ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ηλεκτρονικής

ΕΝΤΑΞΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΣΗ ΤΟΥ ΚΕΡΔΟΥΣ ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΚΑΡΑΜΠΑΤΖΑΚΗ ΔΑΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ

ΓΕΩΡΓΙΛΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΝΙΚΟΛΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ, Λέκτορας

ΔΟΥΛΑΜΗΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής

ΓΕΩΡΓΙΛΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής

ΧΑΝΙΑ

ΑΠΡΙΛΙΟΣ 2008

Στον πατέρα μου Παπάγο
και την μητέρα μου Ελένη

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική μου εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης. Η εκπόνησή της έγινε υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Γεωργιλάκη Παύλου.

Στο σημείο αυτό νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους που με βοήθησαν για να ολοκληρώσω με επιτυχία την Διπλωματική μου εργασία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου κ. Γεωργιλάκη Παύλο, ο οποίος με τις καταλυτικές του συμβουλές και παρεμβάσεις, μου έλυνε οποιαδήποτε απορία εμφανιζόταν. Η άριστη επικοινωνία και το άριστο κλίμα συνεργασίας που δημιουργούσε σε κάθε μας συνάντηση μου έδινε την ψυχική ώθηση να συνεχίσω αγνοώντας τις δυσκολίες που θα εμφανίζονταν στο δρόμο μου, γιατί γνώριζα πως θα με βοηθούσε δίνοντας μου καίριες απαντήσεις.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον κ. Νικολό Ιωάννη και τον κ. Δουλάμη Αναστάσιο για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν όλα τα χρόνια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την εμπιστοσύνη που μου δείχνουν όλα αυτά τα χρόνια και με στηρίζουν σε κάθε μου προσπάθεια δίνοντας μου θάρρος και κουράγιο να συνεχίσω. Επίσης, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους ΄΄μέντορες΄΄ μου, τα δύο μεγαλύτερα μου αδέρφια, Δημήτρη και Φώτη, που με αντέχουν και με στηρίζουν κάθε στιγμή, χωρίς αυτούς πολλά πράγματα θα ήταν διαφορετικά τώρα.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου που ήταν πάντα κοντά μου και στα εύκολα και στα δύσκολα. Ιδιαίτερα, τον φίλο και συμφοιτητή μου Ανδρεάδη Παύλο, ή ΄΄Παυλάρα΄΄, για την άριστη συνεργασία που είχαμε κατά την συγγραφή του $2^{ου}$ Κεφαλαίου της Διπλωματικής και τους πειραματισμούς μας σε κάτι νέο για μας, το GAMS. Ακόμη, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Ν. Σπήλιο, Κ. Κώστα, Μ. Μάρκο και Π. Βαγγέλη, που εδώ και χρόνια αντέχουν την γκρίνια μου και με έχουν ακόμη φίλο. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κοπέλα μου Θ. Ιφιγένεια, η οποία χωρίς να το καταλάβει βοήθησε αρκετά για την ολοκλήρωση της Διπλωματικής μου εργασίας και με στήριζε συνέχεια.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη μεγιστοποίηση του κέρδους σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας με το λογισμικό GAMS. Το πρόβλημα της ένταξης μονάδων με βάση το κέρδος διατυπώνεται ως εξής: για μία εταιρία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με N μονάδες παραγωγής, και για δοσμένη χρονοσειρά τιμών πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτείται να προσδιοριστούν οι χρόνοι εκκίνησης και σταματήματος και η ισχύς εξόδου όλων των μονάδων παραγωγής κάθε χρονική στιγμή t στη διάρκεια μίας χρονικής περιόδου προγραμματισμού T, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το συνολικό κέρδος της ηλεκτρικής εταιρίας, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των μονάδων. Αυτό είναι ένα δύσκολο πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού, μη γραμμικό και μεγάλης κλίμακας. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού αναπτύσσεται κώδικας στο λογισμικό GAMS, το οποίο είναι λογισμικό για επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Παρουσιάζονται και σχολιάζονται αποτελέσματα από τέσσερα διαφορετικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με διαφορετικό πλήθος μονάδων παραγωγής και για διαφορετικές ώρες προγραμματισμού. Τέλος, δίνονται προτάσεις για πιθανές βελτιώσεις και επεκτάσεις για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος με το λογισμικό GAMS.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ένταξη Μονάδων, Μεγιστοποίηση Κέρδους, Λογισμικό GAMS, Προγραμματισμός Παραγωγής, Λειτουργία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας σε Ανταγωνιστικό Περιβάλλον, Αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας.

ABSTRACT

This thesis presents the solution of the profit maximization unit commitment problem in a competitive electricity market environment using GAMS software. The profit maximization unit commitment problem can be stated as follows: for an electric utility with N generating units, and given a certain electricity price profile, it is required to determine the start-up / shut-down times and the power output levels of all the generating units at each time interval t over a specified scheduling period T, so that the electric utility's total profit is maximized, subject to the unit constraints. This is a large-scale non-linear mixed-integer optimization problem. General Algebraic Modeling System (GAMS) is a software tool dedicated to the solution of optimization problems. In this thesis, GAMS is used for the solution of the profit maximization unit commitment problem. Results for four case studies are presented and discussed. Finally, suggestions for possible enhancements and further work on this topic are given.

KEYWORDS

Unit Commitment, Profit Maximization, GAMS Software, Generation Scheduling, Power System Operation in a Competitive Environment, Electricity Markets.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Κάθε ανθρώπινη δραστηριότητα χαρακτηρίζεται από περιοδικότητα. Τα περισσότερα από τα συστήματα παροχής υπηρεσιών, όπως για παράδειγμα τα συστήματα μεταφορών, τα συστήματα επικοινωνιών, καθώς και τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας προσπαθούν να προσαρμόζονται στην περιοδικότητα αυτή. Ειδικότερα στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η ζήτηση της παρουσιάζει προβλέψιμες ημερήσιες και εβδομαδιαίες κυκλικές μεταβολές ακολουθώντας τον κύκλο της ανθρώπινης δραστηριότητας. Αυτό επιβάλλει την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας, τη στιγμή της ζήτησης. Επειδή η βραχυπρόθεσμη ελαστικότητα της ζήτησης σε μεταβολές της τιμής είναι εξαιρετικά μικρή, η ισορροπία προσφοράς και ζήτησης απαιτεί μονάδες παραγωγής ικανές να ακολουθούν τις μεγάλες και ραγδαίες αλλαγές στην κατανάλωση, που λαμβάνουν χώρα σε μια μέρα, κατά την διάρκεια της οποίας δε θα παράγουν όλες οι μονάδες παραγωγής. Όταν η ζήτηση είναι χαμηλή, μόνο οι πιο αποδοτικές μονάδες είναι πιθανόν να είναι ανταγωνιστικές και οι υπόλοιπες μονάδες θα είναι προσωρινά εκτός λειτουργίας. Οι λιγότερο αποδοτικές μονάδες χρησιμοποιούνται μόνο για την εξυπηρέτηση του φορτίου κατά τις ώρες αιχμής. [1.1-1.2].

Η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά το πρόβλημα της βέλτιστης ένταξης θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (unit commitment) με απώτερο στόχο την μεγιστοποίηση του κέρδους. Ως ένταξη μίας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ο συγχρονισμός της και η σύνδεσή της με το δίκτυο έτσι ώστε να μπορεί να δώσει ισχύ στο σύστημα.

Η μοντελοποίηση και η επίλυση του μαθηματικού προβλήματος της ένταξης μονάδων για τη μεγιστοποίηση του κέρδους, γίνεται με την βοήθεια ενός εκ των πιο γνωστών και ευέλικτων λογισμικών που αναπτύσσουν και βελτιστοποιούν μαθηματικά μοντέλα, το GAMS (General Algebraic Modeling System).

1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ως σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας στις περιοχές κατανάλωσης, τις οποίες εξυπηρετεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [1.2].

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να έχει μελετηθεί και να λειτουργεί σωστά, ενώ ταυτόχρονα θα πρέπει να ικανοποιεί τις ακόλουθες απαιτήσεις:

1. Θα πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε όλες τις περιοχές κατανάλωσης που εξυπηρετεί.
2. Θα πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί τη διαρκώς μεταβαλλόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.
3. Θα πρέπει να παρέχει ποιοτική ηλεκτρική ενέργεια, το οποίο σημαίνει ότι θα πρέπει να διασφαλίζει σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.
4. Θα πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια με το ελάχιστο δυνατό οικονομικό κόστος και τις ελάχιστες επιπτώσεις στο περιβάλλον.

Η δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας απαρτίζεται από τα ακόλουθα τέσσερα κύρια μέρη:

1. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
2. Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας.
3. Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας.
4. Φορτία.

Η **παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας** είναι η διαδικασία μετατροπής μιας μορφής πρωτογενούς ενέργειας σε ηλεκτρική. Το σύστημα **μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας** μεταφέρει μεγάλες ποσότητες ισχύος από τους σταθμούς παραγωγής προς τα σημεία κατανάλωσης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το σύστημα **διανομής ηλεκτρικής ενέργειας** είναι υπεύθυνο για τη διανομή της στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Τέλος, τα **φορτία** των συστημάτων ταξινομούνται σε βιομηχανικά, εμπορικά και οικιακά [1.2].

1.2 ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Στις απελευθερωμένες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, η ένταξη μονάδων που χρησιμοποιείται από κάθε εταιρία παραγωγής αφορά στη βελτιστοποίηση των μέσων παραγωγής προκειμένου να μεγιστοποιηθεί το κέρδος. Στο νέο και ανταγωνιστικό αυτό περιβάλλον, το σήμα που επιβάλλει την ένταξη/κράτηση μίας μονάδας είναι η τιμή, που περιλαμβάνει την τιμή αγοράς του καυσίμου και την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ένταξη μονάδων έχει διαφορετικό στόχο από την παραδοσιακή ένταξη μονάδων με βάση το κόστος και ονομάζεται ένταξη μονάδων με βάση το κέρδος (ΕΜΒΚ). Η ΕΜΒΚ είναι ένα μεγάλης κλίμακας, μη κυρτό, μη γραμμικό, μικτό ακέραιο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Επειδή οι αγορές ηλεκτρικής ενέργειας αλλάζουν ραγδαία, υπάρχει έντονο ενδιαφέρον για το πως επιλύονται τα νέα μοντέλα ένταξης μονάδων και τι σκοπούς εξυπηρετούν [1.2].

Στόχος του ανταγωνισμού στην βιομηχανία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι να αυξηθεί η αποδοτικότητα της παραγωγής και της διανομής της, παρέχοντας την καλύτερη επιλογή στους συμμετέχοντες της αγοράς, εξασφαλίζοντας παράλληλα την ασφάλεια και την αξιοπιστία στην παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Η βασική ιδέα του παραπάνω στόχου είναι αφενός ο εμπορικός διαχωρισμός της ηλεκτρικής ενέργειας, κατά την διαδικασία μετατροπής της από προϊόν σε υπηρεσία, με τελικό στόχο να προστατευθεί το συμφέρον των καταναλωτών και αφετέρου η επίτευξη των οικονομικών στόχων που έχει θέσει η επιχείρηση [1.3].

Η γενική δομή μιας ανταγωνιστικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται από την διάθεση της ηλεκτρικής ενέργειας μέσω μιας κεντρικής αγοράς ή διμερών συμβάσεων, ή και των δύο. Μια ανταγωνιστική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας δεν πρέπει να είναι μόνο αποδοτική, δηλαδή να λειτουργεί πολύ κοντά στο βέλτιστο. Επίσης, θα πρέπει να κατευθύνεται από την τιμή πώλησης, απαιτώντας έτσι την ύπαρξη ενός δίκαιου, διαφανούς και ανοικτού στην τιμή μηχανισμού αγοράς. Οι παράγοντες που ευνοούν την αποδοτικότητα της αγοράς, συγκαταλέγοντας τον αριθμό των συμμετεχόντων και των μηχανισμών ανταλλαγής πληροφοριών σε μια αποδοτική αγορά, είναι η ύπαρξη επαρκούς-ικανοποιητικής πληροφόρησης σε ό,τι αφορά την τιμή πώλησης, την προσφορά και την ζήτηση προς όλους τους συμμετέχοντες [1.4].

Αν και η ιδέα πίσω από μία ιδανική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας με τέλειο ανταγωνισμό είναι βασισμένη σε σχετικά απλές αρχές, η εφαρμογή της αποδείχτηκε πως είναι πολύ πιο σύνθετη. Τα πρακτικά προβλήματα προέρχονται:

- από την επαναλαμβανόμενη προσφορά υπό τους ίδιους όρους,
- από την έλλειψη διαφάνειας,
- από την έλλειψη συμμετοχής από την πλευρά των καταναλωτών,
- από τις κινήσεις αισχροκέρδειας των επιχειρήσεων παραγωγής και
- από την αδυναμία της αγοράς στην εκπλήρωση των μακροπρόθεσμων συμβάσεων.

Ένας από τους στόχους της αναθεώρησης της λειτουργίας της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι η προώθηση του ανταγωνισμού, αυξάνοντας αφενός την αποδοτικότητά της και αφετέρου παρέχοντας μεγαλύτερη επιλογή στους συμμετέχοντες της αγοράς, διατηρώντας τη λειτουργία ενός ασφαλούς και αξιόπιστου συστήματος. Μεταξύ των αρχών των νέων ρυθμίσεων είναι:

- η εγκατάλειψη των τωρινών μηχανισμών συντονισμένου σχεδιασμού και τιμολόγησης,
- η ελαχιστοποίηση της κεντρικού ελέγχου και
- η αύξηση της συμμετοχής από την πλευρά των καταναλωτών.

