένει ακίνητο. Ας εξετάσουμε τώρα τη δύναμη που ασκείται σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Μπορεί να έχουμε 20 οπαδούς να πιέζουν δεξιά, και άλλους 21 οπαδούς να πιέζουν προς τα αριστερά, όπου κάθε οπαδός ασκεί ίση ποσότητα δύναμης. Στην περίπτωση αυτή, οι δυνάμεις που ασκούνται από την αριστερή και τη δεξιά πλευρά είναι άνισες υπέρ της αριστερής πλευράς. Το μπαλόνι θα μετακινηθεί λίγο προς τα αριστερά. Το είδος αυτό της ανισορροπία υπάρχει ανά πάσα στιγμή, και προκαλεί την τυχαία κίνηση του μπαλονιού. Αν δούμε αυτή την κατάσταση από πολύ πιο πάνω, έτσι ώστε να μην βλέπουμε τους οπαδούς, θα δούμε το μεγάλο μπαλόνι, σαν ένα μικρό αντικείμενο που εκτελεί μια ακανόνιστη κίνηση.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την τυχαία κίνηση κατά Brown των σωματιδίων γύρης στο νερό: γνωρίζουμε ότι ένα μόριο νερού έχει μέγεθος περίπου 0,1 με 0,2 nm, ενώ τα σωματίδια γύρης είναι περίπου 25 μm σε διάμετρο, δηλαδή περίπου 250.000 φορές μεγαλύτερη. Έτσι, τα σωματίδια γύρης μπορούν να εξομοιωθούν με το μπαλόνι, και τα μόρια νερού με τους οπαδούς μόνο που σε αυτή την περίπτωση το μπαλόνι περιβάλλεται από οπαδούς. Η κίνηση κατά Brown ενός σωματιδίου σε ένα υγρό είναι τέτοια λόγω της στιγμιαίας ανισορροπίας του συνδυασμού δυνάμεων που ασκούνται από τις συγκρούσεις των σωματιδίων με τα πολύ μικρότερα μόρια υγρού (τα οποία βρίσκονται σε τυχαία θερμική κίνηση) που το περιβάλλουν.

A.1.3.4 Μαθηματική ανάλυση

Στα μαθηματικά, η συνάρτηση Wiener είναι μια συνεχής στοχαστική συνάρτηση που ονομάστηκε έτσι προς τιμήν του Norbert Wiener. Είναι μία από τις πιο γνωστές συναρτήσεις Levy (σύνολο στοχαστικών συναρτήσεων με σταθερές ανεξάρτητες προσαιξήσεις) και εμφανίζεται συχνά σε θεωρητικά και εφαρμοσμένα μαθηματικά, στην οικονομία και στη φυσική.

Η συνάρτηση Wiener W_t έχει τρία βασικά χαρακτηριστικά:

1. $W_0 = 0$
2. η W_t είναι σχεδόν πάντα συνεχής
3. η W_t έχει ανεξάρτητες προσαυξήσεις με κατανομή $W_t - W_s \sim N(0, t - s)$ (για $0 \leq s < t$).

Ο συμβολισμός $N(\mu, \sigma^2)$ δηλώνει την κανονική κατανομή με αναμενόμενη τιμή μ και διακύμανση σ^2 . Η συνθήκη ότι έχουμε ανεξάρτητες προσαυξήσεις σημαίνει ότι αν $0 \leq s_1 \leq t_1 \leq s_2 \leq t_2$ τότε οι $W_{t_1} - W_{s_1}$ και $W_{t_2} - W_{s_2}$ είναι ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές.

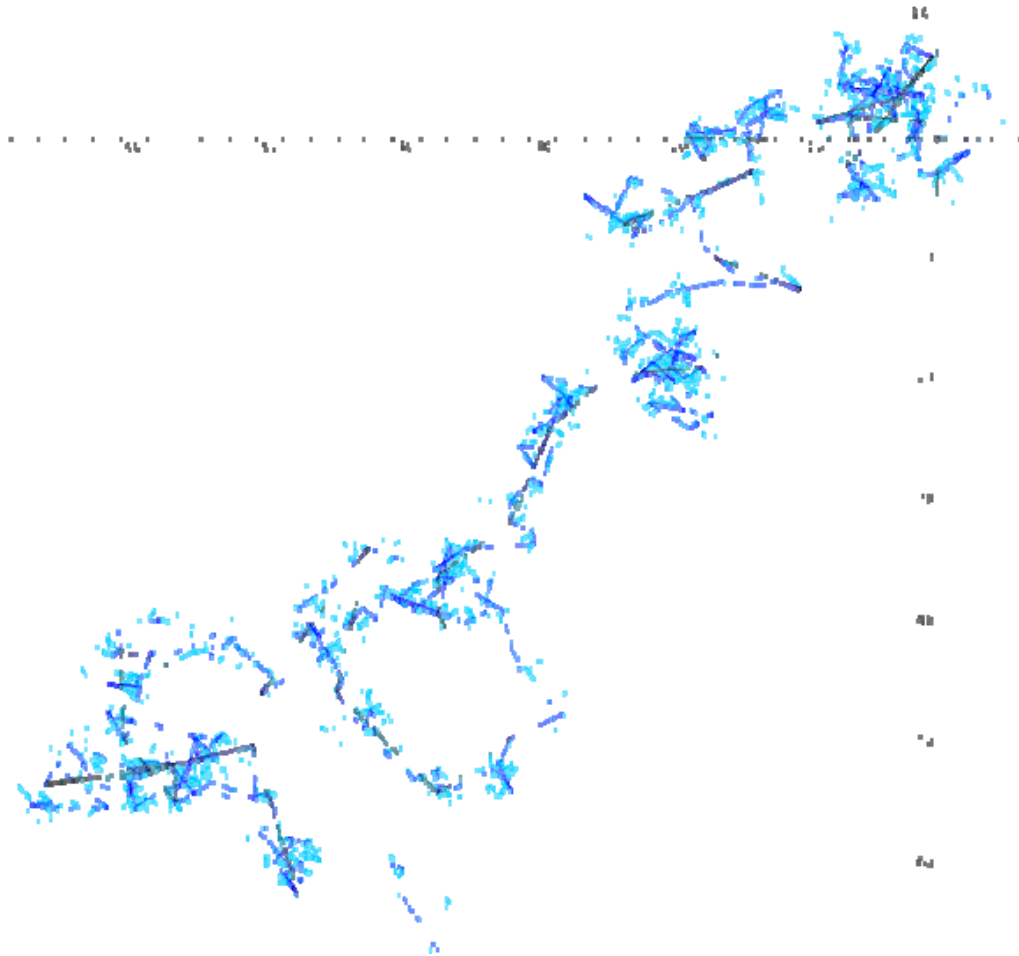
Μια εναλλακτική χαρακτηριστική της συνάρτησης Wiener είναι η λεγόμενη χαρακτηριστική Levy, που λέει ότι η συνάρτηση Wiener είναι μία σχεδόν σίγουρα συνεχής στοχαστική συνάρτηση με $W_0 = 0$ και τετραγωνική διακύμανση $[W_t, W_t] = t$.

