



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

**ΕΝΤΑΞΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΙΚΤΟ ΑΚΕΡΑΙΟ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ
ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Λατσίδης Ηρακλής

Επίβλεψη : Πάυλος Σ. Γεωργιάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013



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

ΕΝΤΑΞΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΜΙΚΤΟ ΑΚΕΡΑΙΟ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ηρακλής Λατσίδης

Επίβλεψη : Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 10^η Ιουλίου 2013.

.....
Παύλος Γεωργιλάκης
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

.....
Γεώργιος Κορρές
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Κωνσταντίνος Βουρνάς
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2013

.....
Ηρακλής Λατσίδης

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

Copyright © Ηρακλής Λατσίδης, 2013.

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

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες έχουν γίνει προσπάθειες σε όλο τον κόσμο αλλά και στην Ελλάδα για την απελευθέρωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας. Στις μέρες μας, η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή η μετάβαση από τα παραδοσιακά μονοπώλια στις ανταγωνιστικές αγορές, έχει γίνει πραγματικότητα. Ένας σημαντικός παράγοντας στην απελευθερωμένη αγορά είναι η διαδικασία της ένταξης των μονάδων, καθώς, διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον καθημερινό σχεδιασμό της λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος, αλλά και διαμορφώνει παράλληλα τους οικονομικούς συσχετισμούς μεταξύ των παραγόντων εκείνων που δραστηριοποιούνται μέσα στα πλαίσια της νέας αγοράς.

Στο μονοπωλιακό περιβάλλον στο παρελθόν, η ένταξη των μονάδων χρησιμοποιούταν για τον προγραμματισμό των μονάδων παραγωγής, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό λειτουργικό κόστος της παραγωγής, ικανοποιώντας περιορισμούς, όπως η ζήτηση ενέργειας και η εφεδρεία. Στο απελευθερωμένο περιβάλλον, από την άλλη πλευρά, η ένταξη των μονάδων έχει γίνει περισσότερο περίπλοκη και ανταγωνιστική. Εφαρμόζεται από κάθε επιχείρηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ονομάζεται ένταξη μονάδων παραγωγής με βάση το κέρδος και αφορά στη βελτιστοποίηση των μέσων παραγωγής με στόχο τη μεγιστοποίηση του κέρδους της επιχείρησης. Ως εκ τούτου, η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί σημαντικό παράγοντα στη διαδικασία λήψης αποφάσεων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά με τη χρήση μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού. Το μαθηματικό μοντέλο του προβλήματος εφαρμόστηκε στο περιβάλλον του GAMS. Όλοι οι συνήθεις περιορισμοί των μονάδων παραγωγής λαμβάνονται υπόψη. Παρουσιάζονται εφαρμογές της μεθόδου σε συστήματα που διαθέτουν μέχρι 50 μονάδες παραγωγής και γίνεται σχολιασμός των αποτελεσμάτων.

Λέξεις κλειδιά

Ένταξη Μονάδων, Απελευθερωμένη Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας, Βελτιστοποίηση, Μικτός Ακέραιος μη-Γραμμικός Προγραμματισμός, GAMS.

Abstract

During the last two decades there have been efforts both around the world and in Greece for the liberalization of electricity markets. Nowadays, the transition from traditional monopolies to competitive markets has become a reality. An important factor in the liberalized market is the unit commitment, as it not only plays an important role in the daily planning of the operation of electric power systems, but also creates economic relations between the actors that operate within the new market.

In the monopolistic environment of the past, Unit Commitment (UC) was used for the planning of production units in order to minimize the overall operating cost of production, satisfying constraints such as energy demand and reserve. In a liberalized environment, on the other hand, UC has become more complex and competitive. It is known as Price-based Unit Commitment (PBUC), it is applied by the Generation Companies (GENCO's) and it concerns the optimization of the means of production in order to maximize the profit of the business. Therefore, electricity prices are an important factor in the decision making process.

The present thesis is solving the problem of the PBUC by using Mixed Integer Nonlinear Programming. The mathematical model of the problem, was solved under GAMS environment. All the usual constraints of generating units are taken into account. Also, the thesis presents applications of the method for GENCO's with up to 50 production units as well as it discusses the obtained results.

Keywords

Unit Commitment, UC, Price-based Unit Commitment, PBUC, Deregulated Electricity Market, Optimization, Mixed Integer Non Linear Programming, MINLP, GAMS.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2012-2013 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιάκη, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντας μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τους φίλους μου για τη στήριξη και βοήθεια τους όλα τα χρόνια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Αντικείμενο της εργασίας	2
1.3 Δομή της εργασίας.....	2
1.4 Βιβλιογραφία.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.....	5
2.1 Η πορεία προς την απελευθέρωση και νομοθετικά πλαίσια	5
2.1.1 Η οδηγία 96/92	5
2.1.2 Ν. 2773/99.....	5
2.1.3 Πράξεις τροποποίησης του Ν. 2773/99.....	6
2.1.3.1 Ν. 3175/2003	6
2.1.3.2 Ν. 4001/2011 – Σύσταση Α.Δ.Μ.Η.Ε. και Λ.ΑΓ.Η.Ε.....	7
2.2 Παράγοντες της αγοράς	7
2.2.1 Παραγωγοί.....	8
2.2.2 Προμηθευτές.....	8
2.2.3 Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.)	8
2.2.4 Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Λ.ΑΓ.Η.Ε.).....	9
2.2.5 Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Α.Δ.Μ.Η.Ε.)....	10

2.2.6	ΔΕΗ.....	11
2.2.7	Παραγωγή από ΑΠΕ & Μικρή Συμπαράγωγή.....	12
2.3	Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός (Η.Ε.Π.)	12
2.3.1	Εισαγωγή.....	12
2.3.2	Αντικείμενο ΗΕΠ	13
2.3.3	Συμμετοχή στον ΗΕΠ	13
2.4	Βιβλιογραφία.....	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ		17
3.1	Εισαγωγή	17
3.2	Γενικό Πλαίσιο και σχεδιασμός.....	18
3.2	Το Πρόβλημα της Ένταξης των Μονάδων στην Απελευθερωμένη Αγορά.....	19
3.3	Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος	20
3.4	Βιβλιογραφία	21
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΕ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΜΕΝΗ ΑΓΟΡΑ ΜΕ ΜΙΚΤΟ ΑΚΕΡΑΙΟ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ		23
4.1	Εισαγωγή	23
4.2	Βασική δομή μοντέλου σε GAMS	24
4.3	Ο SOLVER SCIP του GAMS	26
4.3	Οι επιλογές optca και optcr.....	26

4.4 Μοντελοποίηση και εφαρμογή του αλγόριθμου	27
4.4.1 Εισαγωγή δεδομένων.....	27
4.4.2 Διαχωρισμός μεταβλητών και αρχικοποίηση.....	29
4.4.3 Μοντελοποίηση εξισώσεων	30
4.4.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων.....	32
4.5 Βιβλιογραφία	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ - ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	33
5.1 Εισαγωγή	33
5.2 Εφαρμογές σε σύστημα 4 μονάδων για 8 ώρες προγραμματισμού.....	33
5.2.1 Δεδομένα συστήματος	33
5.2.2 Σενάρια και Αποτελέσματα.....	35
5.2.2.1 Αποτελέσματα για το Σενάριο 1 του συστήματος 4x8	36
5.2.2.2 Αποτελέσματα για το Σενάριο 2 του συστήματος 4x8	40
5.2.2.3 Αποτελέσματα για το Σενάριο 3 του συστήματος 4x8	43
5.2.2.4 Αποτελέσματα για το Σενάριο 4 του συστήματος 4x8	45
5.2.2.5 Αποτελέσματα για το Σενάριο 5 του συστήματος 4x8	48
5.2.2.6 Αποτελέσματα για το Σενάριο 6 του συστήματος 4x8	51
5.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων	57
5.3 Εφαρμογές σε σύστημα 10 μονάδων για 24 ώρες προγραμματισμού.....	59
5.3.1 Δεδομένα συστήματος	59
5.3.2 Σενάρια και Αποτελέσματα.....	61
5.3.2.1 Αποτελέσματα για το Σενάριο 1 του συστήματος 10x24	62

5.3.2.2	Αποτελέσματα για το σενάριο 2 του συστήματος 10x24.....	67
5.3.2.3	Αποτελέσματα για το σενάριο 3 του συστήματος 10x24.....	72
5.3.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	82
5.4	Εφαρμογή σε σύστημα 20 μονάδων για 24 ώρες προγραμματισμού	84
5.4.1	Δεδομένα συστήματος.....	84
5.4.2	Αποτελέσματα εφαρμογής.....	85
5.5	Εφαρμογή σε σύστημα 50 μονάδων για 24 ώρες προγραμματισμού	92
5.5.1	Δεδομένα συστήματος.....	92
5.5.2	Αποτελέσματα εφαρμογής.....	93
5.5.3	Σχολιασμός αποτελεσμάτων	104
5.6	Βιβλιογραφία	106
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6:	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	107
6.1	Σύνοψη της εργασίας και των αποτελεσμάτων.....	107

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η Ένταξη των Μονάδων (Unit Commitment) είναι ένα πολύ σημαντικό έργο βελτιστοποίησης, το οποίο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στον καθημερινό σχεδιασμό της λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων ισχύος. Για το λόγο αυτό αποτελεί ένα σημαντικό θέμα προς έρευνα το οποίο προσελκύει πολλές ερευνητικές προσπάθειες.

Στις μη-απελευθερωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η Ένταξη των Μονάδων αναφέρεται στη βελτιστοποίηση των πόρων παραγωγής, σε καθημερινό ή σε εβδομαδιαίο χρονικό ορίζοντα, με σκοπό να ικανοποιήσει πλήρως τη ζήτηση φορτίου με το ελάχιστο λειτουργικό κόστος, ενώ παράλληλα ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς, όπως: τους ελάχιστους χρόνους λειτουργίας ή διακοπής της λειτουργίας για κάθε μονάδα, τη μέγιστη ικανότητα αλλαγής της παραγόμενης ισχύος είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω, την ελάχιστη και τη μέγιστη ικανότητα παραγωγής. Δεδομένου ότι ο σχετικός στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους, το πρόβλημα αναφέρεται ως Ένταξη των Μονάδων για την ελαχιστοποίηση του κόστους (Cost-based Unit Commitment, CBUC). Η βέλτιστη λύση στο πρόβλημα της Ένταξης των Μονάδων για την ελαχιστοποίηση του κόστους μπορεί να υπολογιστεί με εξαντλητική αναζήτηση, η οποία, όμως, είναι απαγορευτική στην πράξη λόγω των υπερβολικών υπολογιστικών απαιτήσεων. Η ανάγκη για πρακτικές, οικονομικά αποδοτικές λύσεις στο πρόβλημα της Ένταξης των Μονάδων, οδήγησε στην ανάπτυξη διάφορων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, με σκοπό τον αποτελεσματικό προγραμματισμό σε συστήματα πραγματικού μεγέθους που αποτελούνται από εκατοντάδες γεννήτριες. Μέθοδοι για την Ένταξη των Μονάδων με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους αποτελούν η μέθοδος της λίστας προτεραιότητας, η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού, η μέθοδος διάσπασης Lagrange, η μέθοδος branch-and-bound, η μέθοδος αποσύνθεσης Benders και η μέθοδος μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Επιπλέον, τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, γενετικοί αλγόριθμοι και υβριδικές τεχνικές έχουν χρησιμοποιηθεί για την προσέγγιση λύσεων της Ένταξης των Μονάδων με σκοπό τη μείωση του λειτουργικού κόστους.

Δεδομένου ότι η ηλεκτρική βιομηχανία αναδιαρθρώνεται, πολλοί από τους παραδοσιακούς αλγορίθμους για τον έλεγχο των μονάδων παραγωγής πρέπει να τροποποιηθούν ή να αντικατασταθούν. Πλέον, οι αλγόριθμοι για την Ένταξη των Μονάδων που μεγιστοποιούν το κέρδος διαδραματίζουν ουσιαστικό ρόλο στην ανάπτυξη επιτυχημένων στρατηγικών υποβολής

προσφορών σε μία ανταγωνιστική αγορά. Η απλή προσφορά προτάσεων για να κερδηθούν νέα συμβόλαια είναι ανεπαρκής, καθώς, αυτές οι στρατηγικές προσφορών πρέπει να οδηγούν σε συμβόλαια που, κατά μέσο όρο, καλύπτουν το σύνολο του κόστους παραγωγής. Επιπλέον, δεν παρέχεται πλέον εγγύηση σε κανέναν παραγωγό για να είναι ο μοναδικός προμηθευτής ηλεκτρικής ενέργειας, με αποτέλεσμα το μερίδιο συμμετοχής μίας εταιρείας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στη συνολική ζήτηση είναι πιο δύσκολο να προβλεφθεί από ότι στο παρελθόν. Τέλος, η κατάργηση της υποχρέωσης για την εξυπηρέτηση όλου του φορτίου ζήτησης χαλαρώνει τον συγκεκριμένο περιορισμό [1.2].

Στην απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας η Ένταξη των Μονάδων χρησιμοποιείται από τις εταιρείες παραγωγής ενέργειας και αναφέρεται ως Ένταξη των Μονάδων για τη μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους (Price-based Unit Commitment, PBOC). Σκοπός, όπως αναφέρθηκε είναι η βελτιστοποίηση των πόρων παραγωγής προκειμένου να μεγιστοποιηθούν τα συνολικά κέρδη των επιχειρήσεων παραγωγής ενέργειας. Το PBOC είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μεγάλης κλίμακας, μη κυρτό, συνεχές και μη γραμμικό, μικτού-ακέραιου προγραμματισμού, που ανήκει στην κατηγορία προβλημάτων NP-hard. Καθώς οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας αλλάζουν με ταχείς ρυθμούς, υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για το πώς λύνονται νέα PBOC μοντέλα. Για το λόγο αυτό διάφοροι μέθοδοι έχουν προταθεί για την επίλυση του προβλήματος της Ένταξης των Μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά με σκοπό τη μεγιστοποίηση των συνολικών κερδών των εταιρειών παραγωγής ενέργειας, συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων: τη μέθοδο χαλάρωσης Lagrange, το μικτό ακέραιο προγραμματισμό, γενετικούς αλγόριθμους, μιμητικούς αλγόριθμους, τη μέθοδο επιλεκτικής απαρίθμησης, υβριδικές μεθόδους [1.1].

1.2 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Με βάση τα παραπάνω, η συγκεκριμένη εργασία εξετάζει το πρόβλημα της ένταξης των θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην απελευθερωμένη αγορά, το οποίο ανάγεται σε ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα αναφέρεται στην εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού θερμικών μονάδων παραγωγής που πρέπει να λειτουργήσουν σε κάθε ώρα του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, προκειμένου να γίνει μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, ικανοποιώντας, παράλληλα, ένα μεγάλο αριθμό περιορισμών. Για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος χρησιμοποιήθηκε αλγόριθμος μικτού-ακέραιου μη-γραμμικού προγραμματισμού, ο οποίος εφαρμόστηκε σε προγραμματιστικό περιβάλλον GAMS για διάφορα σενάρια και διαφορετικού μεγέθους συστήματα, τα οποία περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια.

1.3 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Στα πλαίσια αυτά και προκειμένου να αποκτηθεί μια σφαιρικότερη εικόνα γύρω από τη σημασία της διαδικασίας της ένταξης των μονάδων στη βάση των νέων δεδομένων που έχουν διαμορφωθεί, η εργασία έχει χωρισθεί σε έξι επιμέρους κεφάλαια.

Στο αμέσως επόμενο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στις ακριβείς διαδικασίες μέσα από τις οποίες η ελληνική ενεργειακή αγορά περνάει στη φάση του ελεύθερου ανταγωνισμού. Αφού γίνει σύντομη αναφορά στα νομοθετικά πλαίσια αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο ρυθμίζονται καίρια ζητήματα, όπως ο διαχωρισμός των πελατών, η χορήγηση αδειών παραγωγής και προμήθειας, η ίδρυση δημόσιων φορέων και οργανισμών που εξασφαλίζουν λειτουργική ισονομία, αλλά και ο ρόλος της Δ.Ε.Η μέσα στη νέα πραγματικότητα. Ακολούθως γίνεται αναφορά στους νέους παράγοντες οι οποίοι αποκτούν υπόσταση και δραστηριοποιούνται μέσα στη νέα αγορά, καθώς και στις αρμοδιότητες και τις υποχρεώσεις αυτών. Επίσης, γίνεται αναφορά και στη διαδικασία του ημερήσιου προγραμματισμού, στην οποία εντάσσεται και το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων, ώστε να γίνει κατανοητός ο σημαντικός ρόλος που διαδραματίζει στα πλαίσια της λειτουργίας της απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων και οι αλλαγές που έγιναν στην αντιμετώπιση του μετά την απελευθέρωση της ενεργειακής βιομηχανίας. Ακόμη, γίνεται μία σύντομη αναφορά σε μεθόδους που έχουν αξιοποιηθεί για την επίλυσή του.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφεται η μοντελοποίηση που έγινε, στα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας, για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά, χρησιμοποιώντας το λογισμικό βελτιστοποίησης του GAMS. Εμφανίζονται η δομή ενός μοντέλου του GAMS αλλά και τα γενικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του solver SCIP του GAMS, που χρησιμοποιήθηκε. Ακόμη, παρουσιάζεται η διαδικασία που χρησιμοποιείται για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων.

Στο πέμπτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής του μοντέλου σε διάφορα συστήματα. Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του GAMS στην επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων με χρήση Μικτού Ακέραιου μη Γραμμικού Προγραμματισμού. Παράλληλα, γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων ανάμεσα σε διαφορετικά σενάρια και διαφορετικά συστήματα.

Τέλος, στο έκτο κεφάλαιο γίνεται μια σύντομη ανακεφαλαίωση των βασικών θεμάτων που εξετάστηκαν στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

1.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] D.K. Dimitroulas, P.S. Georgilakis, “A new memetic algorithm approach for the price based unit commitment problem”, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 12, pp. 4687-4699, December 2011.
- [1.2] C. W. Richter, Jr., G. B. Sheblé, “A Profit-Based Unit Commitment GA for the Competitive Environment”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 15, No. 12, pp. 715-721, May 2000.

ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

2.1 Η ΠΟΡΕΙΑ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΚΑΙ ΝΟΜΟΘΕΤΙΚΑ ΠΛΑΙΣΙΑ

2.1.1 Η οδηγία 96/92

Το πρώτο θεσμικό πλαίσιο προς μια απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση ήταν η ψήφιση της Κοινοτικής Οδηγίας 96/92/ΕΚ. Οι διατάξεις της καθόρισαν τις βασικές αρχές προς το άνοιγμα της αγοράς. Μεταξύ άλλων εισάγεται η έννοια του διαχωρισμού των πελατών-καταναλωτών σε «επιλέξιμους πελάτες», οι οποίοι έχουν δικαίωμα επιλογής προμηθευτή ηλεκτρικής ενέργειας (αρχικά ισχύει για όσους συνδέονται σε υψηλή και μέση τάση), και σε μη επιλέξιμους, οι οποίοι προμηθεύονται ηλεκτρική ενέργεια από τις κρατικές εταιρίες. Σκοπός της απελευθέρωσης είναι σταδιακά όλοι οι πελάτες να μεταβούν στην πρώτη κατηγορία.

Επιπλέον, οποιοσδήποτε ιδιώτης έχει δυνατότητα παραγωγής ή προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας, εφόσον κατέχει σχετική άδεια για παραγωγή ή προμήθεια. Οι κρατικές εταιρίες, στα πλαίσια του ελεύθερου ανταγωνισμού, που πρέπει να διέπει την απελευθερωμένη αγορά, μπαίνουν σε διαδικασία μετατροπής τους σε ανώνυμες εταιρίες με σαφώς διαχωρισμένες τις δραστηριότητες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής (καθετοποιημένες επιχειρήσεις) [2.1].

2.1.2 Ν. 2773/99

Οι οδηγίες της Κοινοτικής Οδηγίας 96/92 εφαρμόστηκαν στην Ελλάδα με τη χρήση του Νόμου 2773/99 [2.2] που καθορίζει το πλαίσιο της απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κύριες κατευθύνσεις που ενσωματώνονται με αυτό το νόμο είναι οι ακόλουθες:

1. Δημιουργία της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ), ως ανεξάρτητης αρχής που έχει τα ακόλουθα καθήκοντα και ευθύνες:
 - Συμβουλευτικά καθήκοντα: προτείνει μέτρα, εκδίδει απλές ή δεσμευτικές γνώμες σε θέματα δευτεροβάθμιας νομοθεσίας, χορήγησης αδειών και ρυθμιζόμενων τιμολογίων

- Λήψη αποφάσεων: επιβάλλει πρόστιμα, εγκρίνει την εφαρμογή των μέτρων που καθορίζουν το πλαίσιο της ηλεκτρικής αγοράς ενέργειας, εκδίδει αποφάσεις στην περίπτωση των καταγγελιών κατά των εμπλεκομένων.
 - Επίλυση διαφορών μεταξύ των καταναλωτών και των συμμετεχόντων στην αγορά, ή μεταξύ των συμμετεχόντων στην αγορά και των εταιρειών διαχείρισης των δικτύων.
 - Παρακολούθηση και υποβολή εκθέσεων σχετικά με τις επιδόσεις της αγοράς και την ασφάλεια των προμηθειών.
2. Δημιουργία του Διαχειριστή του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΣΜΗΕ) για το διασυνδεδεμένο σύστημα, ως κατά πλειοψηφία κρατική εταιρεία, καθώς το 49% των μετοχών της ανήκουν στην ΔΕΗ, με δύο κύριες αρμοδιότητες: α) να διασφαλίσει την ισορροπία μεταξύ της παραγωγής και της κατανάλωσης, την αξιοπιστία, την ασφάλεια και την ποιότητα στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας, και β) για το διακανονισμό των συναλλαγών της αγοράς, όπως σε μία χρηματιστηριακή αγορά ενέργειας που οργανώνει σε καθημερινή βάση τις χρεώσεις και τις πιστώσεις των συμμετεχόντων.
 3. Η ΔΕΗ γίνεται ανώνυμη εταιρεία (ΔΕΗ Α.Ε.), με το κράτος να κατέχει το 51% των μετοχών, και κατέχει αποκλειστικά την ιδιοκτησία και τη λειτουργία του δικτύου διανομής και την κυριότητα του δικτύου μεταφοράς.
 4. Σταδιακή εφαρμογή του δικαιώματος των πελατών να επιλέξουν προμηθευτή, ξεκινώντας με το 30% των πελατών, δηλαδή 450 μεγάλους πελάτες που καταναλώνουν περισσότερο από 2 GWh / έτος
 5. Έκδοση άδειας η οποία εκδίδεται από το Υπουργείο Ανάπτυξης σε διαβούλευση με τη ΡΑΕ για την παραγωγή και την παροχή ενέργειας.
 6. Ρυθμιζόμενη πρόσβαση για τρίτους, δηλαδή ρυθμίσεις για την πρόσβαση νεοεισερχομένων στο εγκατεστημένο δίκτυο.
 7. Απελευθέρωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), την παραγωγή και συμπαραγωγή, η οποία συνίσταται στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρήσιμης θερμότητας από ένα σταθμό παραγωγής [2.3].

2.1.3 Πράξεις τροποποίησης του Ν. 2773/99

2.1.3.1 Ν. 3175/2003

Από τις 23/07/2003 ισχύει η τροποποίηση του Νόμου 2773/99, η οποία επιφέρει σημαντικές αλλαγές στη λειτουργία της απελευθερωμένης ελληνικής αγοράς, στην κατεύθυνση πάντα της όσο το δυνατόν πιο ομαλής μετάβασης από τη μονοπωλιακή κατάσταση στον ελεύθερο ανταγωνισμό.

Πιο συγκεκριμένα, με την τροποποίηση του νόμου καθορίζεται με σαφήνεια το χρονοδιάγραμμα που απαιτείται να ακολουθηθεί για τη σταδιακή απελευθέρωση της ελληνικής αγοράς ενέργειας. Από την 01/07/2004 δικαίωμα επιλογής προμηθευτή αποκτούν όλοι οι καταναλωτές, πλην των μεμονωμένων νοικοκυριών, ενώ από την 01/07/2007 όλοι οι

καταναλωτές μεταπίπτουν στην κατηγορία των επιλεγόντων πελατών. Εξαίρεση αποτελούν τα μη διασυνδεδεμένα νησιά, όπου, όπως προαναφέρθηκε, το ρόλο του Διαχειριστή αναλαμβάνει η Δ.Ε.Η. Μεταρρυθμίζεται επίσης, το καθεστώς χορήγησης άδειας προς τους προμηθευτές, καθώς απαιτείται πλέον λεπτομερής έλεγχος για την αξιοπιστία και την επάρκεια κεφαλαίου του υποψηφίου. Εξασφαλίζεται, τέλος, η δυνατότητα για απευθείας ανάπτυξη οικονομικών σχέσεων μεταξύ προμηθευτών και καταναλωτών, δίχως παρεμβάσεις και περιορισμούς [2.3], [2.4].

2.1.3.2 Ν. 4001/2011 - Σύσταση Α.Δ.Μ.Η.Ε. και Λ.Α.Γ.Η.Ε.

Ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ) Α.Ε. συστάθηκε σύμφωνα με το Ν. 4001/2011 [2.8], «Για τη λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις» και σε συμμόρφωση με την Οδηγία 10 2009/72/ΕΚ της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με την οργάνωση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό να αναλάβει τα καθήκοντα του Διαχειριστή του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ). Στο πλαίσιο αυτό σκοπός του ΑΔΜΗΕ είναι η λειτουργία, συντήρηση και ανάπτυξη του ΕΣΜΗΕ ώστε να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια με τρόπο ασφαλή, αποδοτικό και αξιόπιστο.

Επιπλέον, ο ΑΔΜΗΕ Α.Ε. μετεξελίσσεται στο Λειτουργό της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Λ.Α.Γ.Η.Ε Α.Ε.). Ο Λ.Α.Γ.Η.Ε. λειτουργεί την Ημερήσια Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας και προβαίνει σε κάθε ενέργεια που είναι αναγκαία για την έγκαιρη και συντονισμένη δημιουργία της εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ιδίως μέσω της μετάβασης, το αργότερο μέχρι το Δεκέμβριο του 2014, προς το ενιαίο ευρωπαϊκό μοντέλο αγοράς (target model) [2.5].

2.2 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΤΗΣ ΑΓΟΡΑΣ

Γίνεται επομένως σαφές ότι η λειτουργία της ενεργειακής αγοράς σε ανταγωνιστικά πρότυπα είναι μία πραγματικότητα που αργά ή γρήγορα θα υπάρξει και στη χώρα μας, παρά το γεγονός ότι το υψηλό κόστος των επενδύσεων που απαιτούνται για την είσοδο νέων παραγωγών στην ενεργειακή βιομηχανία αποτελεί ανασταλτικό παράγοντα στην πορεία της απελευθέρωσης, σε αντίθεση με την αντίστοιχη αγορά τηλεπικοινωνιών, όπου η απελευθέρωση συντελέστηκε με γοργούς ρυθμούς, συνεπικουρούμενη από το σαφώς χαμηλότερο απαιτούμενο επενδυτικό κόστος. Το γεγονός αυτό καθιστά απαραίτητη τη σύσταση ρυθμιστικών αρχών και φορέων που θα εξασφαλίζουν την ομαλή, αξιόπιστη και διαφανή λειτουργία της νέας αγοράς και όλων των εμπλεκόμενων σε αυτή παραγόντων.

Στη συνέχεια, λοιπόν, γίνεται αναφορά στους παράγοντες της απελευθερωμένης αγοράς και στον τρόπο που αυτοί δραστηριοποιούνται στα πλαίσια του ανταγωνισμού [2.5], [2.6].

2.2.1 Παραγωγοί

Πρόκειται για τους ιδιώτες που κατέχουν άδεια για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία τους χορηγείται από τη Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας. Πέραν της Δ.Ε.Η., στον τομέα της παραγωγής δραστηριοποιούνται και ήδη κάποιες εταιρείες (ΡΟΚΑΣ, ΤΕΡΝΑ, Μυτιληναίος, Μηχανική), ενώ σε εξέλιξη βρίσκονται σχέδια για την απόσχιση των ενεργειακών δραστηριοτήτων των περισσότερων κατασκευαστικών και τη δημιουργία περισσότερων μικρών και αυτόνομων ενεργειακών εταιρειών.

2.2.2 Προμηθευτές

Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι ιδιώτες οι οποίοι κατέχουν άδεια για προμήθεια επιλεγέντων πελατών, με τους οποίους συνάπτουν συμβόλαια πώλησης. Σε αυτούς συμπεριλαμβάνεται και η Δ.Ε.Η., η οποία είναι και η μοναδική υπεύθυνη για την προμήθεια μη επιλεγέντων πελατών.

2.2.3 Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (Ρ.Α.Ε.)

Η Ρ.Α.Ε. συστήθηκε βάση του νόμου 2773/99, καθώς αποτελεί απαραίτητο βήμα στην προσπάθεια επίτευξης των αναγκαίων διαρθρωτικών αλλαγών στην αγορά. Πρόκειται για μια ανεξάρτητη διοικητική αρχή, οικονομικά και διοικητικά αυτοτελή, με αρμοδιότητες κυρίως γνωμοδοτικού και εισηγητικού χαρακτήρα πάνω στη λειτουργία της ενεργειακής αγοράς.

Η Ρ.Α.Ε. συγκροτείται από πέντε μέλη με ιδιαίτερα εξειδικευμένες γνώσεις και εμπειρία στον ενεργειακό τομέα. Κατά τη διάρκεια της θητείας τους, που είναι πενταετής, τα μέλη αυτά απαγορεύεται να εμπλέκονται κατά οποιονδήποτε τρόπο σε επιχειρήσεις, οι οποίες δραστηριοποιούνται στον τομέα της ενέργειας. Ως αρχή, εποπτεύεται από τον Υπουργό Ανάπτυξης σε ό,τι αφορά τον έλεγχο του νομίμου των πράξεων των μελών της, αλλά και τον πειθαρχικό έλεγχο αυτών.

Η Ρ.Α.Ε. γνωμοδοτεί για τη χορήγηση αδειών, παρακολουθεί και ελέγχει τη διαδικασία χορήγησης αυτών, καθώς και τη γενικότερη λειτουργία της απελευθερωμένης ενεργειακής αγοράς. Αρμοδιότητά της αποτελεί, επίσης, η επιβολή προστίμων στους παραβάτες των διατάξεων του νόμου 2773/99. Επιπλέον, συνεργάζεται με αντίστοιχες αρχές άλλων χωρών ή διεθνείς οργανισμούς και ενημερώνει την αρμόδια Επιτροπή της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την πορεία απελευθέρωσης της ενεργειακής αγοράς στη χώρα μας.