Τα παραπάνω παρέχουν τη δυνατότητα στους συμμετέχοντες της αγοράς να διαπραγματευτούν ελεύθερα τις πωλήσεις και τις αγορές τους, βασισμένοι στο επίπεδο κινδύνου που είναι πρόθυμοι να δεχτούν.

Οι εμπορικές συναλλαγές θα μπορούσαν να τακτοποιηθούν για μερικά έτη εκ των προτέρων μέσω της χρήσης συμβολαίων μελλοντικής εκπλήρωσης, ή μέσω βραχυπρόθεσμων διακανονισμών. Η συμμετοχή στην αγορά θα ήταν εθελοντική, με τις ενδιαφερόμενες πλευρές να διαπραγματεύονται τους όρους μεταξύ τους. Τέλος, η τακτοποίηση των εμπορικών συναλλαγών θα αφηνόταν στους συμμετέχοντες της αγοράς, ενώ η ισορροπία της προσφοράς και της ζήτησης θα επιτυγχανόταν μέσω ενός ξεχωριστού μηχανισμού εξισορρόπησης [1.5].

1.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της ένταξης θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την μεγιστοποίηση του κέρδους. Στα κεφάλαια που ακολουθούν περιγράφεται το λογισμικό στο οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη του κώδικα για την επίλυση του προβλήματος που προαναφέρθηκε.

Επιπλέον, γίνεται πλήρης παρουσίαση του μαθηματικού μοντέλου που διέπει το πρόβλημα της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την μεγιστοποίηση του κέρδους. Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένες περιπτώσεις που μελετήθηκαν καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων από αυτές.

1.4 ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Τα κεφάλαια της εργασίας έχουν την ακόλουθη δομή:

Στο **Κεφάλαιο 1,** γίνεται μία εισαγωγή του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και δίνεται ο σκοπός της εργασίας.

Στο **Κεφάλαιο 2**, περιγράφεται αναλυτικά η δομή, τα εργαλεία και η λειτουργία του λογισμικού GAMS, στο οποίο πραγματοποιήθηκε η ανάπτυξη του κώδικα.

Στο **Κεφάλαιο 3**, περιγράφεται αναλυτικά το μαθηματικό μοντέλο που διέπει το πρόβλημα της ένταξης μονάδων παραγωγής, αναλύοντας όλες τις συναρτήσεις, τους περιορισμούς και την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Επίσης, γίνεται μία αναφορά των μαθηματικών και τεχνητών μεθόδων επίλυσης του προβλήματος.

Στο **Κεφάλαιο 4**, παρουσιάζονται όλες οι περιπτώσεις του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την μεγιστοποίηση του κέρδους που μελετήθηκαν, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα αυτών.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 5,** παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τα προηγούμενα κεφαλαία και δίνονται ορισμένες μελλοντικές επεκτάσεις του προβλήματος.

1.5 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[1.1] Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg "Power Generation, Operation & Control," John Wiley & Sons, New York, 1984.

[1.2] Π. Γεωργιλάκης, "ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ - ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ," Χανιά, Σεπτέμβριος 2006.

[1.3] Hunt, S. and Shuttleworth, G. "Competition and Choice in Electricity," John Wiley & Sons, West Sussex, England, 1996.

[1.4] Calvin J. S. Chan, "Development of a profit maximisation unit commitment program," UMIST, September 2000.

[1.5] OFFER – Office of Electricity Regulation, "Review of Electricity Trading Arrangements: Proposals," July 1998.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το GAMS (General Algebraic Modeling System) είναι ένα περιβάλλον Η/Υ για τον καθορισμό, την ανάλυση και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Είναι μια λιτή και ισχυρή γλώσσα που, αν και απαιτεί κάποιο διάστημα εξοικείωσης, μπορεί να αποτελέσει ένα ευέλικτο και δυνατό εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού μόλις κατανοηθούν οι δομές της [2.1].

Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζει το GAMS είναι:

1. Η ικανότητα επίλυσης προβλημάτων διαφόρων μεγεθών γράφοντας το ίδιο μήκος κώδικα. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στη δυνατότητα γραφής ενός πλήθους παρόμοιων περιορισμών με μία εντολή, χρησιμοποιώντας μία συμπαγή και αποδοτική μορφή δείκτη.

2. Ο διαχωρισμός της μοντελοποίησης του προβλήματος από την τεχνική επίλυσής του. Ο χρήστης καταγράφει το μοντέλο και το αναθέτει σε κάποιον από τους διαθέσιμους επιλυτές (solvers). Εστιάζεται έτσι, στην διαμόρφωση του μοντέλου του και όχι στις τεχνικές λεπτομέρειες κατασκευής του αλγορίθμου επίλυσης.

3. Το GAMS σχεδόν μιμείται τη μαθηματική περιγραφή ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο κώδικας του GAMS καθίσταται έτσι σχεδόν αυτεξήγητος για αναγνώστες με κάποιο υπόβαθρο στη βελτιστοποίηση.

4. Το GAMS επίσης παρέχει μηχανισμούς για την επίλυση συλλογών δομημένων προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως αυτά που προκύπτουν από τεχνικές διάσπασης.

2.2 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΛΩΣΣΑΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ GAMS

Ένα αρχείο του GAMS δομείται σε εντολές, η κάθε μία από τις οποίες αντιμετωπίζει διαφορετικό κομμάτι του μαθηματικού προβλήματος. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται οι βασικές εντολές του GAMS. Πριν τη χρησιμοποίηση του GAMS, κρίνεται απαραίτητο να δειχθούν ορισμένοι από τους βασικούς του κανόνες. Παρακάτω παρατίθενται οι σημαντικότεροι:

1. Στο GAMS, τα μικρά και τα κεφαλαία γράμματα είναι ισοδύναμα, οπότε ο χρήστης μπορεί τα επιλέξει τη μορφή της αρεσκείας του.

2. Κάθε εντολή πρέπει υποχρεωτικά να τερματίζει με το σύμβολο΄΄;΄΄.

3. Οι εντολές (commands) μπορούν να χρησιμοποιηθούν με οποιαδήποτε σειρά, αρκεί κάθε στοιχείο τους να έχει οριστεί πριν χρησιμοποιηθεί.

4. Το GAMS, όπως και κάθε γλώσσα προγραμματισμού, διαθέτει μια λίστα λέξεων που έχουν δεσμευθεί για συγκεκριμένες λειτουργίες και πρέπει να χρησιμοποιούνται με σύνεση.

5. Υπάρχει μεγάλη ευελιξία στο τρόπο που παρουσιάζονται τυπογραφικά οι εντολές. Πολλαπλές γραμμές ανά εντολή, κενές γραμμές και πολλαπλές εντολές ανά γραμμή επιτρέπονται. Ο αριθμός των κενών είναι αδιάφορος στον μεταγλωττιστή του GAMS.

6. Ορισμένες εντολές αναγνωρίζονται από τα αρχικά τους γράμματα ανεξαρτήτως της προσθήκης ή μη ενός ΄΄s΄΄ στο τέλος. Για παράδειγμα το `Parameter` και `Parameters` είναι το ίδιο, διότι το GAMS δεν αναγνωρίζει καμία διαφορά μεταξύ τους.

7. Πολλαπλές δηλώσεις ή αναθέσεις στοιχείων ίδιου τύπου μπορούν να γίνουν με μία εντολή χωρίς να χρειάζεται επανάληψή της.

8. Το GAMS δίνει τη δυνατότητα τεκμηρίωσης του κώδικα, μια δυνατότητα που ο χρήστης θα πρέπει να εκμεταλλευτεί. Κάθε γραμμή που ξεκινάει με αστερίσκο, στην πρώτη στήλη, αγνοείται από τον μεταγλωττιστή και αναγνωρίζεται ως σχόλιο. Ορισμένες εντολές δήλωσης δίνουν τη δυνατότητα εισαγωγής επεξηγηματικών σχολίων.

9. Οι περισσότερες εντολές στο GAMS χρησιμοποιούνται για δηλώσεις στοιχείων και προαιρετικά για ανάθεση συγκεκριμένων τιμών σε αυτά. Ως δήλωση ενός στοιχείου νοείται η μετατροπή του σε στοιχείο έγκυρο για χρήση από το GAMS. Τα στοιχεία δηλώνονται με την απόδοση σε αυτά ενός ονόματος χρησιμοποιώντας κάποια από τις εντολές δήλωσης. Στη περίπτωση των εξισώσεων η δήλωση και η ανάθεση πρέπει να γίνει με ξεχωριστές εντολές. Ο περιορισμός αυτός δεν ισχύει για τα υπόλοιπα στοιχεία του κώδικα.

10. Τα αποδεκτά ονόματα στοιχείων στο GAMS ξεκινούν με γράμμα και ακολουθούνται από έως εννέα άλλα γράμματα ή ψηφία.

Εντολή	**Λειτουργία**
`Set(s)`	Δήλωση δεικτών και των πιθανών τιμών τους
`Scalar(s)`	Δήλωση ποσοτήτων/μεγεθών και ανάθεση τιμών σε αυτά
`Parameter(s)`	Δήλωση διανυσμάτων και ανάθεση τιμών σε αυτά
`Table(s)`	Δήλωση πινάκων και ανάθεση τιμών στα στοιχεία τους
`Variable(s)`	Δήλωση μεταβλητών
`Equation(s)`	Δήλωση αντικειμενικής συνάρτησης προς βελτιστοποίηση και των περιορισμών
`Model`	Δήλωση του μοντέλου και καθορισμός των εξισώσεων που θα περιλαμβάνει
`Solve`	Κλήση του solver για επίλυση του προβλήματος
`Display`	Εμφάνιση στοιχείων στο αρχείο εξόδου

Πίνακας 2.1: Ορισμένες εντολές του GAMS.

2.2.1 Η εντολή Sets

Οι δεσμευμένες λέξεις `Set` και `Sets` χρησιμοποιούνται για τη δήλωση δεικτών και το εύρος τιμών τους (πράγμα που εξηγεί και την ονομασία της εντολής). Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα δήλωσης δύο συνόλων με μία εντολή `sets`:

```
Sets
        i  sxolio a     /a1, a2, a3, a4/
        j  sxolio b     /beta_1 * beta_3/;
```

Στο παράδειγμα αυτό ορίζονται οι δείκτες i και j. Οι λέξεις μετά τα ονόματα των δεικτών (sxolio a, sxolio b) είναι σχόλια και αγνοούνται από τον μεταγλωττιστή. Η ανάθεση εύρους γίνεται ανάμεσα στα δύο σύμβολα ´´/´´. Το σύμβολο ´´*´´ επιτρέπει τον ορισμό του συνόλου κατά ένα συμπαγή τρόπο. Έτσι στο παράδειγμα μας το `/beta_1 * beta_3/` είναι ισοδύναμο του `/beta_1, beta_2, beta_3/`. Το GAMS μεταχειρίζεται τις τιμές των συνόλων σαν αλφαριθμητικά. Η εντολή λήγει με τη χρήση του ´´;´´.

Σύνολα σαν τα παραπάνω είναι γνωστά ως **στατικά σύνολα** και τα στοιχεία τους δεν αλλάζουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Είναι δυνατός ο ορισμός **δυναμικών συνόλων** που θα περιέχουν κάποια από τα στοιχεία ενός δεδομένου στατικού συνόλου. Τα στοιχεία αυτών των συνόλων μπορούν να αλλάξουν κατά την εκτέλεση του προγράμματος. Τα δυναμικά σύνολα ορίζονται πάντα ως υποσύνολα ήδη ορισμένων συνόλων. Επιπλέον μπορούν να ορισθούν πολυδιάστατα σύνολα για την αντιστοίχηση στοιχείων που ανήκουν σε διαφορετικά σύνολα. Για παράδειγμα, για τη μοντελοποίηση ενός δικτύου με κόμβους K1 έως K4 μπορεί να ορισθεί ένα δυσδιάστατο σύνολο που να περιλαμβάνει όλες τις έγκυρες μεταβάσεις:

```
Sets
     K              Set komvon     / K1 * K4/
     Pairs(K, K)    Antistoixisi   /K1.K2,K1.K3,K2.K4,K3.K4/;
```

Αρκετές φορές παρουσιάζεται η ανάγκη ταυτόχρονης αναφοράς σε διαφορετικά στοιχεία του ίδιου συνόλου. Για το λόγο αυτό παρέχεται η εντολή `alias` η οποία ορίζει ένα εναλλακτικό όνομα για κάποιο ήδη ορισμένο σύνολο.

```
Alias(K,KP);
```

Το GAMS παρέχει έξι τελεστές για το χειρισμό διατεταγμένων συνόλων: `card`, `ord`, `+`, `-`, `++`, `--`. Ως διατεταγμένα ορίζονται μονοδιάστατα σύνολα που αποτελούνται από μια διατεταγμένη ακολουθία στοιχείων. Τα στοιχεία ενός διατεταγμένου συνόλου είτε δεν ανήκουν σε κάποιο προηγουμένως ορισμένο σύνολο είτε ανήκουν αλλά διατηρούν ανέπαφη τη σχετική θέση τους.

Η διαδικασία `card` επιστρέφει τον αριθμό στοιχείων που ανήκουν σε ένα σύνολο. Η διαδικασία `ord` επιστρέφει τη θέση του στοιχείου σε ένα σύνολο. Οι διαδικασίες ´´όνομα στοιχείου´´ +1 και ´´όνομα στοιχείου´´ −1 αναφέρονται στο αμέσως επόμενο και προηγούμενο στοιχείο του διατεταγμένου συνόλου αντίστοιχα. Αν αντί για τους τελεστές +, − χρησιμοποιήσουμε τους ++, −− μπορούμε να μεταχειριστούμε το διατεταγμένο σύνολο σαν μια κυκλική λίστα όπου το τελευταίο στοιχείο προηγείται του πρώτου.