Ένας τρίτος χαρακτηρισμός είναι ότι η συνάρτηση Wiener έχει φασματική αναπαράσταση μία ημιτονική σειρά, οι συντελεστές της οποίας είναι ανεξάρτητες $N(0,1)$ τυχαίες μεταβλητές. Αυτή η αναπαράσταση μπορεί να ληφθεί με τη χρήση του θεωρήματος Karhunen-Loève.

Η συνάρτηση Wiener μπορεί να κατασκευαστεί ως το όριο ανόδου μιας τυχαίας όδευσης, ή άλλων στοχαστικών συναρτήσεων διακριτού χρόνου με σταθερές ανεξάρτητες προσαυξήσεις. Αυτό είναι γνωστό ως θεώρημα Donsker. Όπως και η τυχαία όδευση, η συνάρτηση Wiener είναι επαναλαμβανόμενη σε μία ή δύο διαστάσεις (που σημαίνει ότι επιστρέφει σχεδόν σίγουρα σε κάποια καθορισμένη γειτονιά της αρχής των αξόνων απείρως συχνά), ενώ δεν είναι επαναλαμβανόμενη σε τρεις διαστάσεις και παραπάνω. Σε αντίθεση με την τυχαία όδευση, δεν παρουσιάζει μεταβολές κλίμακας.

Η χρονική εξέλιξη της θέσης του σωματιδίου Brown μπορεί να περιγραφεί προσεγγιστικά από την εξίσωση Langevin, μια εξίσωση η οποία περιλαμβάνει μία τυχαία δυναμική που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα των θερμικών διακυμάνσεων του διαλύτη στο θεώρημα Brown. Για μεγάλα χρονικά διαστήματα, η μαθηματική κίνηση κατά Brown περιγράφεται ικανοποιητικά από μια εξίσωση Langevin. Για μικρά χρονικά διαστήματα, τα αποτελέσματα της αδράνειας κυριαρχούν στην εξίσωση Langevin. Ωστόσο, η μαθηματική κίνηση κατά Brown απαλλάσσεται από τα αποτελέσματα της αδράνειας. Σημειώστε ότι τα φαινόμενα της αδράνειας πρέπει να ληφθούν υπόψη στην

εξίσωση Langevin, αλλιώς η εξίσωση γίνεται ασυνήθης, με αποτέλεσμα η απλή αφαίρεση του όρου της αδράνειας από αυτή την εξίσωση να μην δίνει μια ακριβή περιγραφή, αλλά μάλλον μια ασυνήθη συμπεριφορά στην οποία το σωματίδιο στην ουσία δεν κινείται.



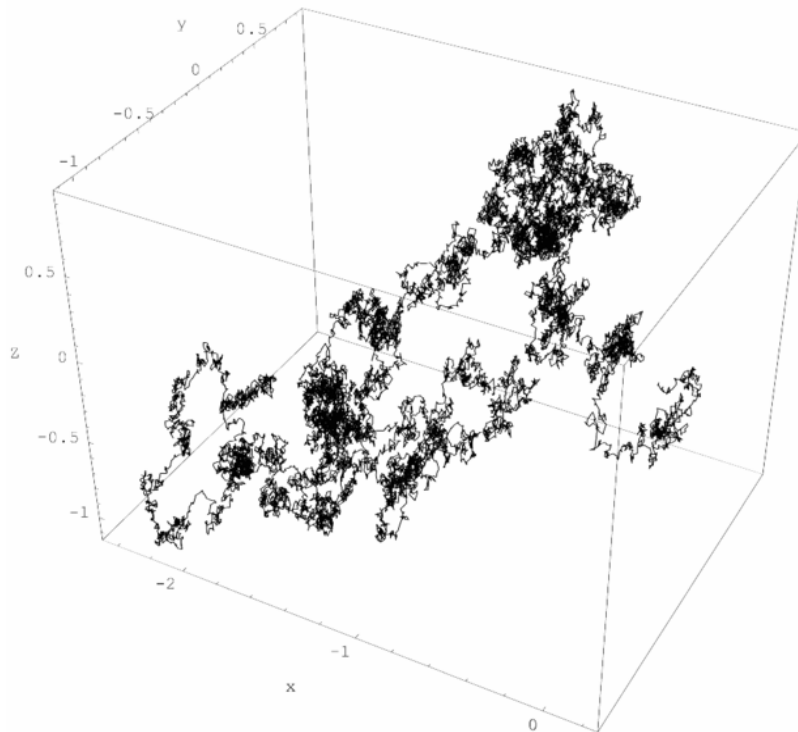
Διάγραμμα -Α.6- Τρεις διαφορετικές μορφές της κίνησης κατά Brown, με 32 , 256, 2.048 βήματα, σχεδιασμένες με προοδευτικά ελαφρύτερα χρώματα.

A.1.3.5 Φυσική θεωρία Brown

Η εξίσωση διάχυσης (διάδοσης) αποφέρει μία προσέγγιση της χρονικής εξέλιξης της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας σε σχέση με την θέση των σωματιδίων που βρίσκονται σε κίνηση κατά Brown, σύμφωνα με τον φυσικό ορισμό. Η προσέγγιση αυτή ισχύει για σύντομα χρονικά διαστήματα (βλ. εξίσωση Langevin για λεπτομέρειες).