Στρατηγικό στόχο και άμεση προτεραιότητα της Ρ.Α.Ε αποτελεί η δημιουργία κλίματος ελεύθερου και υγιούς ανταγωνισμού στην ενεργειακή αγορά, με σκοπό την ποιοτική και ασφαλή εξυπηρέτηση των καταναλωτών, με παράλληλη μείωση του κόστους παροχής ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και την ανάδειξη των πραγματικά υγιών επιχειρήσεων και την εξασφάλιση της βιωσιμότητας των μικρομεσαίων επιχειρήσεων. Στα πλαίσια αυτά μπορεί να επιτευχθεί η παροχή οικονομικών και ποιοτικών υπηρεσιών σε όλους τους καταναλωτές, ανεξαρτήτως γεωγραφικής

θέσης (π.χ. νησιά, ακριτικές περιοχές) ή κοινωνικής τάξης, αλλά και η προστασία του περιβάλλοντος, σύμφωνα και με τις διεθνείς υποχρεώσεις της χώρας μας. Βασικό, επίσης, στόχο της Ρ.Α.Ε αποτελεί και η ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμπαραγωγής και νέων τεχνολογιών στον ενεργειακό τομέα, πάντα υπό το πρίσμα του ελεύθερου ανταγωνισμού, καθώς και η δημιουργία όσο το δυνατόν επαρκέστερης υποδομής σε ό,τι αφορά την παραγωγή, μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας, αποσκοπώντας στη διευκόλυνση της πρόσβασης νέων επιχειρήσεων στο ενεργειακό χρηματιστήριο, αλλά και στην παροχή καλύτερων υπηρεσιών στους καταναλωτές.

Στην προσπάθεια επίτευξης των παραπάνω στόχων, η Ρ.Α.Ε αναλαμβάνει μια σειρά από πρωτοβουλίες, πάντα μέσα στο πνεύμα των αρμοδιοτήτων και του χαρακτήρα της. Μια τέτοια πρωτοβουλία αποτελεί και η παροχή πλήρους, αντικειμενικής και δωρεάν πληροφόρησης προς όλους τους ενδιαφερόμενους μέσω του διαδικτύου (στατιστικά στοιχεία, τιμές, προβλέψεις κατανάλωσης κ.λ.π.), ενισχύοντας τον ελεύθερο ανταγωνισμό και καταπολεμώντας τυχόν μονοπωλιακές καταστάσεις.

Παράλληλα, η Ρ.Α.Ε προτείνει διαρθρωτικά μέτρα, τα οποία ενισχύουν την είσοδο νέων επιχειρήσεων στην αγορά και εξασφαλίζουν τη βιωσιμότητα των ήδη υπαρχόντων. Εισηγείται, επίσης, διατάξεις οι οποίες καλύπτουν νομικά ή θεσμικά κενά που αφορούν τους παράγοντες της απελευθερωμένης αγοράς και ελέγχει τις τιμές και το κόστος της ενέργειας, καθώς και τη λειτουργία των συστημάτων προμήθειας. Επιπλέον συλλέγει όλα τα αναγκαία οικονομικά και λογιστικά στοιχεία που αφορούν πρόσωπα και επιχειρήσεις με δραστηριότητα στον ενεργειακό τομέα, ενώ στη συνέχεια τα επεξεργάζεται και τα αξιολογεί με στόχο τη χρηματοδότηση ζητημάτων δημοσίου συμφέροντος (ανανεώσιμες πηγές, ισότιμη πρόσβαση σε όλους τους καταναλωτές) και την αποφυγή του φαινομένου των σταυροειδών επιδοτήσεων σε μεγάλες επιχειρήσεις. Καλλιεργεί, τέλος, διεθνείς συνεργασίες τόσο με χώρες των Βαλκανίων (αγορά στην ανάπτυξη της οποίας η χώρα μας δίνει μεγάλο βάρος), όσο και στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, με τελικό στόχο τη συγκρότηση μιας ενιαίας εσωτερικής αγοράς ενέργειας [2.1].

2.2.4 Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Λ.ΑΓ.Η.Ε.)

Ο Λειτουργός της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας Α.Ε. (ΛΑΓΗΕ ΑΕ) ιδρύθηκε με βάση τον νόμο 4001/2011 για τη Λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις. Ο ΛΑΓΗΕ εφαρμόζει τους κανόνες για τη λειτουργία της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας σύμφωνα με τις διατάξεις του νόμου 4001/2011.

Στο πλαίσιο του σκοπού του, ο Λειτουργός της Αγοράς ασκεί, ιδίως, τις ακόλουθες αρμοδιότητες:

- Διενεργεί τον Ημερήσιο Ενεργειακό Προγραμματισμό.
- Συνεργάζεται με τον Διαχειριστή του ΕΣΜΗΕ σύμφωνα με τις ειδικότερες προβλέψεις του Κώδικα Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας και του Κώδικα Διαχείρισης του ΕΣΜΗΕ.

- Τηρεί ειδικό Μητρώο Συμμετεχόντων στην Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας και εγγράφει τους Συμμετέχοντες, σύμφωνα με τις ειδικότερες διατάξεις του Κώδικα Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- Παρέχει έγκαιρα και με κάθε πρόσφορο τρόπο στους Συμμετέχοντες στην Αγορά αυτή Ηλεκτρικής Ενέργειας τις απαραίτητες πληροφορίες για τη συμμετοχή τους στην Αγορά.
- Αποφεύγει κάθε διάκριση μεταξύ των Συμμετεχόντων στην Αγορά Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας και εφαρμόζει κατά την παροχή των υπηρεσιών του διαφανή, αντικειμενικά και αμερόληπτα κριτήρια.
- Συμμετέχει σε κοινές επιχειρήσεις, ιδίως με διαχειριστές συστημάτων μεταφοράς, καθώς και χρηματιστήρια ηλεκτρικής ενέργειας και άλλους ανάλογους φορείς, με στόχο τη δημιουργία περιφερειακών αγορών στο πλαίσιο της εσωτερικής αγοράς ενέργειας.
- Εισπράττει από τους Συμμετέχοντες τέλη για τη διαχείριση και λειτουργία της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας και τηρεί τους αναγκαίους λογαριασμούς, σύμφωνα με τις ειδικότερες προβλέψεις του Κώδικα Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας.
- Συμμετέχει σε ενώσεις, οργανώσεις ή εταιρείες, μέλη των οποίων είναι λειτουργοί αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και χρηματιστήρια ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες έχουν σκοπό την επεξεργασία και διαμόρφωση κανόνων κοινής δράσης που συντείνουν, στο πλαίσιο της κοινοτικής νομοθεσίας, στη δημιουργία ενιαίας εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.
- Συνάπτει συμβάσεις πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τα προβλεπόμενα στο άρθρο 12 του ν. 3468/2006 και καταβάλλει τις πληρωμές που προβλέπονται.
- Διενεργεί τη διευθέτηση των χρηματικών συναλλαγών στο πλαίσιο του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού.

Κατά την εκτέλεση των καθηκόντων του, ο Λειτουργός της Αγοράς διευκολύνει κατά κύριο λόγο την ολοκλήρωση της ενιαίας εσωτερικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και για το σκοπό αυτόν αναλαμβάνει κάθε αναγκαία ενέργεια, στο πλαίσιο των αρμοδιοτήτων που του έχουν ανατεθεί.

2.2.5 Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Α.Δ.Μ.Η.Ε)

Ο ΑΔΜΗΕ ως Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΣΜΗΕ) εκτελεί όλα τα καθήκοντα που ορίζονται στο Άρθρο 94 του Νόμου 4001/2011. Συγκεκριμένα τα καθήκοντα αυτά είναι :

- Διασφάλιση ότι η μακροχρόνια ικανότητα του Συστήματος ανταποκρίνεται σε εύλογες ανάγκες για μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, υπό οικονομικά βιώσιμες συνθήκες, λαμβάνοντας υπόψη την προστασία του περιβάλλοντος.
- Παροχή πρόσβασης στο Σύστημα στους κατόχους άδειας παραγωγής, προμήθειας ή εμπορίας ηλεκτρικής ενέργειας, σε όσους έχουν νόμιμα εξαιρεθεί από την υποχρέωση κατοχής τέτοιων αδειών και στους Επιλεγέντες Πελάτες.
- Διαχείριση των ροών της ηλεκτρικής ενέργειας στο Σύστημα, συνεκτιμώντας τις ανταλλαγές με άλλα διασυνδεδεμένα συστήματα μεταφοράς.

- Παροχή στους Χρήστες του Συστήματος κάθε αναγκαίας πληροφορίας για την εξασφάλιση της αποτελεσματικής πρόσβασής τους στο Σύστημα.
- Παροχή των πάσης φύσεως υπηρεσιών του εφαρμόζοντας διαφανή, αντικειμενικά και αμερόληπτα κριτήρια, ώστε να αποτρέπεται κάθε διάκριση μεταξύ των Χρηστών ή των κατηγοριών Χρηστών του Συστήματος και ιδίως κάθε διάκριση υπέρ των συνδεδεμένων με αυτόν επιχειρήσεων.
- Εκπόνηση σε ετήσια βάση, κατόπιν διαβούλευσης με όλους τους υφιστάμενους και μελλοντικούς Χρήστες του ΕΣΜΗΕ, Δεκαετούς Προγράμματος Ανάπτυξης του ΕΣΜΗΕ .
- Δημοσίευση στην ιστοσελίδα του καταλόγου όλων των εγκεκριμένων από τη ΡΑΕ τιμολογίων με τα οποία χρεώνει τους Χρήστες του Συστήματος και υπολογισμός Οριακής Τιμής Αποκλίσεων.
- Εκκαθάριση των Αποκλίσεων Παραγωγής – Ζήτησης και διευθέτηση των χρηματικών συναλλαγών στο πλαίσιο της διευθέτησης των Αποκλίσεων Παραγωγής – Ζήτησης σε συνεργασία με το ΛΑΓΗΕ και το Διαχειριστή του Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΔΕΔΔΗΕ).
- Σύναψη, κατόπιν διαγωνισμού, συμβάσεων αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας, περιλαμβανομένων συμβάσεων διαχείρισης της ζήτησης, μόνον εφόσον αυτό απαιτείται για την παροχή των επικουρικών υπηρεσιών και για τις ανάγκες εξισορρόπησης των αποκλίσεων παραγωγής – ζήτησης κατά τη λειτουργία του συστήματος σε πραγματικό χρόνο και στο πλαίσιο των ρυθμίσεων του Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος.
- Συνεργασία με το ΛΑΓΗΕ, σύμφωνα με τις διατάξεις του Κώδικα Συναλλαγών και του Κώδικα Διαχείρισης του Συστήματος [2.7].

2.2.6 Δ.Ε.Η.

Από την 01/01/2001 η Δ.Ε.Η. έχει μετατραπεί σε ανώνυμη εταιρεία (Δ.Ε.Η. Α.Ε.) με κύριο στόχο την εμπορική και βιομηχανική της δραστηριοποίηση στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ είναι ο αποκλειστικός ιδιοκτήτης του δικτύου μεταφοράς και διανομής στα μικρά μη διασυνδεδεμένα νησιά. Ως αποκλειστικός προμηθευτής των περιοχών αυτών, η Δ.Ε.Η. υποχρεούται να απορροφά την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, καθώς και το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας των αυτό-παραγωγών, εφόσον αυτό προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ή μονάδες συμπαραγωγής. Εξαίρεση αποτελεί η περίπτωση οι τοπικές συνθήκες να μην επιτρέπουν τη διάθεση ηλεκτρικής ενέργειας, οπότε η Δ.Ε.Η. απαλλάσσεται από την παραπάνω υποχρέωση. Στα μεγαλύτερα νησιά η Δ.Ε.Η. απορροφά την ενέργεια οποιουδήποτε ανεξάρτητου παραγωγού. Είναι, τέλος, υπεύθυνη για την προμήθεια των μη επιλεγέντων πελατών (καταναλωτές χαμηλής τάσης).

2.2.7 Παραγωγή από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.) & Μικρή Συμπααραγωγή

Ο ΑΔΜΗΕ υποχρεούται να δίνει προτεραιότητα κατά την κατανομή του φορτίου σε μονάδες παραγωγής, όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ή αποτελεί προϊόν συμπααραγωγής, καθώς και σε υδροηλεκτρικές μονάδες, ενώ παράλληλα οφείλει να απορροφά την ενέργεια των παραγωγών αυτών αμείβοντάς τους σε σταθερή προκαθορισμένη τιμή. Ειδικότερα για τον τομέα των Α.Π.Ε θα πρέπει να τονιστεί ότι τα τελευταία χρόνια η ανάπτυξη και προώθησή του, μέσα και από τις διαδικασίες της απελευθέρωσης, αποτελεί μέγιστη προτεραιότητα. Ο σταδιακός περιορισμός των φυσικών αποθεμάτων συμβατικών (ορυκτών) καυσίμων σε συνδυασμό με τις επιπτώσεις της χρήσης τους στο περιβάλλον (φαινόμενο θερμοκηπίου, κλιματικές αλλαγές) έχουν οδηγήσει τη διεθνή κοινότητα σε μια προσπάθεια απεξάρτησης της Ευρώπης από ρυπογόνα εισαγόμενα καύσιμα, αντικαθιστώντας τα με εγχώριες και ανεξάντλητες πηγές, όπως η ηλιακή ενέργεια. Επιπλέον ώθηση προς την κατεύθυνση αυτή δημιουργήθηκε και από τη συνεχώς αυξανόμενη διεθνή τιμή του αργού πετρελαίου, γεγονός που απειλεί την ευστάθεια ολόκληρου του ευρωπαϊκού οικονομικού συστήματος.

Στα πλαίσια αυτά εφαρμόζεται και στη χώρα μας μια περισσότερο επιθετική πολιτική προώθησης των Α.Π.Ε, παρέχοντας μια σειρά από κίνητρα και διευκολύνοντας την ευρύτερη διάδοση των πιο καινοτόμων τεχνολογικά εφαρμογών, όπως είναι τα φωτοβολταϊκά πάρκα. Ειδικά η ανάπτυξη της συγκεκριμένης τεχνολογίας θα πρέπει να αποτελέσει μία από τις μεγαλύτερες προτεραιότητες για την Ελλάδα, καθώς οι καιρικές συνθήκες είναι εξαιρετικά ευνοϊκές. Άλλωστε, επικρατεί η άποψη πως η ηλιακή ενέργεια (στην πλήρη ανάπτυξη των εφαρμογών της) μπορεί να καλύψει ένα σεβαστό ποσοστό των ετήσιων αναγκών της χώρας μας σε ηλεκτρισμό, υποκαθιστώντας δαπανηρά εισαγόμενα καύσιμα και εξασφαλίζοντας οφέλη τόσο για την εθνική οικονομία, όσο και για το στρατηγικό στόχο της διασφάλισης της ενεργειακής τροφοδοσίας.

2.3 ΗΜΕΡΗΣΙΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ (Η.Ε.Π.)

2.3.1 Εισαγωγή

Ο Ημερήσιος Ενεργειακός Προγραμματισμός (ΗΕΠ) είναι η ημερήσια διαδικασία επίλυσης της αγοράς η οποία λαμβάνει χώρα την προηγούμενη ημέρα της Ημέρας Κατανομής. Η Ημέρα Κατανομής είναι μία ημερολογιακή ημέρα σε ώρες Ελλάδας. Η Ημέρα Κατανομής αποτελείται από έναν αριθμό ωριαίων Περιόδων Κατανομής, συνήθως 24, εκτός από τις “μικρές” και “μεγάλες” ημέρες το φθινόπωρο και την άνοιξη, αντίστοιχα, όπου η τοπική ώρα μεταβάλλεται μία ώρα μπροστά και πίσω, αντίστοιχα. Η μικρή Ημέρα Κατανομής αποτελείται από 23 Περιόδους Κατανομής (απουσιάζει η ώρα από τις 03:00 ως τις 04:00), και η μεγάλη Ημέρα Κατανομής αποτελείται από 25 Περιόδους Κατανομής (η ώρα από τις 03:00 ως τις 04:00 εμφανίζεται δύο φορές). Οι Παραγωγοί και οι άλλοι Συμμετέχοντες που παίρνουν μέρος στον ΗΕΠ και στις άλλες αγορές που διαχειρίζεται ο ΛΑΓΗΕ απαιτείται να εγγραφούν στο Μητρώο

Συμμετεχόντων του ΛΑΓΗΕ. Δια της εγγραφής στο Μητρώο Συμμετεχόντων, οι Συμμετέχοντες συνάπτουν με τον ΛΑΓΗΕ Σύμβαση Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας. Η Σύμβαση Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας έχει ως αντικείμενο τις συναλλαγές που διενεργούνται στα πλαίσια του Συστήματος Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας, που συμπεριλαμβάνει τον Ημερήσιο Ενεργειακό Προγραμματισμό, τη Διαδικασία Κατανομής, τις Εντολές Κατανομής, την Εκκαθάριση Αποκλίσεων και τον Μηχανισμό Διασφάλισης Επαρκούς Ισχύος. Για το σκοπό αυτό, η Σύμβαση Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας παρέχει στους Συμμετέχοντες δικαίωμα να προβαίνουν σε κάθε σχετική νόμιμη ενέργεια συμμετοχής στο Σύστημα Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας, τηρώντας τις διατάξεις του Κώδικα, και να λαμβάνουν τις πληρωμές που τους αναλογούν, και επάγεται την υποχρέωση αυτών να εξοφλούν τις χρεώσεις που τους αναλογούν, σύμφωνα με τις διατάξεις του Κώδικα. Η Σύμβαση Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας παρέχει στον ΛΑΓΗΕ τα δικαιώματα και επάγεται τις υποχρεώσεις που ορίζονται στις διατάξεις του Κώδικα σχετικά με το Σύστημα Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας [2.9].

2.3.2 Αντικείμενο ΗΕΠ

Το αντικείμενο του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού περιλαμβάνει τα κάτωθι:

- Κατάρτιση ενός βέλτιστου προγράμματος ένταξης μονάδων και έγχυσης ενέργειας για την εξυπηρέτηση της ζήτησης ενέργειας για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής, με τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται η συνολική δαπάνη για την εξυπηρέτηση της ζήτησης ενέργειας.
- Κατάρτιση προγραμμάτων Επικουρικών Υπηρεσιών ώστε να καλύπτεται ο προσδιορισμός της Οριακής Τιμής Παραγωγής σε κάθε Λειτουργική Ζώνη για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής.
- Υπολογισμός της Οριακής Τιμής του Συστήματος (ΟΤΣ) για την ενέργεια, για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής.
- Υπολογισμός των Τιμών Εφεδρείας για κάθε τιμολογούμενη Επικουρική Υπηρεσία για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής.

2.3.3 Συμμετοχή στον ΗΕΠ

Στα πλαίσια της συμμετοχής στον ΗΕΠ εκτελούνται τα ακόλουθα:

- Υποβολή μη τιμολογούμενων Δηλώσεων Φορτίου για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από τους Εκπροσώπους Φορτίου για τους Πελάτες που καταναλώνουν ενέργεια εντός της Ελληνικής Επικράτειας.
- Υποβολή τιμολογούμενων Δηλώσεων Φορτίου για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από τους Συμμετέχοντες, όταν αυτοί είναι είτε κάτοχοι Φυσικών Δικαιωμάτων Μεταφοράς (ΦΔΜ) είτε αντισυμβαλλόμενοι κατόχων ΦΔΜ, για εξαγωγές ενέργειας.
- Υποβολή τιμολογούμενων Δηλώσεων Φορτίου για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από Παραγωγούς για αντλητικές μονάδες σε λειτουργία άντλησης.

- Υποβολή μη τιμολογούμενων Δηλώσεων Φορτίου για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από τους από Παραγωγούς ή Προμηθευτές για τα βοηθητικά των μονάδων όταν αυτά δεν καλύπτονται από την παραγωγή των μονάδων.
- Υποβολή τιμολογούμενων Προσφορών Έγχυσης για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από Παραγωγούς για τις Κατανεμόμενες Μονάδες.
- Υποβολή τιμολογούμενων Προσφορών Έγχυσης για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από τον ΔΕΣΜΗΕ για τις Συμβεβλημένες Μονάδες. Οι τιμολογούμενες προσφορές ενέργειας για τις Συμβεβλημένες Μονάδες πρέπει να είναι σύμφωνες με τις τιμές της σχετικής σύμβασης.
- Υποβολή τιμολογούμενων Προσφορών Έγχυσης για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από τους Συμμετέχοντες, όταν αυτοί είναι είτε κάτοχοι Φυσικών Δικαιωμάτων Μεταφοράς (ΦΔΜ) είτε αντισυμβαλλόμενοι κατόχων (ΦΔΜ), για εισαγωγές ενέργειας.
- Υποβολή μη τιμολογούμενων Προσφορών Έγχυσης για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από τον ΛΑΓΗΕ για τις μονάδες του Άρθρου 35 του Νόμου 2773/1999.
- Υποβολή Δηλώσεων Διαχείρισης Υδάτινων Πόρων για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από Παραγωγούς για τις Υδροηλεκτρικές Μονάδες, συμπεριλαμβανομένων των Υδροηλεκτρικών Μονάδων Αντλησης.
- Υποβολή τιμολογούμενων Προσφορών Εφεδρειών για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από Παραγωγούς για τις Κατανεμόμενες Μονάδες.
- Υποβολή τιμολογούμενων Προσφορών Εφεδρειών για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από το ΔΕΣΜΗΕ για τις Συμβεβλημένες Μονάδες. Οι τιμολογούμενες προσφορές εφεδρειών για τις Συμβεβλημένες μονάδες πρέπει να είναι σύμφωνες με τις τιμές της σχετικής σύμβασης.
- Υποβολή Δηλώσεων Ολικής ή Μερικής Μη Διαθεσιμότητας για κάθε Περίοδο Κατανομής της Ημέρας Κατανομής από Παραγωγούς για κάθε μονάδα.
- Υποβολή Δηλώσεων Τεχνοοικονομικών Στοιχείων από τους Παραγωγούς για τις μονάδες.

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [2.1] Αθ. Νταγκούμας, Δ. Λαμπρίδης, Π. Μπίσκας, Π. Ντοκόπουλος. “Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας”. *Τεχνικά Χρονικά*. Σεπτέμβριος- Οκτώβριος 2004, σελ 1-23. [Online] Διαθέσιμο: http://library.tee.gr/digital/techr/2004/techr_2004_5_dagoumas.pdf, προσπελάστηκε τον Ιούνιο του 2013.
- [2.2] Ν. 2773/99: "Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας-Ρύθμιση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής και λοιπές διατάξεις." Τεύχος ΦΕΚ Α' 286, 22-12-99. [Online] Διαθέσιμο: http://www.rae.gr/old/SUB2/2_3.htm#N._2773/99, προσπελάστηκε τον Ιούνιο του 2013.
- [2.3] Π. Πρωτοπαπαδάκης “Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη” Διπλωματική εργασία, Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών, Πανεπιστήμιο Πειραιά, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2006.
- [2.4] Ν. 3175/03: "Αξιοποίηση του γεωθερμικού δυναμικού, τηλεθέρμανση και άλλες διατάξεις." Τεύχος ΦΕΚ Α' 207/29-08-03. [Online] Διαθέσιμο: http://www.rae.gr/old/SUB2/2_3.htm#N._3426/05, προσπελάστηκε τον Ιούνιο του 2013.
- [2.5] Γ. Ιουλιανός. “Διαχείριση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας και συναλλαγές ενέργειας σε περιβάλλον ελεύθερης αγοράς” Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Τεχνολογίας Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Πάτρας, Ιανουάριος 2013.
- [2.6] ΑΔΜΗΕ Α.Ε., “Εγχειρίδιο Γενικών Διατάξεων”, [Online] Διαθέσιμο: http://www.admie.gr/uploads/media/Egcheiridio_Genikon_Diataxeon_Diaboyleysi_v6.pdf, προσπελάστηκε τον Ιούνιο του 2013.
- [2.7] ΑΔΜΗΕ Α.Ε., “Ρόλος & Αρμοδιότητες”, [Online] Διαθέσιμο: <http://www.admie.gr/i-etaireia/apostoli/rolos-armodiotites/>, προσπελάστηκε τον Ιούνιο του 2013.
- [2.8] Ν. 4001/11: “Για τη λειτουργία Ενεργειακών Αγορών Ηλεκτρισμού και Φυσικού Αερίου, για Έρευνα, Παραγωγή και δίκτυα μεταφοράς Υδρογονανθράκων και άλλες ρυθμίσεις.” Τεύχος ΦΕΚ Α 179/ 22.08.2011. [Online] Διαθέσιμο: http://www.rae.gr/categories_new/global_regulation/global_national/global_national_laws/N_4001_2011.csp, προσπελάστηκε τον Ιούνιο του 2013.
- [2.9] ΛΑΓΗΕ Α.Ε., “Εγχειρίδιο Κώδικα Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας”, [Online] Διαθέσιμο: http://www.rae.gr/site/file/categories_new/about_rae/actions/decision/2012_A1023?p=files&i=0, προσπελάστηκε τον Ιούνιο του 2013.

ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο νέο πλαίσιο λειτουργίας της απελευθερωμένης αγοράς, σημαντικό κομμάτι, με εξέχουσα σημασία για τη διαμόρφωση κλίματος ομαλότητας και αξιοπιστίας, αποτελεί ο οικονομικός προγραμματισμός της λειτουργίας των θερμικών μονάδων παραγωγής. Σκοπός της διαδικασίας αυτής πριν την απελευθέρωση της αγοράς αποτελούσε η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του συστήματος παραγωγής, επιτυγχάνοντας παράλληλα ένα συγκεκριμένο επίπεδο ασφάλειας και αξιοπιστίας. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια, χάρη στην ευαισθητοποίηση γύρω από την προστασία του περιβάλλοντος, στις περισσότερες χώρες λαμβάνεται υπόψη η επίδραση των συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο περιβάλλον με συνέπεια η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους να πάψει να αποτελεί το μοναδικό κριτήριο.

Στην οργανωμένη ενεργειακή βιομηχανία, η Ένταξη των Μονάδων (UC) αναφέρεται στη βελτιστοποίηση των πόρων παραγωγής για να ικανοποιηθεί η ζήτηση φορτίου με το ελάχιστο κόστος. Εφόσον, στόχος πρέπει να είναι η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους, η ένταξη μονάδων αυτή αναφέρεται συνήθως ως Ένταξη των Μονάδων με βάση το Κόστος (Cost-Based Unit Commitment, CBUC) . Η ελαχιστοποίηση του κόστους γίνεται με τη δέσμευση των λιγότερο ακριβών μονάδων, ενώ ταυτόχρονα καλύπτεται ολόκληρη η ζήτηση φορτίου και ικανοποιούνται οι αντίστοιχοι περιορισμοί [3.1].

Παρ'όλα αυτά, τις τελευταίες δύο δεκαετίες έχουν λάβει μέρος δραματικές αλλαγές στον τρόπο με τον οποίο η βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας είναι οργανωμένη. Στο παρελθόν, οι επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας έπρεπε να παράγουν ενέργεια για να ικανοποιήσουν τους πελάτες τους και είχαν ως στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους και την κάλυψη όλου του ζητούμενου φορτίου και των αποθεμάτων. Ωστόσο, αυτό δεν είναι απαραίτητο σε ένα απελευθερωμένο σύστημα. Στην απελευθερωμένη αγορά, οι εταιρείες παραγωγής ενέργειας (GENCOs) προγραμματίζουν τις γεννήτριες τους με στόχο να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τις κοινωνικές παροχές του συστήματος. Ως εκ τούτου, οι τιμές πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και του διαθέσιμου αποθέματος αποτελούν τους περισσότερο σημαντικούς παράγοντες στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η απόφαση των επιχειρήσεων παραγωγής να δεσμεύσουν τις μονάδες τους, πλέον, συνδέεται με οικονομικούς κινδύνους. Ο νέος αυτός προγραμματισμός της Ένταξης των Μονάδων έχει διαφορετικό στόχο από εκείνο των παραδοσιακών τρόπων και αναφέρεται ως Ένταξη των Μονάδων με βάση το κέρδος (Profit-Based Unit Commitment, PBUC), για να τονιστεί η σημασία του κέρδους [3.2].

3.2 ΓΕΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Διάφορες προσεγγίσεις έχουν αναπτυχθεί για να λυθεί το πρόβλημα βελτιστοποίησης της Ένταξης των μονάδων. Αυτές οι προσεγγίσεις κυμαίνονται από εξαιρετικά πολύπλοκες και θεωρητικά πολύπλοκες μεθόδους μέχρι την απλή μέθοδο της καταμέτρησης. Το πεδίο εφαρμογής των προσεγγίσεων για τον προγραμματισμό του προβλήματος διαφέρει σημαντικά από δραστηριότητα σε δραστηριότητα ανάλογα με το συνδυασμό των μονάδων και με τους ιδιαίτερους λειτουργικούς περιορισμούς που λαμβάνονται υπόψη σε κάθε περίπτωση.

Οι οικονομικές συνέπειες της Ένταξης των Μονάδων είναι πολύ σημαντικές. Δεδομένου ότι το κόστος των καυσίμων αποτελεί ένα σημαντικό στοιχείο του συνολικού κόστους, η μείωση του κόστους των καυσίμων κατά μόλις 0,5% μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση εκατομμυρίων δολαρίων ετησίως για τις μεγάλες επιχειρήσεις.

Στο παρελθόν, οι διαχειριστές του συστήματος ενημερώνονταν από τις προβλέψεις ζήτησης φορτίου για τις ποσότητες της ενέργειας που έπρεπε να παραχθούν. Από την άλλη μεριά, σε κάποιο μερικώς ή πλήρως απελευθερωμένο περιβάλλον, οι διμερείς και προθεσμιακές συμβάσεις με τις επιχειρήσεις παραγωγής, περιέχουν τμήμα της συνολικής ζήτησης η οποία είναι γνωστή εκ των προτέρων. Το υπόλοιπο μέρος της ζήτησης πρέπει να προβλέπεται, όπως και στο παρελθόν. Ωστόσο, το μερίδιο για κάθε εταιρεία παραγωγής (GENCO) από την υπολειπόμενη ζήτηση μπορεί να είναι δύσκολο να προβλεφθεί, δεδομένου ότι εξαρτάται από τη σύγκριση της τιμής πώλησης, της παραγόμενης ενέργειας της εταιρείας παραγωγής, με εκείνη των άλλων προμηθευτών. Η διαθέσιμη τιμή της επιχείρησης παραγωγής εξαρτάται από την πρόβλεψη του μεριδίου αυτής από την υπολειπόμενη ζήτηση φορτίου, καθώς, έτσι καθορίζεται πόσες μονάδες θα έχει ενεργοποιημένες. Ο προγραμματισμός της Ένταξης των Μονάδων επηρεάζει άμεσα το μέσο κόστος και έμμεσα την τιμή πώλησης, καθιστώντας το απαραίτητο στοιχείο για κάθε επιτυχημένη στρατηγική προσφορών. Πλέον, η μεγιστοποίηση του κέρδους δεν είναι απαραίτητα συνδεδεμένη με την ελαχιστοποίηση του κόστους. Εφόσον δεν υπάρχει πλέον η υποχρέωση να εξυπηρετηθεί πλήρως η ζήτηση φορτίου, οι επιχειρήσεις παραγωγής ενέργειας μπορούν να επιλέξουν να παράγουν λιγότερη ενέργεια από την προβλεπόμενη ζήτηση. Αυτό επιτρέπει μεγαλύτερη ευελιξία και ταυτόχρονα, καθιστά το πρόβλημα της Ένταξης των Μονάδων περισσότερο σύνθετο. Ακόμη, το κέρδος εξαρτάται, όχι μόνο από το κόστος, αλλά επίσης και από τα έσοδα. Έτσι λοιπόν, εάν τα έσοδα αυξάνονται περισσότερο από το κόστος, το κέρδος θα αυξηθεί.