2.2.2 Η εντολή Scalars

Με την εντολή `Scalar` ή `Scalars` ορίζονται και ανατίθενται τιμές σε παραμέτρους μηδενικών διαστάσεων. Παράμετροι δηλαδή που δεν εξαρτώνται από κανένα δείκτη. Μια εντολή έχει την παρακάτω μορφή:

```
Scalar όνομα_παραμέτρου   κείμενο   /τιμή_παραμέτρου/;
```

Το όνομα της παραμέτρου ακολουθείται από προαιρετικά σχόλια. Η τιμή της παραμέτρου δίνεται εντός των συμβόλων ΄΄/΄΄ εντολή τερματίζει με ΄΄;΄΄.

2.2.3 Οι εντολές Parameters και Tables

Η δεσμευμένη λέξη `Parameter` ή `Parameters` χρησιμοποιείται για τον ορισμό διανυσμάτων δεδομένων. Η εντολή επιτρέπει την προαιρετική ανάθεση τιμών σε κάθε στοιχείο του διανύσματος, καθώς και την αναγραφή σχολίων:

```
Parameters
            a(i)  keimeno
                  /x1  10
                   x2  25/;
```

Στο παραπάνω παράδειγμα ορίζεται η παράμετρος ΄΄a΄΄ με δείκτη το σύνολο ΄΄i΄΄. Ανατίθενται τιμές 10, 25 στα στοιχεία x1, x2 του συνόλου αντίστοιχα μεταξύ των δύο συμβόλων ΄΄/΄΄ και η εντολή τερματίζεται με ΄΄;΄΄. Οι παρακάτω κανόνες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την ανάθεση τιμών:

1. Η λίστα πρέπει να περιλαμβάνεται εντός των συμβόλων ΄΄/.../΄΄ και τα στοιχεία καθώς και οι τιμές τους να διαχωρίζονται μεταξύ τους με κόμμα ή αλλαγή γραμμής.

2. Τα ζευγάρια τιμή δείκτη, τιμή παραμέτρου μπορούν να γραφτούν με οποιαδήποτε σειρά.

3. Η εξ ορισμού τιμή μιας παραμέτρου είναι μηδέν και έτσι αρκεί η ανάθεση των μη μηδενικών τιμών.

4. Το GAMS ελέγχει αυτόματα αν οι τιμές του δείκτη αποτελούν έγκυρες τιμές του αντίστοιχου συνόλου και στέλνει σήμα σε περίπτωση σφάλματος.

Η εντολή `Parameters` δίνει επίσης τη δυνατότητα ορισμού και ανάθεσης για διανύσματα δύο ή περισσοτέρων διαστάσεων. Για ένα διάνυσμα δύο διαστάσεων τα στοιχεία θα είναι της μορφής ΄΄τιμή_πρώτου_δείκτη .τιμή_δεύτερου_δείκτη΄΄:

```
Parameters
            b(i, j)  keimeno
                     /x1.y1 20
                      x1.y2 15
                      x2.y1 10
                      x2.y2 5/;
```

Επίσης, για τον ορισμό στοιχείων ενός πίνακα (ή διανύσματος) ως συνάρτηση προηγούμενων ορισμένων στοιχείων, η εντολή `Parameters` μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως παρακάτω:

```
Parameter d(i,j) keimeno
          d(i,j)=5*b(i,j);
```

Η δεσμευμένη λέξη `table` ή `tables` χρησιμοποιείται για τον ορισμό ενός πίνακα. Οι πίνακες δηλώνονται με τη χρήση δύο ή περισσοτέρων δεικτών ενώ σχόλιο μπορεί προαιρετικά να ακολουθεί το όνομα του πίνακα όπως στο παράδειγμα:

```
Table z(i, j)  Keimeno
               y1        y2        y3
          x1   3.5       2.4       2.9
          x2   1.9       1.7       3.1;
```

Στο παράδειγμα αυτό ο πίνακας z ορίζεται χρησιμοποιώντας τους δείκτες ′′i′′ και ′′j′′. Ανατίθεται μια τιμή σε κάθε ζευγάρι στοιχείων (`x1.y1, x1.y2, x1.y3, x2.y1, x2.y2, x3.y3`). Αν θεωρήσουμε τώρα ένα πίνακα τριών διαστάσεων, αυτός θα γραφεί όπως στο παρακάτω παράδειγμα:

```
Table (i,j,k)  Keimeno
               k1        k2        K3
       x1.y1   3         2         2
       x1.y2   1         1         3
       X1.y3   5         2         9
       x2.y1   4         5         2
       x2.y2   8         7         3
       x2.y3   4         7         1;
```

2.2.4 Κανόνες μαθηματικών παραστάσεων κατά την ανάθεση τιμών

Οι παρακάτω κανόνες ισχύουν για την ανάθεση τιμών σε παραμέτρους με τη χρήση μαθηματικών εκφράσεων:

1. Μπορεί να αποδοθεί μια συγκεκριμένη τιμή στο σύνολο των στοιχείων ενός διανύσματος με μία μόνο εντολή:

   ```
   Z(i,j)=3;
   ```

2. Η απόδοση τιμής σε συγκεκριμένο στοιχείο μπορεί να γίνει με την αναγραφή των τιμών του δείκτη σε εισαγωγικά:

   ```
   Z('x1', 'y1')=3.333;
   ```

3. Μπορεί να γίνει ανάθεση τιμών σε παράμετρο περισσότερες από μία φορές. Οι καινούριες τιμές αντικαθιστούν τις παλιές.

4. Οι μαθηματικές εκφράσεις μπορούν να ενσωματώνουν κάποιες μαθηματικές λειτουργίες και διαδικασίες, πχ:

   ```
   Set I /I1*I10/; Parameter x(I);
   x(I)=exp(6,7)*0,5;
   ```

Ο Πίνακας 2.2 παρουσιάζει ορισμένες συναρτήσεις μαθηματικών λειτουργιών στο GAMS.

Συνάρτηση	Περιγραφή
`abs(x)`	Απόλυτη τιμή του x
`exp(x)`	Εκθετική συνάρτηση του x
`log(x)`	Φυσικός λογάριθμος του x
`power(x,y)`	Δύναμη του x υψωμένο στην y (το y πρέπει να είναι ακέραιος)
`x**y`	Δύναμη του x υψωμένο στην y (το x πρέπει να είναι θετικός)
`sqrt(x)`	Τετραγωνική ρίζα του x
`uniform(x,y)`	Τυχαίος αριθμός από ομοιόμορφη κατανομή
`sin(x)`	Ημίτονο του x (σε rad)
`cos(x)`	Συνημίτονο του x (σε rad)

Πίνακας 2.2: Ορισμένες συναρτήσεις του GAMS με μαθηματική λειτουργία.

2.2.5 Η εντολή Variables

Οι δεσμευμένες λέξεις `Variable` και `Variables` στο GAMS χρησιμοποιούνται για τη δήλωση μεταβλητών προς βελτιστοποίηση. Η εντολή δήλωσης μιας μεταβλητής έχει την ακόλουθη μορφή:

```
Variables όνομα_μεταβλητής(σύνολο δεικτών)  κείμενο;
```

Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα δήλωσης μεταβλητών στο GAMS:

```
Variables
x(i,j)    keimeno
Z         keimeno;
```

Μία μεταβλητή μπορεί να ορισθεί χωρίς δείκτες. Αλλιώς, γίνεται αναφορά πλέον σε ένα διάνυσμα μεταβλητών. Μετά το όνομα της μεταβλητής ακολουθούν οι διαστάσεις της μεταβλητής και προαιρετικά σχόλια ενώ η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ΄΄;΄΄. Τα προγράμματα σε GAMS πρέπει πάντα να διαθέτουν μια μεταβλητή για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης.

Το GAMS διαθέτει μια σειρά λέξεων για ορισμό του τύπου των μεταβλητών. Οι πέντε βασικότερες εξ αυτών παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Λέξη Κώδικα	Τύπος Μεταβλητής	Κατώτατο Όριο	Ανώτατο Όριο	Περιγραφή
free	ελεύθερη	*- inf*	*+ inf*	Χωρίς περιορισμούς. Τα προκαθορισμένα όρια μπορούν να αλλαχθούν από το χρήστη
positive	θετική	*0*	*+ inf*	Δεν επιτρέπονται αρνητικές τιμές. Το προκαθορισμένο ανώτατο όριο μπορεί να αλλαχθεί από το χρήστη
negative	αρνητική	*- inf*	0	Δεν επιτρέπονται θετικές τιμές. Το προκαθορισμένο κατώτατο όριο μπορεί να αλλαχθεί από το χρήστη
binary	δυαδική	0	1	Διακριτή μεταβλητή που παίρνει τιμή '0' ή '1'
integer	ακέραιη	0	100	Διακριτή μεταβλητή που παίρνει ακέραιες τιμές μεταξύ των ορίων. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τα προκαθορισμένα όρια

Πίνακας 2.3: Τύποι μεταβλητών του GAMS.

Η μεταβλητή προς βελτιστοποίηση πρέπει να είναι μηδενικών διαστάσεων και του τύπου free. Άλλοι τύποι μεταβλητών με σπανιότερη χρήση είναι οι: `sos1`, `sos2`, `semicont` και `semiint`.

Κάθε μεταβλητή στο GAMS έχει επτά τιμές συσχετιζόμενες με κάθε συνδυασμό δεικτών. Ο χρήστης έχει πρόσβαση στις τιμές αυτές με την προσθήκη της κατάλληλης κατάληξης στο τέλος του ονόματος της μεταβλητής. Οι καταλήξεις καθώς και η τιμές στις οποίες αντιστοιχούν δίδονται στον Πίνακα 2.4.

Εντολή	**Σκοπός**
`.lo`	Το κατώτερο όριο της μεταβλητής
`.up`	Το ανώτερο όριο της μεταβλητής
`.fx`	Η καθορισμένη τιμή της μεταβλητής. Απόδοση τιμής στο .fx θέτει τα ανώτερα και κατώτερα όρια ίσα με αυτή τη τιμή
`.l`	Η τρέχουσα τιμή της μεταβλητής. Δέχεται νέες τιμές κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του κώδικα
`.m`	Η οριακή τιμή της μεταβλητής. Δέχεται νέες τιμές κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του κώδικα
`.scale`	Ο συντελεστής κλίμακας της μεταβλητής. Χρησιμοποιείται κυρίως σε προβλήματα μη-γραμμικού προγραμματισμού
`.prior`	Η σειρά προτεραιότητας διακλάδωσης της μεταβλητής. Χρησιμοποιείται μόνο σε μοντέλα Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού

Πίνακας 2.4: Καταλήξεις για ειδική λειτουργία των μεταβλητών του GAMS.

2.2.6 Η εντολή Equations

Οι δεσμευμένες λέξεις `Equation` και `Equations` στο GAMS αναφέρονται στις αλγεβρικές σχέσεις που χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία των περιορισμών του μοντέλου. Ως εξίσωση στο GAMS νοείται ο ορισμός οποιουδήποτε είδους περιορισμού. Μία δήλωση εξίσωσης έχει την παρακάτω μορφή:

```
Equations όνομα_εξίσωσης(σύνολο δεικτών)   κείμενο;
```

Όπως και με άλλες δομές του GAMS η εξίσωση μπορεί να μη σχετίζεται με κάποιο δείκτη. Αλλιώς αναφερόμαστε πλέον σε διάνυσμα περιορισμών. Το όνομα ακολουθείται από το σύνολο δεικτών και προαιρετικό κείμενο ενώ η εντολή καταλήγει με το σύμβολο ΄΄;΄΄.

Ο ορισμός μιας εξίσωσης έπεται της δήλωσής του και έχει την παρακάτω μορφή:

```
όνομα_εξίσωσης(σύνολο δεικτών).. παράσταση τύπος_σχέσης παράσταση;
```

Οι δύο τελείες ΄΄**..**΄΄ μεταξύ του ονόματος της εξίσωσης και της άλγεβρας είναι υποχρεωτικές. Οι παραστάσεις αποτελούν μαθηματικές εκφράσεις που μπορούν να περιλαμβάνουν παραμέτρους και μεταβλητές. Η εντολή τερματίζει με το σύμβολο ΄΄;΄΄. Μεταξύ των δύο παραστάσεων παρεμβάλλεται ένα σύμβολο που δηλώνει τον τύπο της σχέσης μεταξύ τους και μπορεί να είναι ένα από τα παρακάτω:

`=e=`	Ισότητα: Οι δύο παραστάσεις πρέπει να είναι ίσες μεταξύ τους.
`=g=`	Μεγαλύτερο από: Η αριστερή παράσταση πρέπει να είναι μεγαλύτερη ή ίση της δεξιάς.

`=l=` Μικρότερο από: Η αριστερή παράσταση πρέπει να είναι μικρότερη ή ίση της δεξιάς.
`=n=` Δεν εφαρμόζεται κανένας περιορισμός μεταξύ των παραστάσεων. Ένας τύπος εξίσωσης με σπάνια χρήση.

Δύο αλγεβρικές μορφές που χρησιμοποιούνται συχνά στην έκφραση περιορισμών είναι το άθροισμα και το γινόμενο, με τις αντίστοιχες δεσμευμένες λέξεις στο GAMS να είναι οι sum και prod. Παρακάτω δίνονται οι γενικές μορφές αναπαράστασής τους στο GAMS.

```
Sum(σύνολο δεικτών,παράσταση)    Prod(σύνολο δεικτών,παράσταση)
Sum(j,x(i,j))                    Prod(j,x(i,j))
```

Αν το σύνολο δεικτών απαιτεί κόμμα για να εκφραστεί τότε το σύνολο θα πρέπει να είναι σε παρένθεση. Η παράσταση προς άθροιση ή πολλαπλασιασμό μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε μαθηματική έκφραση.