Η χρονική εξέλιξη της θέσης των σωματιδίων Brown προσδιορίζεται καλύτερα χρησιμοποιώντας την εξίσωση Langevin, μια εξίσωση η οποία περιλαμβάνει μία τυχαία δυναμική που αντιπροσωπεύει το αποτέλεσμα των θερμικών διακυμάνσεων του διαλύτη στο σωματίδιο.

Η μετατόπιση ενός σωματιδίου που υφίσταται κίνηση κατά Brown προκύπτει από την επίλυση της εξίσωσης διάχυσης υπό τις κατάλληλες οριακές συνθήκες και την εξεύρεση της rms της λύσης. Αυτό δείχνει ότι η μετατόπιση κυμαίνεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου (μη γραμμικά), πράγμα που εξηγεί γιατί τα προηγούμενα πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με την ταχύτητα των σωματιδίων Brown έδιναν ανόητα αποτελέσματα. Μια γραμμική χρονική εξάρτηση είχε εσφαλμένα θεωρηθεί.



Διάγραμμα -A.7- Ενιαία υλοποίηση τρισδιάστατης κίνησης κατά Brown για $0 \leq t \leq 2$.

A.1.3.6 Κώδικας Matlab

Η γενική μορφή του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στο Matlab για κίνηση κατά Brown είναι ο παρακάτω:

```
N = 365;           % number of steps to take
T = 365;           % maximum time
h = T / N;         % time step
t = (0 : h : T);   % t is the vector [0 1h 2h 3h ... Nh]
sigma = 1.0;       % strength of noise
x=zeros (size(t)); % place to store x locations
x(1) = 10;         % initial x location
for i = 1 : N      % take N steps
    x(i+1) = x(i)+sigma * sqrt(h) * randn;
    if x(i+1) > 25
        x(i+1) = 25;
    end
    if x(i+1) < 5
        x(i+1) = 5;
    end
end;
plot(t,x);
grid on           % add a grid to axes
% axis([0 T -3 8]); % set axis limits
```

A.1.4 ΔΥΑΔΙΚΗ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ

A.1.4.1 Γενικά

Στην επιστήμη των υπολογιστών, ο αλγόριθμος της δυαδικής αναζήτησης είναι μια τεχνική για τον εντοπισμό μιας συγκεκριμένης τιμής σε μία ταξινομημένη λίστα. Η μέθοδος κάνει σταδιακά βελτιωμένες προβλέψεις, και καταλήγει σε μία περιοχή της ζητούμενης τιμής επιλέγοντας το μεσαίο στοιχείο της λίστας (το οποίο, επειδή η λίστα είναι ταξινομημένη σε αύξουσα σειρά, είναι η μέση τιμή), συγκρίνοντας την τιμή αυτή με την τιμή-στόχο, και καθορίζοντας, αν είναι μεγαλύτερη από, μικρότερη από, ή ίση με την τιμή στόχο. Ένας δείκτης πρόβλεψης η τιμή του οποίου αποδεικνύεται ότι είναι πολύ υψηλή γίνεται το νέο ανώτατο όριο της αναζήτησης, ενώ εάν η τιμή του είναι πολύ χαμηλή ο δείκτης αυτός είναι το νέο κατώτατο όριο. Μόνο το πρόσημο της διαφοράς λαμβάνεται υπ'όψιν, ενώ δεν γίνεται καμία χρήση του μεγέθους της διαφοράς. Συνεχίζοντας αυτή την στρατηγική επαναληπτικά, η μέθοδος μειώνει το διάστημα αναζήτησης κατά δύο κάθε φορά, και σύντομα εντοπίζει την τιμή στόχο ή κρίνει ότι δεν περιέχεται στην λίστα. Μια δυαδική αναζήτηση είναι ένα κλασικό παράδειγμα ενός αλγορίθμου αναζήτησης 'διαίρει και βασίλευε'.

A.1.4.2 Επισκόπηση

Η εύρεση του δείκτη μιας συγκεκριμένης τιμής σε μία ταξινομημένη λίστα είναι χρήσιμη, διότι, με δεδομένο τον δείκτη, άλλες δομές δεδομένων θα περιέχουν συναφείς πληροφορίες. Ας υποθέσουμε ότι μια δομή δεδομένων που περιέχει την κλασική συλλογή ονόματος, διεύθυνσης, αριθμού τηλεφώνου κλπ. έχει κατασκευαστεί, και ένας πίνακας, με τα ονόματα αριθμημένα από το ένα έως το N , είναι έτοιμος. Ένα ερώτημα μπορεί να είναι: ποιος είναι ο τηλεφωνικός αριθμός για ένα δεδομένο όνομα X . Για να απαντηθεί το ερώτημα αυτό θα πρέπει να ερευνηθεί ο πίνακας και να καθορισθεί ο δείκτης (αν υπάρχει), που αντιστοιχεί σε αυτό το όνομα, οπότε ο σχετικός πίνακας αριθμών τηλεφώνου θα έχει τον αριθμό τηλεφώνου του X σε αυτό το δείκτη, όπως και ο σχετικός πίνακας διευθύνσεων και ούτω καθεξής. Η κατάλληλη πρόνοια πρέπει να ληφθεί για τα ονόματα που δεν είναι στον κατάλογο (κατά κανόνα με την επιστροφή ενός δείκτη με μηδενική τιμή), καθώς η ερώτηση μπορεί να είναι εάν το X περιέχεται στην λίστα ή όχι.