Εάν οι λειτουργίες προσφορών είναι μη κυρτές ή μη διαφορίσιμες, κάτι το οποίο παρατηρείται και στις οργανωμένες και στις απελευθερωμένες βιομηχανίες ηλεκτρικής ενέργειας, τότε το παραπάνω πρόβλημα περιπλέκεται. Περαιτέρω, η πολυπλοκότητα αυξάνεται αν ο ανταγωνισμός ενθαρρύνεται και στην πλευρά των προμηθευτών και στην πλευρά των αγοραστών, καθώς και εφόσον περιλαμβάνονται περιορισμοί εκπομπών του συστήματος.

Με τα διαθέσιμα τυποποιημένα προϊόντα λογισμικού, οι επιχειρήσεις ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ενισχύονται, να εξελίσσονται, και να αναβαθμίζουν ή να προσθέτουν νέες εφαρμογές, όπως λύσεις για την Ένταξη των Μονάδων για τη σύγχρονη απελευθερωμένη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας, σε συνδυασμό με τα συστήματα διαχείρισης της ενέργειας.

3.3 ΤΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΤΗΝ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΜΕΝΗ ΑΓΟΡΑ

Από τα μέσα της δεκαετίας του 1980, η βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε όλο τον κόσμο γνώρισε μια περίοδο ταχέων και κρίσιμων αλλαγών όσον αφορά τον τρόπο με τον οποίο η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται, μεταφέρεται και διανέμεται. Η ανάγκη για μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την παράδοση οδήγησε στην ιδιωτικοποίηση, την αναδιάρθρωση και την απελευθέρωση των τομέων ενέργειας σε πολλές χώρες, που παραδοσιακά βρίσκονταν υπό τον έλεγχο των ομοσπονδιακών και πολιτειακών κυβερνήσεων.

Σε κάθε αναδιάρθρωμένη ή απελευθερωμένη βιομηχανία ενέργειας, η κάθε επιχείρηση υλοποιεί ένα πλάνο παραγωγής ενέργειας που βασίζονται σε ένα μοντέλο Ένταξης των Μονάδων. Οι προμηθευτές υποβάλλουν τις προσφορές τους για την παροχή της προβλεπόμενης ημερήσιας ανελαστικής ζήτησης. Κάθε προσφορά αποτελείται από μια συνάρτηση κόστους και ένα σύνολο παραμέτρων που καθορίζουν τα λειτουργικά όρια των μονάδων παραγωγής. Αφότου η επιχείρηση λύσει το πρόβλημα της Ένταξης των Μονάδων, καθορίζεται η Οριακή Τιμή του Συστήματος για κάθε χρονική περίοδο. Η Οριακή Τιμή του Συστήματος είναι το μέγιστο μέσο κόστος μεταξύ των προγραμματισμένων παραγωγών. Για την απελευθερωμένη αγορά, παρατηρήθηκε πως το μοντέλο ελαχιστοποίησης του κόστους δεν οδηγεί πάντα σε χαμηλότερες τιμές, όταν ορίζονται ως μέγιστο μέσο κόστος. Καθώς υποδεέστερες λύσεις, στο πρόβλημα της Ένταξης των Μονάδων με βάση το Κόστος, μπορεί να υπήρχαν που να οδηγούσαν σε χαμηλότερες τιμές. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή των μοντέλων Ένταξης των μονάδων για ελαχιστοποίηση του κόστους για τις δημοπρασίες προσφορών ενέργειας τέθηκε υπό αμφισβήτηση.

Κρίθηκε απαραίτητη, λοιπόν, η αναβάθμιση του προβλήματος της Ένταξης των Μονάδων καθώς η ηλεκτρική βιομηχανία αναδιρθρώνεται. Έτσι, στις απελευθερωμένες αγορές ενέργειας έγινε ευρέως διαδεδομένη η χρησιμοποίηση μοντέλων της Ένταξης των Μονάδων με βάση το κέρδος, τα οποία χρησιμοποιούνται από την κάθε επιχείρηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [3.3].

Το πρόβλημα της Ένταξης των Μονάδων, όπως αναφέρθηκε, αποτελεί σημαντικό ζήτημα στις απελευθερωμένες αγορές ενέργειας και ουσιαστικά εντάσσεται στο γενικότερο πλαίσιο του προγραμματισμού της παραγωγής και τον ημερήσιο προγραμματισμό. Το πρόβλημα αναφέρεται στον προσδιορισμό των μονάδων που πρέπει να βρίσκονται σε λειτουργία για κάθε ώρα του χρονικού ορίζοντα στον οποίο απευθύνεται ο προγραμματισμός, καθώς και στον προσδιορισμό του φορτίου των εν λόγω μονάδων για το ίδιο χρονικό διάστημα. Η εύρεση μιας καλής λύσης σε εύλογο χρονικό διάστημα είναι ουσιαστική, καθώς δίνει τη δυνατότητα στην επιχείρηση παραγωγής ενέργειας να αξιοποιήσει με βέλτιστο τρόπο τους πόρους παραγωγής και να αυξήσει τα κέρδη της.

Έχουμε να αντιμετωπίσουμε λοιπόν το δύσκολο συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης του προγράμματος ένταξης των μονάδων, ικανοποιώντας παράλληλα ένα σύνολο απαιτήσεων και περιορισμών φορτίου και συστήματος. Από μαθηματικής άποψης πρόκειται για ένα μη γραμμικό πρόβλημα μεγάλης κλίμακας το οποίο περιλαμβάνει συνεχείς

και ακέραιες μεταβλητές και πλήθος περιορισμών, ανισοτικών και ισοτικών, γραμμικών και μη γραμμικών, εξαρτώμενων και μη από το χρόνο.

Οι περιορισμοί φορτίου και εφεδρείας του συστήματος, καθώς και οι περιορισμοί μέγιστης και ελάχιστης ικανότητας παραγωγής των μονάδων που απαρτίζουν το σύστημα μπορούν εύκολα να ενταχθούν στη διαδικασία επίλυσης λόγω της γραμμικής τους φύσης, ενώ οι περιορισμοί που αναφέρονται στους χρόνους συγχρονισμού και αποσυγχρονισμού των μονάδων δυσχεραίνουν την επίλυση, ακριβώς λόγω της μη γραμμικής φύσης τους. Επιπλέον, οι ακέραιες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται για να δηλώσουν την κατάσταση των μονάδων (εντός ή εκτός λειτουργίας) αυξάνουν την πολυπλοκότητα του προβλήματος [3.4].

3.4 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ

Μέχρι σήμερα έχουν υιοθετηθεί πολλές και διαφορετικού τύπου μέθοδοι για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων, αξιοποιώντας αναλυτικές ή μετα-ευριστικές προσεγγίσεις [3.5].

Στις αναλυτικές μεθόδους περιλαμβάνονται η εκτεταμένη απαρίθμηση, η λίστα προτεραιότητας, η μέθοδος αποδέσμευσης, ο δυναμικός προγραμματισμός και η Lagrangian Relaxation μέθοδος, προσεγγίσεις οι οποίες αξιοποιούν το μαθηματικό προγραμματισμό. Η εφαρμογή των συγκεκριμένων μεθόδων, οι οποίες εξετάστηκαν και υλοποιήθηκαν κυρίως στις πρώτες περιόδους μελέτης του προβλήματος της ένταξης των μονάδων, αποδείχθηκε σχετικά προβληματική για διαφορετικούς λόγους. Στις περισσότερες περιπτώσεις ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται σε απαγορευτικά επίπεδα καθώς το μέγεθος του εξεταζόμενου προβλήματος αυξάνεται, ενώ στην περίπτωση της λίστας προτεραιότητας, όπου η λύση παρέχεται σε λογικό χρονικό διάστημα, η ποιότητα των αποτελεσμάτων θεωρείται χαμηλή.

Τα προβλήματα αυτά οδήγησαν τα τελευταία χρόνια σε μια πιο εκτεταμένη διερεύνηση της δυνατότητας μη αναλυτικών μεθόδων να ανταποκριθούν στην πολυπλοκότητα και τις πολλαπλές απαιτήσεις του προβλήματος, γεγονός που έφερε στο προσκήνιο τους μετα-ευριστικούς αλγόριθμους. Χρησιμοποιώντας μία αρχική λύση του προβλήματος ως σημείο εκκίνησης, οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι πραγματοποιούν ενδελεχή έρευνα του πεδίου λύσεων του προβλήματος και οδηγούν σε λύσεις ανώτερης ποιότητας, αντιμετωπίζοντας με μεγαλύτερη επιτυχία τους πολύπλοκους περιορισμούς του προβλήματος, συγκριτικά με τις αναλυτικές μεθόδους. Παρόλα αυτά, ο χρόνος σύγκλισης προς τη βέλτιστη λύση εξακολουθεί να αποτελεί σημείο προς συζήτηση.

Στην κατηγορία αυτή εντάσσονται τα έμπειρα συστήματα, τα νευρωνικά δίκτυα, ο αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing), οι γενετικοί αλγόριθμοι, η μέθοδος Tabu Search, καθώς και αλγόριθμοι βελτιστοποίησης οι οποίοι έχουν εμπνευσθεί από την παρατήρηση φυσικών φαινομένων (Ant Colony Search Algorithm, Geometric Optimization Model, Artificial Immune Algorithm).

Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί, ότι για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων έχει πραγματοποιηθεί αρκετά εκτεταμένη εφαρμογή υβριδικών αλγορίθμων που

συνδυάζουν δύο ή και περισσότερες από τις παραπάνω μεθόδους, με στόχο την καλύτερη αξιοποίηση των πλεονεκτημάτων που καθεμία από αυτές εμφανίζει και τελικά την παροχή λύσεων ανώτερης ποιότητας.

3.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] M. Shahidehpour, H. Yamin, Z. Li, “Market Operations in Electric Power Systems Forecasting, Scheduling, and Risk Management”, pp. 115-160, J. Wiley & Sons, New York, 2002.
- [3.2] M. Bavafa, N. Navidi, H. Monsef, “A new approach for profit-based unit commitment using Lagrangian relaxation combined with ant colony search algorithm”, Universities Power Engineering Conference, 43rd International, 1-4 Sept. 2008, pp. 1-6.
- [3.3] N. P. Padhy, “Unit Commitment- A Bibliographical Survey”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 19, No. 2, pp. 1196-1205, May 2004
- [3.4] S. Sen, D. P. Kothari, “Optimal thermal generating commitment: a review”, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 20, No. 7, pp. 443-451, 1998.
- [3.5] Δ. Ν. Κοσσυβάκης “ Διερεύνηση του Προβλήματος της Ένταξης των Θερμικών Μονάδων Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας” Διπλωματική εργασία, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2005.

ΕΠΙΛΥΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΣΕ ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΜΕΝΗ ΑΓΟΡΑ ΜΕ ΜΙΚΤΟ ΑΚΕΡΑΙΟ ΜΗ ΓΡΑΜΜΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη και η επίλυση του προβλήματος της Ένταξης των Μονάδων με σκοπό τη μεγιστοποίηση του κέρδους ως ένα Μικτό Ακέραιο μη-Γραμμικό πρόβλημα. Για την μοντελοποίηση του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GAMS (General Algebraic Modeling System) και συγκεκριμένα ο solver SCIP του GAMS.

Το Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης (General Algebraic Modeling System - GAMS) είναι ένα υψηλού επιπέδου σύστημα μοντελοποίησης για μαθηματικό προγραμματισμό και βελτιστοποίηση. Το GAMS είναι αποκλειστικά σχεδιασμένο για μοντελοποίηση προβλημάτων βελτιστοποίησης γραμμικών, μη γραμμικών και μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Το σύστημα αυτό είναι ιδανικό για περίπλοκες, ευρείας κλίμακας εφαρμογές βελτιστοποίησης και επιτρέπει στο χρήστη να κατασκευάσει μεγάλα, εύχρηστα μοντέλα, με ιδιαίτερα συμπαγή και φυσικό τρόπο, τα οποία μπορούν εύκολα να προσαρμοσθούν σε νέες συνθήκες. Επίσης επιτρέπει στο χρήστη να αφοσιωθεί στη μοντελοποίηση του προβλήματος κάνοντας την οργάνωση εύκολη.

Το GAMS είναι κατάλληλο για χρήση σε διάφορες υπολογιστικές πλατφόρμες καθώς τα μοντέλα προσομοίωσης χαρακτηρίζονται από φορητότητα. Επίσης είναι διαθέσιμο για χρήση από προσωπικούς υπολογιστές, workstations, υπολογιστές mainframe, και υπερ-υπολογιστές. Το σύστημα επιμελείται των χρονοβόρων λεπτομερειών για την υλοποίηση σε συγκεκριμένο μηχανήμα και σύστημα λογισμικού. Παράλληλα ο χρήστης μπορεί εύκολα και γρήγορα να αλλάξει τη διατύπωση του προβλήματος, τον επιλύτη, ακόμα και να μετατρέψει ένα πρόβλημα από γραμμικό σε μη γραμμικό χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία. Τέλος το GAMS συμπεριλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο περιβάλλον ανάπτυξης (integrated development environment -IDE) και μία ομάδα ολοκληρωμένων solvers [4.1].

Στο κεφάλαιο αυτό, αρχικά γίνεται μία βασική περιγραφή της δομής ενός μοντέλου του GAMS. Έπειτα, παρουσιάζεται η αναλυτική περιγραφή της μοντελοποίησης που έγινε προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα της Ένταξης των Μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά με το GAMS.

4.2 ΒΑΣΙΚΗ ΔΟΜΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΕ GAMS

Ένα μοντέλο GAMS δομείται από ένα σύνολο εντολών, οι οποίες προσδιορίζουν διαφορετικό κομμάτι του μαθηματικού προβλήματος. Πριν γίνει συνοπτική παρουσίαση της δομής του GAMS καλό θα ήταν να αναφερθούν οι σημαντικότεροι κανόνες που διέπουν τη λειτουργία του προγράμματος. Αυτοί είναι:

- ✓ Η δημιουργία οντοτήτων στο GAMS περιλαμβάνει δύο βήματα: μια δήλωση (declaration) και μια ανάθεση (assignment) ή καθορισμός. Η δήλωση περιλαμβάνει την ύπαρξη της οντότητας στο πρόγραμμα δίνοντάς της ένα όνομα. Η ανάθεση ή καθορισμός δίνει μια συγκεκριμένη τιμή ή μια μορφή. Στην περίπτωση των εξισώσεων, πρέπει να γίνεται δήλωση και ανάθεση σε ξεχωριστές δηλώσεις στο GAMS. Για όλες τις άλλες οντότητες του GAMS, ωστόσο, υπάρχει η επιλογή των δηλώσεων και αναθέσεων στην ίδια δήλωση ή χωριστά.
- ✓ Οι οντότητες στο GAMS μπορούν να δηλωθούν σχεδόν με οποιοδήποτε τρόπο επιθυμεί ο χρήστης. Έτσι επιτρέπονται οι δηλώσεις σε πολλαπλές γραμμές, οι κενές γραμμές μεταξύ των δηλώσεων όπως και οι πολλαπλές δηλώσεις ανά γραμμή.
- ✓ Ένα μοντέλο στο GAMS είναι μία συλλογή των δηλώσεων στη γλώσσα GAMS. Ο κανόνας που οδηγεί τις δηλώσεις είναι ότι κάθε οντότητα (εξαρτημένη ή ανεξάρτητη, σταθερή ή μεταβλητή) στο μοντέλο δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί αν δεν έχει οριστεί παραπάνω.
- ✓ Τα επεξηγηματικά σχόλια είναι χρήσιμα για την τεκμηρίωση των μαθηματικών μοντέλων. Είναι καλύτερα εάν ενσωματώνονται μέσα στο ίδιο το μοντέλο παρά να παρουσιάζονται ξεχωριστά. Υπάρχουν δύο τρόποι να παρεμβληθεί η επεξήγηση μέσα σε μια εφαρμογή του GAMS. Καταρχήν, οποιαδήποτε γραμμή που αρχίζει με έναν αστερίσκο (*) στη πρώτη στήλη λαμβάνεται ως σχόλιο από το μεταγλωττιστή GAMS. Δεύτερον, ίσως το σημαντικότερο, τα σχόλια μπορούν και πολλές φορές επιβάλλεται να παρεμβληθούν μετά από τις δηλώσεις των οντοτήτων του GAMS.
- ✓ Το GAMS δεν κάνει διάκριση μεταξύ κεφαλαίων και πεζών γραμμάτων, δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να τα χρησιμοποιεί όπως αυτός θέλει.
- ✓ Κάθε εντολή πρέπει να τελειώνει με το σύμβολο «;» (semicolon).
- ✓ Τα ονόματα που δίνονται στις οντότητες του μοντέλου για να είναι έγκυρα πρέπει να αρχίζουν με γράμμα και μπορούν να ακολουθούν μέχρι και τριάντα οποιοδήποτε χαρακτήρες ή ψηφία.
- ✓ Το GAMS, ως γλώσσα προγραμματισμού, έχει κάποιες δεσμευμένες λέξεις οι οποίες θα πρέπει να χρησιμοποιούνται με μεγάλη προσοχή.

Η δομή ενός κώδικα σε GAMS, δηλαδή τα στοιχεία εισόδου με τη σειρά που εισάγονται και τα στοιχεία εξόδου που μπορεί να παράγει το GAMS, φαίνονται στον Πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Δομή ενός μοντέλου GAMS.

ΕΙΣΟΔΟΙ	ΕΞΟΔΟΙ
<ul style="list-style-type: none"> • Σύνολα (Sets) Δήλωση Ανάθεση Μελών • Δεδομένα (πίνακες, παράμετροι, σταθερές) Δήλωση Ανάθεση Τιμών • Μεταβλητές (Variables) Δήλωση Ανάθεση Είδους • Προσδιορισμός ορίων ή/και αρχικών τιμών (προαιρετικό) • Εξισώσεις (Equations) Δήλωση Ορισμός • Εντολές μοντέλου και επίλυσης (Model and Solve statements) • Εντολές απεικόνισης (display) 	<ul style="list-style-type: none"> • Εκτύπωση ηχούς (Echo Print) • Χάρτες αναφοράς (Reference Maps) • Λίστες εξισώσεων (Equation Listings) • Αναφορές κατάστασης (Status Reports) • Αποτελέσματα (Results)

Όταν το GAMS «τρέχει», το αρχείο που περιέχει το πρόγραμμα (input file), υποβάλλεται σε επεξεργασία και μερικές γραμμές εμφανίζονται στο αρχείο εξόδου (output file) που κρατούν το χρήστη ενήμερο για την πρόοδο και τα πιθανά λάθη που παρουσιάζονται. Τα αποτελέσματα της επεξεργασίας αποθηκεύονται στο αρχείο εξόδου και μπορούν να επιθεωρηθούν με ένα συντάκτη κειμένων (text editor), αλλά είναι ευθύνη του χρήστη να επιθεωρήσει το αρχείο εξόδου για να δει προσεκτικά τα αποτελέσματα και να εντοπίσει τυχόν λάθη [4.1].

4.3 Ο SOLVER SCIP ΤΟΥ GAMS

Όπως αναφέρθηκε, για την επίλυση του προβλήματος της Ένταξης των Μονάδων χρησιμοποιήθηκε ο solver SCIP, ο οποίος είναι διαθέσιμος για ακαδημαϊκή μη εμπορική χρήση και διανέμεται μέσω του GAMS. Ο SCIP είναι ένα λογισμικό πλαίσιο για ακέραιο προγραμματισμό με περιορισμούς (constraint integer programming,CIP), ένα πρότυπο που ενσωματώνει τεχνικές μοντελοποίησης και επίλυσης από τον προγραμματισμό με περιορισμούς (constraint programming,CP), το μικτό ακέραιο προγραμματισμό (mixed integer programming,MIP).

Είναι ένας πολύ γρήγορος και δυνατός νέος solver και διασφαλίζει γενικευμένες βέλτιστες λύσεις για κυρτά και μη κυρτά προβλήματα Μικτού Ακέραιου μη-Γραμμικού προγραμματισμού. Υλοποιεί ένα χωρικό αλγόριθμο διακλάδωσης και φράγματος (branch and bound) που χρησιμοποιεί γραμμικούς επιλύτες για το βήμα οριοθέτησης. Παρόμοια με το solver BARON, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την εξέταση του προβλήματος της διπλωματικής προτού διατεθεί ο SCIP, με μικρότερα ποσοστά επιτυχίας, η εξωτερική προσέγγιση παράγεται από μια αναδιατύπωση του Μικτού Ακέραιου μη-Γραμμικού Προγραμματισμού. Επιπροσθέτως, ο SCIP περιλαμβάνει μεγάλης κλίμακας γειτονικής αναζήτησης ευριστικές μεθόδους και μια νέα μικτή ευριστική μέθοδο Μικτού Ακέραιου, Γραμμικού και μη-Γραμμικού Προγραμματισμού [4.2], [4.3].

4.4 ΟΙ ΕΠΙΛΟΓΕΣ optca ΚΑΙ optcr

Γενικά, τα προβλήματα του Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού είναι αρκετά δύσκολα ως προς την επίλυσή τους και επιπλέον, η απόδειξη πως η λύση που βρέθηκε είναι η καλύτερη δυνατή, μπορεί να απαιτεί πολύ μεγάλο αριθμό πόρων. Για το λόγο αυτό το GAMS χρησιμοποιεί κάποιες επιλογές παραμετροποίησης ως προς τα σημεία στα οποία θα σταματάει η βελτιστοποίηση.

Ως πρώτο βήμα για την επίλυση ενός προβλήματος με διακριτές μεταβλητές, όπως είναι το πρόβλημα της Ένταξης των Μονάδων που μελετάται και γενικά τα μικτά ακέραια προβλήματα, είναι να βρεθεί μία βέλτιστη λύση, κατά τη διάρκεια της προ-επίλυσης αλλά και κατά τη διάρκεια της επίλυσης, η οποία είναι η βέλτιστη δυνατή λύση του προβλήματος για μη-διακριτές μεταβλητές. Στη συνέχεια, ο solver SCIP χρησιμοποιείται προκειμένου να βρεθεί μία εφικτή λύση στο πρόβλημα του μικτού ακέραιου προγραμματισμού, η οποία είναι εφικτή ή περιέχει αποδεκτές συμβάσεις για τη μη διακριτότητα κάποιας ακέραιας μεταβλητής. Ο solver διακόπτει τη βελτιστοποίηση όταν η εφικτή λύση βρίσκεται «κοντά» στη βέλτιστη λύση χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα κριτήρια για τη διακοπή της λειτουργίας του και την επιλογή της τελικής λύσης.

Δύο επιλογές που περιέχονται στο λογισμικό του GAMS και χρησιμοποιούνται από τον solver SCIP είναι οι επιλογές optca και optcr, των οποίων η επεξήγηση δίνεται παρακάτω:

- Optca (absolut optimality criterion) : Η επιλογή αυτή ρυθμίζει την απόλυτη ανοχή τερματισμού, πράγμα που σημαίνει ότι ο solver θα σταματήσει και θα παρουσιάσει τη λύση

για την οποία η τιμή της αντικειμενική συνάρτησης βρίσκεται σε απόσταση “optca” της καλύτερης δυνατής λύσης.

- Optcr (relative optimality criterion) : Αυτή η επιλογή καθορίζει μια σχετική τιμή τερματισμού για τα προβλήματα που περιέχουν διακριτές μεταβλητές, πράγμα που σημαίνει ότι ο solver θα σταματήσει και θα παρουσιάσει τη λύση της οποίας η τιμή της αντικειμενική συνάρτησης βρίσκεται σε ποσοστιαία απόσταση επί τοις εκατό από την καλύτερη δυνατή λύση κατά την τιμή που δίνεται στην επιλογή optcr.

Αλλάζοντας λοιπόν τις τιμές που θα λαμβάνουν οι δύο παραπάνω επιλογές δίνεται η δυνατότητα στο χρήστη του GAMS να βρει διαφορετικές εφικτές λύσεις ανάλογα με τα διάφορα κριτήρια που του χρειάζονται [4.1], [4.4].

4.5 ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ

4.5.1 Εισαγωγή δεδομένων

Το πρώτο βήμα της μοντελοποίησης είναι η εισαγωγή των δεδομένων του προβλήματος σε κατάλληλη μορφή. Στο συγκεκριμένο πρόβλημα χρησιμοποιήθηκαν οι δύο ακόλουθοι τρόποι για την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό του GAMS:

1) Αρχικά ορίστηκαν τα “Sets” i και t . Η δεσμευμένη λέξη “Set” ή “Sets” χρησιμοποιείται στο GAMS για να δηλώσει δείκτες και για να ορίσει τις δυνατές τιμές που απαρτίζουν το σύνολο. Τα σύνολα είναι θεμελιώδεις δομικές μονάδες και χρησιμεύουν σε οποιοδήποτε μοντέλο του GAMS καθώς επιτρέπουν στο μοντέλο να δηλωθεί σωστά και να διαβάζεται εύκολα.

Ο δείκτης i χρησιμοποιήθηκε για να διαχωρίσει την κάθε θερμική μονάδα παραγωγής και ο δείκτης t χρησιμοποιήθηκε για να υποδεικνύει την κάθε ώρα προγραμματισμού ξεκινώντας από την τιμή $t = 0$ προκειμένου να δηλωθούν οι αρχικές συνθήκες του προβλήματος.

Ανάλογα με το σύστημα που μελετάται, τα παραπάνω sets παίρνουν και τις αντίστοιχες τιμές, για παράδειγμα στο σύστημα 10x24 το set i παίρνει τιμές από 1 έως 10 και στο set t δίνονται τιμές από 0 έως 24.

Ακόμη ορίζονται οι ακόλουθοι δύο τελεστές:

- N , ο συνολικός αριθμός των μονάδων παραγωγής
- T , ο συνολικός αριθμός των χρονικών περιόδων που αποτελούν το χρονικό ορίζοντα για κάθε σενάριο στο οποίο εφαρμόζεται η Ένταξη των Μονάδων. Το χρονικό βήμα στη μελέτη της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μία (1) ώρα.

2) Τα υπόλοιπα δεδομένα του προβλήματος αποτελούν τα χαρακτηριστικά στοιχεία των μονάδων παραγωγής και τα δεδομένα του συστήματος που είναι η ωριαία πρόβλεψη ζήτησης φορτίου, $D(t)$ (MW) και η ωριαία πρόβλεψη της τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, $Pgm(t)$ (\$/MWh). Τα δεδομένα αυτά εισήχθησαν στον αλγόριθμο του κάθε σεναρίου με τη μορφή πινάκων από το Excel χρησιμοποιώντας την εντολή του GAMS: xls2gams. Οι πίνακες με

τα συγκεκριμένα δεδομένα φαίνονται στο επόμενο κεφάλαιο πριν από την καταγραφή των αποτελεσμάτων για κάθε σύστημα.

Για τα δεδομένα των μονάδων παραγωγής χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συμβολισμοί:

- $Pmin(i)$ (MW) είναι η ελάχιστη παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας
- $Pmax(i)$ (MW) είναι η μέγιστη παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας
- $A(i)$ (\$/h), $B(i)$ (\$/MWh), και $C(i)$ (\$/MW²h) είναι ο σταθερός, ο γραμμικός, και ο τετραγωνικός συντελεστής κόστους καυσίμου (λειτουργίας) κάθε μονάδας
- $Tup(i)$ (h) είναι ο ελάχιστος χρόνος που μπορεί να είναι σε λειτουργία η κάθε γεννήτρια από την ώρα που θα τεθεί σε λειτουργία
- $Tdown(i)$ (h) είναι ο ελάχιστος χρόνος που πρέπει να είναι κλειστή μία μονάδα από τη στιγμή που θα σταματήσει να λειτουργεί
- $Xo(i)$ (h) είναι ένας δείκτης που δείχνει πόσες ώρες συνολικά μία μονάδα είναι σε λειτουργία (ή είναι σβηστή), τη χρονική στιγμή μηδέν, δηλαδή αμέσως πριν την πρώτη ώρα του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Πιο συγκεκριμένα, αν το $Xo(i)$ είναι αρνητικό τότε το $-Xo(i)$ εκφράζει πόσες ώρες ήταν σβηστή η μονάδα i έως την ώρα μηδέν. Αντίθετα, αν το $Xo(i)$ είναι θετικό τότε εκφράζει πόσες ώρες ήταν σε λειτουργία η μονάδα i έως την ώρα μηδέν
- $Rup(i)$ (MW/h) είναι η μέγιστη ωριαία αύξηση της παραγωγής μίας μονάδας
- $Rdown(i)$ (MW/h) είναι η μέγιστη ωριαία μείωση της παραγωγής μίας μονάδας
- $Po(i)$ (MW) είναι η παραγωγή κάθε μονάδας την ώρα μηδέν, δηλαδή μία ώρα πριν από την έναρξη του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού της μονάδας
- $SD(i)$ (\$/h) είναι το κόστος διακοπής της λειτουργίας για κάθε μονάδα
- $SUP - COST(i)$ (\$/h) είναι το σταθερό κόστος εκκίνησης κάθε μονάδας
- $D(i)$ (\$/h), το κόστος του προσωπικού και συντήρησης για την ψυχρή εκκίνηση
- $E(i)$ (\$/h), το κόστος ψυχρής εκκίνησης κάθε μονάδας
- $CT(i)$ (h), η σταθερά ψύξης κάθε μονάδας.