2.2.7 Η εντολή Model

Οι δεσμευμένες λέξεις `model` και `models` χρησιμοποιούνται για τη δήλωση του μοντέλου προς επίλυση. Ως μοντέλο στο GAMS νοείται μια συλλογή εξισώσεων. Μια δήλωση μοντέλου έχει την παρακάτω μορφή:

```
Models    όνομα_μοντέλου  κείμενο   /σύνολο εξισώσεων/;
```

Το σύνολο εξισώσεων αποτελεί μια αναγραφή των ονομάτων των εξισώσεων που θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο, διαχωρισμένα με κόμμα ´´,´´. Αν στη θέση του συνόλου των εξισώσεων χρησιμοποιηθεί η λέξη `all`, το GAMS θα συμπεριλάβει όλες τις προηγουμένως ορισμένες εξισώσεις στο μοντέλο. Σχόλιο μπορεί να συμπεριληφθεί στη δήλωση μετά το όνομα του μοντέλου. Η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ´´;´´.

Solver	**Σκοπός**
`lp`	Γραμμικός Προγραμματισμός
`nlp`	Μη-γραμμικός Προγραμματισμός
`dnlp`	Μη-γραμμικός Προγραμματισμός με ασυνεχείς παραγώγους
`mip`	Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός
`rmip`	´´Χαλαρός´´ Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός
`minlp`	Μικτός Ακέραιος Μη-γραμμικός Προγραμματισμός
`rminlp`	´´Χαλαρός´´ Μικτός Ακέραιος Μη-γραμμικός
`mcp`	Μικτά Προβλήματα Αλληλοσυμπληρωμένων Περιορισμών
`mpec`	Μαθηματικά Προγράμματα με Περιορισμούς Ισορροπίας
`cns`	Φραγμένα Μη-γραμμικά Συστήματα

Πίνακας 2.5: Ορισμένα είδη διαδικασίας επίλυσης προβλημάτων (solvers) του GAMS.

2.2.8 Η εντολή Solve

Η δεσμευμένη λέξη `Solve` χρησιμοποιείται στο GAMS για την διαδικασία επίλυσης ενός προβλήματος που έχει μοντελοποιηθεί. Μια εντολή επίλυσης έχει την παρακάτω μορφή:

```
solve  όνομα_μοντέλου  using  είδος_solver
                       minimizing/maximizing όνομα_μεταβλητής;
```

Από την παραπάνω γραμμή εντολής γίνεται κατανοητό πως πρέπει να καθοριστούν:

1. Το όνομα του μοντέλου προς επίλυση.
2. Το είδος της διαδικασίας επίλυσης (Πίνακας 2.5).
3. Η λέξη `minimizing/maximizing` αναλόγως με το αν επιθυμούμε την ελαχιστοποίηση ή την μεγιστοποίηση της μεταβλητής που ακολουθεί.

2.2.9 Η εντολή Display και τα αρχεία εξόδου του GAMS

Για πληροφορίες σχετικά με την τιμή κάποιου στοιχείου ο χρήστης μπορεί να δώσει την εντολή `Display` που έχει την παρακάτω μορφή:

```
Display        όνομα_στοιχείου;
```

Για την προβολή κάποιας από τις επτά τιμές μιας μεταβλητής ο χρήστης πρέπει να προσθέσει στο τέλος του ονόματος την αντίστοιχη κατάληξη όπως αυτές δόθηκαν στο Πίνακα 2.4 παραπάνω. Η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ΄΄;΄΄.

Το GAMS παρέχει επίσης λεπτομερή αναφορά με το πέρας της εκτέλεσης του κώδικα. Πληροφορίες που παρέχονται είναι μεταξύ άλλων: αντίγραφο κώδικα, μηνύματα σφάλματος, πίνακες αναφοράς, στατιστικά μοντέλου, αναφορές κατάστασης και αναφορές λύσης.

2.2.10 Δηλώσεις υπό συνθήκη και επαναληπτικές δομές

Το σύμβολο ΄΄$΄΄ έχει ιδιαίτερη σημασία στο GAMS και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για δηλώσεις υπό συνθήκη. Αν και το ΄΄$΄΄ έχει διαφορετικά αποτελέσματα σε κάθε είδος χρήσης, η λειτουργία του μπορεί να συνοψιστεί σε αυτήν ενός ΄΄εφόσον΄΄ ή ΄΄Αν΄΄. Για παράδειγμα μετά το σύνολο δεικτών στον ορισμό εξισώσεων ελέγχει τις τιμές των δεικτών δημιουργώντας εξισώσεις μόνο για τις τιμές εκείνες του δείκτη που ικανοποιούν τη συνθήκη.
Η μορφή χρήσης του '$' είναι:

```
παράσταση $(παράσταση)
```

Η συνθήκη του ΄΄$΄΄ ικανοποιείται εφόσον η τιμή της παράστασης στην παρένθεση είναι μη μηδενική. Μια σχεσιακή παράσταση επιστρέφει ΄΄1΄΄ εφόσον ισχύει και ΄΄0΄΄ αλλιώς. Σε λειτουργίες του GAMS πέραν του ορισμού εξισώσεων η λειτουργία του ΄΄$΄΄ μπορεί να υποκατασταθεί από μια δήλωση ΄΄if – then – else΄΄. Αυτή έχει την μορφή:

```
if     (συνθήκη1,εντολές1
elseif  συνθήκη2, εντολές2
...
elseif συνθήκηΝ-1, εντολές Ν-1
else    εντολέςΝ);
```

Οι elseif και else είναι προαιρετικές. Κάθε εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ΄΄;΄΄. Όλη η διαδικασία πέραν της if περιλαμβάνεται σε παρενθέσεις ενώ η εντολή τερματίζεται με το σύμβολο ΄΄;΄΄.

Ένα παράδειγμα της αντιστοιχίας μεταξύ του συμβόλου ΄΄$΄΄ και του ΄΄if – then – else΄΄ δίνεται στον Πίνακα 2.6.

Έκφραση΄΄$΄΄	**Έκφραση ΄΄if – then – else΄΄**

`c('p2','m1')$(z.l >= 70)=0.01;`	`If(z.l >= 70,`
	`c('p2','m1')=0.01;`
	`);`

`c('p2','m1') =0.01$(z.l >= 70)`	`If(z.l >= 70,`
	`c('p2','m1')=0.01;`
	`else`
	`c('p2','m1')=0.0;`
	`);`

Πίνακας 2.6: Παραδείγματα της αντιστοιχίας μεταξύ του συμβόλου ΄΄$΄΄ και της λειτουργίας ΄΄if – then – else΄΄.

Τυπικοί τελεστές άλλων γλωσσών προγραμματισμού που είναι επίσης έγκυροι στο GAMS είναι οι:

not, and, or, xor ως λογικοί τελεστές
<, <=, =, >, <>, >=, > ως σχεσιακοί τελεστές

Τέλος, το GAMS υποστηρίζει επίσης μια σειρά επαναληπτικών διαδικασιών όπως *loop*, *for* και *while*.

2.3 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια σύντομη παρουσίαση των βασικών λειτουργιών του GAMS. Το GAMS ως αλγεβρική γλώσσα μοντελοποίησης παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα απέναντι στις τυπικές γλώσσες προγραμματισμού. Αυτά εντοπίζονται πρώτον στην εξοικονόμηση χρόνου λόγω της δυνατότητας εκτέλεσης ενός συνόλου διαδικασιών με μία δήλωση. Δεύτερον στην αποδοτική ΄΄ανακύκλωση΄΄ του κώδικα λόγω της γενικότητας που από τη φύση τους παρέχουν οι αλγεβρικές διατυπώσεις ενός προβλήματος. Άλλο σημαντικό στοιχείο της γλώσσας είναι η αναγνωσιμότητα του κώδικα και ο σημαντικός έλεγχος που έχει ο χρήστης πάνω στις εξόδους του [2.4].

2.4 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[2.1] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, R. Raman. (2005, Dec.). GAMS: A Users Guide. GAMS Development Corporation, Washington DC. [Online]. Available: www.gams.com

[2.2] Bruce A. Mc Carl. (2006, March). McCarl GAMS User Guide. Version 22.2. GAMS Development Corporation, Washington DC. [Online]. Available: www.gams.com

[2.3] Enrique Castillo, Antonio J. Conejo, Pablo Pedregal, Ricardo Garcia and Natalia Alguacil, “Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science,” Wiley, 2002, pp. 285-364.

[2.4] Chattopadhyay, D., "Application of general algebraic modelling system to power system optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 15-22, Feb 1999.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΚΕΡΔΟΣ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πρόβλημα της ένταξης θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το κέρδος διατυπώνεται ως εξής:
΄΄Για μια εταιρία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με *N* μονάδες παραγωγής, και για δοσμένη χρονοσειρά τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτείται να προσδιοριστούν οι χρόνοι εκκίνησης και σταματήματος και η ισχύς εξόδου όλων των μονάδων παραγωγής κάθε χρονική στιγμή *t* στη διάρκεια μίας χρονικής περιόδου προγραμματισμού *T*, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το συνολικό κέρδος της ηλεκτρικής εταιρίας, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των μονάδων΄΄.

3.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΜΟΝΤΕΛΟ

3.2.1 Περιγραφή

Το μαθηματικό μοντέλο καθώς και οι συμβολισμοί που διέπουν το πρόβλημα της ένταξης μονάδων με βάση το κέρδος παρουσιάζονται αναλυτικά στις παρακάτω παραγράφους.

3.2.2 Συμβολισμοί

i	Δείκτης για την μονάδα παραγωγής.
t	Δείκτης για την ώρα προγραμματισμού.
N	Αριθμός θερμικών μονάδων παραγωγής.
T	Συνολικό αριθμός ωρών προγραμματισμού.
$I(i,t)$	Κατάσταση της μονάδας i τη χρονική στιγμή (1 = εκκίνηση, 0 = κράτηση).
$A(i)$	Συντελεστής κόστους καυσίμου της μονάδας i (σε €/h).
$B(i)$	Συντελεστής κόστους καυσίμου της μονάδας i (σε €/MWh).
$C(i)$	Συντελεστής κόστους καυσίμου της μονάδας i (σε €/ MW^2h).
$Cost(i,t)$	Συνολικό κόστος παραγωγής της μονάδας i τη χρονική στιγμή t (σε €/h).
$CT(i)$	Χρονική σταθερά ψύξης της μονάδας i (σε ώρες).
$D(i)$	Κόστος προσωπικού για την εκκίνηση και κόστος συντήρησης εξοπλισμού της μονάδας i (σε €/h).
$E(i)$	Κόστος ψυχρής εκκίνησης της μονάδας i (σε €/h).
$FC(i,t)$	Κόστος καυσίμου της μονάδας i τη χρονική στιγμή t (σε €/h).
$SU(i,t)$	Κόστος εκκίνησης της μονάδας i τη χρονική στιγμή t (σε €/h).
$SD(i,t)$	Κόστος κράτησης της μονάδας i τη χρονική στιγμή t (σε €/h).

$F(i,t)$	Κέρδος της μονάδας i τη χρονική στιγμή t (σε €/h).
$Rvn(i,t)$	Εισόδημα της μονάδας i τη χρονική στιγμή t (σε €/h).
$P(i,t)$	Παραγωγή της μονάδας i τη χρονική στιγμή t (σε MW).
$p_{gm}(t)$	Προβλεπόμενη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας την χρονική στιγμή t (€/MWh).
$d\ (t)$	Προβλεπόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας την χρονική στιγμή t (MW).
$P^{\min}(i)$	Ελάχιστη παραγωγή της μονάδας i (σε MW).
$P^{\max}(i)$	Μέγιστη παραγωγή της μονάδας i (σε MW).
$T^{up}(i)$	Ελάχιστος χρόνος ένταξης (λειτουργίας) της μονάδας i (σε ώρες).
$T^{down}(i)$	Ελάχιστος χρόνος κράτησης της μονάδας i (σε ώρες).
$R^{up}(i)$	Ρυθμός αύξησης της παραγωγής κατά την εκκίνηση της μονάδας i (σε MW/h).
$R^{down}(i)$	Ρυθμός μείωσης της παραγωγής κατά την κράτηση της μονάδας i (σε MW/h).
$X^0(i,t)$	Αν $X^0(i,t) > 0$, τότε η μονάδα i λειτουργεί για $X^0(i,t)$ ώρες, πριν από την έναρξη της περιόδου προγραμματισμού. Αν $X^0(i,t) < 0$, τότε η μονάδα i είναι κρατημένη για $-X^0(i,t)$ ώρες, πριν από την έναρξη της περιόδου προγραμματισμού.
$X(i,t)$	Αν $X(i,t) > 0$, τότε ο αθροιστικός χρόνος λειτουργίας της μονάδας i τη χρονική στιγμή t είναι $X(i,t)$ ώρες. Αν $X(i,t) < 0$, ο αθροιστικός χρόνος λειτουργίας της μονάδας i τη χρονική στιγμή t είναι $-X(i,t)$ ώρες.
$X_{off}(i,t)$	Χρονική διάρκεια συνεχούς κράτησης της μονάδας i τη χρονική στιγμή t (σε ώρες).