Αν ο κατάλογος των ονομάτων είναι ταξινομημένος σε σειρά, μια δυαδική αναζήτηση θα βρει ένα συγκεκριμένο όνομα με πολύ λιγότερες προσπάθειες σε σχέση με την απλή διαδικασία της σχολαστικής αναζήτησης κάθε ονόματος στον κατάλογο, γραμμικά τη μία μετά την άλλη, και η διαδικασία είναι πολύ πιο απλή από την οργάνωση ενός τυχαίου πίνακα. Ωστόσο, από τη στιγμή που δημιουργήθηκε, η αναζήτηση ενός οργανωμένου πίνακα μπορεί να είναι ταχύτερη, συνήθως κατά μέσο όρο λίγο περισσότερο από μία προσπάθεια ανά αναζήτηση. Με μια μη ομοιόμορφη κατανομή τιμών, εάν είναι γνωστό

ότι κάποια λίγα στοιχεία είναι πολύ πιο πιθανό να ζητηθούν σε σχέση με την πλειοψηφία, τότε η γραμμική αναζήτηση με την λίστα διατεταγμένη έτσι ώστε τα πιο δημοφιλή στοιχεία να βρίσκονται πρώτα μπορεί να έχει καλύτερη απόδοση από την δυαδική αναζήτηση. Η επιλογή της καλύτερης μεθόδου μπορεί να μην είναι εμφανής. Εάν, μεταξύ των αναζητήσεων, τα στοιχεία της λίστας έχουν τροποποιηθεί ή στοιχεία προστίθενται ή αφαιρούνται, η διατήρηση της απαιτούμενης οργάνωσης μπορεί να καταναλώσει περισσότερο χρόνο από τις αναζητήσεις.

A.1.4.3 Παιχνίδι εύρεσης αριθμών

Αυτό το μάλλον απλό παιχνίδι ξεκινάει κάπως έτσι σκέφτομαι έναν ακέραιο μεταξύ του σαράντα και του εξήντα συμπεριλαμβανομένου, και οι απαντήσεις στις εικασίες σας θα είναι Υψηλή, Χαμηλή, ή Ναι ανάλογα με την περίπτωση'. Υποθέτοντας ότι το N είναι ο αριθμός των δυνατών τιμών (εδώ, είκοσι ένα καθώς συμπεριλαμβάνεται και το εξήντα), τότε το πολύ $\lceil \log_2 N \rceil$ ερωτήσεις απαιτούνται για τον προσδιορισμό του αριθμού, δεδομένου ότι κάθε ερώτηση μειώνει στο ημίσι το διάστημα αναζήτησης. Σημειώστε ότι απαιτείται μια ερώτηση (επανάληψη) λιγότερη σε σχέση με τον γενικό αλγόριθμο, δεδομένου ότι ο αριθμός είναι ήδη περιορισμένος σε ένα συγκεκριμένο εύρος.

Ακόμη και αν ο αριθμός που θα μαντέψουμε μπορεί να είναι αυθαίρετα μεγάλος, οπότε δεν υπάρχει άνω όριο N , μπορούμε να βρούμε τον αριθμό με το πολύ $2\lceil \log_2 k \rceil$ βήματα (όπου το k είναι ένας άγνωστος επιλεγμένος αριθμός) βρίσκοντας αρχικά ένα άνω όριο με επαναλαμβανόμενους διπλασιασμούς. Για παράδειγμα, αν ο αριθμός ήταν το 11, θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την ακόλουθη σειρά προβλέψεων για να το βρούμε: 1, 2, 4, 8, 16, 12, 10, 11. Κάποιος θα μπορούσε επίσης να επεκτείνει την τεχνική ώστε να συμπεριλάβει και τους αρνητικούς αριθμούς. Για παράδειγμα οι ακόλουθες εικασίες θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση του -13: 0, -1, -2, -4, -8, -16, -12, -14, -13.

A.1.4.4 Λίστες λέξεων

Οι άνθρωποι συνήθως χρησιμοποιούν ένα μείγμα αλγορίθμων δυαδικής αναζήτησης και αναζήτησης παρεμβολής κατά την αναζήτηση σε ένα τηλεφωνικό κατάλογο, μετά την αρχική μαντεψιά εκμεταλλευόμαστε το γεγονός ότι οι εγγραφές είναι ταξινομημένες και μπορούμε γρήγορα να βρούμε την απαιτούμενη εγγραφή. Για παράδειγμα, κατά την αναζήτηση του Smith, αν οι Thomas και Rogers έχουν ήδη βρεθεί, κάποιος μπορεί να μεταβεί σε άλλη σελίδα περίπου στη μέση των δύο προηγούμενων εικασιών. Αν αυτή περιέχει το Samson, γνωρίζουμε ότι ο Smith είναι σε κάποια σελίδα μεταξύ του Samson και του Thomas και έτσι μπορούμε να διχοτομήσουμε το διάστημα αυτό.

A.1.4.5 Εφαρμογές στην θεωρία πολυπλοκότητας

Ακόμη και αν δεν γνωρίζουμε ένα σταθερό διάστημα στο οποίο περιέχεται ο αριθμός k , μπορούμε ακόμη να καθορίσουμε την τιμή του, κάνοντας $2\lceil \log_2 k \rceil$ απλές ΝΑΙ ή ΟΧΙ ερωτήσεις της μορφής 'Είναι το k μεγαλύτερο από το x ;' για κάποιον αριθμό x . Ως απλή συνέπεια αυτού, αν μπορείτε να απαντήσετε στην ερώτηση 'Είναι η περιοχή του

ακεραίου k μεγαλύτερη από μια συγκεκριμένη τιμή;’ σε ορισμένο χρονικό διάστημα, τότε μπορείτε να βρείτε την περιοχή του ακεραίου στον ίδιο χρόνο αυξημένο κατά τον παράγοντα $\log_2 k$. Αυτό ονομάζεται μείωση, και εξαιτίας αυτής οι περισσότεροι θεωρητικοί της πολυπλοκότητας επικεντρώνονται σε προβλήματα αποφάσεων, αλγορίθμους που παράγουν απλές απαντήσεις της μορφής Ναι ή Όχι.

Για παράδειγμα, ας υποθέσουμε ότι θα μπορούσαμε να απαντήσουμε στην ερώτηση ‘Έχει η $n \times n$ μήτρα ορίζουσα μεγαλύτερη από k σε χρόνο $O(n^2)$; Στη συνέχεια, με χρήση δυαδικής αναζήτησης, θα μπορούσαμε να βρούμε το ανώτατο όριο της ορίζουσας σε χρόνο $O(n^2 \log d)$, όπου d είναι η ορίζουσα. Αξίζει να σημειωθεί ότι το d δεν είναι το μέγεθος της εισόδου αλλά της εξόδου.