4.5.2 Διαχωρισμός μεταβλητών και αρχικοποίηση

Οι μεταβλητές του προβλήματος αποτελούν τους αγνώστους που καλείται το πρόβλημα βελτιστοποίησης να προσδιορίσει. Χωρίζονται σε ακέραιες, δυαδικές, θετικές και ελεύθερες μεταβλητές και φαίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Περιγραφή μεταβλητών μοντέλου

Θετικές Μεταβλητές:	<ul style="list-style-type: none"> • $P(i, t)$, παραγωγή ισχύος της μονάδας i την ώρα t (MW) • $Revenue(i, t)$, τα έσοδα της μονάδας i την ώρα t (\$/h) • $Cost(i, t)$, τα συνολικά έξοδα της μονάδας i την ώρα t (\$/h) • $FC(i, t)$, το κόστος λειτουργίας της μονάδας i για την ώρα t (\$/h) • $SU(i, t)$, το κόστος εκκίνησης της μονάδας i για την ώρα t (\$/h) • $SD(i, t)$, το κόστος διακοπής της λειτουργίας της μονάδας i την ώρα t (\$/h) • $F(i, t)$, τα κέρδη από τον προγραμματισμό της μονάδας i την ώρα t (\$/h)
Δυαδική Μεταβλητή:	<ul style="list-style-type: none"> • $I(i, t)$, κατάσταση λειτουργίας της μονάδας i την χρονική στιγμή t (1= Ανοιχτή, 0= Σβηστή)
Ακέραιες Μεταβλητές:	<ul style="list-style-type: none"> • $X(i, t)$, είναι ένας δείκτης που δείχνει πόσες ώρες συνολικά η μονάδα i είναι σε λειτουργία (ή είναι σβηστή) τη χρονική στιγμή t. Πιο συγκεκριμένα, αν το $X(i, t)$ είναι αρνητικό τότε το $-X(i, t)$ εκφράζει πόσες ώρες ήταν σβηστή η μονάδα i έως την ώρα t. Αντίθετα, αν το $X(i, t)$ είναι θετικό τότε εκφράζει πόσες ώρες ήταν σε λειτουργία η μονάδα i έως την ώρα t. • $Xoff(i, t)$, είναι ένας δείκτης ο οποίος σε περίπτωση που η μονάδα i είναι σβηστή την χρονική στιγμή t, τότε δείχνει πόσες ώρες αθροιστικά είναι σβηστή έως την χρονική στιγμή t. Σε περίπτωση που η μονάδα i λειτουργεί τη χρονική στιγμή t, τότε $Xoff(i, t) = 0$.
Ελεύθερες Μεταβλητές:	<ul style="list-style-type: none"> • z, το συνολικό κέρδος που προκύπτει από την εφαρμογή του προγραμματισμού που χρησιμοποιείται για την επίλυση της Ένταξης των Μονάδων (\$)

Αφού εισάγονται στο GAMS τα παραπάνω δεδομένα και μεταβλητές, γίνεται μια αρχικοποίηση των μεταβλητών του προβλήματος με σκοπό να οριστεί σωστά το πρόβλημα και το αρχικό του σημείο και να διευκολυνθεί ο solver στην εύρεση της βέλτιστης λύσης για κάθε σενάριο. Ταυτόχρονα, δίνεται προσοχή στη γενικότητα έτσι ώστε αυτή να είναι εφαρμόσιμη για όλα τα σενάρια που θα μελετηθούν. Η αρχικοποίηση γίνεται έτσι ώστε να οριστούν οι αρχικές

συνθήκες για τη δυαδική μεταβλητή $I(i, t)$, τις δύο ακέραιες μεταβλητές του προβλήματος $X(i, 0)$ $Xoff(i, 0)$ και της αρχικής παραγωγής ισχύος που παράγεται από κάθε μονάδα πριν την εκκίνηση του προγραμματισμού $P(i, 0)$.

Έτσι διαχωρίζονται οι ακόλουθες δύο περιπτώσεις:

- Αν $Xo(i)$ για τη μονάδα παραγωγής i είναι μικρότερο ή ίσο του “0”, δηλαδή η μονάδα είναι σβηστή πριν την έναρξη του προγραμματισμού, τότε:

$$I(i, 0) = 0, \text{ και} \\ Xoff(i, 0) = -Xo(i).$$

- Αν $Xo(i)$ της μονάδας παραγωγής i είναι μεγαλύτερο του “0”, δηλαδή η μονάδα είναι σε λειτουργία πριν την έναρξη του προγραμματισμού, τότε:

$$I(i, 0) = 1, \text{ και} \\ Xoff(i, 0) = 0.$$

Ακόμη, αρχικοποιούνται οι μεταβλητές:

$$X(i, 0) = Xo(i) \text{ και} \\ P(i, 0) = Po(i).$$

4.5.3 Μοντελοποίηση εξισώσεων

Οι εξισώσεις που εισήχθησαν στο λογισμικό του GAMS για μοντελοποίηση του προβλήματος της Ένταξης των Μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά [4.5], είναι οι ακόλουθες:

Το κέρδος που προκύπτει από τη μονάδα i την ώρα t :

$$F(i, t) = Revenue(i, t) - Cost(i, t) \quad (4.1)$$

όπου,

τα έσοδα που προκύπτουν από τη μονάδα i την ώρα t είναι:

$$Revenue(i, t) = Pgm(t) \times P(i, t) \times I(i, t) \quad (4.2)$$

και τα έξοδα που προκύπτουν από τη μονάδα i την ώρα t είναι:

$$Cost(i, t) = FC(i, t) \times I(i, t) + SU(i, t) \times I(i, t) \times [1 - I(i, t - 1)] + \\ SD(i) \times I(i, t - 1) \times [1 - I(i, t)] \quad (4.3)$$

όπου,

το κόστος λειτουργίας της μονάδας i την ώρα t είναι:

$$FC(i, t) = A(i) + B(i) \times P(i, t) + C(i) \times [P(i, t)]^2, \quad (4.4)$$

το κόστος εκκίνησης της μονάδας i την ώρα t είναι:

$$SU(i, t) = D(i) + E(i) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{Xoff(i,t)}{CT(i)}\right) \right] \text{ και} \quad (4.5)$$

το κόστος διακοπής της λειτουργίας για κάθε μονάδα i είναι σταθερό και αποτελεί δεδομένο.

Το πρόβλημα της Ένταξης των Μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά, διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$z = \max \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N F(i, t) \quad (4.6)$$

και υπόκειται στους παρακάτω περιορισμούς:

- 1) Περιορισμοί για την παραγωγή ισχύος κάθε μονάδας:

$$Pmin(i) \leq P(i, t) \times I(i, t) \leq Pmax(i) \quad (4.7)$$

- 2) Περιορισμοί ωριαίας αύξησης και μείωσης της παραγωγής για κάθε μονάδα, αντίστοιχα:

$$P(i, t) - P(i, t - 1) \leq Rup(i) \quad (4.8)$$

$$P(i, t - 1) - P(i, t) \leq Rdown(i) \quad (4.9)$$

- 3) Περιορισμός για την πρόβλεψη ζήτησης φορτίου:

$$\sum_{i=1}^N P(i, t) \times I(i, t) \leq D(t) \quad (4.10)$$

- 4) Περιορισμοί για την ελάχιστη διάρκεια λειτουργίας και διακοπής της λειτουργίας κάθε μονάδας, αντίστοιχα:

$$[X(i, t - 1) - Tup(i)] \times \{I(i, t - 1) \times [1 - I(i, t)]\} \geq 0 \quad (4.11)$$

$$[Xoff(i, t - 1) - Tdown(i)] \times \{I(i, t) \times [1 - I(i, t - 1)]\} \geq 0 \quad (4.12)$$

Επίσης χρησιμοποιήθηκαν οι δύο παρακάτω εξισώσεις για να παίρνουν τις σωστές τιμές οι ακέραιες μεταβλητές $X(i, t)$ και $Xoff(i, t)$:

$$X(i, t) = X(i, t - 1) \times I(i, t) + I(i, t) \quad (4.13)$$

$$Xoff(i, t) = \{Xoff(i, t - 1) \times [1 - I(i, t)]\} + [1 - I(i, t)] \quad (4.14)$$

4.5.4 Εξαγωγή αποτελεσμάτων

Το μοντέλο του προβλήματος της Ένταξης των Μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά, όπως περιγράφηκε στο προηγούμενο υποκεφάλαιο η μαθηματική του διατύπωση, επιλύεται με μικτό ακέραιο μη γραμμικό προγραμματισμό, καθώς συμπεριλαμβάνονται σε αυτό ακέραιες μεταβλητές αλλά και μη γραμμικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών του.

Προκειμένου, να γίνει καλύτερη εμφάνιση των αποτελεσμάτων, τα αποτελέσματα των μεταβλητών του προβλήματος αποθηκεύτηκαν σε μορφή του Microsoft Excel. Αυτό έγινε με τη χρήση των GDX utilities που μπορούν να βρεθούν στο [4.1]. Επιπλέον, με χρήση του Excel έγιναν ανάλυση και συγκρίσεις των αποτελεσμάτων για τα διάφορα σενάρια στα οποία επιλύθηκε το πρόβλημα του PBUC. Η επεξεργασία των αποτελεσμάτων που έγινε περιγράφεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] GAMS — A User’s Guide. (Tutorial by Richard E. Rosenthal), (©May 2013 GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA), [Online] Διαθέσιμο: <http://www.gams.com/dd/docs/bigdocs/GAMSUsersGuide.pdf>, προσπελάστηκε Ιούνιο 2013.
- [4.2] T. Achterberg, “SCIP: Solving Constraint Integer Programs”. Mathematical Programming Computation, (2009) 1:1–41.
- [4.3] M. R. Bussieck and S. Vigerske, “MINLP Solver Software”, [Online] Διαθέσιμο: <http://www.math.hu-berlin.de/~stefan/minlpsoft.pdf>, προσπελάστηκε Ιούνιο 2013.
- [4.4] GAMS — The Solver Manuals. (© May 2013 GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA), [Online] Διαθέσιμο: <http://www.gams.com/dd/docs/solvers/allsolvers.pdf>, προσπελάστηκε Ιούνιο 2013.
- [4.5] D.K. Dimitroulas, P.S. Georgilakis. “A new memetic algorithm approach for the price based unit commitment problem”, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 12, pp. 4687-4699, December 2011.

ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το λογισμικό που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4 εφαρμόστηκε για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων στα ακόλουθα συστήματα: σύστημα 4 μονάδων και 8 ωρών προγραμματισμού, σε σύστημα 10 μονάδων παραγωγής και 24 ωρών προγραμματισμού, καθώς και σε συστήματα 20 και 50 μονάδων παραγωγής και 24 ωρών προγραμματισμού. Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα των συστημάτων που μελετήθηκαν, τα αποτελέσματα για τα διαφορετικά σενάρια, καθώς και σχολιασμός και σύγκριση των αποτελεσμάτων.

5.2 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 4 ΜΟΝΑΔΩΝ ΓΙΑ 8 ΩΡΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

5.2.1 Δεδομένα του συστήματος

Το πρώτο σύστημα στο οποίο μελετήθηκε το πρόβλημα της ένταξης μονάδων για μεγιστοποίηση του κέρδους (Profit-based unit commitment – PBUC) αποτελείται από 4 θερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αφορά 8 ώρες προγραμματισμού. Το σύστημα αυτό στη συνέχεια ονομάζεται σύστημα 4x8 [5.1].

Στον Πίνακα 5.1 φαίνονται τα δεδομένα των 4 μονάδων παραγωγής, όπου:

- P_{min} (MW) είναι η ελάχιστη παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας
- P_{max} (MW) είναι η μέγιστη παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας
- A (\$/h), B (\$/MWh), και C (\$/MW²h) είναι ο σταθερός, ο γραμμικός, και ο τετραγωνικός συντελεστής κόστους καυσίμου (λειτουργίας) κάθε μονάδας
- T_{up} (h) είναι ο ελάχιστος χρόνος που μπορεί να είναι σε λειτουργία η κάθε γεννήτρια από την ώρα που θα τεθεί σε λειτουργία
- T_{down} (h) είναι ο ελάχιστος χρόνος που πρέπει να είναι κλειστή μία μονάδα από τη στιγμή που θα σταματήσει να λειτουργεί

- X_0 (h) είναι ένας δείκτης που δείχνει πόσες ώρες συνολικά μία μονάδα είναι σε λειτουργία (ή είναι σβηστή), τη χρονική στιγμή μηδέν, δηλαδή αμέσως πριν την πρώτη ώρα του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Πιο συγκεκριμένα, αν το X_0 είναι αρνητικό τότε το $-X_0$ εκφράζει πόσες ώρες ήταν σβηστή η μονάδα έως την ώρα μηδέν. Αντίθετα, αν το X_0 είναι θετικό τότε εκφράζει πόσες ώρες ήταν σε λειτουργία η μονάδα έως την ώρα μηδέν
- R_{up} (MW/h) είναι η μέγιστη ωριαία αύξηση της παραγωγής μίας μονάδας
- R_{down} (MW/h) είναι η μέγιστη ωριαία μείωση της παραγωγής μίας μονάδας
- P_0 (MW) είναι η παραγωγή κάθε μονάδας την ώρα μηδέν, δηλαδή μία ώρα πριν από την έναρξη του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού της μονάδας
- SD (\$/h) είναι το κόστος διακοπής της λειτουργίας για κάθε μονάδα
- $SUP-COST$ (\$/h) είναι το σταθερό κόστος εκκίνησης κάθε μονάδας.

Στα 3 πρώτα σενάρια του συστήματος 4x8 που μελετήθηκαν, χρησιμοποιείται σταθερό κόστος εκκίνησης των μονάδων. Τα χαρακτηριστικά των μονάδων για τα σενάρια 1 έως 3 φαίνονται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικά μονάδων για τα σενάρια 1 έως 3 του συστήματος 4x8

Μονάδα	P_{min} (MW)	P_{max} (MW)	A (\$/h)	B (\$/MW h)	C (\$/MW ² h)	T_{up} (h)	T_{down} (h)
1	27	90	47.38	21.3913	0.06512	4	3
2	38	150	43.49	19.1342	0.06124	3	2
3	80	230	39.67	16.2916	0.05768	4	3
4	115	350	36.93	17.7604	0.05957	3	2

Μονάδα	R_{up} (MW/h)	R_{down} (MW/h)	P_0 (MW)	X_0 (h)	SD (\$)	SUP-COST (\$)
1	61	74	0	-1	8	41
2	45	63	72	2	12	127
3	105	82	0	-1	23	322
4	120	116	143	2	31	354

Στα σενάρια 4 έως 6 του συστήματος 4x8 (Πίνακας 5.2), η μόνη διαφορά ως προς τα χαρακτηριστικά των μονάδων αφορά στον υπολογισμό του κόστους εκκίνησης κάθε μονάδας. Στα σενάρια 4 έως 6, το κόστος εκκίνησης δεν είναι σταθερό, αλλά είναι μεταβλητό και μη γραμμικό και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.5). Έτσι, τα πρόσθετα δεδομένα του Πίνακα 5.2, σε σχέση με τον Πίνακα 5.1, είναι τα ακόλουθα:

- το κόστος του προσωπικού και συντήρησης για την ψυχρή εκκίνηση, D (\$/h)
- το κόστος ψυχρής εκκίνησης κάθε μονάδας, E (\$/h)
- η σταθερά ψύξης κάθε μονάδας, CT (h).

Πίνακας 5.2: Χαρακτηριστικά μονάδων για τα σενάρια 4 έως 6 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Pmin (MW)	Pmax (MW)	A (\$/h)	B (\$/MW h)	C (\$/MW ² h)	Tup (h)	Tdown (h)	Xo (h)
1	27	90	47.38	21.3913	0.06512	4	3	-1
2	38	150	43.49	19.1342	0.06124	3	2	2
3	80	230	39.67	16.2916	0.05768	4	3	-1
4	115	350	36.93	17.7604	0.05957	3	2	2

Μονάδα	Rup (MW/h)	Rdown (MW/h)	Po (MW)	D (\$/h)	E (\$/h)	CT (h)	SD (\$)
1	61	74	0	25	30	5	8
2	45	63	72	105	100	4	12
3	105	82	0	220	225	5	23
4	120	116	143	255	250	4	31

Στον Πίνακα 5.3 παρουσιάζονται τα δεδομένα της ωριαίας πρόβλεψης ζήτησης φορτίου, D (MW), και η ωριαία πρόβλεψη της τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, Pgm (\$/MWh).

Πίνακας 5.3: Ωριαία πρόβλεψη ζήτησης φορτίου και πρόβλεψη τιμή πώλησης για το σύστημα 4x8

h	D (MW)	Pgm (\$/MWh)
1	214	32.1
2	227	44.56
3	238	51.47
4	235	48.34
5	225	41.18
6	214	34.1
7	210	28.4
8	205	22.1

5.2.2 Σενάρια και αποτελέσματα

Το πρόβλημα των 4 μονάδων και 8 ωρών προγραμματισμού μελετήθηκε για 6 διαφορετικά σενάρια (Πίνακας 5.4). Όπως αναφέρθηκε, τα πρώτα 3 σενάρια έχουν σταθερό κόστος εκκίνησης για κάθε μονάδα, ενώ στα υπόλοιπα 3 χρησιμοποιήθηκε ο εκθετικός τρόπος υπολογισμού του κόστους εκκίνησης της σχέσης (4.5). Οι υπόλοιπες διαφοροποιήσεις στα σενάρια αφορούν την ένταξη ή όχι των περιορισμών T-up και T-down, το ίδιο και για τους περιορισμούς Ramp-up και Ramp-down. Επίσης, με σκοπό την παρουσίαση της βέλτιστης λύσης που βρέθηκε από τον SCIP solver του GAMS, παρουσιάζεται η λύση κάθε σεναρίου με τη χρήση

της επιλογής $optca=0$ και $optcr=0$, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Στο σενάριο 6, που είναι το αρχικό σενάριο προς μελέτη και περιέχει όλους τους περιορισμούς που μελετούνται, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είτε στις default παραμέτρους βελτιστοποίησης του SCIP solver, όπου $optca=1^{-9}$ και $optcr=0,1$, είτε με τη χρήση της επιλογής $optca=0$ και $optcr=0$.

Πίνακας 5.4 : Παρουσίαση σεναρίων που μελετήθηκαν για το σύστημα 4x8

	Tup	Tdown	Ramp-up	Ramp-down	start-up cost σταθερό	start-up cost εκθετικό
Σενάριο 1			√	√	√	
Σενάριο 2	√	√			√	
Σενάριο 3	√	√	√	√	√	
Σενάριο 4			√	√		√
Σενάριο 5	√	√				√
Σενάριο 6	√	√	√	√		√

Όλα τα σενάρια επιλύθηκαν με τη χρήση φορητού υπολογιστή (laptop) με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά: μνήμη 4 GB RAM, και επεξεργαστή intel core i5 CPU στα 2.53 GHz. Χρησιμοποιήθηκε η έκδοση v. 23.9.5 του λογισμικού GAMS.

Σε κάθε σενάριο υπολογίστηκαν με το GAMS τα ακόλουθα:

1. Ο προγραμματισμός της κάθε μονάδας σε κάθε μία από τις 8 ώρες του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, με τη μορφή πίνακα με τιμές '0' ή '1', όπου '0' σημαίνει μονάδα σβηστή, ενώ '1' σημαίνει μονάδα σε λειτουργία.
2. Η ισχύς που παράγει κάθε μονάδα σε κάθε μία από τις 8 ώρες του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού.
3. Το συνολικό κέρδος όλων των μονάδων για όλες τις ώρες προγραμματισμού, που είναι και η αντικειμενική συνάρτηση προς μεγιστοποίηση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων.
4. Τα συνολικά κέρδη ανά ώρα.
5. Τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα.
6. Ο συνολικός χρόνος που απαιτήθηκε από τον υπολογιστή για την επίλυση του προβλήματος.

5.2.2.1 Αποτελέσματα για το σενάριο 1 του συστήματος 4x8

Στο σενάριο 1 δεν περιλαμβάνονται στο λογισμικό οι περιορισμοί Tup και Tdown με αποτέλεσμα η κάθε μονάδα να έχει τη δυνατότητα να ξεκινά ή να διακόπτει τη λειτουργία της χωρίς χρονικούς περιορισμούς. Το κόστος εκκίνησης είναι σταθερό για κάθε μονάδα και τέλος χρησιμοποιείται η έκδοση των παραμέτρων βελτιστοποίησης του solver SCIP, όπου $optca=0$ και $optcr=0$, για να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Στον Πίνακα 5.5 φαίνεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS, όπου με την τιμή '1' φαίνεται ποια μονάδα είναι σε λειτουργία κάθε ώρα προγραμματισμού και με την τιμή '0' ποια μονάδα είναι σβηστή. Στη συνέχεια, στον Πίνακα 5.6 φαίνεται η ισχύς που παράγει κάθε μονάδα για τον χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 1.

Πίνακας 5.5: Βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός στο σενάριο 1 για το σύστημα 4x8

Μονάδα	Ωρα προγραμματισμού (h)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	0	0	1	1	1	0
2	1	1	0	1	1	1	1	1	0
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Πίνακας 5.6: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος (MW) στο σενάριο 1 για το σύστημα 4x8

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.00	39.05	31.84	0.00	0.00	50.85	47.41	48.28	0.00
2	72.00	59.95	0.00	43.00	40.00	72.51	68.85	63.00	0.00
3	0.00	0.00	80.16	80.00	80.00	101.63	97.74	98.72	80.00
4	143.00	115.00	115.00	115.00	115.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Στο σενάριο αυτό κάθε μονάδα έχει την δυνατότητα να τίθεται ή όχι σε λειτουργία κάθε ώρα προγραμματισμού, με αποτέλεσμα, όπως φαίνεται και στους Πίνακες 5.5 και 5.6 να χρησιμοποιούνται ή να διακόπτον τη λειτουργία τους μονάδες για μικρά χρονικά διαστήματα, σε αντίθεση με επόμενα σενάρια που εμπεριέχουν χρονικούς περιορισμούς.

Για το σενάριο 1 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε ότι είναι:

- Profit(1) = \$ 25 568.21.

Έπειτα, υπολογίζονται για κάθε μονάδα και κάθε ώρα τα κέρδη (ή έξοδα) ως ακολούθως:

$$\text{Profit}(i,t) = \text{Revenue}(i,t) - \text{Cost_Leit}(i,t) - \text{Cost_Start_Up}(i,t) - \text{Cost_Shut_Down}(i,t) \quad (5.1)$$

όπου :

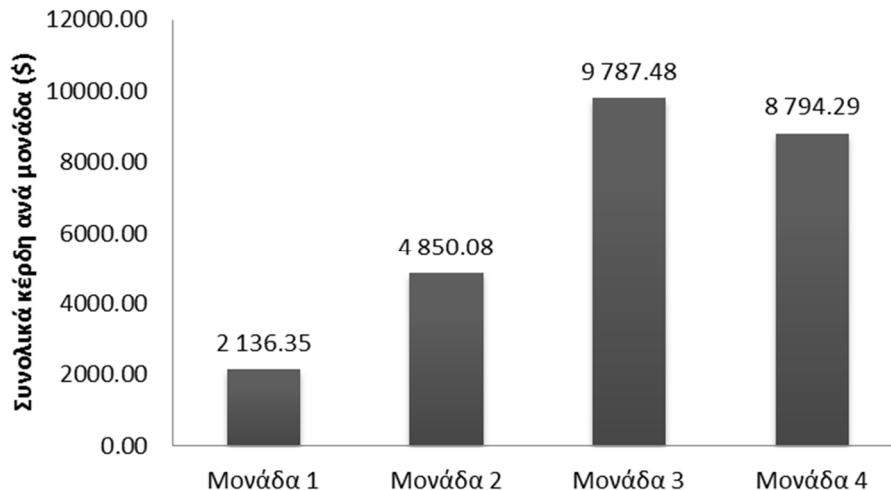
- Profit(i,t): το συνολικό κέρδος (\$) της μονάδας i την ώρα t
- Revenue(i,t): τα έσοδα (\$) της μονάδας i την ώρα t

- $Cost_Leit(i,t)$: τα έξοδα (\$) λειτουργίας της μονάδας i την ώρα t
- $Cost_Start_up(i,t)$: τα έξοδα (\$) εκκίνησης της μονάδας i την ώρα t
- $Cost_Shut_down(i,t)$: τα έξοδα (\$) διακοπής λειτουργίας μονάδας i την ώρα t

Με βάση τη σχέση (5.1), αθροίζοντας τα κέρδη ($Profit(i,t)$) για κάθε μονάδα, υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.7 και στο Σχήμα 5.1.

Πίνακας 5.7: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα στο σενάριο 1 για το σύστημα 4x8

Μονάδα	Συνολικά κέρδη ανά μονάδα (\$)
1	2 136.35
2	4 850.05
3	9 787.48
4	8 794.29
Σύνολο	25 568.21



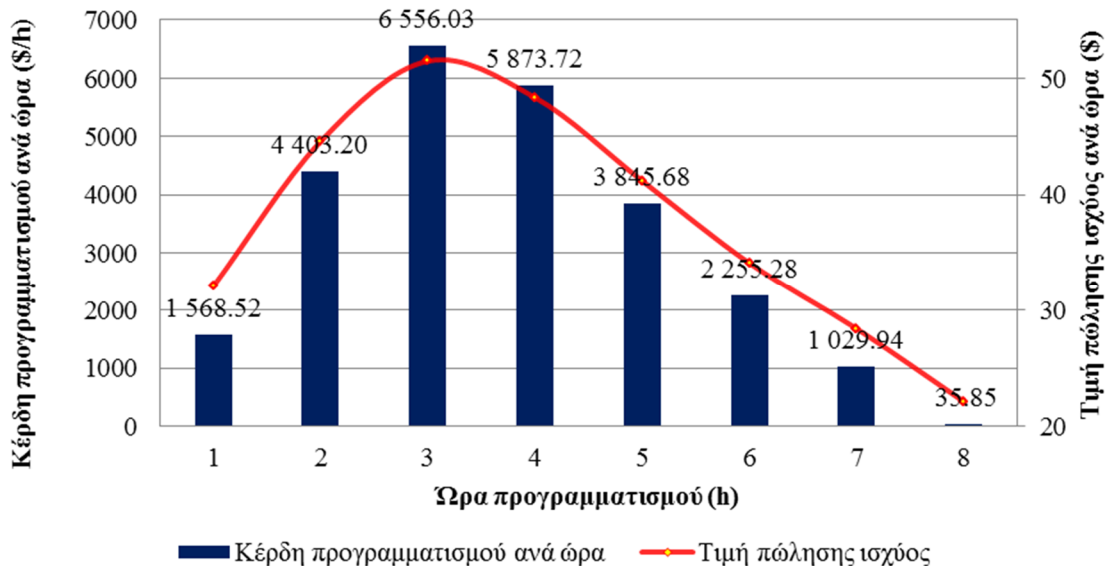
Σχήμα 5.1: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 1 του συστήματος 4x8

Από τον Πίνακα 5.7 προκύπτει ότι τα μεγαλύτερα κέρδη για το χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού προέρχονται από τις μονάδες 3 και 4. Συγκεκριμένα, από τις δύο αυτές μονάδες προέρχεται το 72.68% των συνολικών κερδών. Στο σενάριο 1 έγινε χρήση της επιλογής βελτιστοποίησης $optca=0$ και $optcr=0$, με αποτέλεσμα ο solver SCIP του GAMS να σταματήσει τη σύγκλιση προς τη βέλτιστη λύση όταν δεν υπάρχει περαιτέρω σύγκλιση. Συμπερασματικά, το παραπάνω αποτέλεσμα είναι και το αναμενόμενο καθώς οι συγκεκριμένες μονάδες έχουν τα μικρότερα κόστη λειτουργίας όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.1 και τις χαρακτηριστικές τιμές A, B, C, από τις οποίες εξαρτάται το κόστος λειτουργίας κάθε μονάδας.

Στη συνέχεια, στον Πίνακα 5.8 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων σε κάθε χρονική στιγμή ξεχωριστά, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο Σχήμα 5.2 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.8: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 1 του συστήματος 4x8

	Ωρα προγραμματισμού (h)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Κέρδος ανά ώρα (\$/h)	1 568.52	4 403.20	6 556.03	5 873.72	3 845.68	2 255.28	1 029.94	35.85
Σύνολο (\$)	25 568.21							



Σχήμα 5. 2: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 1 του συστήματος 4x8

Από το Σχήμα 5.2 φαίνεται πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να ‘ακολουθεί’ την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς το ωριαίο κέρδος αυξάνεται, έως την μέγιστη τιμή του την τρίτη ώρα προγραμματισμού, όπως και η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, ενώ στη συνέχεια τα ωριαία κέρδη και η ωριαία τιμή πώλησης μειώνονται παράλληλα, έως την τελευταία ώρα προγραμματισμού. Σημαντικό είναι επίσης πως στο χρονικό διάστημα όπου η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας είναι υψηλή, σημειώνονται και τα μεγαλύτερα κέρδη του προγραμματισμού. Συγκεκριμένα το 80.9% του συνολικού κέρδους προκύπτει στο διάστημα από την δεύτερη ως την πέμπτη ώρα προγραμματισμού.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 12,47 sec για την επίλυση του σεναρίου 1 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.2.2.2 Αποτελέσματα για το Σενάριο 2 του συστήματος 4x8

Στο σενάριο 2 δεν περιλαμβάνονται στο λογισμικό οι περιορισμοί Ramp-up και Ramp-down με αποτέλεσμα η κάθε μονάδα να έχει τη δυνατότητα να αυξάνει ή να μειώνει την παραγόμενη ισχύ της σε κάθε ώρα προγραμματισμού χωρίς περιορισμούς. Το κόστος εκκίνησης είναι σταθερό για κάθε μονάδα και τέλος χρησιμοποιείται η έκδοση των παραμέτρων βελτιστοποίησης του solver SCIP, όπου optca=0 και optcr=0, για να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Στον Πίνακα 5.9 απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS, όπου με την τιμή '1' φαίνεται ποια μονάδα λειτουργεί την συγκεκριμένη χρονική στιγμή και στον Πίνακα 5.10 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

Πίνακας 5.9: Βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός για το σενάριο 2 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Ωρα προγραμματισμού (h)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Πίνακας 5.10: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σενάριο 2 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.86	47.42	46.16	27.00
2	72.00	99.00	43.00	40.00	40.00	72.52	68.84	67.51	0.00
3	0.00	0.00	80.00	80.00	80.00	100.62	97.74	96.33	80.00
4	143.00	115.00	120.76	115.00	115.00	0.00	0.00	0.00	0.00

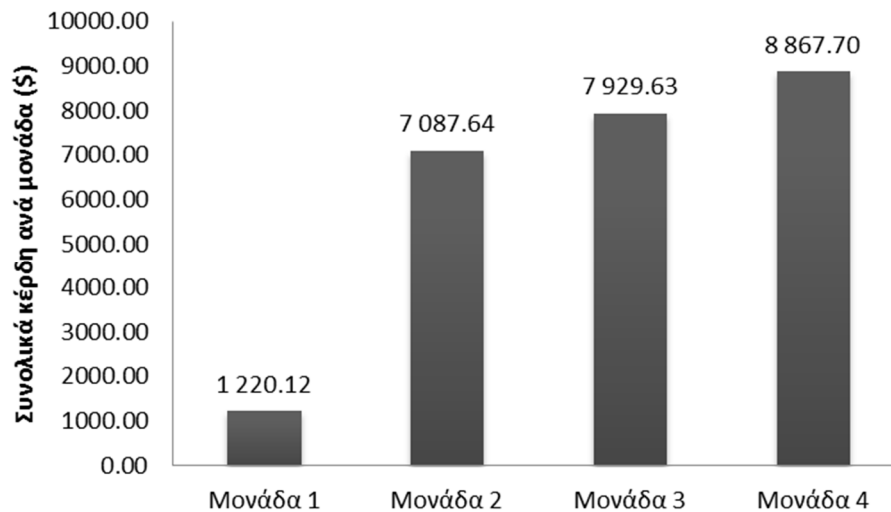
Για το σενάριο 2 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit(2) = \$ 25 105.09.

Έπειτα, υπολογίζονται για κάθε μονάδα και κάθε ώρα τα κέρδη (ή έξοδα), μέσω της σχέσης (5.1). Αμέσως μετά, αθροίζοντας τα κέρδη για κάθε μονάδα, υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 2 του συστήματος 4x8. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.11 και στο Σχήμα 5.3.