3.2.3 Αντικειμενική Συνάρτηση

Για μία μονάδα *i* τη χρονική στιγμή *t* το κέρδος υπολογίζεται αφαιρώντας το συνολικό κόστος παραγωγής κατά τη διάρκεια του χρονικού αυτού διαστήματος από το συνολικό εισόδημα:

$$F(i,t) = Rvn(i,t) - Cost(i,t) \tag{3.1}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι ένα αρνητικό κέρδος, *F(i,t)*, δείχνει ζημία για τη μονάδα *i* τη χρονική στιγμή *t.*

Το εισόδημα για τη μονάδα *i* τη χρονική στιγμή *t* υπολογίζεται πολλαπλασιάζοντας την παραγωγή της με την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας:

$$Rvn(i,t) = p_{gm}(t) \cdot P(i,t) \cdot I(i,t) \tag{3.2}$$

Το συνολικό κόστος παραγωγής, *Cost(i,t)*, για κάθε μονάδα στη διάρκεια κάθε χρονικού διαστήματος είναι το άθροισμα του κόστους, καυσίμου, του κόστους εκκίνησης και του κόστους κράτησης κατά το διάστημα αυτό:

$$Cost(i,t) = [FC(i,t) + SU(i,t) + SD(i,t)] \cdot I(i,t) \tag{3.3}$$

Το κόστος καυσίμου *FC(i,t)* της μονάδας *i* σε κάθε δοσμένο χρονικό διάστημα *t* είναι συνάρτηση της ισχύος εξόδου *P(i,t)* της μονάδας αυτής στο θεωρούμενο χρονικό διάστημα. Η συνάρτηση κόστους καυσίμου μοντελοποιείται με ένα πολυώνυμο δευτέρας τάξεως:

$$FC(i,t) = A(i) \cdot [P(i,t)]^2 + B(i) \cdot P(i,t) + C(i) \tag{3.4}$$

Το κόστος εκκίνησης σε κάθε χρονική στιγμή *t* εξαρτάται από τον αριθμό των ωρών που η μονάδα είναι σταματημένη πριν να ξεκινήσει. Το κόστος αυτό μοντελοποιείται από μία εκθετική συνάρτηση της μορφής:

$$SD(i,t) = D(i) + E(i) \cdot \left[1 - \exp\left(- \frac{X_{off}(i,t)}{CT(i)} \right) \right] \tag{3.5}$$

Το κόστος κράτησης, *SD(i,t)*, έχει μία σταθερή τιμή για κάθε μονάδα ανά κράτημα.

Ο στόχος του προβλήματος ένταξης μονάδων με βάση το κέρδος για μία εταιρία παραγωγής που λειτουργεί σε ανταγωνιστικό περιβάλλον είναι να μεγιστοποιήσει, κατά τη διάρκεια του χρονικού ορίζοντα προγραμματισμού, το συνολικό κέρδος για όλες τις μονάδες παραγωγής της:

$$\max_{I(i,t),P(i,t)} \sum_{t=1}^{T} \sum_{i=1}^{N} F(i,t) \tag{3.6}$$

κάτω από του περιορισμούς που περιγράφονται στην παρακάτω ενότητα.

3.2.4 Περιορισμοί

Οι θερμικές μονάδες υπόκεινται σε ένα σύνολο περιορισμών που παρουσιάζονται στην ενότητα αυτή.

3.2.4.1 Λειτουργικά όρια μονάδων

Οι μονάδες μπορούν να παράγουν μέσα σε προκαθορισμένα όρια:

$$P^{\min}(i) \cdot I(i,t) \le P(i,t) \le P^{\max}(i) \cdot I(i,t), \ \forall\ i, \forall\ t \tag{3.7}$$

όπου $P^{\min}(i)$ και $P^{\max}(i)$ είναι η ελάχιστη και η μέγιστη παραγωγή, αντίστοιχα, της μονάδας *i* (σε MW).

3.2.4.2 Ελάχιστος χρόνος ένταξης μονάδας

Πρέπει να ικανοποιούνται οι περιορισμοί:

$$\left[X(i,t-1) - T^{up}(i) \right] \cdot \left[I(i,t-1) - I(i,t) \right] \ge 0, \ \forall i, \forall t \tag{3.8}$$

όπου $T^{up}(i)$ είναι ο ελάχιστος χρόνος ένταξης της μονάδας *i* (σε ώρες).

3.2.4.3 Ελάχιστος χρόνος κράτησης μονάδας

Πρέπει να ικανοποιούνται οι περιορισμοί:

$$\left[-X(i,t-1) - T^{down}(i) \right] \cdot \left[I(i,t) - I(i,t-1) \right] \ge 0, \ \forall i, \forall t \tag{3.9}$$

όπου $T^{down}(i)$ είναι ο ελάχιστος χρόνος κράτησης της μονάδας *i* (σε ώρες).

3.2.4.4 Περιορισμός αναρρίχησης κατά την εκκίνηση

Ο περιορισμός αναρρίχησης κατά την εκκίνηση εκφράζει την ποσότητα που μπορεί μία μονάδα να αυξήσει την παραγωγή της σε μία ώρα:

$$P(i,t) - P(i,t-1) \leq R^{up}(i), \quad \forall i, \forall t \tag{3.10}$$

όπου $R^{up}(i)$ είναι ο ρυθμός αύξησης της παραγωγής κατά την εκκίνηση της μονάδας i (σε MW/h).

Ο περιορισμός (3.10) εφαρμόζεται από τη στιγμή της εκκίνησης μέχρι τη στιγμή που η μονάδα θα παράγει την ονομαστική της ισχύ. Το όριο τη στιγμή της εκκίνησης υπολογίζεται από την σχέση:

$$P(i,t) \leq \max\left[R^{up}(i), P^{\min}(i)\right], \quad \forall i, \forall t \tag{3.11}$$

3.2.4.5 Περιορισμός μείωσης εξόδου κατά την κράτηση

Ο περιορισμός μείωσης εξόδου κατά την κράτηση εκφράζει την ποσότητα που μπορεί μία μονάδα να μειώσει την παραγωγή της σε μία ώρα:

$$P(i,t-1) - P(i,t) \leq R^{down}(i), \quad \forall i, \forall t \tag{3.12}$$

όπου $R^{down}(i)$ είναι ο περιορισμός μείωσης της παραγωγής κατά την κράτηση της μονάδας i (σε MW/h).

Ο περιορισμός (3.12) εφαρμόζεται από τη στιγμή που η μονάδα θα παράγει την ονομαστική της ισχύ μέχρι τη στιγμή που η μονάδα θα κρατηθεί (σταματήσει). Το όριο τη στιγμή της κράτησης υπολογίζεται από την σχέση:

$$P(i,t) \leq \max\left[R^{down}(i), P^{\min}(i)\right], \quad \forall i, \forall t \tag{3.13}$$

3.2.4.6 Περιορισμοί κατάστασης μονάδων

Κάποιες μονάδες ίσως θα πρέπει να λειτουργούν σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα (μονάδες υποχρεωτικά ενταγμένες), ενώ κάποιες άλλες μονάδες ενδεχομένως να μην είναι διαθέσιμες λόγω προγραμματισμένης συντήρησης ή βλάβης.

3.2.4.7 Αρχικές συνθήκες

Θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι αρχικές συνθήκες των μονάδων (πχ συνολικές ώρες ένταξης ή συνολικές ώρες κράτησης) στην αρχή της περιόδου προγραμματισμού.

3.2.4.8 Περιορισμός της ζήτησης

Ο περιορισμός της ζήτησης για το πρόβλημα της ένταξης θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την μεγιστοποίηση του κέρδους εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\sum_{i=1}^{N} P(i,t) \leq d(t), \quad \forall\ i, \forall\ t \tag{3.14}$$

Σε αντίθεση με το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του κόστους, όπου στον αντίστοιχο περιορισμό υπάρχει μόνο το σύμβολο της ισότητας. Στην μεγιστοποίηση του κέρδους μία εταιρία μπορεί να σταματήσει να παράγει ακόμη και αν η ζήτηση δεν ικανοποιείται διότι μπορεί να έχει ζημία από την μονάδα *i*. Για τον λόγο αυτό υπάρχει και το σύμβολο του μικρότερου στην σχέση (3.14).

3.3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ

Στην ενότητα αυτή κρίνεται απαραίτητη η αναφορά ορισμένων μαθηματικών μεθόδων που επιλύουν το πρόβλημα που παραπάνω αναλυτικά παρουσιάστηκε, δηλαδή της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το κέρδος.

3.3.1 Μέθοδος πλήρης απαρίθμησης

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει μια εξαντλητική δοκιμή όλων των πιθανών σεναρίων και έπειτα την επιλογή του καλύτερου εξ αυτών. Όλες οι εφικτές λύσεις, δηλαδή εκείνες που ικανοποιούν τους περιορισμούς των μονάδων, αξιολογούνται και αποθηκεύονται. Η λύση με το μεγαλύτερο συνολικό κέρδος λαμβάνεται ως η βέλτιστη. Αυτή η μέθοδος εγγυάται την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Το μειονέκτημα της όμως, έγκειται στο μεγάλο χρονικό διάστημα που χρειάζεται για να ολοκληρώσει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς σε μεγάλα προβλήματα με πολλές μονάδες και για πολλές ώρες προγραμματισμού [3.1].

3.3.2 Μέθοδος δυναμικού προγραμματισμού

Η μέθοδος του δυναμικού προγραμματισμού ήταν η πρώτη μέθοδος βελτιστοποίησης που εφαρμόστηκε στο πρόβλημα της ένταξης των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και εφαρμόζεται ακόμη και σήμερα. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με μία απλοϊκή μέθοδο, το πρόβλημα της ένταξης N μονάδων αναλύεται σε N υπό-προβλήματα ένταξης, ένα για κάθε μονάδα ξεχωριστά. Το βασικό πλεονέκτημα αυτής είναι η ευελιξία και η προσαρμοστικότητα, η οποία μπορεί εύκολα να τροποποιηθεί για να διαμορφώσει τα χαρακτηριστικά συγκεκριμένων προβλημάτων [3.2-3.3].

3.3.3 Μέθοδος διακλάδωσης και φραγής

Μια νέα προσέγγιση για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στη μέθοδο διακλάδωσης και φραγής, η οποία ενσωματώνει όλους τους χρονικά εξαρτημένους περιορισμούς και δεν απαιτεί ταξινόμηση προτεραιότητας των μονάδων.

Η μέθοδος διακλάδωσης και φραγής αποτελείται από την επαναλαμβανόμενη εφαρμογή των ακόλουθων βημάτων. Αρχικά, ένα τμήμα της λύσης δηλαδή, το σύνολο των μεταβλητών απόφασης που είναι υπό εξέταση για το οποίο η βέλτιστη λύση είναι γνωστή, χωρίζεται σε υποσύνολα. Δεύτερον, εάν όλα τα στοιχεία σε ένα υποσύνολο παραβιάζουν τους περιορισμούς του προβλήματος, το υποσύνολο εκείνο αποβάλλεται από την περαιτέρω μελέτη. Τρίτον, υπολογίζεται ένα ανώτερο όριο της ελάχιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Τέλος, υπολογίζονται τα κατώτερα όρια της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης όταν περιορίζονται οι μεταβλητές απόφασης κάθε υποσύνολου που βρίσκεται ακόμα υπό μελέτη. Ένα υποσύνολο ελέγχεται αν το κατώτερο όριο του υπερβαίνει το ανώτερο όριο του προβλήματος, δεδομένου ότι η βέλτιστη μεταβλητή απόφασης δεν μπορεί να βρίσκεται στο υποσύνολο αυτό. Η σύγκλιση πραγματοποιείται όταν παραμείνει μόνο ένα υποσύνολο των μεταβλητών απόφασης και τα ανώτερα και κατώτερα όρια είναι ίσα για αυτό το υποσύνολο [3.1].

3.4 ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΜΕΘΟΔΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

Οι τεχνητές μέθοδοι βελτιστοποίησης είναι χρήσιμες σε περιπτώσεις όπου το πρόβλημα είναι σύνθετο για να μοντελοποιηθεί μαθηματικά. Παρόλα αυτά, έχουν ένα μειονέκτημα στο ότι απαιτούν αρκετά μεγάλους υπολογιστικούς πόρους από τους Η/Υ. Όμως, με την εξέλιξη της τεχνολογίας των επεξεργαστών και την συνεχή αύξηση της υπολογιστικής τους δύναμης, οι μέθοδοι αυτοί γίνονται όλο και πιο εύκολοι στην εφαρμογή τους [3.3].

Οι πιο γνωστές τεχνητές μέθοδοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα της ένταξης των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται στις παρακάτω υποενότητες.

3.4.1 Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι συστήματα επεξεργασίας δεδομένων που προσομοιώνουν τη λειτουργία του ανθρώπινου εγκεφάλου. Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από ένα σύνολο στοιχειωδών μονάδων επεξεργασίας που ονομάζονται νευρώνες. Στόχος είναι η εκμετάλλευση της υπολογιστικής ισχύς που παρέχεται από την παράλληλη διασύνδεση επεξεργαστών, σε αντιδιαστολή με τον παραδοσιακό σειριακό τρόπο σύνδεσης. Όλα αυτά τα χρόνια, διάφορα μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων και αλγόριθμοι εκμάθησης έχουν αναπτυχθεί

Έχει διερευνηθεί η δυνατότητα επίλυσης του συνδυαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης, συγκεκριμένα του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό να εφαρμοστεί το νευρωνικό δίκτυο Hopfield. Το προτεινόμενο νευρωνικό δίκτυο έλυσε ένα πρόβλημα 30 μονάδων για πάνω από 24 περιόδους και τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν πολύ ενθαρρυντικά. Στην συνέχεια, προτάθηκε ένα νευρωνικό δίκτυο για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής συμπεριλαμβάνοντας και τους περιορισμούς αναρρίχησης. Αποδείχτηκε τελικά, ότι το πρόβλημα της ένταξης μονάδων παραγωγής δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί ακριβώς στα πλαίσια του συμβατικού νευρωνικού δικτύου Hopfield. Ως αποτέλεσμα, παρουσιάστηκε μία αυξημένη δικτυακή αρχιτεκτονική με μια νέα μορφή διασύνδεσης μεταξύ των νευρώνων, δίνοντας περισσότερη ενεργή λειτουργία περιέχοντας διακριτούς και συνεχείς όρους [3.1].