A.1.4.6 Μέθοδος

Για να συζητήσουμε την μέθοδο λεπτομερώς, είναι απαραίτητη μια πιο επίσημη περιγραφή. Η βασική ιδέα είναι ότι υπάρχει μια δομή δεδομένων που απεικονίζεται με ένα πίνακα A , με τα ανεξάρτητα στοιχεία του να συμβολίζονται ως $A(1)$, $A(2)$, ..., $A(N)$ και μπορεί να προσεγγιστεί με οποιαδήποτε σειρά. Η δομή δεδομένων περιέχει ένα υποστοιχείο ή ένα πεδίο δεδομένων που ονομάζεται κλειδί, και ο πίνακας διατάσσεται έτσι ώστε για τις διαδοχικές τιμές να ισχύει $A(1) \times \text{κλειδί} \leq A(2)$ και ούτω καθεξής. Η απαίτηση είναι ότι με δεδομένη κάποια τιμή του x , να βρεθεί ένας δείκτης p (όχι απαραίτητα ο ένας και μοναδικός) τέτοιος ώστε $A(p) \times \text{κλειδί} = x$.

Καταρχάς, το διάστημα αναζήτησης είναι ο πλήρης κατάλογος των στοιχείων, που χαρακτηρίζεται από μεταβλητές L και R , οι τιμές των οποίων αλλάζουν σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας αναζήτησης, όπως φαίνεται από το διάγραμμα ροής. Σημειώστε ότι η διαίρεση με τον παράγοντα δύο είναι διαίρεση ακεραίων, με οποιοδήποτε υπόλοιπο να χάνεται, έτσι ώστε το $3/2$ να γίνεται 1 , και όχι $1 \frac{1}{2}$. Η έρευνα ολοκληρώνεται είτε επειδή η τιμή έχει βρεθεί, είτε επειδή η συγκεκριμένη τιμή δεν περιέχεται στον κατάλογο.

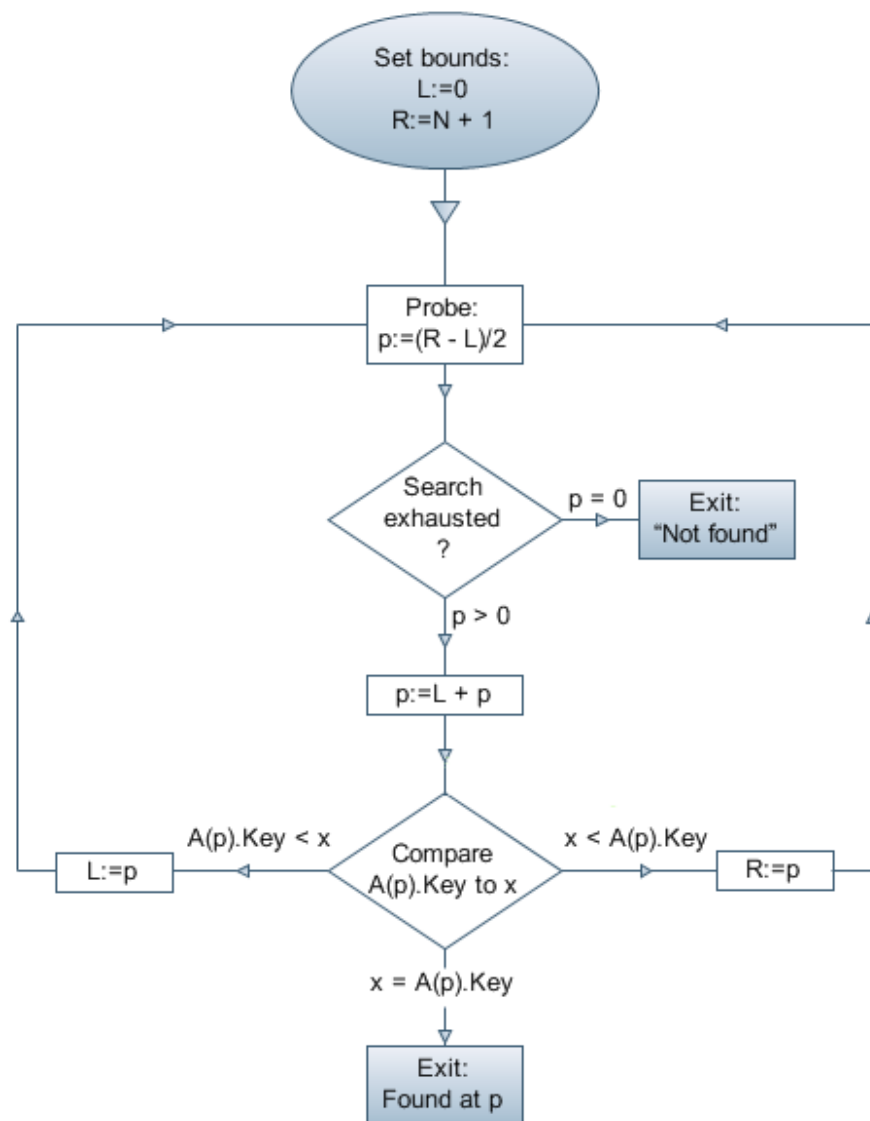
A.1.4.7 Λειτουργία μεθόδου

Η μέθοδος βασίζεται και υπερασπίζεται την ιδέα ότι εάν πρέπει να βρεθεί η τιμή του x , θα είναι μεταξύ των στοιχείων $(L+1)$ και $(R-1)$ του πίνακα.