Πίνακας 5.11: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 2 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Συνολικά κέρδη ανά μονάδα (\$)
1	1 220.12
2	7 087.64
3	7 929.63
4	8 867.70
Σύνολο	25 105.09

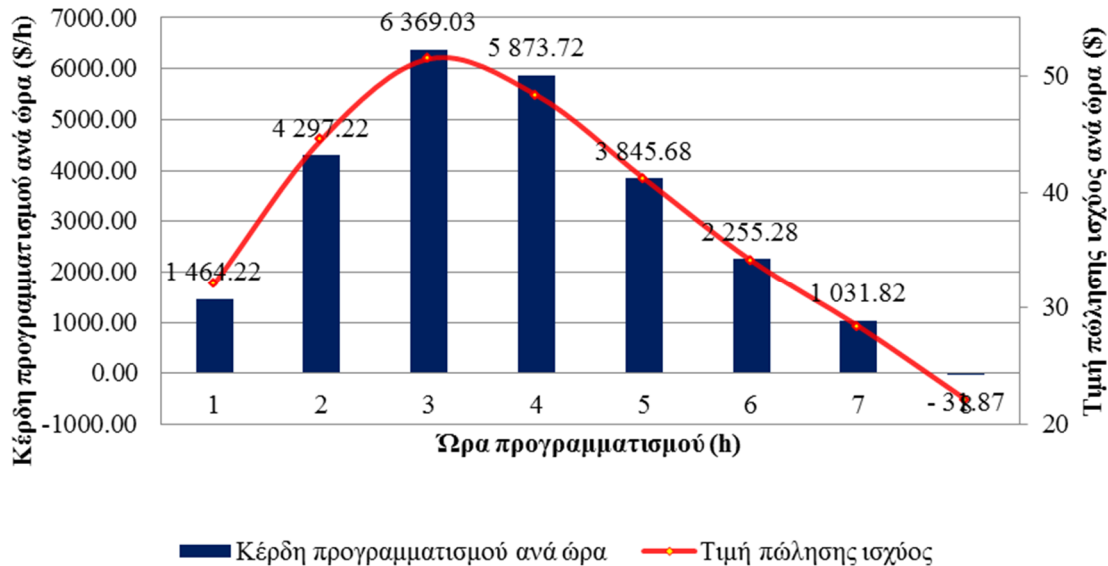
**Σχήμα 5.3:** Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 2 του συστήματος 4x8

Από τον Πίνακα 5.11 προκύπτει ότι τα μεγαλύτερα κέρδη για το χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού προέρχονται από τις μονάδες 2,3 και 4. Συγκεκριμένα, από τις τρεις αυτές μονάδες προέρχεται το 95,14% των συνολικών κερδών.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.12 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στο σενάριο 1, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο σχήμα 5.4 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.12: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 2 του συστήματος 4x8

	Ωρα προγραμματισμού							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Κέρδος ανά ώρα (\$/h)	1 464.22	4 297.22	6 369.03	5 873.72	3 845.68	2 255.28	1 031.82	-31.87
Σύνολο (\$)	25 105.09							

**Σχήμα 5.4:** Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 2 του συστήματος 4x8

Από το Σχήμα 5.4 φαίνεται, αντίστοιχα με το σενάριο 1, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να 'ακολουθεί' την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς το ωριαίο κέρδος αυξάνεται, έως την μέγιστη τιμή του την τρίτη ώρα προγραμματισμού, όπως και η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, ενώ στη συνέχεια τα ωριαία κέρδη και η ωριαία τιμή πώλησης μειώνονται παράλληλα, έως την τελευταία ώρα προγραμματισμού. Σημαντικό είναι επίσης πως στο χρονικό διάστημα όπου η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας είναι υψηλή, σημειώνονται και τα μεγαλύτερα κέρδη του προγραμματισμού. Συγκεκριμένα το 81.2% του συνολικού κέρδους προκύπτει στο διάστημα από την δεύτερη ως την πέμπτη ώρα προγραμματισμού.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 10,55 sec για την επίλυση του σεναρίου 2 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.2.2.3 Αποτελέσματα για το Σενάριο 3 του συστήματος 4x8

Στο σενάριο 3 περιλαμβάνονται στο λογισμικό όλοι οι περιορισμοί Ramp-up, Ramp-down, Tur και Tdown των μονάδων του συστήματος. Το κόστος εκκίνησης είναι σταθερό για κάθε μονάδα και τέλος χρησιμοποιείται η έκδοση των παραμέτρων βελτιστοποίησης του solver SCIP, όπου ortca=0 και ortcr=0, για να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Στον Πίνακα 5.13, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS, όπου με την τιμή '1' φαίνεται ποια μονάδα λειτουργεί την συγκεκριμένη χρονική στιγμή και στον Πίνακα 5.14 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

Πίνακας 5.13: Βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός για το σενάριο 3 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Ώρα προγραμματισμού (h)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Πίνακας 5.14: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σενάριο 3 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.86	47.42	48.29	27.00
2	72.00	99.00	106.00	43.00	40.00	72.51	68.86	63.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	80.00	80.00	100.63	97.73	98.72	80.00
4	143.00	115.00	121.00	115.00	115.00	0.00	0.00	0.00	0.00

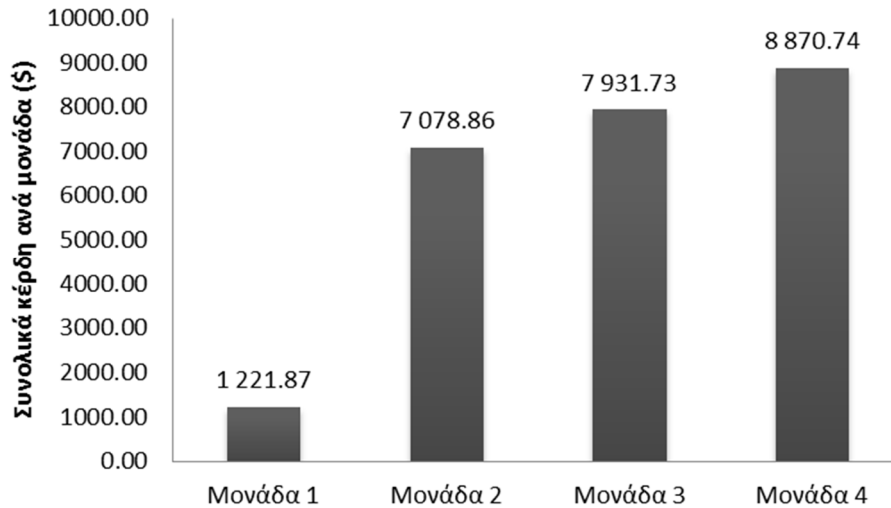
Για το σενάριο 3 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit(3) = \$ 25 103.21.

Έπειτα, υπολογίζονται για κάθε μονάδα και κάθε ώρα τα κέρδη (ή έξοδα), μέσω της σχέσης (5.1). Αμέσως μετά, αθροίζοντας τα κέρδη για κάθε μονάδα, υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 3 του συστήματος 4x8. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.15 και στο Σχήμα 5.5.

Πίνακας 5.15: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 3 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Συνολικά κέρδη ανά μονάδα (\$)
1	1 221.87
2	7 078.86
3	7 931.73
4	8 870.74
Σύνολο	25 103.21

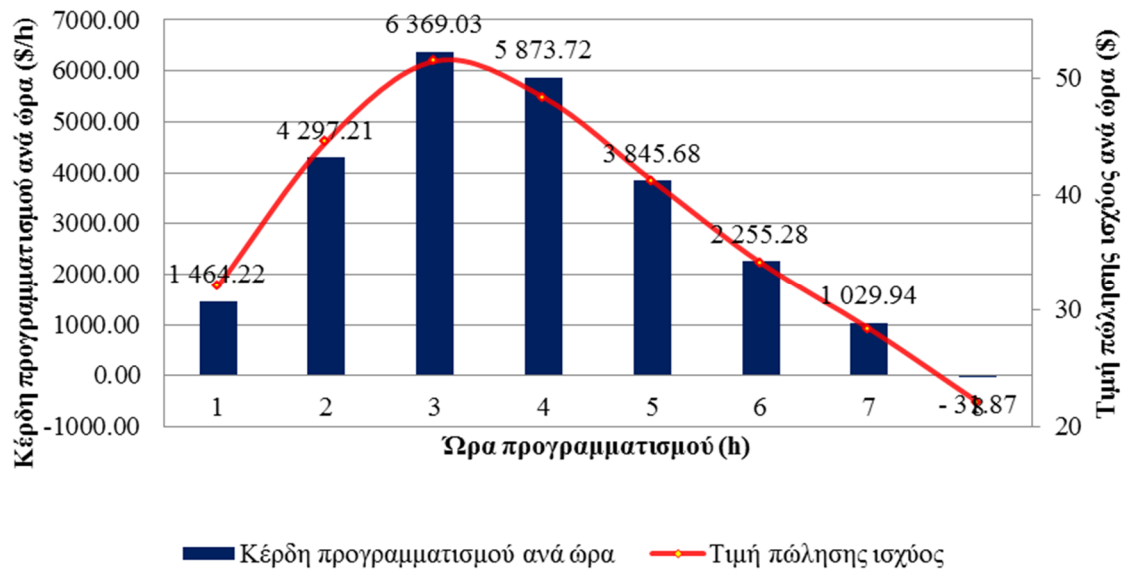
**Σχήμα 5.5:** Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 3 του συστήματος 4x8

Από τον Πίνακα 5.15 προκύπτει ότι τα μεγαλύτερα κέρδη για το χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού προέρχονται από τις μονάδες 2,3 και 4. Συγκεκριμένα, από τις τρεις αυτές μονάδες προέρχεται το 95,13% των συνολικών κερδών.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.16 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στο σενάριο 1, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο σχήμα 5.6 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.16: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 3 του συστήματος 4x8

	Ωρα προγραμματισμού							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Κέρδος ανά ώρα (\$/h)	1 464.22	4 297.21	6 369.03	5 873.72	3 845.68	2 255.28	1 029.94	-31.87
Σύνολο (\$)	25 103.21							



Σχήμα 5. 6: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 3 του συστήματος 4x8

Από το Σχήμα 5.6 φαίνεται, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να ‘ακολουθεί’ την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Σημαντικό είναι επίσης, πως στο χρονικό διάστημα όπου η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας είναι υψηλή σημειώνονται και τα μεγαλύτερα κέρδη του προγραμματισμού. Συγκεκριμένα το 81.2% του συνολικού κέρδους προκύπτει στο διάστημα από την δεύτερη ως την πέμπτη ώρα προγραμματισμού.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 11,72 sec για την επίλυση του σεναρίου 3 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.2.2.4 Αποτελέσματα για το Σενάριο 4 του συστήματος 4x8

Στο σενάριο 4 δεν περιλαμβάνονται στο λογισμικό οι περιορισμοί Tur και Tdown με αποτέλεσμα η κάθε μονάδα να έχει τη δυνατότητα να ξεκινά ή να διακόπτει τη λειτουργία της χωρίς χρονικούς περιορισμούς. Το κόστος εκκίνησης δεν είναι σταθερό, αλλά είναι μεταβλητό και μη γραμμικό και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.5). και τέλος χρησιμοποιείται η έκδοση των παραμέτρων βελτιστοποίησης του solver SCIP, όπου ortca=0 και ortcr=0, για να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Στον Πίνακα 5.17, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS και στον Πίνακα 5.18 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

Πίνακας 5.17: Βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός για το σενάριο 4 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Χρονική ώρα προγραμματισμού (h)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	1	1	0	0	1	1	1	0
2	1	1	0	1	1	1	1	1	0
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Πίνακας 5.18: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σενάριο 4 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.00	39.05	31.84	0.00	0.00	50.86	47.41	48.28	0.00
2	72.00	59.95	0.00	43.00	40.00	72.51	68.85	63.00	0.00
3	0.00	0.00	80.16	80.00	80.00	101.63	97.74	98.72	80.00
4	143.00	115.00	115.00	115.00	115.00	0.00	0.00	0.00	0.00

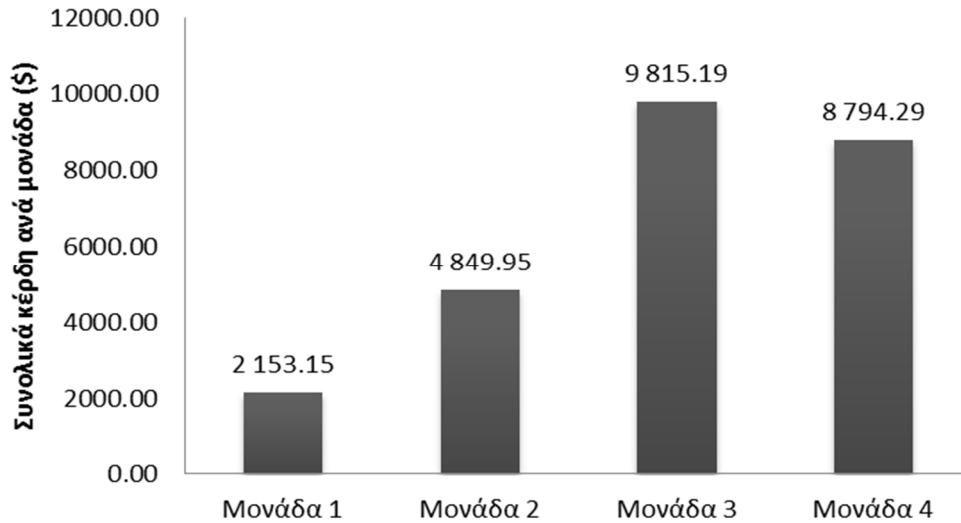
Για το σενάριο 4 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit(4) = \$ 25 612.58.

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, μέσω της σχέσης (5.1), υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 4 του συστήματος 4x8. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.19 και στο Σχήμα 5.7.

Πίνακας 5.19: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 4 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Συνολικά κέρδη ανά μονάδα (\$)
1	2 153.15
2	4 849.95
3	9 815.19
4	8 794.29
Σύνολο	25 612.58



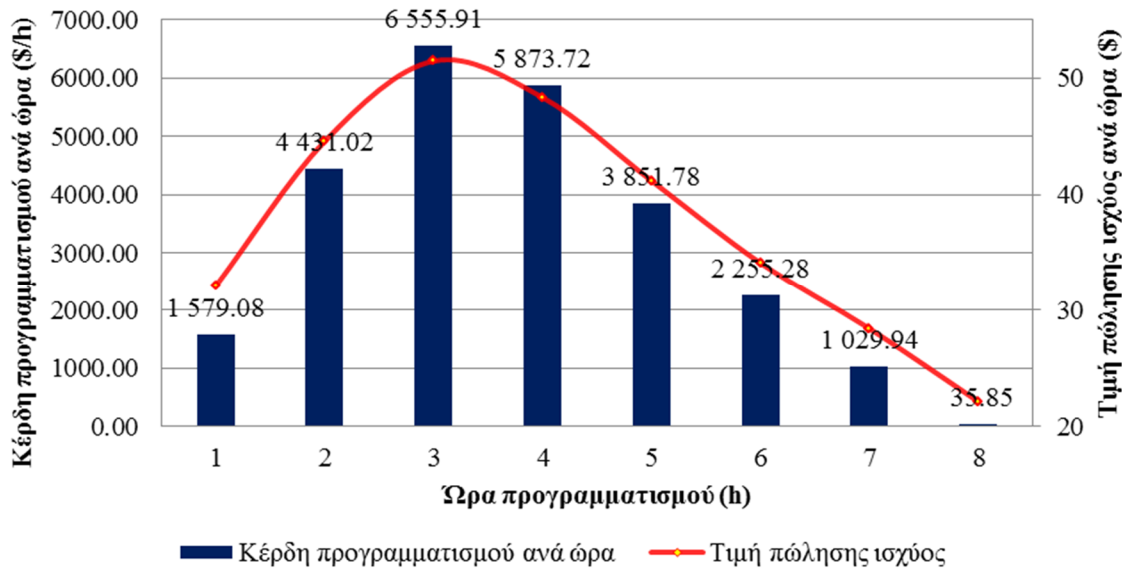
Σχήμα 5.7: : Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 4 του συστήματος 4x8

Από τον Πίνακα 5.19 προκύπτει ότι τα μεγαλύτερα κέρδη για το χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού προέρχονται από τις μονάδες 3 και 4. Συγκεκριμένα, από τις τρεις αυτές μονάδες προέρχεται το 72.7% των συνολικών κερδών. Όπως στα προηγούμενα σενάρια, μικρή ήταν η συνεισφορά της μονάδας 1 στα κέρδη του σεναρίου, αφού το 91.4% των κερδών προέρχεται από τις μονάδες 2,3 και 4.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.20 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στο σενάριο 1, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο σχήμα 5.8 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.20: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 4 του συστήματος 4x8

	Ώρα προγραμματισμού							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Κέρδος ανά ώρα (\$/h)	1 597.08	4 431.02	6 555.91	5 873.72	3 851.78	2 255.28	1 029.94	35.85
Σύνολο (\$)	25 612.58							



Σχήμα 5. 8: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 4 του συστήματος 4x8

Από το Σχήμα 5.8 φαίνεται, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να ‘ακολουθεί’ την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το 80.9% του συνολικού κέρδους προκύπτει στο διάστημα από την δεύτερη ως την πέμπτη ώρα προγραμματισμού.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 13.67 sec για την επίλυση του σεναρίου 4 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.2.2.5 Αποτελέσματα για το Σενάριο 5 του συστήματος 4x8

Στο σενάριο 5 δεν περιλαμβάνονται στο λογισμικό οι περιορισμοί Ramp-up και Ramp-down με αποτέλεσμα η κάθε μονάδα να έχει τη δυνατότητα να αυξάνει ή να μειώνει την παραγόμενη ισχύ της σε κάθε ώρα προγραμματισμού χωρίς περιορισμούς. Το κόστος εκκίνησης δεν είναι σταθερό, αλλά είναι μεταβλητό και μη γραμμικό και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.5). και τέλος χρησιμοποιείται η έκδοση των παραμέτρων βελτιστοποίησης του solver SCIP, όπου $optca=0$ και $optcr=0$, για να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Στον Πίνακα 5.21, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS και στον Πίνακα 5.22 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

Πίνακας 5.21: Βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός για το σενάριο 5 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Ώρα προγραμματισμού (h)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Πίνακας 5.22: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σενάριο 5 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.85	47.42	43.16	27.00
2	72.00	99.00	106.24	43.00	40.00	72.52	68.85	67.51	0.00
3	0.00	0.00	0.00	80.00	80.00	101.63	97.74	96.33	80.00
4	143.00	115.00	120.76	115.00	115.00	0.00	0.00	0.00	0.00

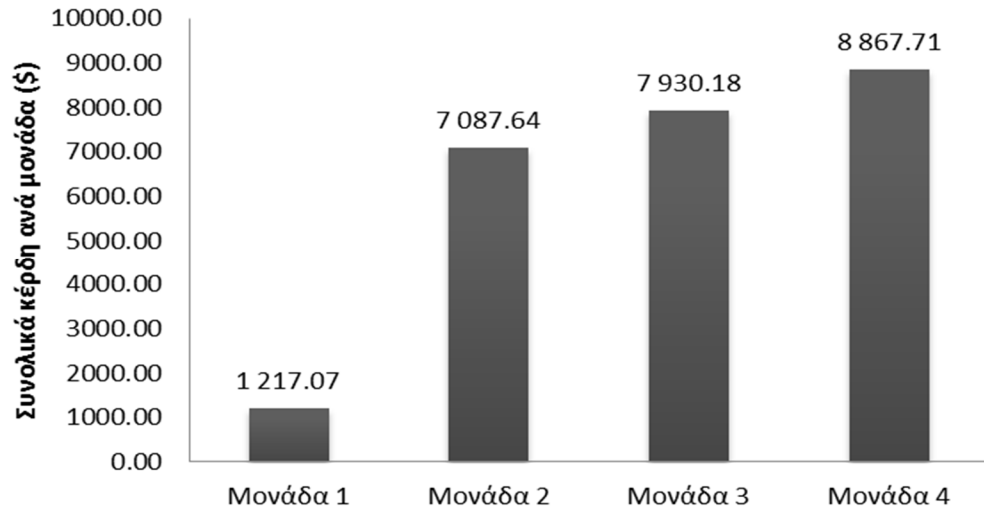
Για το σενάριο 5 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit(5) = \$ 25 102.6.

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, μέσω της σχέσης (5.1), υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 4 του συστήματος 4x8. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.23 και στο Σχήμα 5.9.

Πίνακας 5.23: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 5 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Συνολικά κέρδη ανά μονάδα (\$)
1	1 217.07
2	7 087.64
3	7 930.18
4	8 867.71
Σύνολο	25 102.6



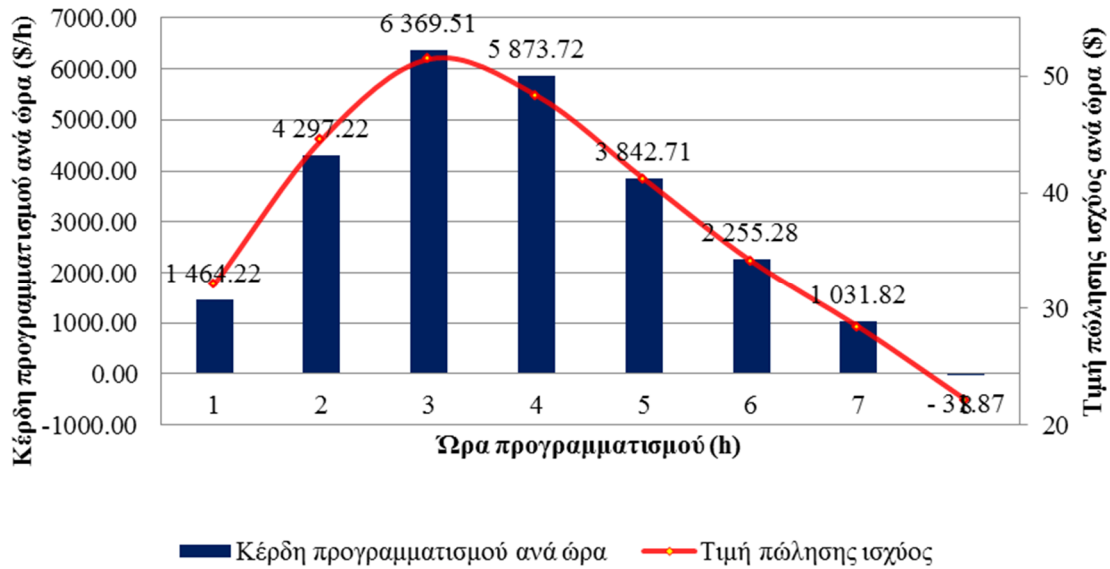
Σχήμα 5.9: : Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 5 του συστήματος 4x8

Από τον Πίνακα 5.23 προκύπτει ότι, παρόμοια με τα προηγούμενα σενάρια, μικρή ήταν η συνεισφορά της μονάδας 1 στα κέρδη του σεναρίου, αφού το 95.15% από τα κέρδη προέρχεται από τις μονάδες 2,3 και 4.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.24 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στο σενάριο 1, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο Σχήμα 5.10 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.24: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 5 του συστήματος 4x8

	Ωρα προγραμματισμού							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Κέρδος ανά ώρα (\$/h)	1 464.22	4 297.22	6 369.51	5 873.72	3 842.71	2 255.28	1 031.82	-31.87
Σύνολο (\$)	25 612.58							



Σχήμα 5. 10: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 5 του συστήματος 4x8

Από το Σχήμα 5.6 φαίνεται, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να ‘ακολουθεί’ την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το 79.6% του συνολικού κέρδους προκύπτει στο διάστημα από την δεύτερη ως την πέμπτη ώρα προγραμματισμού.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 11.49 sec για την επίλυση του σεναρίου 5 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.2.2.6 Αποτελέσματα για το Σενάριο 6 του συστήματος 4x8

Στο σενάριο 6 περιλαμβάνονται στο λογισμικό όλοι οι περιορισμοί Ramp-up, Ramp-down, Tur και Tdown των μονάδων του συστήματος. Το κόστος εκκίνησης δεν είναι σταθερό, αλλά είναι μεταβλητό και μη γραμμικό και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση (4.5). Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είτε στις default παραμέτρους βελτιστοποίησης του SCIP solver του GAMS (σενάριο 6.1), όπου $optca=1^{-9}$ και $optcr=0.1$, είτε με τη χρήση της επιλογής $optca=0$ και $optcr=0$ (σενάριο 6.2), όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.

5.2.2.6.1 Αποτελέσματα σεναρίου 6.1 του συστήματος 4x8

Στον Πίνακα 5.25, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS και στον Πίνακα 5.26 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

Πίνακας 5.25: Βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός για το σενάριο 6.1 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Ώρα προγραμματισμού (h)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1	1	0	0
4	1	1	1	1	0	0	0	0	0

Πίνακας 5.26: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σενάριο 6.1 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
2	72.00	99.00	106.00	43.00	88.00	97.18	122.18	75.65	38.00
3	0.00	0.00	0.00	80.00	147.00	127.82	82.00	0.00	0.00
4	143.00	115.00	121.00	115.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

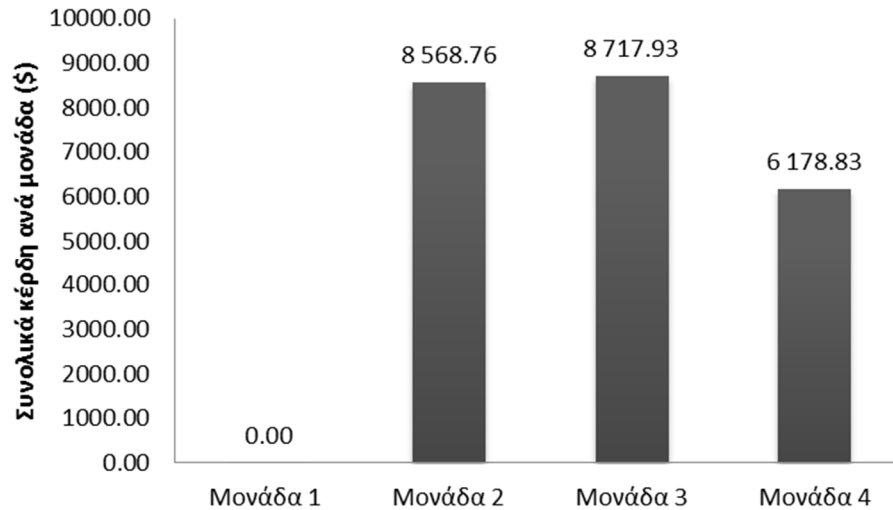
Για το σενάριο 6.1 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit(6.1) = \$ 23 465.52.

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, μέσω της σχέσης (5.1), υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 6.1 του συστήματος 4x8. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.27 και στο Σχήμα 5.11.

Πίνακας 5.27: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 6.1 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Συνολικά κέρδη ανά μονάδα (\$)
1	0.00
2	8 568.76
3	8 717.93
4	6 178.83
Σύνολο	23 465.52



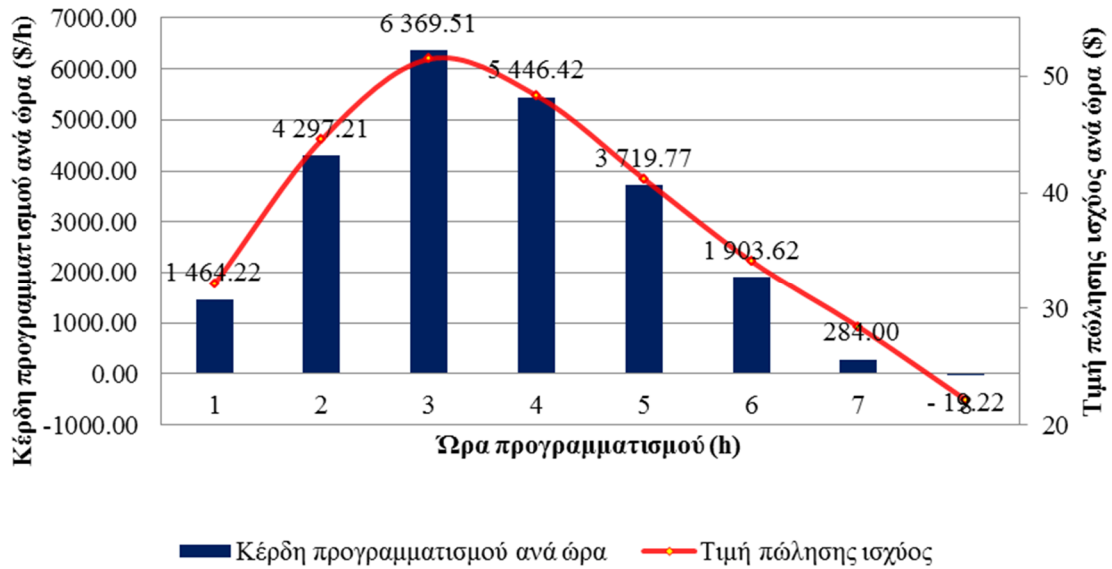
Σχήμα 5.11: : Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 6.1 του συστήματος 4x8

Από τον Πίνακα 5.27 προκύπτει ότι η συνεισφορά της μονάδας 1 στα κέρδη του σεναρίου είναι μηδενική, καθώς δεν ξεκινάει η λειτουργία της σε καμία ώρα του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, και όλα τα κέρδη προέρχονται από τις μονάδες 2,3 και 4, με τις μονάδες 2 και 3 να έχουν μεγαλύτερη συνεισφορά στα κέρδη από την μονάδα 4.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.28 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στα προηγούμενα σενάρια, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο σχήμα 5.12 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.28: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 6.1 του συστήματος 4x8

	Ωρα προγραμματισμού							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Κέρδος ανά ώρα (\$/h)	1 464.22	4 297.21	6 369.51	5 446.42	3 719.77	1 903.62	284.00	-19.22
Σύνολο (\$)	23 465.52							



Σχήμα 5. 12: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 6.1 του συστήματος 4x8

Από το Σχήμα 5.12 φαίνεται, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να ‘ακολουθεί’ την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το 84.5% του συνολικού κέρδους προκύπτει στο διάστημα από την δεύτερη ως την πέμπτη ώρα προγραμματισμού.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 11.3 sec για την επίλυση του σεναρίου 5 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.2.2.6.2 Αποτελέσματα σεναρίου 6.2 του συστήματος 4x8

Στον Πίνακα 5.29, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS και στον Πίνακα 5.30 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

Πίνακας 5.29: Βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός για το σενάριο 6.2 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Ωρα προγραμματισμού (h)								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	0	0	0	0

Πίνακας 5.30: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σενάριο 6.2 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.86	47.42	48.28	27.00
2	72.00	99.00	106.00	43.00	40.00	72.51	68.84	63.00	0.00
3	0.00	0.00	0.00	80.00	80.00	101.62	97.74	98.72	80.00
4	143.00	115.00	121.00	115.00	115.00	0.00	0.00	0.00	0.00

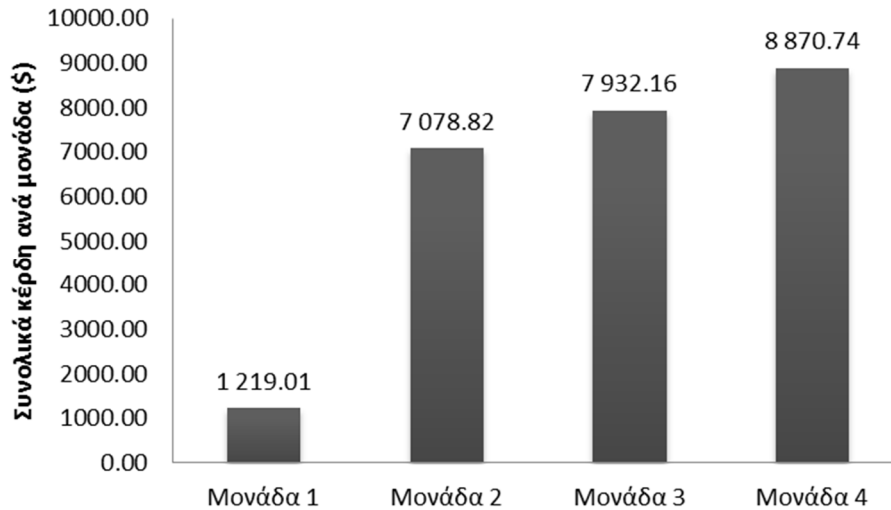
Για το σενάριο 6.2 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit(6.2) = \$ 25 100.73.