3.4.2 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Κατά την διάρκεια των τελευταίων ετών έχει υπάρξει ένα έντονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη μεθόδων-αλγορίθμων βελτιστοποίησης, που βασίζονται στη παρατήρηση και στην μίμηση διαδικασιών που εμφανίζονται στην φύση. Μια τέτοια ΄΄οικογένεια΄΄ αλγορίθμων είναι οι στρατηγικές εξέλιξης, δηλαδή αλγόριθμοι που μιμούνται τις αρχές της φυσικής εξέλιξης (αναπαραγωγής) για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης παραμέτρων.

Ένας γενετικός αλγόριθμος εφαρμόστηκε για την επίλυση πρόβλημα της ένταξης μονάδων παραγωγής για μια έως επτά μέρες. Η δυνατότητα της εφαρμογής των γενετικών αλγορίθμων για τα προβλήματα ένταξης μονάδων παραγωγής έχει εξεταστεί και για μικρά και για μεγάλου μεγέθους προβλήματα. Τέλος, προτάθηκε ένας γενετικός αλγόριθμος για το πρόβλημα της ένταξης μονάδων παραγωγής και δοκιμάστηκε για ένα πραγματικό σενάριο περιόδου μιας ημέρας για διαφορετικές παραμέτρους του γενετικού αλγορίθμου [3.1].

3.4.3 Μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης

Στην επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να προσδιοριστούν δύο τύποι μεταβλητών. Η μεταβλητή που χαρακτηρίζει την κατάσταση λειτουργίας των μονάδων, δηλαδή αν μία μονάδα είναι σε λειτουργία ή όχι (δυαδική μεταβλητή) και οι μεταβλητές παραγωγής των μονάδων (συνεχείς μεταβλητές). Το πρόβλημα μπορεί να αναλυθεί σε δύο υπό-προβλήματα, ένα συνδυαστικό πρόβλημα βελτιστοποίησης στις μεταβλητές της κατάστασης λειτουργίας και σε ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης στις μεταβλητές παραγωγής. Έτσι, η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης μπορεί να χρησιμοποιηθεί κατάλληλα για να λύσει το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ένας αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτησης παρουσιάστηκε για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι και ο αλγόριθμος αυτός παρουσιάζει το μειονέκτημα του μεγάλου χρονικού διαστήματος για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Ωστόσο, η μέθοδος αυτή διαθέτει και ισχυρά χαρακτηριστικά γνωρίσματα, όπως ότι είναι ανεξάρτητη από την αρχική λύση και τη μαθηματική πολυπλοκότητα [3.1].

3.5 ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS

Στην ενότητα αυτή και πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων κρίνεται σκόπιμο να γίνει μία αναφορά στην προτεινόμενη επίλυση του προβλήματος που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή του 1^{ου} κεφαλαίου το πρόβλημα της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με βάση το κέρδος είναι ένα μεγάλης κλίμακας, μη κυρτό, μη γραμμικό, μικτό ακέραιο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Στην προτεινόμενη μεθοδολογία επίλυσης, επιλέχθηκε η γραμμική προσέγγιση του προβλήματος έχοντας συμπεριλάβει όλους τους περιορισμούς των θερμικών μονάδων που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 3.2.4, εκτός των περιορισμών (3.8) και (3.9), των οποίων η γραμμική προσέγγιση κατά την μοντελοποίηση του προβλήματος στην γλώσσα GAMS δεν κατέστη δυνατή. Οι υπόλοιποι περιορισμοί που παρουσιάζονται στην υποενότητα 3.2.4 συμπεριελήφθησαν όλοι στην διαδικασία επίλυσης.

Η δεύτερη παραδοχή που πραγματοποιήθηκε κατά την μοντελοποίηση του προβλήματος, αφορά την μη κυρτότητα και μη γραμμικότητα του προβλήματος και ειδικότερα τη συνάρτηση της σχέσης (3.4). Όπως προαναφέρθηκε στην υποενότητα 3.2.3, το κόστος καυσίμου $FC(i,t)$ της μονάδας i σε κάθε δοσμένο χρονικό διάστημα t είναι συνάρτηση της ισχύος εξόδου $P(i,t)$ της μονάδας αυτής στο θεωρούμενο χρονικό διάστημα. Η συνάρτηση κόστους καυσίμου μοντελοποιείται με ένα πολυώνυμο δευτέρας τάξεως. Κατά την μοντελοποίηση του προβλήματος στην γλώσσα GAMS και για την γραμμική προσέγγιση του προβλήματος, δεν κατέστη εφικτή η προσαρμογή της σχέσης αυτής. Αυτό γιατί το GAMS δεν δέχεται πολυώνυμο δεύτερης τάξης στην αντικειμενική συνάρτηση και κατ΄ επέκταση δεν μπορεί να βρει λύση για δύο μεταβλητές προς βελτιστοποίηση ταυτόχρονα στην ίδια μαθηματική σχέση.

Έτσι επιλέχθηκε η εισαγωγή μίας νέας μεταβλητής, της $PP(i,t)$, η οποία ουσιαστικά θα είναι μία προβλεπόμενη τιμή της ισχύος εξόδου $P(i,t)$ ούτως ώστε το κόστος καυσίμου $FC(i,t)$ της εκάστοτε μονάδας i να εισάγεται στο λογισμικό και να επιλύεται το πρόβλημα.

Για να μπορέσει η προσέγγιση αυτή να έχει ισχύ και να γίνει η ορθή επιλογή της βέλτιστης προβλεπόμενης τιμής ισχύος εξόδου επιλέχθηκαν ορισμένα σενάρια στα οποία θέτονταν τιμές στην βοηθητική μεταβλητή *PP(i,t)*. Το αποτέλεσμα της σύγκρισης ήταν το συνολικό κέρδος. Το σενάριο το οποίο που έδωσε το μεγαλύτερο συνολικό κέρδος επιλέχθηκε για τις επόμενες περιπτώσεις του προβλήματος.

Η διερεύνηση πραγματοποιήθηκε για τα δεδομένα των 10 μονάδων παραγωγής που παρουσιάζονται στον Πίνακας 4.1 και αφορούν 12 πρώτες ώρες προγραμματισμού. Η τιμή της μεταβλητή *PP(i,t)*, που δίνει το μεγαλύτερο αναμενόμενο κέρδος θα επιλεγεί και θα χρησιμοποιηθεί και για τις περιπτώσεις δικτύων μεγαλύτερων από 10 μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην αρχή εξετάστηκαν τα ακραία σενάρια στα οποία και οι 10 μονάδες παραγωγής λειτουργούν, αρχικά όλες στην ελάχιστη παραγωγή $P^{\min}(i)$ και στην συνέχεια στην μέγιστη $P^{\max}(i)$. Με τις δύο αυτές περιπτώσεις ουσιαστικά ορίζεται το μέγιστο και το ελάχιστο του συνολικού κέρδους. Το μέγιστο συνολικό κέρδος δίνεται όταν όλες οι μονάδες λειτουργούν στο $P^{\min}(i)$. Το σενάριο όμως αυτό, δεν είναι καθόλου ρεαλιστικό, αφού δεν είναι λογική η λειτουργία όλων των μονάδων στο ελάχιστο για όλες τις ώρες προγραμματισμού της παραγωγής. Στόχος, ήταν η εύρεση της προβλεπόμενης τιμής ισχύος εξόδου, που θα έδινε συνολικό κέρδος πλησιέστερο στο μέγιστο πληρώντας ένα ρεαλιστικό σενάριο.

Μετά από την εξέταση πολλών πιθανών σεναρίων, η βέλτιστη προβλεπόμενη τιμή της ισχύος εξόδου επιλέχθηκέ να είναι για κάθε μονάδα το κλάσμα:

$$\frac{P^{\min}(i)+P^{\max}(i)}{2} \tag{3.15}$$

δηλαδή το άθροισμα της ελάχιστης με την μέγιστη παραγωγή διαιρεμένο με το 2. Η προτεινομένη μεθοδολογία επίλυσης της σχέσης (3.15) δοκιμάστηκε για ένα δίκτυο αποτελούμενο από 3 μονάδες και έδωσε απόκλιση της τάξεως του 8% στην τιμή του συνολικού κέρδους από την επίλυση του προβλήματος με την μη γραμμική προσέγγιση του. Όμως, επειδή ο διαθέσιμος solver του λογισμικού GAMS για την επίλυση μη γραμμικών προβλημάτων διατίθεται μόνο για περιορισμένη χρήση και δεν έδινε λύση μετά από έναν επιτρεπόμενο αριθμό μεταβλητών προς βελτιστοποίηση, ακολουθήθηκε η μεθοδολογία επίλυσης που παραπάνω παρουσιάστηκε.

Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως η απόκλιση αυτή εμφανίζεται μονό για την τιμή του συνολικού κέρδους. Οι υπόλοιπες τιμές των μεταβλητών, όπως για παράδειγμα της παραγόμενης ισχύος υπολογίζεται κανονικά για κάθε μονάδα και κάθε ώρα σύμφωνα με τους περιορισμούς της κάθε μονάδας.

3.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

[3.1] Narayana Prasad Padhy "Unit Commitment–A Bibliographical Survey," IEEE Transactions On Power Systemw, Vol.19 No.2, May 2004.

[3.2] Π. Γεωργιλάκης, "ΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ - ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΕΣ ΠΑΡΑΔΟΣΕΙΣ," Χανιά, Σεπτέμβριος 2006.

[3.3] Calvin J. S. Chan, "Development of a profit maximisation unit commitment program," UMIST, September 2000.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων που μελετήθηκαν για το πρόβλημα της ένταξης θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την μεγιστοποίηση του κέρδους. Αρχικά, επιλέχθηκε ένα μικρό δίκτυο αποτελούμενο από 10 μονάδες παραγωγής για τον προγραμματισμό 12 ωρών και υπολογίστηκε το συνολικό κέρδος που αποφέρει στην εταιρία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στην συνέχεια, δοκιμάστηκαν μεγαλύτερα δίκτυα και εξετάστηκαν τα αποτελέσματα αυτών για τον προγραμματισμό 24 ωρών.

Στο σημείο αυτό πρέπει να αναφερθεί ότι για τις περιπτώσεις που ο αριθμός των μονάδων παραγωγής ήταν πάνω από 10, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα του Πίνακα 4.1, μεταβάλλοντας αισθητά τα χαρακτηριστικά ορισμένων μονάδων. Επίσης, αναλόγως με τον αριθμό των μονάδων παραγωγής αυξανόταν και η τιμή της ζήτησης επιτυγχάνοντας έτσι ρεαλιστικά αποτελέσματα.

4.1.1 ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΤΩΝ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Στους παρακάτω πίνακες παραθέτονται τα δεδομένα των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας και την ζήτησης για την χρονική περίοδο των 24 ωρών.

Δείκτης μονάδας	P^{min} (MW)	P^{max} (MW)	R^{up} (MW/h)	R^{down} (MW/h)	***A*** (€/h)	***B*** (€/MWh)	***C*** (€/MW^{2}h)	***initial*** (h)	***D*** (€/h)	***E*** (€/h)	***CT*** (h)	***SD*** (€/h)
1	200	500	200	100	1000	16,19	0,00048	-1	150	60	1	35
2	150	500	200	100	500	10	0,002	-1	150	60	1	35
3	140	400	140	150	700	16,6	0,002	-1	75	35	2	40
4	150	400	160	150	680	16,5	0,00211	-2	75	35	2	25
5	120	330	130	80	450	19,7	0,00398	-2	65	25	3	30
6	130	330	130	75	370	22,26	0,00712	-3	65	25	3	20
7	90	280	100	90	480	27,74	0,00079	-3	70	35	4	50
8	90	280	110	85	660	25,92	0,00413	-4	70	35	4	15
9	35	150	40	35	665	27,27	0,00222	-5	85	40	6	40
10	35	150	40	25	670	27,79	0,00173	-6	85	40	6	35

Πίνακας 4.1: Δεδομένα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ώρα	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Ζήτηση(MW)	2500	2550	2600	2650	2700	2750	2800	2850	2900	2950	3000	3050
Τιμή(€/MWh)	8,00	9,80	12,40	15,00	25,50	31,80	31,40	31,00	36,02	42,51	47,36	52,20
Ώρα	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**	**19**	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
Ζήτηση(MW)	3100	3150	3200	3200	3150	3100	3000	2900	2800	2700	2600	2500
Τιμή(€/MWh)	52,00	46,70	43,90	41,10	35,50	30,30	25,85	21,40	17,00	10,50	11,75	13,00

Πίνακας 4.2: Ωριαίες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και ζήτησης.

4.2 ΔΙΚΤΥΟ 10 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 12 ΩΡΩΝ

Με βάση τα δεδομένα του Πινάκα 4.1 και επιλέγοντας τα δεδομένα των πρώτων 12 ωρών του Πίνακα 4.2 το κέρδος που αποφέρουν οι 10 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 12 πρώτων ωρών είναι 386.121€.