Η αρχικοποίηση των L και R , κατά την οποία λαμβάνουν τιμές 0 και $N+1$ είναι μια απλή επαναδιατύπωση του προβλήματος, ότι τα στοιχεία 1 έως N θα ερευνηθούν, και έτσι η μέθοδος είναι έτοιμη να ξεκινήσει. Το πρώτο βήμα της κάθε επανάληψης είναι ο έλεγχος ότι υπάρχει κάτι να αναζητηθεί, δηλαδή αν υπάρχουν στοιχεία στο διάστημα αναζήτησης $(L+1)$ έως $(R-1)$. Ο αριθμός αυτών των στοιχείων είναι $(R-L-1)$, ώστε ο υπολογισμός $(R-L)$ έχει ως αποτέλεσμα τον αριθμό των στοιχείων $+ 1$. Η μείωση του αριθμού αυτού κατά το ήμισυ (με ακέραια διαίρεση) σημαίνει ότι εάν υπάρχει ένα στοιχείο (ή περισσότερα), τότε $p=1$ (ή περισσότερο), αλλά αν δεν υπάρχει τότε $p=0$, και στην περίπτωση αυτή, η μέθοδος τερματίζεται με την αναφορά ‘Δεν βρέθηκε’.

Διαφορετικά, για $p > 0$, η αναζήτηση συνεχίζεται με $p := L + p$, το οποίο εξ' ορισμού είναι εντός των ορίων $(L+1)$ και $(R-1)$. Το γεγονός ότι αυτή η τιμή στο ή κοντά στο μέσο της ρύθμισης δεν είναι σημαντικό στο συγκεκριμένο σημείο. Μας ενδιαφέρει απλώς το ότι είναι μια έγκυρη τιμή.

Binary Search
Given: array A with attribute Key ,
 elements 1 to N ordered on the values of Key
 so that $A(1).Key \leq A(2).Key \leq \dots \leq A(N).Key$
Find index p such that $A(p).Key = x$.



Διάγραμμα -A.8- Διάγραμμα ροής δεδομένων διαδικής αναζήτησης

Τώρα συγκρίνουμε το x με το $A(p)$ x Κλειδί. Αν $x=A(p)$ x Κλειδί τότε η μέθοδος τερματίζει επιτυχώς. Διαφορετικά, ας υποθέσουμε ότι $x < A(p)$ x Κλειδί. Αν ναι, τότε καθώς η λίστα είναι ταξινομημένη, το x θα πρέπει να είναι μικρότερο από όλα τα επόμενα στοιχεία του πίνακα, μέχρι το τελικό στοιχείο ($R-1$). Κατά συνέπεια, η τιμή του δεξιού δείκτη R μπορούν να τροποποιηθούν και να πάρει την τιμή p , δεδομένου ότι, από τη δοκιμή που μόλις έγινε, $x < A(p)$ x Κλειδί και έτσι, αν πρέπει να βρεθεί το x , θα βρίσκεται ανάμεσα σε στοιχεία μικρότερα του p , δηλαδή από το $(p-1)$ και νωρίτερα. Και αντιθέτως, για την περίπτωση που $x > A(p)$ x Κλειδί, η τιμή του L θα πρέπει να αλλάξει. Έτσι, οποιοδήποτε όριο και αν αλλάξει, η βασική ιδέα επιβεβαιώνεται, και περαιτέρω, το διάστημα αναζήτησης που απομένει είναι μειωμένο. Αν άλλαξε το L , έχει λάβει μια μεγαλύτερη τιμή (τουλάχιστον $L+1$), ενώ αν άλλαξε το R , έλαβε μια χαμηλότερη τιμή (πιθανότατα $R-1$), καθώς αυτά είναι τα όρια του p .

Αν απομένει μόνο μια τιμή στο διάστημα αναζήτησης (έτσι ώστε $L+1=p=R-1$), και το x δεν ταιριάζει, τότε, ανάλογα με το πρόσημο της σύγκρισης είτε το L είτε το R θα λάβει την τιμή του p και κατά την έναρξη της επόμενης επανάληψης το διάστημα θα βρεθεί κενό. Κατά συνέπεια, σε κάθε επανάληψη, αν το διάστημα αναζήτησης είναι κενό το αποτέλεσμα είναι "δεν βρέθηκε", αλλιώς είτε το x βρίσκεται στο αρχικό σημείο p είτε το διάστημα αναζήτησης μειώνεται για κάθε επόμενη επανάληψη.

A.1.4.8 Κώδικας Matlab

Η γενική μορφή του κώδικα που χρησιμοποιήθηκε στο Matlab για κίνηση κατά Brown είναι ο παρακάτω:

```
function IndVal = bin_sear (X,Val)

N = length(X);

if (N == 1),
    IndVal = 1;
else
    Ind1 = 1;
    Ind2 = N;
    IndM = floor(0.5.*N);
    Y1 = X(Ind1);
    Y2 = X(Ind2);
    Ym = X(IndM);

    Found = 0;
    while (Found == 0),
        %[[Ind1, IndM, Ind2]-499000, [Y1, Ym, Y2]]
        if (Val > Ym),
            Ind1 = IndM;
```

```

%Ind2 = Ind2;
Y1 = X(Ind1);
%Y2 = X(Ind2);

if ((Ind2-Ind1) >= 2),
    IndM = floor(floor(0.5.*(Ind2+Ind1)));
else
    Found = 1;
    if (abs(Val-Y1) < abs(Val-Y2)),
        IndVal = Ind1;
    else
        IndVal = Ind2;
    end
end

Ym = X(IndM);

elseif (Val < Ym),
    Ind2 = IndM;
    %Ind1 = Ind1;
    %Y1 = X(Ind1);
    Y2 = X(Ind2);

    if ((Ind2-Ind1) >= 2),
        IndM = floor(floor(0.5.*(Ind2+Ind1)));
    else
        Found = 1;
        if (abs(Val-Y1) < abs(Val-Y2)),
            IndVal = Ind1;
        else
            IndVal = Ind2;
        end
    end

    Ym = X(IndM);

else
    Found = 1;
    IndVal = IndM;
end
end
end

```

A.2 BUILD-IN ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΤΟΥ MATLAB

A.2.1 Συνάρτηση *binornd*

Η γενική μορφή της εντολής *binornd* όπως χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα είναι η εξής:

$$R = \text{binornd}(N,P) \quad (\text{A.16})$$

Η παραπάνω εντολή παράγει τυχαίους αριθμούς από τη διωνυμική κατανομή με παραμέτρους που καθορίζονται από το N και P . Τα N και P μπορεί να είναι διανύσματα, μήτρες, ή πολυδιάστατοι πίνακες που έχουν το ίδιο μέγεθος, το οποίο είναι και το μέγεθος του R . Μια βαθμωτή είσοδος για το N ή P επεκτείνεται σε έναν συνεχή πίνακα με τις ίδιες διαστάσεις όπως και οι υπόλοιπες εισοδοί.