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, μέσω της σχέσης (5.1), υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 6.2 του συστήματος 4x8. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.31 και στο Σχήμα 5.13.

Πίνακας 5.31: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 6.2 του συστήματος 4x8

Μονάδα	Συνολικά κέρδη ανά μονάδα (\$)
1	1 219.01
2	7 078.82
3	7 932.16
4	8 870.74
Σύνολο	25 100.73



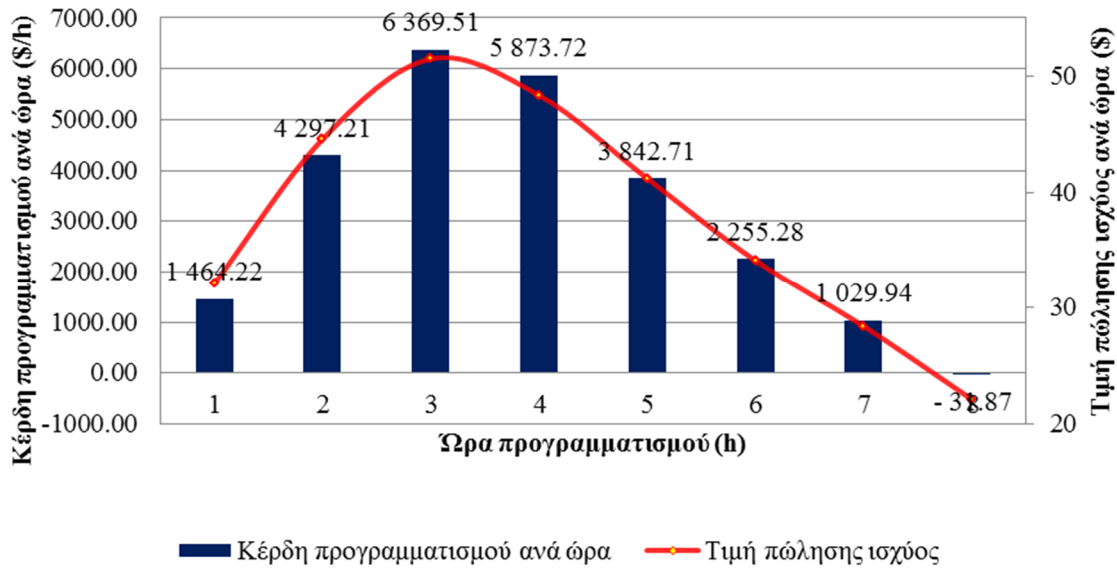
Σχήμα 5.13: : Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 6.2 του συστήματος 4x8

Από τον Πίνακα 5.31 προκύπτει ότι, παρόμοια με τα προηγούμενα σενάρια, μικρή είναι η συνεισφορά της μονάδας 1 στα κέρδη του σεναρίου, αφού το 95.14% από τα κέρδη προέρχεται από τις μονάδες 2,3 και 4. Σε αντίθεση με το σενάριο 6.1, εδώ η μονάδα 1 λειτουργεί από την ώρα 5 έως την ώρα 8 του προγραμματισμού και παράγει κέρδη.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.32 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στα προηγούμενα σενάρια, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο σχήμα 5.14 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.32: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 6.2 του συστήματος 4x8

	Ωρα προγραμματισμού							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Κέρδος ανά ώρα (\$/h)	1 464.22	4 297.21	6 369.51	5 873.72	3 842.71	2 255.28	1 029.94	-31.87
Σύνολο (\$)	25 100.73							



Σχήμα 5. 14: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 6.2 του συστήματος 4x8

Από το Σχήμα 5.14 φαίνεται, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να ‘ακολουθεί’ την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το 79% του συνολικού κέρδους προκύπτει στο διάστημα από την δεύτερη ως την πέμπτη ώρα προγραμματισμού. Σημαντικό είναι επίσης, πως από την πρώτη έως και την τέταρτη ώρα προγραμματισμού παρατηρούνται τα ίδια ωριαία κέρδη στα σενάρια 6.1 και 6.2. Στο σενάριο 6.2, τα συνολικά κέρδη είναι μεγαλύτερα επειδή επιτυγχάνονται μεγαλύτερα κέρδη από την ώρα 5 και μετά όπου η τιμή πώλησης της ισχύος μειώνεται σε σχετικά μικρές τιμές.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 11.4 sec για την επίλυση του σεναρίου 6.2 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.2.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά μελετήθηκε παραπάνω για μικρό σύστημα που αποτελείται από 4 θερμικές μονάδες παραγωγής για 8 ώρες προγραμματισμού. Μελετήθηκε σε 6 διαφορετικά σενάρια. Τα σενάρια, όπως αναφέρθηκε και φαίνεται στον Πίνακα 5.4, περιείχαν διαφορετικά χαρακτηριστικά για τις μονάδες παραγωγής, με σκοπό να γίνει μία ανάλυση ευαισθησίας για την επιρροή κάθε χαρακτηριστικού των μονάδων παραγωγής ως προς τα συνολικά κέρδη που απορρέουν σε κάθε σενάριο.

Φαίνεται πως μεγαλύτερη επιρροή στη μεγιστοποίηση των κερδών που προέρχονται από τον προγραμματισμό του συγκεκριμένου συστήματος έχουν οι περιορισμοί T-up και T-down. Συγκεκριμένα, σε σύγκριση με το σενάριο 6.2 που είναι και το αρχικό σύστημα που περιέχει

όλους τους περιορισμούς, στα σενάρια 1 και 4, όπου παραλείπονται οι περιορισμοί T-up και T-down, παρουσιάζεται αύξηση στα κέρδη κατά 1.86% και 2.04%, αντίστοιχα. Ποσοστά αύξησης του κέρδους σημαντικά για ένα τόσο μικρό σύστημα με λίγες ώρες προγραμματισμού.

Στα σενάρια 2 και 5, όπου παραλείπονται οι περιορισμοί Ramp-up και Ramp-down, οι διαφορές στα κέρδη είναι αμελητέες σε σχέση με το σενάριο 6.2. Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο, δεδομένου του μικρού συστήματος, και του γεγονότος πως η ωριαία πρόβλεψη ζήτησης φορτίου, D (MW), δεν παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις στο συγκεκριμένο σύστημα, και επομένως δεν είναι τόσο σημαντική η επιρροή των περιορισμών Ramp-up και Ramp-down.

Επιπροσθέτως, η χρήση σταθερού ή εκθετικού κόστους εκκίνησης φαίνεται πως δεν επηρεάζει τον προγραμματισμό του παραπάνω συστήματος σε σημαντικό βαθμό, ούτε ως προς το αποτέλεσμα της επίλυσης, αλλά ούτε και ως προς τον χρόνο επίλυσης για κάθε σενάριο. Σημαντικότερες αλλαγές ως προς τον χρόνο επίλυσης παρατηρούνται μεταξύ των σεναρίων 1 και 4, όπου παραλείπονται οι περιορισμοί T-up και T-down και κάθε μονάδα έχει τη δυνατότητα να ξεκινάει ή να σταματάει τη λειτουργία της σε κάθε ώρα του προγραμματισμού. Η λύση για το σενάριο 4 χρειάστηκε 9.6% περισσότερο χρόνο από το σενάριο 1. Όμως, ακριβή συμπεράσματα δεν είναι δυνατό να βγουν, καθώς οι χρόνοι εκτέλεσης δεν ήταν σταθεροί. Ως προς τη βελτιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, οι αλλαγές που παρατηρήθηκαν, από τη χρήση διαφορετικού κόστους εκκίνησης, ήταν μικρότερες από 0.2%. Στα υπόλοιπα σενάρια χρησιμοποιήθηκε μόνο ο εκθετικός τρόπος υπολογισμού του κόστους εκκίνησης, που περιέχει το κόστος του προσωπικού και συντήρησης για την ψυχρή εκκίνηση, το κόστος ψυχρής εκκίνησης και τη σταθερά ψύξης κάθε μονάδας, βασικά χαρακτηριστικά των θερμικών μονάδων παραγωγής.

Επίσης, σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι σε όλα τα παραπάνω σενάρια το συνολικό κέρδος κάθε ώρας προγραμματισμού τείνει να 'ακολουθεί' την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς το ωριαίο κέρδος αυξάνεται, έως την μέγιστη τιμή του την τρίτη ώρα προγραμματισμού, όπως και η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, ενώ στη συνέχεια τα ωριαία κέρδη και η ωριαία τιμή πώλησης μειώνονται παράλληλα, έως την τελευταία ώρα προγραμματισμού. Ως αποτέλεσμα, στο χρονικό διάστημα όπου η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας είναι υψηλή, σημειώνονται και τα μεγαλύτερα κέρδη του προγραμματισμού. Σε όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν τουλάχιστον 79.6% του συνολικού κέρδους προκύπτει στο διάστημα από την δεύτερη ως την πέμπτη ώρα προγραμματισμού.

Ακόμη, φαίνεται πως μικρή είναι η συνεισφορά της μονάδας 1 στα συνολικά κέρδη κάθε σεναρίου. Εκτός από τα σενάρια 1 και 4, όπου δεν υπάρχουν χρονικοί περιορισμοί για τη διάρκεια της λειτουργίας ή της διακοπής της λειτουργίας κάθε μονάδας, στα υπόλοιπα σενάρια πάνω από 95% των συνολικών κερδών προέρχεται από τις μονάδες 2, 3 και 4. Γεγονός το οποίο, όπως αναφέρθηκε, είναι και το αναμενόμενο καθώς η μονάδα 1 έχει τις μεγαλύτερες χαρακτηριστικές τιμές A, B και C, όπως φαίνεται από τους Πίνακες 5.1 και 5.2, από τις οποίες υπολογίζεται το κόστος λειτουργίας των μονάδων.

5.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ 10 ΜΟΝΑΔΩΝ ΓΙΑ 24 ΩΡΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

5.3.1 Δεδομένα συστήματος

Το δεύτερο σύστημα στο οποίο μελετήθηκε το πρόβλημα της ένταξης μονάδων για μεγιστοποίηση του κέρδους (Profit-based unit commitment – PBUc) αποτελείται από 10 θερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αφορά 24 ώρες προγραμματισμού. Το σύστημα αυτό στη συνέχεια ονομάζεται σύστημα 10x24 [5.2], [5.3].

Στον Πίνακα 5.33 φαίνονται τα δεδομένα των 10 μονάδων παραγωγής, όπου:

- P_{min} (MW) είναι η ελάχιστη παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας
- P_{max} (MW) είναι η μέγιστη παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας
- A (\$/h), B (\$/MWh), και C (\$/MW²h) είναι ο σταθερός, ο γραμμικός, και ο τετραγωνικός συντελεστής κόστους καυσίμου (λειτουργίας) κάθε μονάδας
- T_{up} (h) είναι ο ελάχιστος χρόνος που μπορεί να είναι σε λειτουργία η κάθε γεννήτρια από την ώρα που θα τεθεί σε λειτουργία
- T_{down} (h) είναι ο ελάχιστος χρόνος που πρέπει να είναι κλειστή μία μονάδα από τη στιγμή που θα σταματήσει να λειτουργεί
- X_0 (h) είναι ένας δείκτης που δείχνει πόσες ώρες συνολικά μία μονάδα είναι σε λειτουργία (ή είναι σβηστή), τη χρονική στιγμή μηδέν, δηλαδή αμέσως πριν την πρώτη ώρα του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού.
- R_{up} (MW/h) είναι η μέγιστη ωριαία αύξηση της παραγωγής μίας μονάδας
- R_{down} (MW/h) είναι η μέγιστη ωριαία μείωση της παραγωγής μίας μονάδας
- P_0 (MW) είναι η παραγωγή κάθε μονάδας την ώρα μηδέν, δηλαδή μία ώρα πριν από την έναρξη του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού της μονάδας
- SD (\$/h) είναι το κόστος διακοπής της λειτουργίας για κάθε μονάδα
- $SUP-COST$ (\$/h) είναι το σταθερό κόστος εκκίνησης κάθε μονάδας
- D (\$/h) είναι το κόστος του προσωπικού και συντήρησης για την ψυχρή εκκίνηση
- E (\$/h) είναι το κόστος ψυχρής εκκίνησης κάθε μονάδας
- CT (h) είναι η σταθερά ψύξης κάθε μονάδας.

Πίνακας 5.33: Χαρακτηριστικά μονάδων του συστήματος 10x24

Μονάδα	Pmin (MW)	Pmax (MW)	A (\$/h)	B (\$/MW h)	C (\$/MW ² h)	Tup (h)	Tdown (h)
1	15	60	15	1.4	0.0051	3	2
2	20	80	25	1.5	0.004	3	4
3	30	100	40	1.35	0.0039	4	4
4	25	120	32	1.4	0.0038	3	3
5	50	150	29	1.54	0.0021	1	3
6	75	280	72	1.35	0.0026	6	3
7	250	520	105	1.395	0.0013	10	4
8	50	150	100	1.329	0.0014	3	2
9	120	320	49	1.264	0.0029	7	5
10	75	200	82	1.214	0.0015	6	6

Μονάδα	Xo (h)	Rup (MW/h)	Rdown (MW/h)	Po (MW)	D (\$/h)	E (\$/h)	CT (h)	SD (\$)
1	3	35	55	60	15	123	5	0
2	3	66	70	80	15	123	5	0
3	4	80	93	100	25	110	5	0
4	3	55	118	120	12	100	5	0
5	-3	143	139	0	30	130	5	0
6	-3	128	261	0	30	146	6	0
7	10	271	276	520	60	207	11	0
8	3	55	83	150	80	202	11	0
9	7	161	150	320	50	137	7	0
10	6	143	87	200	70	157	9	0

Στον Πίνακα 5.34 παρουσιάζονται τα δεδομένα της ωριαίας πρόβλεψης ζήτησης φορτίου, D (MW), και η ωριαία πρόβλεψη της τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, Pgm (\$/MWh) [5.4].

Πίνακας 5.74: Ωριαία πρόβλεψη ζήτησης φορτίου και πρόβλεψη τιμή πώλησης για το σύστημα 10x24

h	D (MW)	Pgm (\$/MWh)
1	1 517	17.412
2	1 426	17.443
3	1 368	17.505
4	1 328	20.018
5	1 317	17.502
6	1 351	20.178

Πίνακας 5.84: Ωριαία πρόβλεψη ζήτησης φορτίου και πρόβλεψη τιμή πώλησης για το σύστημα 10x24 (συνέχεια)

h	D (MW)	Pgm (\$/MWh)
7	1 398	20.576
8	1 351	20.974
9	1 317	20.735
10	1 293	23.228
11	1 238	26.234
12	1 226	27.417
13	1 203	23.228
14	1 180	20.735
15	1 170	20.974
16	1 136	17.533
17	1 113	17.502
18	1079	20.178
19	1 034	20.974
20	1 022	23.228
21	1 010	20.576
22	1 058	23.114
23	1 124	17.455
24	1 517	17.393

5.3.2 Σενάρια και αποτελέσματα

Το πρόβλημα των 10 μονάδων και 24 ωρών προγραμματισμού μελετήθηκε για 4 διαφορετικά σενάρια (Πίνακας 5.35). Οι διαφοροποιήσεις στα σενάρια αφορούν την θεώρηση ή όχι των περιορισμών T-up και T-down, το ίδιο και για τους περιορισμούς Ramp-up και Ramp-down. Επίσης, με σκοπό την παρουσίαση της βέλτιστης λύσης που βρέθηκε από τον SCIP solver του GAMS, παρουσιάζεται η λύση κάθε σεναρίου με τη χρήση της επιλογής `optca=0` και `optcr=0`, όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4. Στο σενάριο 3, που είναι το αρχικό σενάριο προς μελέτη και περιέχει όλους τους περιορισμούς που μελετούνται, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είτε στις default παραμέτρους βελτιστοποίησης του SCIP solver, όπου `optca=1-9` και `optcr=0,1`, είτε με τη χρήση της επιλογής `optca=0` και `optcr=0`.

Πίνακας 5.35 : Παρουσίαση σεναρίων που μελετήθηκαν για το σύστημα 10x24

	Tup	Tdown	Ramp-up	Ramp-down	Optcr =0	start-up cost εκθετικό
Σενάριο 1			√	√	√	√
Σενάριο 2	√	√			√	√
Σενάριο 3.1	√	√	√	√		√
Σενάριο 3.2	√	√	√	√	√	√

Πίνακας 5.37: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σενάριο 1 του συστήματος 10x24 (συνέχεια)

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού							
	9	10	11	12	13	14	15	16
1	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
2	80.00	80.00	80.00	71.42	75.92	80.00	80.00	80.00
3	100.00	93.00	0.00	80.00	97.09	100.00	100.00	93.00
4	120.00	120.00	118.00	0.00	55.00	110.00	120.00	120.00
5	0.00	143.00	150.00	126.51	0.00	0.00	0.00	139.00
6	0.00	128.00	245.26	138.73	145.63	204.00	261.00	0.00
7	276.00	0.00	0.00	260.15	273.96	276.00	0.00	0.00
8	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
9	320.00	319.00	234.74	139.19	145.40	0.00	161.00	294.00
10	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού							
	17	18	19	20	21	22	23	24
1	60.00	60.00	43.74	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
2	73.59	80.00	43.26	79.43	77.70	78.31	80.00	80.00
3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
4	90.62	120.00	58.70	96.76	94.95	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	72.89	0.00	0.00	139.65	150.00	150.00
6	128.00	0.00	95.41	151.04	0.00	0.00	0.00	128.00
7	266.79	469.00	250.00	284.77	279.47	281.33	318.60	501.58
8	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
9	144.00	0.00	120.00	0.00	147.88	148.71	165.40	247.42
10	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00

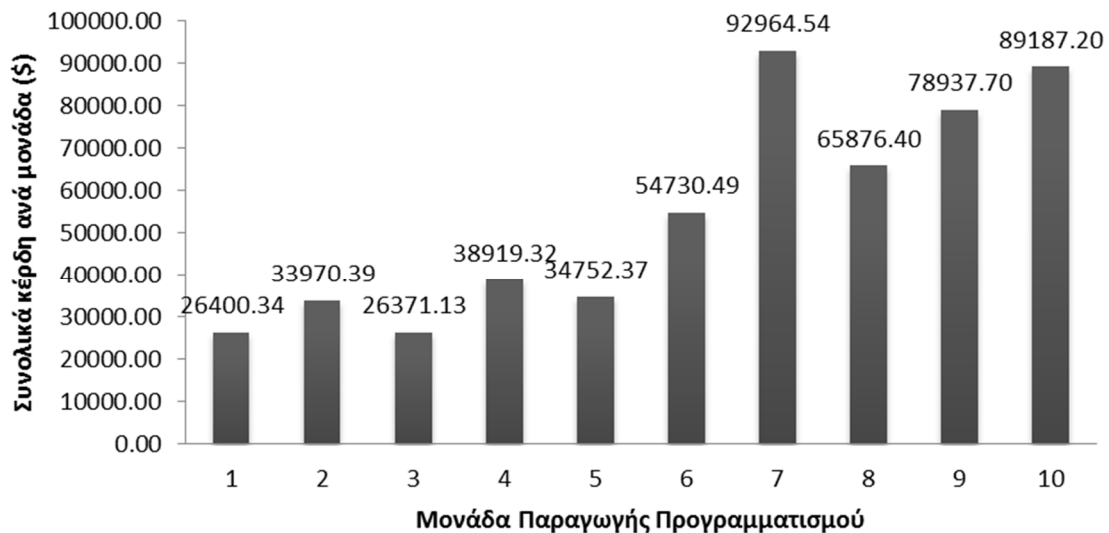
Για το σενάριο 1 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit (1) = \$ 542 109.87.

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα συστήματα, μέσω της σχέσης (5.1), υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 1 του συστήματος 10x24. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.38 και στο Σχήμα 5.15.

Πίνακας 5.38: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 1 του συστήματος 10x24

Μονάδα	Συνολικά κέρδη ανά μονάδα (\$)
1	26 400.34
2	33 970.39
3	26 371.13
4	38 919.32
5	34 752.37
6	54 730.49
7	92 964.54
8	65 876.40
9	78 937.70
10	89 187.20
Σύνολο (\$)	542 109.87

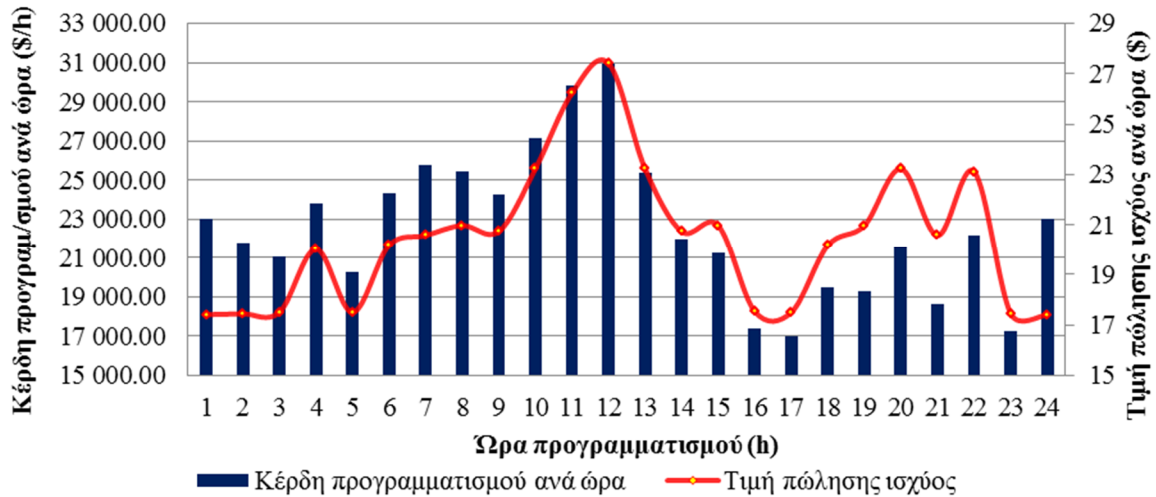
**Σχήμα 5.15:** : Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 1 του συστήματος 10x24

Από τον Πίνακα 5.38 προκύπτει ότι η συνεισφορά των μονάδων 1 έως 5 στα κέρδη του σεναρίου είναι σχετικά μικρή σε σχέση με των υπόλοιπων μονάδων, κάτι αναμενόμενο καθώς από τον Πίνακα 5.33 φαίνεται πως οι χαρακτηριστικές τιμές B και C των μονάδων 6 έως 10, που ευθύνονται για τα κόστη λειτουργίας, είναι μικρότερες από τις αντίστοιχες των προηγούμενων μονάδων. Αποτέλεσμα είναι να παράγουν περισσότερο οι μονάδες 6 έως 10 στον προγραμματισμό ώστε να ελαχιστοποιούνται τα κόστη λειτουργίας. Συγκεκριμένα, οι μονάδες 6 έως 10 ευθύνονται για το 70.4% των κερδών.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.39 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στα προηγούμενα σενάρια, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο Σχήμα 5.16 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.39: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 1 του συστήματος 10x24

h	Κέρδη ανά ώρα(\$/h)
1	23 023.28
2	21 786.61
3	21 027.67
4	23 770.62
5	20 265.21
6	24 314.23
7	25 783.19
8	25 439.77
9	24 268.09
10	27 108.24
11	29 851.71
12	30 911.61
13	25 387.30
14	21 973.06
15	21 272.86
16	17 416.31
17	17 004.52
18	19 468.53
19	19 312.99
20	21 590.69
21	18 619.89
22	22 195.29
23	17 289.75
24	23 028.45
Σύνολο (\$)	542 109.87



Σχήμα 5. 16: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 1 του συστήματος 10x24

Από το Σχήμα 5.16 φαίνεται, αντίστοιχα με το προηγούμενο σύστημα, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να 'ακολουθεί' την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, το 55% των κερδών κερδίζεται κατά τις 12 πρώτες ώρες του προγραμματισμού.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 10 ώρες και 43 λεπτά για την επίλυση του σεναρίου 1 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.3.2.2 Αποτελέσματα για το Σενάριο 2 του συστήματος 10x24

Στο σενάριο 2 δεν περιλαμβάνονται στο λογισμικό οι περιορισμοί Ramp-up και Ramp-down με αποτέλεσμα η κάθε μονάδα να έχει τη δυνατότητα να αυξάνει ή να μειώνει την παραγωγή της χωρίς περιορισμούς. Χρησιμοποιείται η έκδοση των παραμέτρων βελτιστοποίησης του solver SCIP, όπου $optca=0$ και $optcr=0$, για να βρεθεί η βέλτιστη λύση.

Στον Πίνακα 5.40, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS και στον Πίνακα 5.41 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

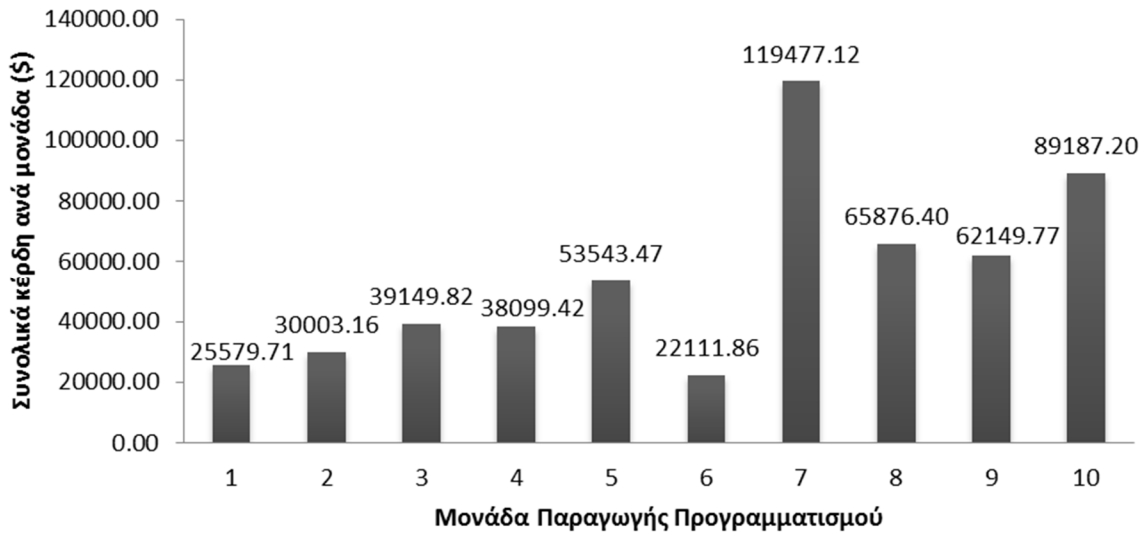
Για το σενάριο 2 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit (2) = \$ 545 177.95.

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, μέσω της σχέσης (5.1), υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 2 του συστήματος 10x24. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.42 και στο Σχήμα 5.17.

Πίνακας 5.42: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 2 του συστήματος 10x24

Μονάδα	Συνολικά κέρδη ανά μονάδα (\$)
1	25 579.71
2	30 003.16
3	39 149.82
4	38 099.42
5	53 543.47
6	22 111.86
7	119 477.12
8	65 876.40
9	62 149.77
10	89 187.20
Σύνολο (\$)	545 177.95



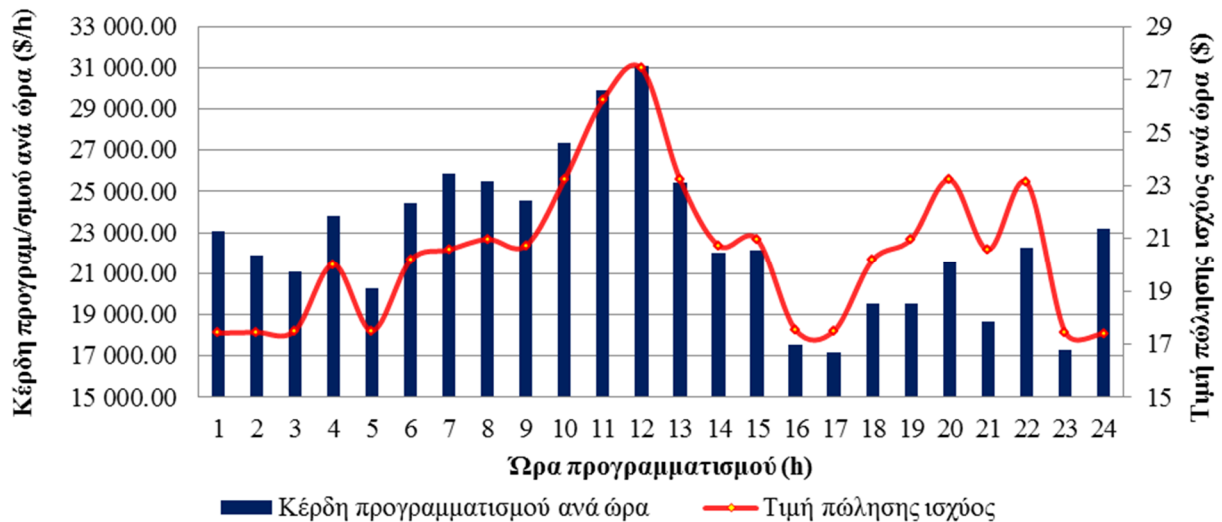
Σχήμα 5.17: : Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 2 του συστήματος 10x24

Από τον Πίνακα 5.42 προκύπτει ότι η συνεισφορά των μονάδων 1 έως 6 στα κέρδη του σεναρίου είναι σχετικά μικρή σε σχέση με των υπόλοιπων μονάδων. Συγκεκριμένα, οι μονάδες 7 έως 10 ευθύνονται για το 61.9% των κερδών.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.43 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στα προηγούμενα σενάρια, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο Σχήμα 5.18 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.43: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 2 του συστήματος 10x24

h	Κέρδη ανά ώρα(\$/h)
1	23 056.58
2	21 891.83
3	21 088.07
4	23 808.61
5	20 297.59
6	24 437.33
7	25 843.11
8	25 512.73
9	24 555.45
10	27 348.20
11	29 909.73
12	31 070.58
13	25448.78
14	22 020.51
15	22 113.39
16	17 560.62
17	17 168.98
18	19 528.39
19	19 529.91
20	21 604.40
21	18 669.52
22	22 251.64
23	17 286.69
24	23 175.29
Σύνολο (\$)	545 177.95



Σχήμα 5. 18: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 2 του συστήματος 10x24

Από το Σχήμα 5.18 φαίνεται, αντίστοιχα με το προηγούμενο σύστημα, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να ‘ακολουθεί’ την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, το 54.8% των κερδών κερδίζεται κατά τις 12 πρώτες ώρες του προγραμματισμού.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 1 ώρα και 48 λεπτά για την επίλυση του σεναρίου 1 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.3.2.3 Αποτελέσματα για το Σενάριο 3 του συστήματος 10x24

Στο σενάριο 3 περιλαμβάνονται στο λογισμικό όλοι οι περιορισμοί Ramp-up, Ramp-down, Tur και Tdown των μονάδων του συστήματος 10x24. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είτε στις default παραμέτρους βελτιστοποίησης του SCIP solver του GAMS (σενάριο 3.1), όπου $optca=1^{-9}$ και $optcr=0.1$, είτε με τη χρήση της επιλογής $optca=0$ και $optcr=0$ (σενάριο 3.2), όπως περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 4.