Στον Πίνακα 4.3 παρουσιάζεται το πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 10 μονάδων που έδωσε ο κώδικας βελτιστοποίησης του GAMS και στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζεται το αντίστοιχο πλάνο παραγωγής.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 4.3 είναι ότι από τις 10 συνολικά μονάδες παραγωγής του εξεταζόμενου δικτύου οι 8 βρίσκονται σε λειτουργία για κάποιο χρονικό διάστημα του προγραμματισμού των 12 ωρών, εκτός των μονάδων 9 και 10 οι οποίες δεν εντάσσονται καθόλου στο πρόγραμμα παραγωγής. Επιπλέον, παρατηρείται ότι τις 2 πρώτες ώρες καμία μονάδα παραγωγής δεν εντάσσεται στον προγραμματισμό.

Οι περισσότερες μονάδες παραγωγής εντάσσονται κατά την 5η ώρα και λειτουργούν μέχρι το τέλος των 12 ωρών όπου παρατηρείται αύξηση της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συνεπάγεται πως με την αύξηση της παραγωγής θα εμφανίζεται μεγαλύτερο κέρδος.

Μονάδα	**Ώρες**											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.3: Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 10 μονάδων για τις 12 ώρες.

Από τον Πίνακα 4.4 γίνεται εμφανή η σταδιακή αύξηση του ρυθμού παραγωγής μίας μονάδας (όριο αναρρίχησης κατά την εκκίνηση) από την χρονική περίοδο που αυτή εντάσσεται μέχρι να φτάσει στην μέγιστη τιμή παραγωγής της. Για παράδειγμα, η μονάδα 1 η οποία εντάσσεται την 4η ώρα δεν παράγει αμέσως το μέγιστο των 500MW, αλλά παράγει αρχικά 200MW, ενώ στην συνέχεια αν παραμείνει σε λειτουργία αυξάνει την παραγωγή της σταδιακά μέχρι να φτάσει στο μέγιστο όριο των 500MW.

Τέλος, στον Πίνακα 4.4 παρατηρείται, ότι οι μονάδες παράγουν τη μέγιστη ισχύ τους κατά τις ώρες όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή.

Επιπλέον, την $11^{η}$ ώρα η συνολική ισχύς εμφανίζεται να είναι ίση με 3000MW και παράλληλα υπάρχει πλήρης κάλυψη της απαιτούμενης ζήτησης.

Μονάδα	**Ώρες**											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	0	200	400	500	500	500	500	500	480	500
2	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500
3	0	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400
4	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400
5	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330
6	0	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330
7	0	0	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280
8	0	0	0	0	0	110	220	280	280	280	280	280
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.4: Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 10 μονάδων για τις 12 ώρες.

4.3 ΔΙΚΤΥΟ 10 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Και στην περίπτωση αυτή επιλέγονται οι 10 μονάδες παραγωγής της προηγούμενης ενότητας 4.2, μόνο που στο παρών σενάριο ο προγραμματισμός δεν γίνεται πλέον για 12 ώρες αλλά για 24.

Οι Πίνακες 4.5 και 4.6 παρουσιάζουν το πλάνο εκκίνησης/κράτησης και το πλάνο παραγωγής των 10 μονάδων για τις 24 ώρες προγραμματισμού, αντίστοιχα. Το κέρδος που αποφέρουν οι 10 μονάδες παραγωγής για τον χρονικό ορίζοντα των 24 ωρών είναι 722.089€. Από τους παρακάτω πίνακες παρατηρείται ότι οι περισσότερες μονάδες θέτονται σε λειτουργία από την $3^{η}$ ώρα μέχρι το τέλος του προγραμματισμού. Συγκεκριμένα η μονάδα παραγωγής 2 είναι σε λειτουργία και τις 24 ώρες, ενώ η μονάδα 10 δεν εντάσσεται καθόλου στο πρόγραμμα παραγωγής.

Τα αποτελέσματα της περίπτωσης αυτής είναι σχεδόν παρόμοια με αυτά του σεναρίου της ενότητας 4.2. Και στα δύο αυτά σενάρια, παρατηρείται η σχεδόν όμοια συμπεριφορά τόσο σε ό,τι αφορά την ένταξη/κράτηση των μονάδων, όσο και την παραγόμενη ισχύ που αυτές προσφέρουν.

Μονάδα	**Ώρες** 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
9	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Μονάδα	**Ώρες** 13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
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	0
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.5: Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 10 μονάδων για τις 24 ώρες.

Στο σενάριο αυτό επίσης, παρατηρείται η σταδιακή άνοδος της παραγόμενης ισχύος κάθε μονάδας από την στιγμή που αυτή εντάσσεται στο πρόγραμμα και θέτεται σε λειτουργία, καθώς και αντίστοιχα η σταδιακή μείωση της παραγωγής όταν αποφασίζεται να διακοπεί η λειτουργία της (κράτηση).

Τέλος, όσο αφορά τη ζήτηση στην συγκεκριμένη περίπτωση ενδιαφέρον παρουσιάζουν η $12^{η}$ και η $13^{η}$ ώρα, κατά τις οποίες η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας παραμένει σε υψηλές τιμές. Η παραγόμενη ισχύς των μονάδων παραγωγής και για τις 2 αυτές ώρες είναι πάρα πολύ κοντά στην πλήρη κάλυψη της ζήτησης (στα 2960MW με ζήτηση 3050 MW την $12^{η}$ ώρα και στα 3050MW με ζήτηση 3100MW την $13^{η}$).

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο, στο πρόβλημα της μεγιστοποίησης του κέρδους η εταιρία παραγωγής δεν ενδιαφέρεται για την πλήρη κάλυψη της ζήτησης, όταν η λειτουργία ορισμένων μονάδων παραγωγής από ένα όριο και μετά δεν τις αποφέρει κέρδη. Ο Πίνακας 4.6 παρουσιάζει όσα αναφέρονται παραπάνω.

	Ώρες											
Μονάδα	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500
2	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
3	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400
4	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400
5	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330
6	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330
7	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	280
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	220
9	0	0	0	0	0	0	40	80	70	35	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	Ώρες											
Μονάδα	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
2	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
3	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400
4	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0
5	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
6	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
7	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0	0	0
8	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.6: Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 10 μονάδων για τις 24 ώρες.

4.4 ΔΙΚΤΥΟ 40 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα δίκτυο 40 μονάδων παραγωγής και στην επόμενη για ένα δίκτυο αποτελούμενο από 80 μονάδες παραγωγής. Στις περιπτώσεις αυτές δοκιμάζεται ουσιαστικά η ισχύς του κώδικα και της προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης. Στα δύο αυτά δίκτυα, όπου ο αριθμός των μονάδων παραγωγής ήταν πάνω από 10, τα χαρακτηριστικά ορισμένων μονάδων διαφοροποιήθηκαν αισθητά. Επιπλέον, για την ορθότερη επίτευξη των εξαγόμενων αποτελεσμάτων, η τιμή της ζήτησης για κάθε ώρα αυξήθηκε. Συγκεκριμένα για την περίπτωση των 40 μονάδων παραγωγής η αρχική ζήτηση που δίνεται στον Πίνακα 4.2 πολλαπλασιάστηκε με 4 και για την περίπτωση των 80 μονάδων παραγωγής πολλαπλασιάστηκε με 8.

Στο σημείο αυτό θα αναλυθούν τα αποτελέσματα του δικτύου των 40 μονάδων παραγωγής. Το κέρδος που αποφέρουν αυτές, στον χρονικό ορίζοντα των 24 ωρών προγραμματισμού είναι 2.871.637€.

Οι Πίνακες 4.7 και 4.8 παρουσιάζουν το πλάνο εκκίνησης/κράτησης και το πλάνο παραγωγής των 40 μονάδων στις 24 ώρες προγραμματισμού, αντίστοιχα.

Μονάδα	Ώρες																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	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	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
14	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
15	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
24	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
34	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
35	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
36	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
37	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
39	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1		0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.7: Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 40 μονάδων για τις 24 ώρες.

Μονάδα	**Ώρες**																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	470	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
2	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
3	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
4	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0
5	0	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
6	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
7	0	0	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	110	220	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
9	0	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	150	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
12	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
13	0	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
14	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
15	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
16	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
22	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
23	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
24	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0
25	0	0	0		130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
26	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	110	220	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
29	0	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
32	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
33	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0
34	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0
35	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
36	0	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
37	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	280	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0
38	0	0	0	0	110	220	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
39	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.8: Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 40 μονάδων για τις 24 ώρες.

Στην περίπτωση αυτή ενδιαφέρον πέρα από τους πίνακες της ένταξης/κράτησης των μονάδων παραγωγής και του πλάνου παραγωγής παρουσιάζει η ζήτηση. Ειδικότερα, την 12^{η} ώρα κατά την οποία εμφανίζεται η μεγαλύτερη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας στα 52,20€/MWh, η ζήτηση βρίσκεται στα 12200MW και καλύπτεται πλήρως από τις 35 μονάδες που βρίσκονται σε λειτουργία.

4.5 ΔΙΚΤΥΟ 80 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Το κέρδος που αποφέρουν οι 80 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 24 ωρών προγραμματισμού είναι 5.719.940€.

Οι Πίνακες 4.9 και 4.10 παρουσιάζουν το πλάνο εκκίνησης/κράτησης και το πλάνο παραγωγής των 80 μονάδων στις 24 ώρες προγραμματισμού, αντίστοιχα.

Μονάδα	**Ώρες**																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	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	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
14	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
15	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
24	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
25	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
29	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
33	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
34	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
35	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
36	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
37	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0
38	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
39	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

συνέχεια για τις μονάδες 41–80 στην επόμενη σελίδα...

Μονάδα	**Ώρες**																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
41	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
42	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
43	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
44	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
45	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
46	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
49	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
52	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
53	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
54	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
55	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
56	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
62	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
63	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
64	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
67	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
72	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
73	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
74	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
75	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
76	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
77	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
78	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
79	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας 4.9: Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 80 μονάδων για τις 24 ώρες.

Μονάδα	Ώρες																						
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
1	0	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
2	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
3	0	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
4	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
5	0	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
6	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
7	0	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	110	220	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
9	0	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	150	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
12	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
13	0	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
14	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
15	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
16	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	80	120	140	105	70	35	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
21	0	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
22	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
23	0	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
24	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
25	0	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
26	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	110	220	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
29	0	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	150	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
32	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
33	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0
34	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0
35	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
36	0	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
37	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	280	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0
38	0	0	0	110	220	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
39	0	0	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0	0	0	0	0
40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

συνέχεια για τις μονάδες 41–80 στην επόμενη σελίδα...

Μονάδα	**Ώρες**																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
41	0	0	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
42	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
43	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0
44	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
45	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
46	0	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0	0
48	0	0	0	0	110	220	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
49	0	0	0	0	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0	0	0
50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
51	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
52	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
53	0	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
54	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
55	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
56	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
57	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0	0
58	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
59	0	0	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0	0	0	0	0
60	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
61	0	0	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
62	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
63	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0
64	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
66	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
67	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	280	280	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0	0
68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
69	0	0	0	0	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0	0	0	0	0
70	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
71	0	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
72	0	0	200	400	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500
73	0	0	0	140	280	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
74	0	0	0	160	320	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	400	300	150	0	0	0	0
75	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
76	0	0	0	130	260	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330	330
77	0	0	0	0	0	0	100	200	280	280	280	280	280	280	280	270	180	90	0	0	0	0	0	0
78	0	0	0	110	220	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280	280
79	0	0	0	0	0	40	80	120	150	150	150	150	150	150	150	150	140	105	70	35	0	0	0	0
80	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

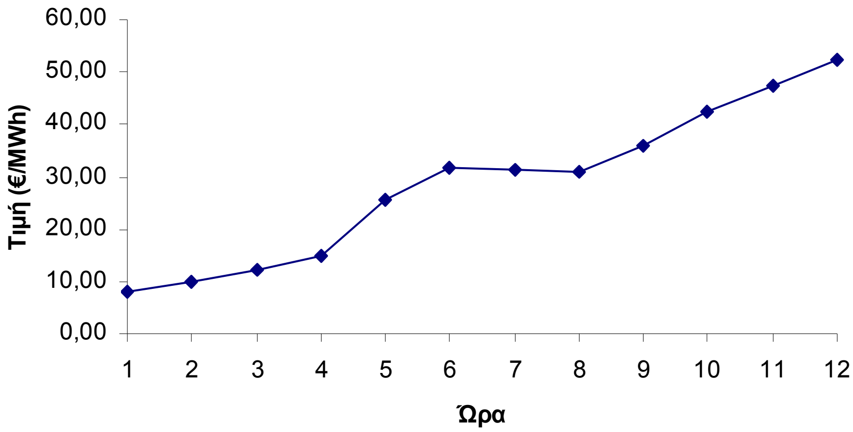
Πίνακας 4.9: Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 80 μονάδων για τις 24 ώρες.

Από τους παραπάνω πίνακες παρατηρείται ότι, για καμία από τις 24 ώρες του προγραμματισμού η ζήτηση δεν καλύπτεται πλήρως. Η συνολική παραγόμενη ισχύς την πλησιάζει αρκετά, κυρίως στις ώρες αιχμής όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή. Οι λόγοι είναι οι ίδιοι μ΄ αυτούς που έχουν αναφερθεί στις προηγούμενες ενότητες.