A.2.2 Συνάρτηση *normrnd*

Η γενική μορφή της εντολής *normrnd* όπως χρησιμοποιείται στο πρόγραμμά είναι η εξής:

$$R = \text{normrnd}(\mu, \sigma) \quad (\text{A.17})$$

Η παραπάνω εντολή παράγει τυχαίους αριθμούς από την κανονική κατανομή με παραμέτρους μέση τιμή μ και τυπική απόκλιση σ . Οι παράμετροι αυτές μπορεί να είναι διανύσματα, μήτρες ή πολυδιάστατοι πίνακες που έχουν το ίδιο μέγεθος, το οποίο είναι ίσο με το μέγεθος του R . Μία βαθμωτή είσοδος του μ ή/και του σ επεκτείνεται σε ένα σταθερό πίνακα με τις ίδιες διαστάσεις όπως και για οποιαδήποτε άλλη είσοδο.

A.2.3 Συνάρτηση *fmincon*

Χρησιμοποιείται για την εύρεση της ελάχιστης τιμής μιας μη γραμμικής συνάρτησης πολλών μεταβλητών σύμφωνα με κάποιους περιορισμούς. Η γενική μορφή του προβλήματος είναι:

$$\min_x f(x) \text{ such that } \begin{cases} c(x) \leq 0 \\ \text{ceq}(x) = 0 \\ A \cdot x \leq b \\ A_{\text{eq}} \cdot x = b_{\text{eq}} \\ lb \leq x \leq ub, \end{cases}$$

όπου τα x , b , beq , lb , ub είναι διανύσματα, οι A και Aeq είναι πίνακες, οι $c(x)$ και $ceq(x)$ είναι συναρτήσεις που επιστρέφουν σαν αποτέλεσμα διανύσματα και η $f(x)$ είναι συνάρτηση που επιστρέφει σαν αποτέλεσμα ένα βαθμωτό μέγεθος. Οι $f(x)$, $c(x)$ και $ceq(x)$ μπορούν να είναι μη γραμμικές συναρτήσεις. Η γενική μορφή της εντολής **fmincon** όπως χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα είναι η εξής:

$$[x,fval] = \text{fmincon} (@\text{myfun}, x_0, A, b) \quad (\text{A.18})$$

όπου x_0 είναι μία αρχική τιμή από την οποία ξεκινάει η συνάρτηση **fmincon** για την εύρεση της τιμής του x που ελαχιστοποιεί την συνάρτηση f . Οι πίνακες A και B περιέχουν τους συντελεστές των μεταβλητών καθώς και τους σταθερούς όρους των περιορισμών. Η myfun είναι η συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί και η τιμή που λαμβάνει η συνάρτηση αυτή μετά την διαδικασία της ελαχιστοποίησης καταχωρείται στην μεταβλητή $fval$.

A.2.4 Συνάρτηση mean

Η γενική μορφή της εντολής **mean** όπως χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα είναι η εξής:

$$M = \text{mean} (A) \quad (\text{A.19})$$

Η παραπάνω εντολή επιστρέφει τις μέσες τιμές των στοιχείων κατά μήκος διαφορετικών διαστάσεων ενός πίνακα. Αν ο A είναι διάνυσμα, τότε επιστρέφει την μέση τιμή του A . Αν ο A είναι μήτρα, η εντολή αντιμετωπίζει τις στήλες του A ως διανύσματα και επιστρέφει ένα διάνυσμα-σειρά των μέσων τιμών. Αν ο A είναι πολυδιάστατος πίνακας, αντιμετωπίζει τις τιμές της πρώτης non-Singleton διάστασης ως διανύσματα, επιστρέφοντας ένα πίνακα με τις μέσες τιμές. Ο μαθηματικός τύπος της παραπάνω συνάρτησης είναι:

$$M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \text{ όπου } n \text{ το πλήθος των στοιχείων} \quad (\text{A.20})$$

A.2.5 Συνάρτηση std

Η γενική μορφή της εντολής **std** όπως χρησιμοποιείται στο πρόγραμμα είναι η εξής:

$$s = \text{std} (X) \quad (\text{A.21})$$

Υπάρχουν δύο κοινά αποδεκτοί ορισμοί για την τυπική απόκλιση s ενός διανύσματος δεδομένων X :

$$s = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.22})$$

$$s = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\text{A.23})$$

όπου n είναι ο αριθμός των στοιχείων του δείγματος. Οι δύο μορφές της εξίσωσης διαφέρουν μόνο στους όρους $n-1$ και n του παρονομαστή.

Η εντολή `std (X)` όπου X είναι ένα διάνυσμα, επιστρέφει την τυπική απόκλιση με τη χρήση της σχέσης (A.22) παραπάνω. Το αποτέλεσμα είναι η τετραγωνική ρίζα μιας αμερόληπτης εκτιμήτριας της διακύμανσης του πληθυσμού από την οποία έχει προκύψει το X , εφόσον το X αποτελείται από ανεξάρτητα, ομοίως κατανομημένα δείγματα. Αν το X είναι μια μήτρα, τότε η εντολή `std (X)` επιστρέφει ένα διάνυσμα-σειρά που περιέχει την τυπική απόκλιση των στοιχείων της κάθε στήλης της X . Αν το X είναι ένας πολυδιάστατος πίνακας, το `std (X)` είναι η τυπική απόκλιση των στοιχείων κατά μήκος της πρώτης non-singleton διάστασης του X .