5.3.2.3.1 Αποτελέσματα για το σενάριο 3.1 του συστήματος 10x24

Στον Πίνακα 5.44, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS και στον Πίνακα 5.45 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

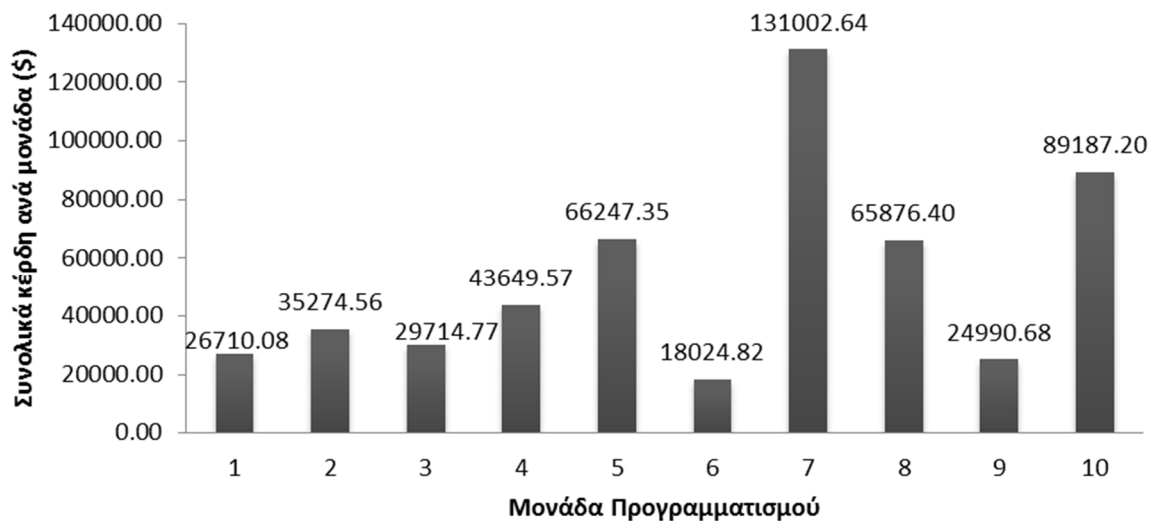
Για το σενάριο 3.1 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit (3.1) = \$ 530 678.06.

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, μέσω της σχέσης 5.1, υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 3.1 του συστήματος 10x24. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.46 και στο Σχήμα 5.19.

Πίνακας 5.46: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 3.1 του συστήματος 10x24

Μονάδα	Συνολικά κέρδη ανά μονάδα (\$)
1	26 710.08
2	35 274.56
3	29 714.77
4	43 649.57
5	66 247.35
6	18 024.82
7	131 002.64
8	65 876.40
9	24 990.68
10	89 187.20
Σύνολο (\$)	530 678.06



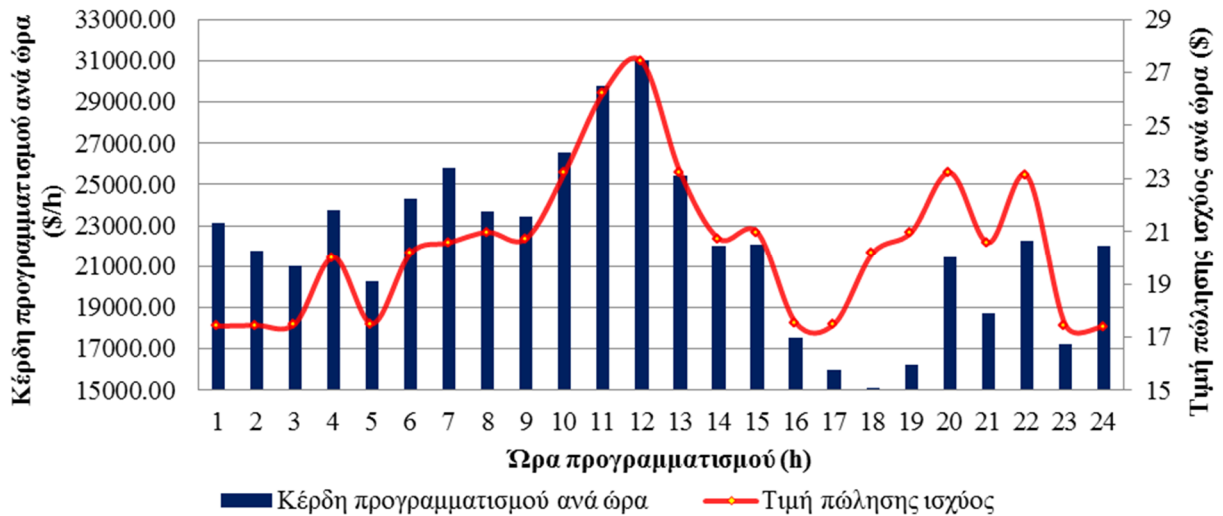
Σχήμα 5.19: : Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 3.1 του συστήματος 10x24

Από τον Πίνακα 5.46 προκύπτει ότι η συνεισφορά των μονάδων 1 έως 6 στα κέρδη του σεναρίου είναι σχετικά μικρή σε σχέση με των υπόλοιπων μονάδων. Συγκεκριμένα, οι μονάδες 7 έως 10 ευθύνονται για το 58.6% των κερδών, ποσοστό περίπου 3% μικρότερο από τα προηγούμενα σεναρία. Η μονάδα 7 παρουσιάζει τα υψηλότερα κέρδη και συνεισφέρει σε ποσοστό 24.7% των συνολικών κερδών στο συγκεκριμένο σενάριο.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.47 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στα προηγούμενα σεναρία, από τη σχέση (5.1). Έπειτα, στο Σχήμα 5.20 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.47: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 3.1 του συστήματος 10x24

h	Κέρδη ανά ώρα(\$/h)
1	23 109.61
2	21 773.88
3	21 044.97
4	23 778.01
5	20 270.14
6	24 328.12
7	25 815.49
8	23 720.46
9	23 419.32
10	26 560.50
11	29 797.11
12	31 043.09
13	25 425.93
14	21 981.50
15	22 078.52
16	17 538.60
17	15 977.44
18	15 125.41
19	16 258.06
20	21 433.61
21	18 699.51
22	22 262.07
23	17 255.03
24	21 981.68
Σύνολο (\$)	530 678.06



Σχήμα 5. 20: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 3.1 του συστήματος 10x24

Από το Σχήμα 5.20 φαίνεται, αντίστοιχα με το προηγούμενο σύστημα, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να ‘ακολουθεί’ την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, το 55.5% των κερδών κερδίζεται κατά τις 12 πρώτες ώρες του προγραμματισμού και τα μεγαλύτερα κέρδη παρατηρούνται κατά την 12^η ώρα του προγραμματισμού όπου η προβλεπόμενη τιμή πώλησης της ισχύος παρουσιάζει μέγιστη τιμή.

Τέλος, επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 27 λεπτά για την επίλυση του σεναρίου 2 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.3.2.3.2 Αποτελέσματα για το σενάριο 3.2 του συστήματος 10x24

Στον Πίνακα 5.48, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS και στον Πίνακα 5.49 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

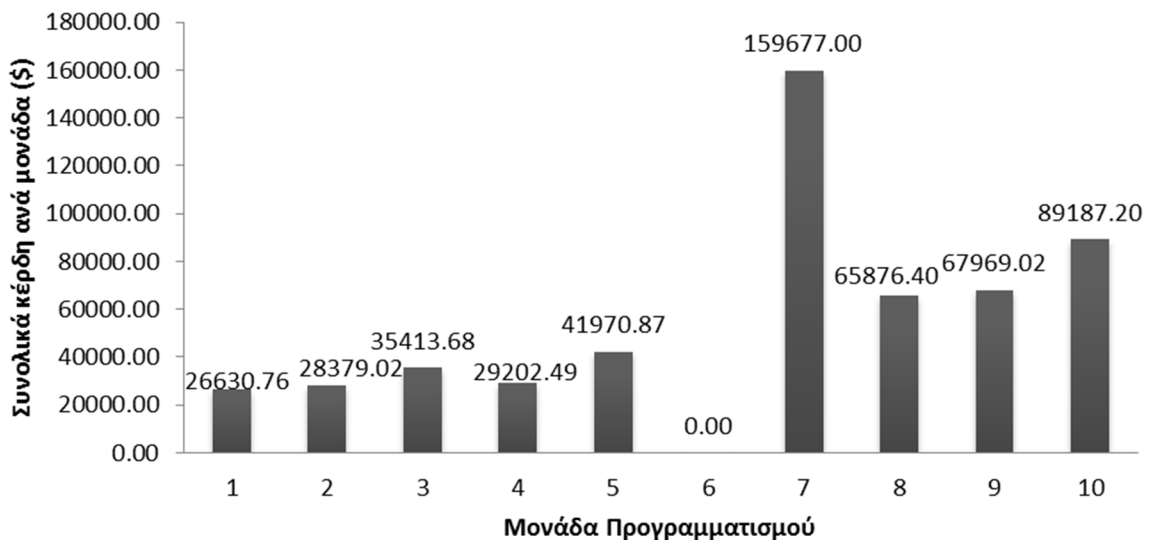
Για το σενάριο 3.2 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit (3.2) = \$ 544 306.43.

Αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, μέσω της σχέσης (5.1), υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού για το σενάριο 3.2 του συστήματος 10x24. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.50 και στο Σχήμα 5.21.

Πίνακας 5.50: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 3.2 του συστήματος 10x24

Μονάδα	Συνολικό κέρδος ανά μονάδα (\$)
1	26 630.76
2	28 379.02
3	35 413.68
4	29 202.49
5	41 970.87
6	0.00
7	159 677.00
8	65 876.40
9	67 969.02
10	89 187.20
Σύνολο (\$)	544 306.43



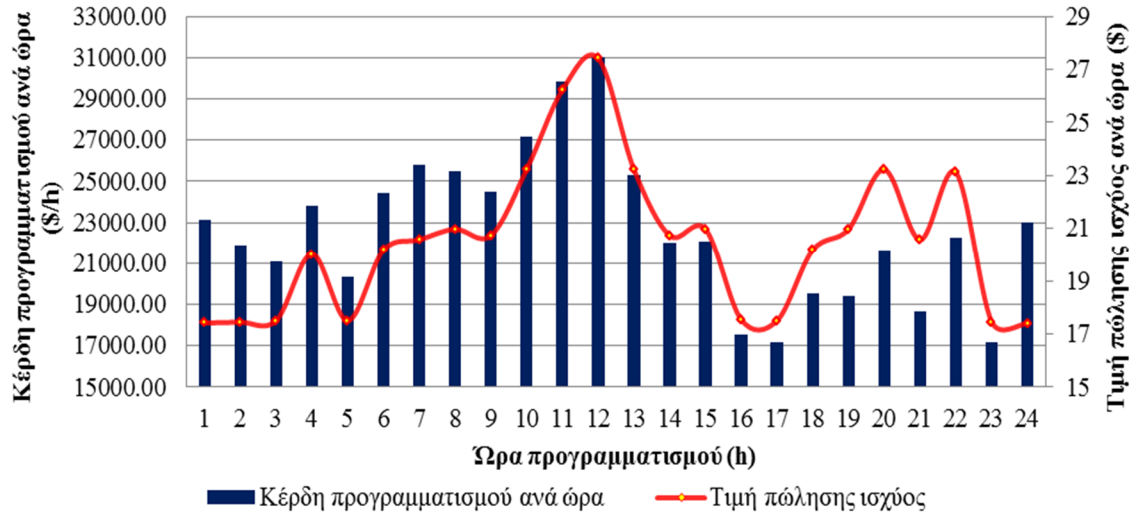
Σχήμα 5.21: : Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 3.2 του συστήματος 10x24

Από τον Πίνακα 5.50 προκύπτει ότι η συνεισφορά των μονάδων 1 έως 5 στα κέρδη του σεναρίου είναι σχετικά μικρή σε σχέση με των υπόλοιπων μονάδων. Ακόμη, η μονάδα 6 δεν συνεισφέρει στα κέρδη καθώς δεν λειτουργεί σε καμία χρονική περίοδο κατά τον προγραμματισμό του συγκεκριμένου σεναρίου. Συγκεκριμένα, οι μονάδες 7 έως 10 ευθύνονται για το 70.3% των κερδών, ενώ η μονάδα 7 που παρουσιάζει και τα υψηλότερα κέρδη συνεισφέρει σε ποσοστό 29.34% των συνολικών κερδών στο συγκεκριμένο σενάριο.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.51 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στα προηγούμενα σεναρία, από τη Σχέση (5.1). Έπειτα στο Σχήμα 5.22 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.51: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σενάριο 3.2 του συστήματος 10x24

h	Κέρδη ανά ώρα(\$/h)
1	23 112.765
2	21 886.982
3	21 094.687
4	23 821.595
5	20 311.4
6	24 427.917
7	25 817.178
8	25 500.25
9	24 489.773
10	27 170.201
11	29 852.505
12	31 018.138
13	25 284.837
14	22 003.54
15	22 098.224
16	17 550.812
17	17 162.507
18	19 526.739
19	19 423.476
20	21 626.447
21	18 680.141
22	22 242.825
23	17 183.476
24	23 020.019
Σύνολο (\$)	544 306.43



Σχήμα 5. 22: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 3.2 του συστήματος 10x24

Από το Σχήμα 5.22 φαίνεται, αντίστοιχα με το προηγούμενο σύστημα, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να ‘ακολουθεί’ την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, το 54.8% των κερδών κερδίζεται κατά τις 12 πρώτες ώρες του προγραμματισμού.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 5 ώρες και 16 λεπτά για την επίλυση του σεναρίου 1 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.3.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στην συγκεκριμένη ενότητα μελετήθηκε το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά για σύστημα που αποτελείται από 10 θερμικές μονάδες παραγωγής για 24 ώρες προγραμματισμού σε 4 διαφορετικά σενάρια. Τα σενάρια, όπως αναφέρθηκε στον Πίνακα 5.35, περιείχαν διαφορετικά χαρακτηριστικά για τις μονάδες παραγωγής. Στο σενάριο 1, παραλείπονται οι περιορισμοί T-up και T-down, στο σενάριο 2 παραλείπονται οι περιορισμοί Ramp-up και Ramp-down και στο σενάριο 3 περιλαμβάνονται στο λογισμικό όλοι οι περιορισμοί Ramp-up, Ramp-down, Tur και Tdown των μονάδων του συστήματος 10x24. Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα είτε στις default παραμέτρους βελτιστοποίησης του SCIP solver του GAMS (σενάριο 3.1), όπου optca=1⁹ και optcr=0.1, είτε με τη χρήση της επιλογής optca=0 και optcr=0 (σενάριο 3.2).

Στο σενάριο 1 αξιοσημείωτο είναι πως ο SCIP solver του GAMS χρειάστηκε αρκετά μεγαλύτερο χρόνο σύγκλισης για τη βελτιστοποίηση, ο οποίος ήταν 10 ώρες και 42 λεπτά. Αυτό είναι και λογικό καθώς στο συγκεκριμένο σενάριο υπάρχει πολύ μεγαλύτερο εύρος πιθανών λύσεων που πρέπει να ελεγχθεί, καθώς κάθε μονάδα από τις 10 που αποτελείται το πρόβλημα έχει

τη δυνατότητα να ξεκινάει ή να διακόπτει τη λειτουργία της σε κάθε χρονική ώρα του προγραμματισμού χωρίς χρονικούς περιορισμούς. Στο συγκεκριμένο σενάριο ο προγραμματισμός που εφαρμόστηκε συνέχισε τη σύγκλιση και μετά τις 10 ώρες και 42 λεπτά, χωρίς όμως να βρεθούν καλύτερα αποτελέσματα οπότε και σταμάτησε μετά από τρεις ημέρες. Φαίνεται, όμως, πως στο συγκεκριμένο σύστημα με τις περισσότερες μονάδες οι συγκεκριμένοι περιορισμοί δεν επηρεάζουν το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης του κέρδους σε τόσο μεγάλο βαθμό καθώς υπάρχουν αρκετές μονάδες για κάθε χρονική στιγμή, οι οποίες μπορούν να καλύψουν το φορτίο ζήτησης. Τα κέρδη που απορρέουν από τον προγραμματισμό του συγκεκριμένου σεναρίου είναι 2.15% μεγαλύτερα από τα κέρδη του σεναρίου 3.1 και μικρότερα κατά 0.41% από τα κέρδη του σεναρίου 3.2.

Στο σενάριο 2, όπου παραλείπονται οι περιορισμοί Ramp-up και Ramp-down, ενώ σε 26 δευτερόλεπτα ο SCIP solver του GAMS είχε συγκλίνει στην πρώτη λύση του με τις default παραμέτρους βελτιστοποίησης όπου τα κέρδη ήταν \$ 544 537.27 χρειάστηκε 1 ώρα και 48 λεπτά για να σταματήσει τη σύγκλιση σε κέρδη \$ 545 177.65, δηλαδή 0.12% παραπάνω. Ως προς το αρχικό σύστημα, που μελετήθηκε στο σενάριο 3, τα κέρδη που απορρέουν από τον προγραμματισμό του σεναρίου 2 είναι 2.73% μεγαλύτερα από του σεναρίου 3.1 και 0.16% μεγαλύτερα από του σεναρίου 3.2.

Επίσης, σημαντικό είναι ότι, όπως και στο προηγούμενο σύστημα έτσι και στο σύστημα 10x24, σε όλα τα σενάρια το συνολικό κέρδος κάθε ώρας προγραμματισμού τείνει να 'ακολουθεί' την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Σε όλα τα σενάρια παρατηρούνται τα μέγιστα ωριαία κέρδη για κάθε σενάριο την 12^η ώρα, όπου και η τιμή πώλησης είναι και η υψηλότερη. Επίσης, σε όλα τα παραπάνω σενάρια παρατηρείται ότι 54.8% έως και το 55.5% από τα συνολικά κέρδη παρατηρήθηκαν κατά τις πρώτες 12 ώρες του προγραμματισμού.

Ακόμη, σε όλα τα παραπάνω σενάρια οι μηχανές 7 έως 10 ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος των κερδών κάθε προγραμματισμού. Συγκεκριμένα, από 58.6% στο σενάριο 2 έως 70.3% στο σενάριο 3.2 των συνολικών κερδών για κάθε σενάριο προέρχονται από τις συγκεκριμένες μονάδες. Τέλος, η μονάδα 7, που είναι και η μονάδα που μπορεί να παράγει τη μεγαλύτερη ισχύ, όπως φαίνεται από τον Πίνακα 5.33, είναι η μονάδα από την οποία προκύπτουν τα περισσότερα κέρδη σε σχέση με τις υπόλοιπες, καθώς το 17.15% στο σενάριο 1 έως το 29.34% στο σενάριο 3.2 από τα συνολικά κέρδη προέρχονται από τη συγκεκριμένη μονάδα.

5.4 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ 20 ΜΟΝΑΔΩΝ ΓΙΑ 24 ΩΡΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

5.4.1 Δεδομένα συστήματος

Το τρίτο σύστημα στο οποίο μελετήθηκε το πρόβλημα της ένταξης μονάδων για μεγιστοποίηση του κέρδους (Profit-based unit commitment – PBUC) αποτελείται από 20 θερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αφορά 24 ώρες προγραμματισμού. Το σύστημα αυτό στη συνέχεια ονομάζεται σύστημα 20x24, και βασίζεται στο σύστημα 10x24 το οποίο μελετήθηκε στην προηγούμενη ενότητα. Αναλυτικότερα, το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από τις μονάδες του συστήματος 10x24 παρατεταγμένες 2 φορές σε σειρά. Η μονάδα 1, δηλαδή έχει τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά με την μονάδα 11, η μονάδα 2 με την 12, κ.ο.κ.. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος 10x24 φαίνονται στον Πίνακα 5.33.

Στον Πίνακα 5.52 παρουσιάζονται τα δεδομένα της ωριαίας πρόβλεψης ζήτησης φορτίου, D (MW), που είναι 2 φορές μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος 10x24, και η πρόβλεψη της τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, P_{gm} (\$/MWh), η οποία είναι ίδια με του συστήματος 10x24.

Πίνακας 5.52: Ωριαία πρόβλεψη ζήτησης φορτίου και πρόβλεψη τιμή πώλησης για το σύστημα 20x24

h	D (MW)	P_{gm} (\$/MWh)
1	3 034	17.412
2	2 852	17.443
3	2 736	17.505
4	2 656	20.018
5	2 634	17.502
6	2 702	20.178
7	2 796	20.576
8	2 702	20.974
9	2 634	20.735
10	2 586	23.228
11	2 476	26.234
12	2 452	27.417
13	2 406	23.228
14	2 360	20.735
15	2 340	20.974
16	2 272	17.533
17	2 226	17.502

Πίνακας 5.52: Ωριαία πρόβλεψη ζήτησης φορτίου και πρόβλεψη τιμή πώλησης για το σύστημα 20x24 (συνέχεια)

h	D (MW)	Pgm (\$/MWh)
18	2 158	20.178
19	2 068	20.974
20	2 044	23.228
21	2 020	20.576
22	2 116	23.114
23	2 248	17.455
24	3 034	17.393

5.4.2 Αποτελέσματα εφαρμογής

Το λογισμικό του Μικτού Ακέραιου μη-Γραμμικού Προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε στα παραπάνω συστήματα, εφαρμόστηκε στο πρόβλημα των 20 μονάδων και 24 ωρών προγραμματισμού. Στο συγκεκριμένο σύστημα περιέχονται όλοι οι περιορισμοί: T-up, T-down, Ramp-up και Ramp-down, χρησιμοποιείται ο εκθετικός τρόπος υπολογισμού του κόστους εκκίνησης της σχέσης 4.5 και οι παράμετροι βελτιστοποίησης $ortca=0$ και $ortcr=0$.

Στον Πίνακα 5.53, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS και στον Πίνακα 5.54 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

Πίνακας 5.54: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σύστημα 20x24 (συνέχεια)

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού							
	17	18	19	20	21	22	23	24
1	45.39	41.74	37.89	36.95	36.01	39.78	46.57	60.00
2	45.37	40.72	35.81	34.61	33.41	38.22	46.88	80.00
3	65.77	60.99	55.96	54.73	53.49	58.43	67.31	100.00
4	60.92	56.02	50.86	49.59	48.32	53.39	62.50	110.83
5	76.90	68.04	58.69	56.40	54.11	63.28	79.77	150.00
6	98.65	91.49	83.94	82.09	80.24	87.65	100.97	171.60
7	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	325.89
8	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
9	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	168.68
10	200.00	200.00	190.84	187.63	184.42	197.25	200.00	200.00
11	45.39	41.74	37.89	36.95	36.01	39.78	46.57	60.00
12	45.37	40.72	35.81	34.61	33.41	38.22	46.88	80.00
13	65.77	60.99	55.96	54.73	53.49	58.43	67.31	100.00
14	60.92	56.02	50.86	49.59	48.32	53.39	62.50	110.83
15	76.90	68.04	58.69	56.40	54.11	63.28	79.77	150.00
16	98.65	91.49	83.94	82.09	80.24	87.65	100.97	171.60
17	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	250.00	325.89
18	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
19	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	168.68
20	200.00	200.00	190.84	187.63	184.42	197.25	200.00	200.00

Για το σύστημα 20x24 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit (20x24) = \$ 1 088 936.94.

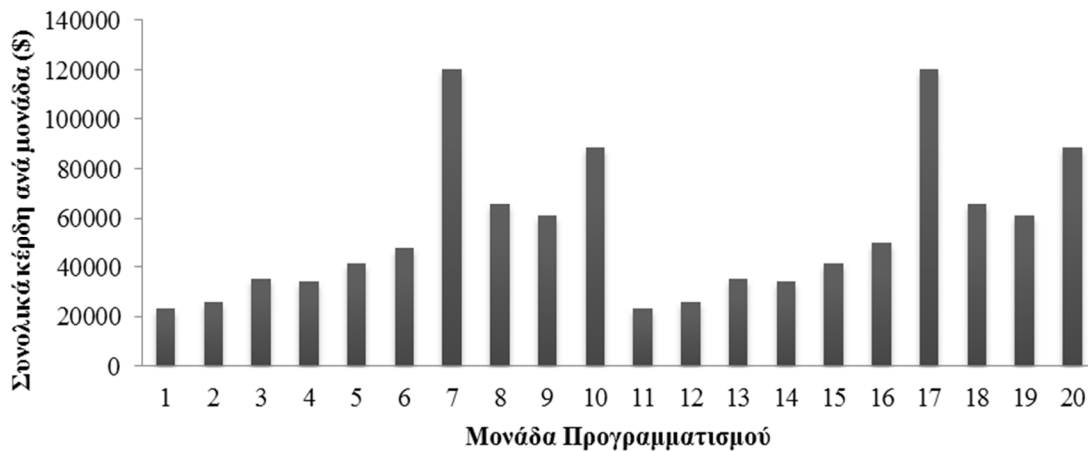
Αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, μέσω της σχέσης 5.1, υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού του συστήματος 20x24. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.55 και στο Σχήμα 5.23.

Πίνακας 5.55: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύστημα 20x24

Μονάδα	Συνολικό κέρδος ανά μονάδα (\$)
1	23 437.68
2	26 011.14
3	35 080.70
4	34 153.72
5	41 253.62
6	47 712.79
7	120 207.45
8	65 876.40
9	61 224.46
10	88 395.15

Πίνακας 5.55: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύστημα 20x24 (συνέχεια)

Μονάδα	Συνολικό κέρδος ανά μονάδα (\$)
11	23 437.68
12	26 011.14
13	35 080.70
14	34 153.72
15	41 253.62
16	49 943.53
17	120 207.45
18	65 876.40
19	61 224.46
20	88 395.15
Σύνολο (\$)	1 088 936.94

**Σχήμα 5.23:** : Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σενάριο 20x24

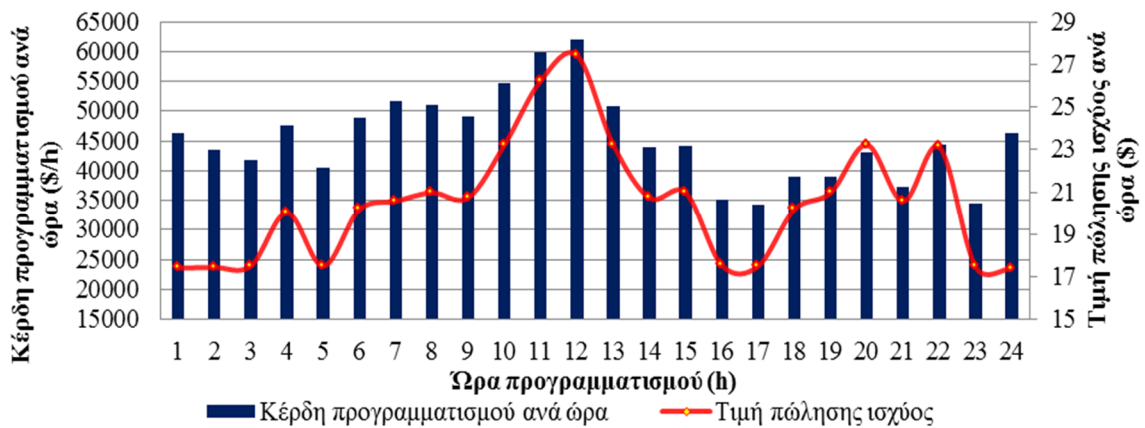
Από τον Πίνακα 5.55 φαίνεται ότι οι μονάδες με τα ίδια χαρακτηριστικά παρουσιάζουν τα ίδια κέρδη, για παράδειγμα οι μονάδες 7 και 17 συνεισφέρουν και οι δύο από \$ 120 207.45 στον προγραμματισμό του σεναρίου. Επίσης οι μονάδες 7 και 17 είναι και οι δύο που παρουσιάζουν και τα μεγαλύτερα κέρδη και συνεισφέρουν σε ποσοστό 22.08% των συνολικών κερδών στο συγκεκριμένο σενάριο. Ακόμη, παρόμοια με το σύστημα 10x24, οι μονάδες 7 έως 10 και 17 έως 20 ευθύνονται για το 61.7% των συνολικών κερδών.

Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.56 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στα προηγούμενα σεναρία, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο σχήμα 5.24 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της

ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.56: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σύστημα 20x24

h	Κέρδη ανά ώρα(\$/h)
1	46 218.23
2	43 579.01
3	41 838.49
4	47 617.22
5	40 595.18
6	48 874.66
7	51 686.23
8	51 025.45
9	49 110.90
10	54 661.18
11	59 771.15
12	62 089.96
13	50 840.75
14	43 978.43
15	44 161.61
16	35 047.09
17	34 257.84
18	38 967.93
19	38 960.48
20	43 107.04
21	37 235.06
22	44 409.26
23	34 496.11
24	46 407.71
Σύνολο (\$)	1 088 936.94



Σχήμα 5. 24: Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σενάριο 3.2

Από το Σχήμα 5.24 φαίνεται, αντίστοιχα με το προηγούμενο σύστημα, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να ‘ακολουθεί’ την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, το 54.8% των κερδών κερδίζεται κατά τις 12 πρώτες ώρες του προγραμματισμού, ποσοστό ίδιο με το αντίστοιχο του συστήματος 10x24.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 11 ώρες και 24 λεπτά για την επίλυση του σεναρίου 1 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

5.5 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑ 50 ΜΟΝΑΔΩΝ ΓΙΑ 24 ΩΡΕΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

5.5.1 Δεδομένα συστήματος

Το επόμενο σύστημα στο οποίο μελετήθηκε το πρόβλημα της ένταξης μονάδων για μεγιστοποίηση του κέρδους αποτελείται από 50 θερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αφορά 24 ώρες προγραμματισμού. Το σύστημα αυτό στη συνέχεια ονομάζεται σύστημα 50x24, και βασίζεται και αυτό στο σύστημα 10x24, το οποίο μελετήθηκε. Αναλυτικότερα, το συγκεκριμένο σύστημα αποτελείται από τις μονάδες του συστήματος 10x24 παρατεταγμένες 5 φορές σε σειρά. Η μονάδα 1, δηλαδή έχει τα ίδια τεχνικά χαρακτηριστικά με την μονάδα 11, 21, 31 και 41, κ.ο.κ.. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος 10x24 φαίνονται στον Πίνακα 5.33.

Στον Πίνακα 5.57 παρουσιάζονται τα δεδομένα της ωριαίας πρόβλεψης ζήτησης φορτίου, D (MW), που είναι 5 φορές μεγαλύτερη από αυτή του συστήματος 10x24, και η πρόβλεψη της τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, Pgm (\$/MWh), η οποία παραμένει η ίδια με του συστήματος 10x24.

Πίνακας 5.57: Ωριαία πρόβλεψη ζήτησης φορτίου και πρόβλεψη τιμή πώλησης για το σύστημα 50x24

h	D (MW)	Pgm (\$/MWh)
1	7 585	17.412
2	7 130	17.443
3	6 840	17.505
4	6 640	20.018
5	6 585	17.502
6	6 755	20.178
7	6 990	20.576
8	6 755	20.974
9	6 585	20.735
10	6 465	23.228
11	6 190	26.234
12	6 130	27.417
13	6 015	23.228
14	5 900	20.735
15	5 850	20.974
16	5 680	17.533
17	5 565	17.502
18	5 395	20.178
19	5 170	20.974

Πίνακας 5.57: Ωριαία πρόβλεψη ζήτησης φορτίου και πρόβλεψη τιμή πώλησης για το σύστημα 50x24 (συνέχεια)

h	D (MW)	Pgm (\$/MWh)
20	5 110	23.228
21	5 050	20.576
22	5 290	23.114
23	5 620	17.455
24	7 585	17.393

5.5.2 Αποτελέσματα εφαρμογής

Το λογισμικό του Μικτού Ακέραιου μη-Γραμμικού Προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε στα παραπάνω συστήματα, εφαρμόστηκε στο πρόβλημα των 50 μονάδων και 24 ωρών προγραμματισμού. Στο συγκεκριμένο σύστημα περιέχονται όλοι οι περιορισμοί: T-up, T-down, Ramp-up και Ramp-down, χρησιμοποιείται ο εκθετικός τρόπος υπολογισμού του κόστους εκκίνησης της σχέσης (4.5) και οι default παράμετροι βελτιστοποίησης του SCIP solver του GAMS.

Στον Πίνακα 5.58, αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, απεικονίζεται ο βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός που υπολογίστηκε από το GAMS και στον Πίνακα 5.59 φαίνεται, αντίστοιχα, η παραγόμενη ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα προγραμματισμού.

Πίνακας 5.58: Βέλτιστος ωριαίος προγραμματισμός για το σύστημα 50x24

Μονάδα	Ώρα προγραμματισμού (h)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
7	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0

Πίνακας 5.59: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σύστημα 50x24

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
2	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
3	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
4	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
5	143.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
6	128.00	229.53	256.68	238.36	246.59	267.17	280.00	241.98
7	276.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
9	231.11	150.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
11	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
12	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
13	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
14	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
15	0.00	143.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
16	128.00	229.54	256.70	238.34	246.59	267.16	280.00	241.98
17	465.13	441.75	496.09	459.38	475.87	517.03	520.00	466.66
18	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
19	231.11	150.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	161.00
20	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
21	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
22	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
23	93.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.00	100.00	100.00
24	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
25	143.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
26	128.00	229.53	256.70	238.35	246.57	267.15	280.00	241.98
27	465.16	441.75	496.09	459.38	276.00	0.00	0.00	0.00
28	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
29	231.11	150.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	161.00
30	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
31	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
32	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
34	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
35	0.00	143.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	128.00	256.00	241.98
37	465.17	441.74	496.08	459.36	475.87	517.00	520.00	466.64
38	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
39	231.10	150.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
41	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
42	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
43	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
44	118.00	0.00	0.00	0.00	55.00	110.00	120.00	120.00

Πίνακας 5.59: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σύστημα 50x24 (συνέχεια)

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού							
	9	10	11	12	13	14	15	16
35	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
36	248.12	245.51	208.10	248.68	254.00	250.05	261.00	0.00
37	478.93	473.72	276.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
38	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
39	161.00	234.95	201.41	237.81	242.57	239.04	256.34	286.66
40	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
41	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
42	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
43	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
44	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00	120.00
45	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
48	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
49	237.25	234.96	201.39	150.00	0.00	0.00	0.00	0.00
50	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού							
	17	18	19	20	21	22	23	24
1	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
2	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
3	100.00	93.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.00	100.00
4	120.00	118.00	0.00	0.00	0.00	55.00	110.00	120.00
5	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
6	0.00	0.00	128.00	236.44	280.00	280.00	175.97	280.00
7	0.00	0.00	271.00	455.57	520.00	520.00	334.62	520.00
8	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
9	251.85	247.08	150.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
11	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
12	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
13	100.00	93.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.00	100.00
14	120.00	118.00	0.00	0.00	0.00	55.00	110.00	120.00
15	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
18	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
19	251.85	247.07	150.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
21	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
22	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
23	100.00	100.00	93.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.00
24	118.00	0.00	0.00	0.00	55.00	110.00	113.83	120.00

Πίνακας 5.59: Ωριαίος προγραμματισμός παραγόμενης ισχύος για το σύστημα 50x24 (συνέχεια)

Μονάδα	Παραγόμενη ισχύς (MW) ανά ώρα προγραμματισμού							
	17	18	19	20	21	22	23	24
25	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	128.00	256.00
27	511.46	500.78	371.75	276.00	0.00	0.00	0.00	0.00
28	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
29	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
30	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
31	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
32	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
33	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
34	120.00	118.00	0.00	0.00	0.00	55.00	110.00	120.00
35	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	128.00
37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	271.00	520.00
38	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
39	251.85	247.07	189.25	150.00	0.00	0.00	0.00	0.00
40	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00
41	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00	60.00
42	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00	80.00
43	100.00	93.00	0.00	0.00	0.00	0.00	80.00	100.00
44	120.00	120.00	118.00	0.00	0.00	0.00	55.00	110.00
45	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
46	0.00	0.00	128.00	236.45	280.00	280.00	175.97	280.00
47	0.00	0.00	271.00	455.54	520.00	520.00	334.61	520.00
48	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00
49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	161.00	320.00
50	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00

Για το σύστημα 50x24 το βέλτιστο κέρδος υπολογίστηκε:

- Profit (50x24) = \$ 2 706 345.17.

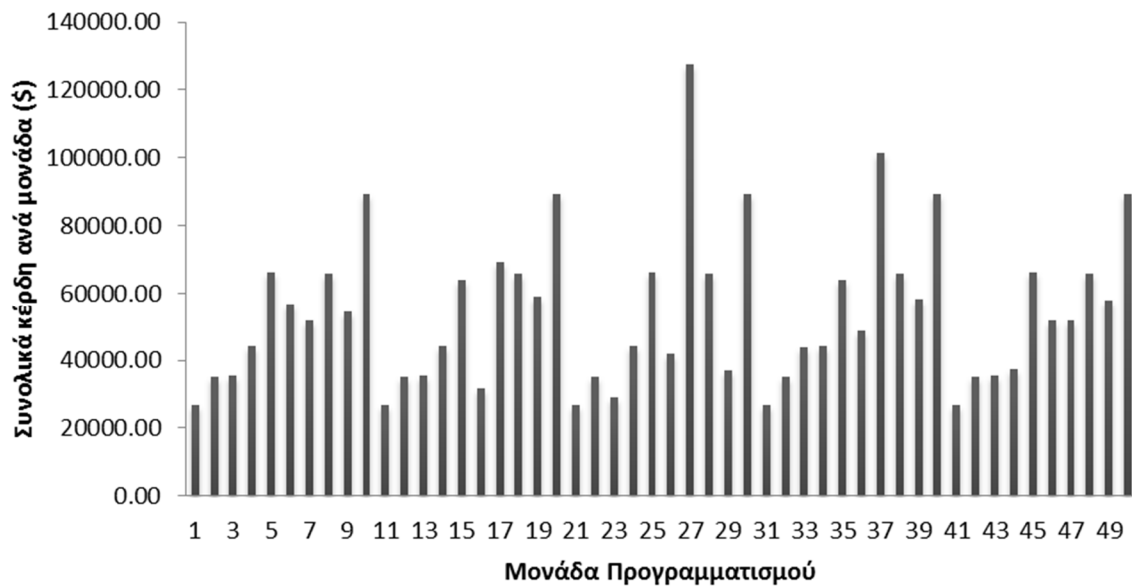
Αντίστοιχα με τα προηγούμενα σενάρια, μέσω της σχέσης (5.1), υπολογίστηκαν τα συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύνολο του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού του συστήματος 50x24. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον Πίνακα 5.60 και στο Σχήμα 5.25.

Πίνακας 5.60: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύστημα 50x24

Μονάδα	Συνολικό κέρδος ανά μονάδα (\$)
1	26 710.08
2	35 274.56
3	35 621.84
4	44 318.10
5	66 247.35
6	56 656.74
7	52 011.85
8	65 876.40
9	54 425.54
10	89 187.20
11	26 710.08
12	35 274.56
13	35 621.84
14	44 318.10
15	63 929.65
16	31 629.39
17	69 461.22
18	65 876.40
19	58 880.35
20	89 187.20
21	26 710.08
22	35 274.56
23	29 023.35
24	44 385.97
25	66 247.35
26	41 859.10
27	127 526.88
28	65 876.40
29	36 912.09
30	89 187.20
31	26 710.08
32	35 274.56
33	44 075.20
34	44 318.10
35	63 929.65
36	48 929.50
37	101 606.59
38	65 876.40

Πίνακας 5.60: Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύστημα 50x24 (συνέχεια)

Μονάδα	Συνολικό κέρδος ανά μονάδα (\$)
39	58 340.92
40	89 187.20
41	26 710.08
42	35 274.56
43	35 621.84
44	37 326.62
45	66 247.35
46	51 877.43
47	52 011.08
48	65 722.23
49	57 993.59
50	89 187.20
Σύνολο (\$)	2 706 354.17

**Σχήμα 5.25:** : Συνολικά κέρδη ανά μονάδα για το σύστημα 50x24

Από τον Πίνακα 5.60 φαίνεται πως οι μονάδες με τα ίδια χαρακτηριστικά παρουσιάζουν μία συμμετρία ως προς τα κέρδη τα οποία προκύπτουν από τον προγραμματισμό του συγκεκριμένου συστήματος. Συγκεκριμένα, οι μονάδες 1,2 και 10 παρουσιάζουν τα ίδια κέρδη με τις αντίστοιχες μονάδες που έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά με την κάθε μία από αυτές. Επίσης, οι μονάδες 3,13,43 παρουσιάζουν και οι τρεις κέρδη: \$ 35621,84. Οι μονάδες 4,14,24,34 αποδίδουν: \$ 44318.10. Ακόμη από τις μονάδες 5,25 και 45 προκύπτουν κέρδη: \$ 66247.35, ενώ οι μονάδες

15 και 35 συνεισφέρουν το ίδιο στα κέρδη κατά: \$ 63929.65. Οι μονάδες 8, 18, 28, 38 κερδίζουν όλες από \$ 65876.4 και οι μονάδες 9, 19, 39, 49 παρουσιάζουν κοντινά κέρδη: από \$ 54425.54, στη μονάδα 9, έως \$ 58880.35, στη μονάδα 19. Αντίθετα, οι μονάδες με τα ίδια χαρακτηριστικά με την μονάδα 6 παρουσιάζουν όλες διαφορετικά κέρδη, τα οποία κυμαίνονται από \$31912.39, στη μονάδα 16, έως \$ 56656.74, στη μονάδα 6. Το ίδιο συμβαίνει και με τις μονάδες που είναι όμοιες με τη μονάδα 7 όπου τα κέρδη κυμαίνονται από \$ 52011.08, στη μονάδα 47, έως \$ 127536.88, στη μονάδα 27, που είναι και η μονάδα που παρουσιάζει τα μεγαλύτερα κέρδη.

Αντίστοιχα με το σύστημα 10x24, και εδώ το μεγαλύτερο ποσοστό των κερδών παρουσιάζεται από τις μονάδες 7 έως 10, 17 έως 20, 27 έως 30, 37 έως 40 και 47 έως 50, αφού οι συγκεκριμένες μονάδες ευθύνονται για το 53.4% των συνολικών κερδών. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως το ποσοστό αυτό είναι κατά 16.9% μικρότερο από το αντίστοιχο του συστήματος 10x24 στο σενάριο 3.2.

Επίσης, από τις μονάδες 7, 17, 27 37, 47 προκύπτει το 14.9% από τα συνολικά κέρδη του συστήματος 50x24, δηλαδή κατά 14.44% μικρότερο ποσοστό από το αντίστοιχο ποσοστό στο σενάριο 3.2 του συστήματος 10 x24.

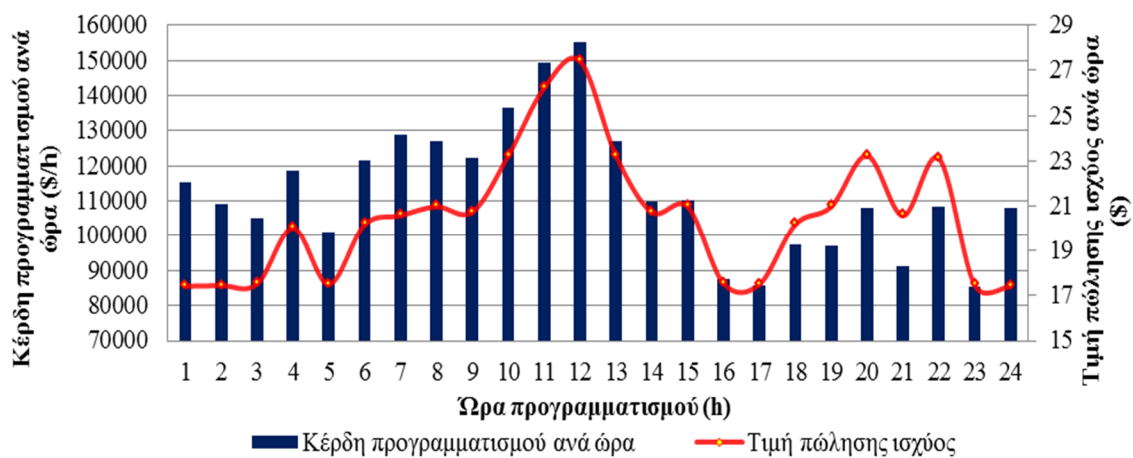
Στην συνέχεια, στον Πίνακα 5.61 φαίνονται τα συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού τα οποία υπολογίστηκαν αθροίζοντας τα κέρδη όλων των μονάδων για κάθε χρονική στιγμή, όπως και στα προηγούμενα σενάρια, από τη σχέση (5.1). Έπειτα στο σχήμα 5.24 φαίνεται το καθαρό συνολικό κέρδος για κάθε ώρα προγραμματισμού και η συνάρτηση της ωριαίας τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, από όπου προκύπτει συσχέτιση των δύο αυτών μεγεθών.

Πίνακας 5.56: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σύστημα 50x24

h	Κέρδη ανά ώρα(\$/h)
1	115 322.21
2	109 081.81
3	105 062.02
4	118 774.76
5	101 167.84
6	121 579.30
7	128 745.21
8	127 106.70
9	122 398.04
10	136 421.41
11	149 461.66
12	155 167.23
13	127 028.30
14	109 930.45
15	110 325.95
16	87 558.63
17	85 692.97

Πίνακας 5.56: Συνολικά κέρδη ανά ώρα για το σύστημα 50x24 (συνέχεια)

h	Κέρδη ανά ώρα(\$/h)
18	97 530.51
19	96 936.22
20	107 940.19
21	91 336.65
22	108 410.31
23	85 526.33
24	107 849.46
Σύνολο (\$)	2 706 354.17

**Σχήμα 5.22:** Συνολικά κέρδη ανά ώρα προγραμματισμού σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας για το σύστημα 50x24

Από το Σχήμα 5.22 φαίνεται, αντίστοιχα με το προηγούμενο σύστημα, πως το συνολικό κέρδος κάθε ώρας τείνει να 'ακολουθεί' την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Ακόμη, το 55% των κερδών κερδίζεται κατά τις 12 πρώτες ώρες του προγραμματισμού, ποσοστό κατά 0.2% μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του συστήματος 10x24.

Τέλος επισημαίνεται πως ο solver SCIP, χρειάστηκε 43 λεπτά για την επίλυση του προβλήματος στο σύστημα 50x24 στο συγκεκριμένο υπολογιστή.

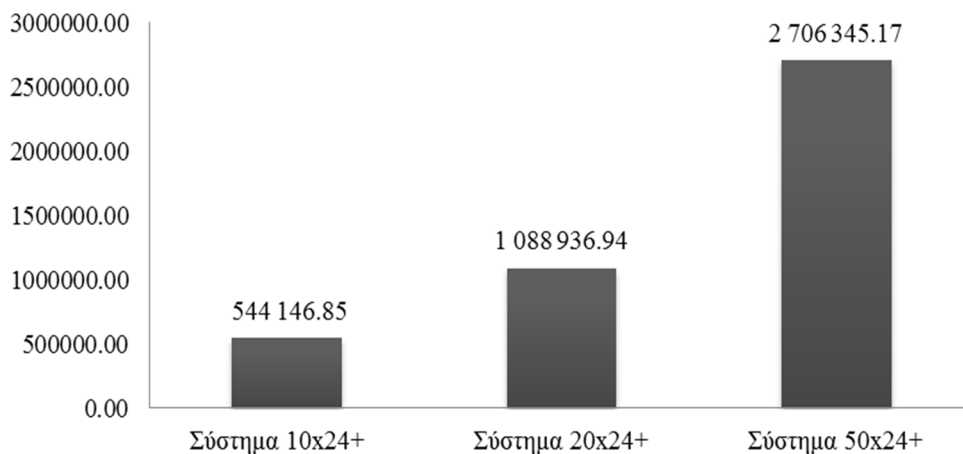
5.5.3 Σχολιασμός αποτελεσμάτων

Στις ενότητες 5.4 και 5.5 μελετήθηκε το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά για σύστημα που αποτελείται από 20 και από 50 θερμικές μονάδες παραγωγής για 24 ώρες προγραμματισμού. Στα δύο αυτά συστήματα περιέχονται όλοι οι περιορισμοί: T-up, T-down, Ramp-up και Ramp-down και χρησιμοποιείται ο εκθετικός τρόπος υπολογισμού του κόστους εκκίνησης της σχέσης 4.5. Όπως αναφέρθηκε, τα δύο αυτά συστήματα είναι συστήματα πολλαπλάσια του συστήματος 10x24 που μελετήθηκε στην ενότητα 5.3. Συγκεκριμένα, τα συστήματα 20x24 και 50x24, αντίστοιχα, έχουν τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

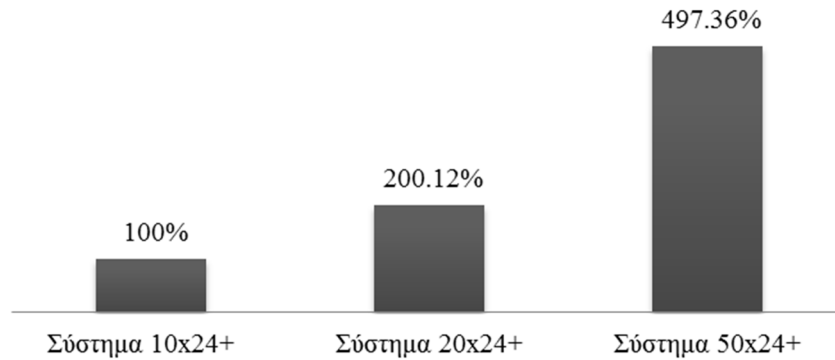
1. Αποτελούνται από 2 ή 5 φορές τις μονάδες του συστήματος 10x24 σε σειρά, έτσι ώστε οι μονάδες 1, 11, 21, 31 και 41 να είναι μονάδες με τα ίδια χαρακτηριστικά.
2. Η πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου, D (MW), για κάθε ώρα προγραμματισμού είναι διπλάσια ή πέντε φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του συστήματος 10x24.
3. Η πρόβλεψη της τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας, P_{gm} (\$/MWh), η οποία είναι ίδια με του συστήματος 10x24.

Επίσης, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τη χρήση της επιλογής του SCIP solver του GAMS: $optca=0$ και $optcr=0$ για το σύστημα 20x24 και με τις default παραμέτρους βελτιστοποίησης, όπου $optca=1^9$ και $optcr=0.1$, για το σύστημα 50x24, καθώς δεν γινόταν περαιτέρω σύγκλιση από τον SCIP.

Φαίνεται από τα αποτελέσματα πως και τα δύο συστήματα συμπεριφέρονταν ανάλογα με το σύστημα 10x24. Τα κέρδη του προγραμματισμού για τα δύο αυτά σενάρια, αλλά και του σεναρίου 3.2 του συστήματος 10x24 φαίνονται στο Σχήμα 5.23 και στο Σχήμα 5.24.



Σχήμα 5.23: Συνολικά κέρδη για κάθε σύστημα



Σχήμα 5.24: Συνολικά κέρδη κάθε συστήματος σε συνάρτηση με τα συνολικά κέρδη του συστήματος 10x24

Όπως φαίνεται από το Σχήμα 5.23 και το Σχήμα 5.24, σε σχέση με το σύστημα 10x24, παρατηρείται αύξηση στα κέρδη του προγραμματισμού κατά 100.12% στο σύστημα 20x24 και 397.36% για το σύστημα 50x24.

Στο σύστημα 20x24, όπως αναφέρθηκε, οι μονάδες με τα ίδια χαρακτηριστικά παρουσιάζουν τα ίδια κέρδη, για παράδειγμα οι μονάδες 7 και 17 συνεισφέρουν και οι δύο από \$ 120 207.45 στον προγραμματισμό του σεναρίου. Επίσης οι μονάδες 7 και 17 είναι και οι δύο που παρουσιάζουν και τα μεγαλύτερα κέρδη και συνεισφέρουν σε ποσοστό 22.08% από τα συνολικά κέρδη στο συγκεκριμένο σύστημα, δηλαδή 7.26% λιγότερο από το 29.34% των κερδών που προέρχονταν από την μονάδα 7 στο σενάριο 3.2 του συστήματος 10x24. Ακόμη, παρόμοια με το σύστημα 10x24, οι μονάδες 7 έως 10 και 17 έως 20 ευθύνονται για το 61.7% των συνολικών κερδών, ποσοστό 8.6% μικρότερο από το αντίστοιχο του συστήματος 10x24.

Αντίστοιχα, στο σύστημα 50x24, και εδώ το μεγαλύτερο ποσοστό των κερδών παρουσιάζεται από τις μονάδες 7 έως 10, 17 έως 20, 27 έως 30, 37 έως 40 και 47 έως 50, αφού οι συγκεκριμένες μονάδες ευθύνονται για το 53.4% των συνολικών κερδών. Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως το ποσοστό αυτό είναι κατά 16.9% μικρότερο από το αντίστοιχο του συστήματος 10x24 στο σενάριο 3.2. Επίσης, από τις μονάδες 7, 17, 27, 37, 47 προκύπτει το 14.9% από τα συνολικά κέρδη του συστήματος 50x24, δηλαδή κατά 14.44% μικρότερο ποσοστό από το αντίστοιχο ποσοστό στο σενάριο 3.2 του συστήματος 10 x24.

5.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [5.1] D.K. Dimitroulas, P.S. Georgilakis, “A new memetic algorithm approach for the price based unit commitment problem”, *Applied Energy*, Vol. 88, No. 12, pp. 4687-4699, December 2011.
- [5.2] S.O. Orero, M.R. Irving, “Large scale unit commitment using a hybrid genetic algorithm”, *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 19, No. 1, pp.45-55, 1997.
- [5.3] E. S. Huse, I. Wangensteen, H. H. Faanes, “Thermal Power Generation Scheduling by Simulated Competition”, *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 14, No.2, pp. 472-477, May 1999
- [5.4] BK. Pokhale, GB Shrestha, TT Lie, S. Fleten, “Profit Based Unit Commitment in Competitive Markets”, *2004 International Conference on Power System Technology-POWERCON 2004*, Singapore, November 2004.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΣΥΝΟΨΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στις μέρες μας είναι πλέον σαφές ότι η ενεργειακή βιομηχανία είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την καθημερινότητα του ανθρώπου και την κοινωνική ευημερία. Μέσα από μια πορεία εξέλιξης και συνεχούς βελτίωσης, αποτέλεσε πολύτιμο αρωγό στην προσπάθεια του ανθρώπου για τη διαμόρφωση αξιοπρεπέστερων συνθηκών διαβίωσης και την εξασφάλιση ανώτερης ποιότητας ζωής. Φαίνεται λογικό λοιπόν, να υποστεί σημαντικές δομικές αλλαγές, άρρηκτα δεμένες με τις ανάγκες και τις προσδοκίες κάθε εποχής, αλλά και να δημιουργήσει έντονες συζητήσεις γύρω από την ιδιοκτησία και χρήση των μέσων παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρά τις συνεχείς συζητήσεις γύρω από το ιδιοκτησιακό καθεστώς, επί μεγάλο χρονικό διάστημα, τόσο στη χώρα μας όσο και στο εξωτερικό, ο κρατικός παράγοντας ήταν ο ρυθμιστής της διαδικασίας παραγωγής και διανομής. Η συνεχής, όμως, μετάλλαξη των κοινωνικών δομών και η επικράτηση των νόμων της ελεύθερης αγοράς παγκοσμίως, οδήγησαν και την ενεργειακή οικονομία σε μία παρόμοια κατάσταση. Επομένως, μετά το απαραίτητο διάστημα προσαρμογής στα νέα δεδομένα, τέθηκαν οι βάσεις για την επικράτηση του ελεύθερου ανταγωνισμού και στην αγορά ενέργειας.

Σε μια εποχή, λοιπόν, που οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες έφεραν ξανά στο προσκήνιο τη βιομηχανία ηλεκτρισμού, η απελευθέρωση περιέπλεξε ακόμη περισσότερο τα δεδομένα, καθιστώντας τον οικονομικό προγραμματισμό και κυρίως το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων πολύ σημαντικό ζήτημα. Η διερεύνηση του συγκεκριμένου προβλήματος αποτέλεσε το αντικείμενο της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Προκειμένου, λοιπόν, να φανεί η σημασία του προβλήματος της ένταξης των μονάδων στα πλαίσια της απελευθερωμένων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, στο Κεφάλαιο 2 της εργασίας αναλύθηκαν οι διαδικασίες μέσα από τις οποίες η ελληνική ενεργειακή αγορά μπαίνει στη φάση της απελευθέρωσης. Πιο συγκεκριμένα, έγινε αναφορά στις κατευθυντήριες γραμμές που έθεσε η Ευρωπαϊκή Ένωση, μέσω της Οδηγίας 96/92, προκειμένου να γίνει ομαλά η μετάβαση από το μονοπώλιο στον πλήρη ανταγωνισμό. Παράλληλα, αναλύθηκαν τα βασικά σημεία του νόμου 2773/99 του Ελληνικού Κοινοβουλίου, ο οποίος εναρμόνισε την ελληνική νομοθεσία με τα ευρωπαϊκά κριτήρια και δεδομένα. Επιπλέον, έγινε σύντομη αναφορά στους νέους παράγοντες

που δραστηριοποιούνται στα πλαίσια της απελευθερωμένης αγοράς, καθώς και στις υποχρεώσεις και τις αρμοδιότητες αυτών. Επιπλέον, βαρύτητα δόθηκε στην περιγραφή της διαδικασίας του ημερήσιου προγραμματισμού, στα πλαίσια της οποίας εντάσσεται και το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων.

Μετά την παραπάνω ανάλυση, ακολούθησε μία γενική περιγραφή του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής με βάση το κέρδος για εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που λειτουργούν σε ανταγωνιστικό περιβάλλον, μέσα από την οποία έγινε φανερός ο βαθμός δυσκολίας που παρουσιάζει η επίλυσή του.

Μετά την παραπάνω γενική περιγραφή, ακολούθησε η μαθηματική διατύπωση της μοντελοποίησης, που έγινε στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά, χρησιμοποιώντας το λογισμικό βελτιστοποίησης του GAMS. Η δομή ενός μοντέλου του GAMS, τα χαρακτηριστικά του solver SCIP του GAMS που χρησιμοποιήθηκε καθώς και όλες οι λεπτομέρειες σχετικά με τη μοντελοποίηση που έγινε προκειμένου να επιλυθεί το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων περιγράφονται στο Κεφάλαιο 4.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 της εργασίας παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα της εφαρμογής του παραπάνω αλγορίθμου σε διαφορετικά συστήματα. Παρουσιάστηκαν εφαρμογές της μεθόδου σε ηλεκτρικές επιχειρήσεις με τέσσερις μονάδες παραγωγής για οχτώ ώρες προγραμματισμού, και με δέκα, με είκοσι και με πενήντα μονάδες παραγωγής για ημερήσιο προγραμματισμό (24 ώρες). Παράλληλα, έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών σεναρίων στα δύο μικρότερα συστήματα, προκειμένου να σημειωθεί η επιρροή που έχουν οι διαφορετικοί περιορισμοί του κάθε συστήματος στον προγραμματισμό των μονάδων παραγωγής του. Τα κυριότερα συμπεράσματα από τις εφαρμογές αυτές είναι:

- α) οι μονάδες παράγουν το μέγιστο κέρδος τις ώρες όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή και οι μονάδες παράγουν τη μέγιστη ισχύ τους, καθιστώντας την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας το σημαντικότερο παράγοντα επιρροής του προγραμματισμού της Ένταξης των Μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά,
- β) οι μονάδες παραγωγής δεν λειτουργούν ή μειώνουν κατά το μέγιστο την παραγωγή τους τις ώρες όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή,
- γ) όσο αυξάνει το πλήθος των περιορισμών λειτουργίας των μονάδων παραγωγής, τόσο μειώνονται τα κέρδη τους,
- δ) η ένταξη μίας μονάδας παραγωγής μπορεί να έχει ζημία κατά την ώρα ένταξης, που, όμως, μπορεί να αντισταθμιστεί γρήγορα τις επόμενες ώρες και
- ε) για δοσμένες μονάδες παραγωγής και συνθήκες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας οι μονάδες παραγωγής με τα χαμηλότερα κόστη λειτουργίας και με υψηλή ικανότητα παραγωγής δίνουν τα μεγαλύτερα συνολικά κέρδη.

Το βασικό συμπέρασμα, που προκύπτει για τη χρήση του solver SCIP του GAMS στην επίλυση του προβλήματος της Ένταξης των Μονάδων στην απελευθερωμένη αγορά, είναι ότι για μικρά συστήματα, όπως είναι το σύστημα των δέκα και ακόμα και των είκοσι μονάδων

παραγωγής, ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρέχει καλές λύσεις σε αποδεκτό υπολογιστικό χρόνο. Ως πρόγραμμα γενικής χρήσης, το GAMS μπορεί να λειτουργήσει με απλά συστήματα, παρέχοντας, παράλληλα, σημαντική ευχρηστία, καθώς όλα τα δεδομένα των μονάδων εισάγονται μέσω του προγράμματος του Excel, αλλά και καθώς στον κώδικα του GAMS γίνονται εύκολα μικρές μετατροπές. Ωστόσο, για μεγαλύτερα συστήματα όπου η εφαρμογή του αλγορίθμου έχει σημαντικές υπολογιστικές απαιτήσεις, καθίσταται μη πρακτική τη χρήση του.