A.2.6 Συνάρτηση `sort`

Η γενική μορφή της εντολής `sort` όπως χρησιμοποιείται στο πρόγραμμά είναι η εξής:

$$B = \text{sort} (A) \quad (\text{A.24})$$

Η παραπάνω εντολή ταξινομεί τα στοιχεία κατά μήκος διαφορετικών διαστάσεων ενός πίνακα, και τα τοποθετεί σε αύξουσα σειρά. Αν ο A είναι διάνυσμα, η εντολή επιστρέφει ταξινομημένα τα στοιχεία του A . Αν ο A είναι μήτρα, η εντολή επιστρέφει τα στοιχεία κάθε σειράς ταξινομημένα. Αν ο A είναι πολυδιάστατος πίνακας, η εντολή ταξινομεί τον A κατά μήκος της πρώτης non-singleton διαγωνίου και επιστρέφει έναν πίνακα ταξινομημένων διανυσμάτων.

Πίνακες ακεραίων αριθμών, αριθμών κινητής υποδιαστολής, λογικών συμβολών και χαρακτήρων επιτρέπονται. Οι πίνακες κινητής υποδιαστολής μπορεί να περιέχουν είτε θετικούς είτε αρνητικούς αριθμούς. Για τα στοιχεία του A με πανομοιότυπες τιμές, η σειρά των στοιχείων αυτών διατηρείται μέσα στη ταξινομημένη λίστα. Όταν ένας πίνακας περιέχει και θετικούς και αρνητικούς αριθμούς, τα στοιχεία του ταξινομούνται κατά μέγεθος, π.χ. `abs (A)`, και όπου τα μεγέθη είναι ίσα, ταξινομούνται περαιτέρω κατά γωνία φάσης, π.χ. `angle (A)`, στο διάστημα $[-\pi, \pi]$. Αν A περιλαμβάνει στοιχεία NaN, η εντολή τα τοποθετεί στο άνω άκρο.

Βιβλιογραφία

ΔΙΑΧΕΙΡΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ ΠΟΛΙΤΙΚΗ

Ι. ΨΑΡΡΑΣ, Καθ. ΕΜΠ

Η ΠΟΡΕΙΑ ΤΗΣ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗΣ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Π. ΚΑΠΡΟΥ, Πρόεδρος ΡΑΕ, Καθηγητής ΕΜΠ

ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ ΚΑΙ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΨΥΞΗΣ - Η ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

ΔΗΜΗΤΡΗΣ ΓΑΛΑΝΑΚΗΣ, Γραμματέας ΕΣΣΗΘ

Μάρτιος 2006

ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΑΝΤΑΓΩΝΙΣΤΙΚΟΤΗΤΑ & ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ

2007 -2013

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ

Δεκέμβριος 2006

ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΟΤΗΤΑΣ ΕΛΚΕΠΑ

Νοέμβριος 1994

ΗΜΕΡΙΔΑ ΤΕΕ

ΛΙΓΝΙΤΗΣ ΚΑΙ ΦΑ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΤΗΣ ΧΩΡΑΣ

ΚΩΝ. ΓΡ. ΘΕΟΦΥΛΑΚΤΟΣ

Ελληνικός Σύνδεσμος Συμπααραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

Αθήνα, 9/6/2005

6^ο ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΙΧΜΗΣ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ, ΜΗΧΑΝΕΣ ΙΣΧΥΟΣ STIRLING ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ

Ν. Α. ΜΠΟΡΜΠΙΛΑΣ, Δρ. ΕΜΠ

Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 2004

**STOCHASTIC MODEL FOR OPERATION OF BOTTOMING-CYCLE
COGENERATION FACILITY**

LUIS T. YOUN, KOUNG HEE LEEM

Future Power Systems, 2005 International Conference on
Volume , Issue , 18-18 Nov. 2005 Page(s):5 pp. - 5

**CO2 EMISSIONS TRADING PLANNING IN COMBINED HEAT AND POWER
PRODUCTION VIA MULTI-PERIOD STOCHASTIC OPTIMIZATION**

AIYING RONG, RISTO LAHDELMA

European Journal of Operational Research 176 (2007) 1874–1895

THE EUROPEAN EDUCATIONAL TOOL ON COGENERATION (EDUCOGEN)

Second Edition, December 2001

COMBINED HEAT AND POWER: CAPTURING WASTED ENERGY

NEAL ELLIOTT, MARK SPURR

May 1999

**SIMULATION AND OPTIMISATION OF POWER PRODUCTION IN BIOMASS-
FUELLED SMALL-SCALE CHP PLANTS**

TUULA SAVOLA

A thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the degree of Licentiate
of Science in Technology on 14th of March 2005.

**CONTRIBUTION FOR THE REVIEW OF DIRECTIVE 2003/087/EC ON EMISSION
TRADING - TREATMENT OF CHP/DHC UNDER EMISSION TRADING**

29 November 2005

POSITION OF COGEN EUROPE ON EMISSIONS TRADING AND CHP

21 MAY 2003

**NEW AND ADVANCED ENERGY CONVERSION TECHNOLOGIES - ANALYSIS OF
COGENERATION, COMBINED AND INTEGRATED CYCLES**

M.A. KOROBITSYN

EU POLICIES ON COMBINED HEAT-AND-POWER PRODUCTION (CHP)

REINHARD MADLENER

CEPE- Centre for Energy Policy and Economics, ETH Zurich

International OSCOGEN Workshop

'Cogeneration Operation in Competitive Markets'

St. Veit/Glan, Austria, January 2003

EFFICIENT ALGORITHMS FOR OPTIMIZING COMBINED HEAT AND POWER PRODUCTION UNDER THE ELECTRICITY MARKET

AIYING RONG, RISTO LAHDELMA

Tucs Technical Report

No 615, July 2004

THE ECONOMICS OF COGENERATION TECHNOLOGY ADOPTION AND DIFFUSION: A DETERMINISTIC MODEL

REINHARD MADLENER, MARCEL WICKART

CEPE Working Paper No. 27

December 2003, Revised December 2004

Δικτυακοί Τόποι:

www.hachp.gr

www.stoprog.org

www.cogeneurope.eu

www.retscreen.net

www.cogen.org

Wikipedia

<http://mally.eco.rug.nl/index.html?lnmb/lnmb.html>

http://www.ypan.gr/ape/sith_greece.html