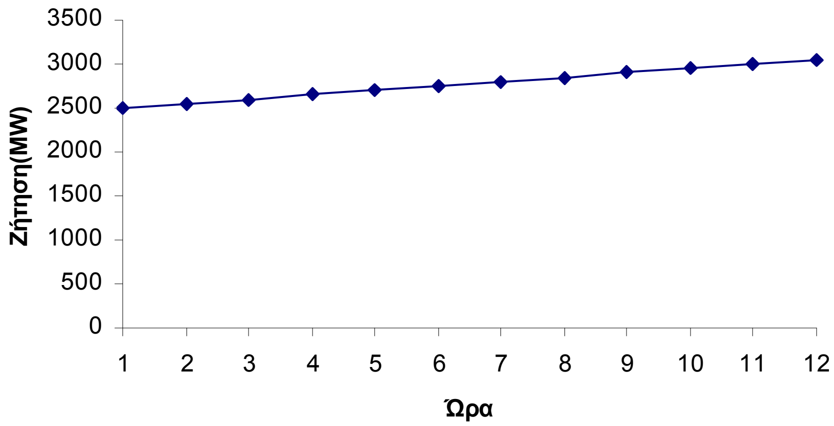
4.6 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση των αποτελεσμάτων και εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα από τα αποτελέσματα των περιπτώσεων που μελετήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

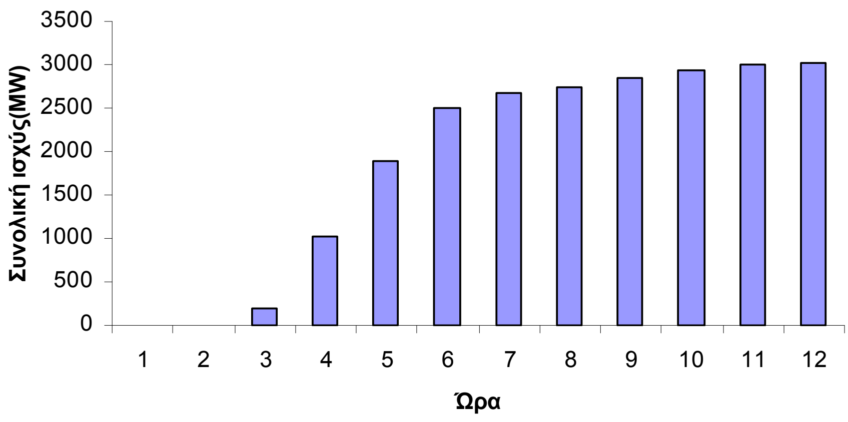
Στα παρακάτω γραφήματα δίνονται η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, η τιμή της ζήτησης και η συνολική παραγόμενη ισχύς των μονάδων παραγωγής για κάθε ώρα. Τα γραφήματα αυτά αφορούν το δίκτυο των 10 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 12 ωρών, όπως αυτό μελετήθηκε στην ενότητα 4.2.



Γράφημα 4.1: Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα.



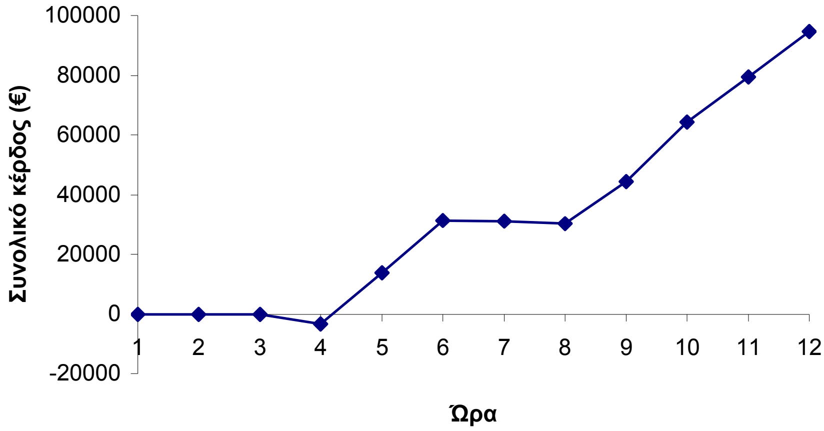
Γράφημα 4.2: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα.



Γράφημα 4.3: Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα.

Από τα παραπάνω γίνεται εμφανές πως για τις ώρες κατά τις οποίες η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή, ώρες 9 έως 12 (Γράφημα 4.1), παρατηρείται άνοδος της ζήτησης (Γράφημα 4.2). Επίσης, ανοδική πορεία εμφανίζει και η συνολική παραγόμενη ισχύς των μονάδων, η οποία φτάνει στο μέγιστο την $12^{η}$ ώρα. Αυτό συμβαίνει, γιατί τις ώρες όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας έχει τις μεγαλύτερες τιμές, την εταιρία παραγωγής συμφέρει η αύξηση της συνολικής παραγόμενης ισχύος μέχρι την κάλυψη της ζήτησης, αυξάνοντας έτσι τα κέρδη της. Επιπλέον, από το Γράφημα 4.3 για τις 2 πρώτες ώρες, κατά τις οποίες η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή, στο σύστημα δεν υπάρχει παραγόμενη ισχύς.

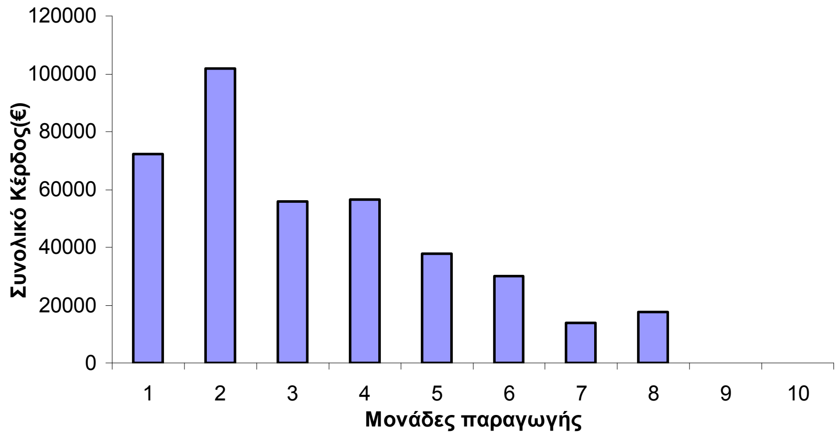
Στο Γράφημα 4.4 παρουσιάζεται το συνολικό κέρδος για κάθε ώρα. Για την $3^{η}$ και την $4^{η}$ ώρα υπάρχει μία ζημία και θα έπρεπε να αποφασιστεί η κράτηση των μονάδων παραγωγής. Όμως αυτό δεν συμβαίνει, γιατί η ζημία αντισταθμίζεται τις επόμενες ώρες από το παραγόμενο κέρδος.



Γράφημα 4.4: Συνολικό κέρδος για κάθε ώρα.

Γράφημα 4.5: Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε μονάδα.

Η συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε μονάδα παραγωγής για τις 12 ώρες του προγραμματισμού δίνεται στο Γράφημα 4.5. Εύκολα παρατηρείται πως η μονάδα 2 παράγει την μεγαλύτερη ισχύ στα 4600MW. Επιπλέον, η μονάδα 2 είναι σε λειτουργία τις περισσότερες ώρες. Τέλος, οι μονάδες 3 έως 6 παράγουν σχεδόν την ίδια ισχύ, ενώ οι μονάδες 9 και 10 δεν παράγουν καθόλου ισχύ, διότι βρίσκονται εκτός λειτουργίας και για τις 12 ώρες.

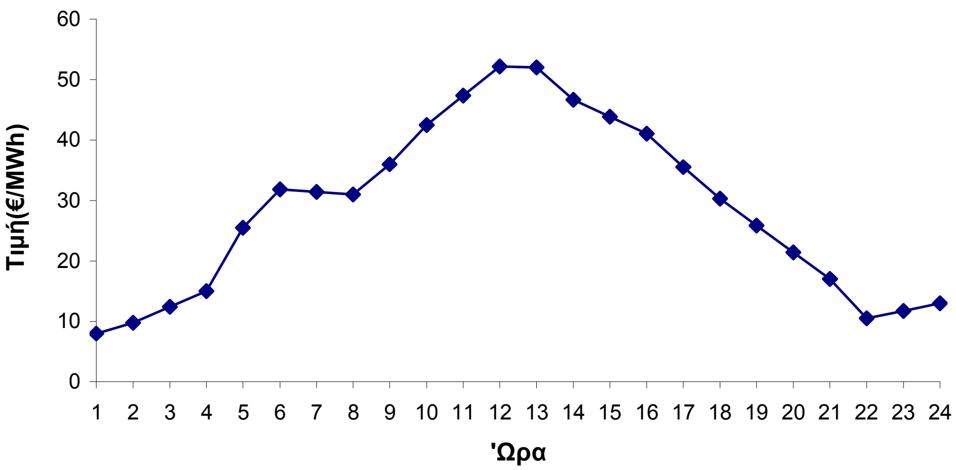


Γράφημα 4.6: Συνολικό κέρδος για κάθε μονάδα.

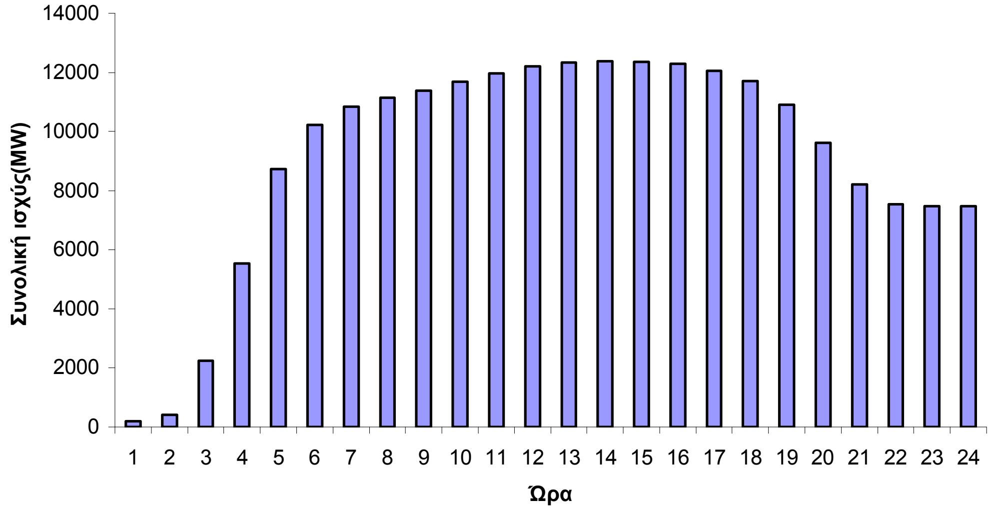
Το συνολικό κέρδος για κάθε μονάδα παραγωγής παρουσιάζεται στο Γράφημα 4.6. Σε σύγκριση με το Γράφημα 4.5 παρατηρείται πώς το μεγαλύτερο κέρδος το προσφέρει η μονάδα 2 η οποία παράγει και την μεγαλύτερη ισχύ, όπως παραπάνω αναφέρθηκε. Τέλος, οι μονάδες 9 και 10 δεν προσφέρουν καθόλου κέρδος, διότι δεν εντάσσονται καθόλου στο πλάνο του προγραμματισμού.

Από τα γραφήματα που παρουσιάζονται παραπάνω και ειδικότερα τα Γραφήματα 4.1, 4.3 και 4.4 εξάγονται και ορισμένα ακόμη χρήσιμα συμπεράσματα τα οποία καταδεικνύουν τον τρόπο λειτουργίας της εταιρίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ειδικότερα, όταν ξεκινά η άνοδος της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, εμφανίζεται μία ανάλογη αύξηση του ρυθμού της παραγόμενης συνολικής ισχύος. Οι δύο αυτοί παράγοντες σε συνδυασμό, δίνουν τον αντίστοιχο ρυθμό αύξησης του συνολικού κέρδους, όπως παρατηρείται στο Γράφημα 4.4.

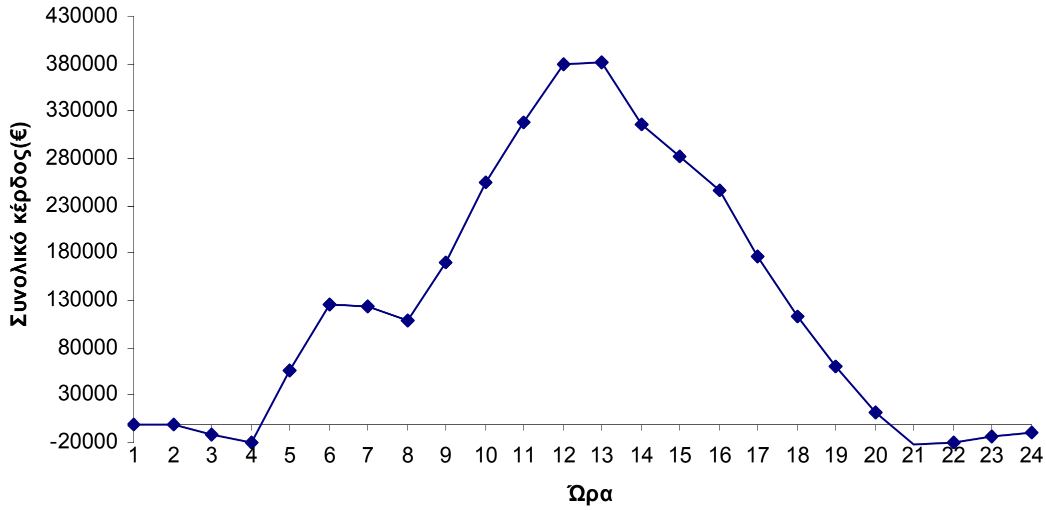
Ενδεικτικά, παρουσιάζονται και τα γραφήματα για την περίπτωση του δικτύου των 40 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 24 ωρών, όπως αυτό μελετήθηκε στην ενότητα 4.4.



Γράφημα 4.7: Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα.



Γράφημα 4.8: Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα.



Γράφημα 4.9: Συνολικό κέρδος για κάθε ώρα.

Από τα παραπάνω γραφήματα μπορούν να εξαχθούν αντίστοιχα συμπεράσματα με αυτά της πρώτης περίπτωσης. Εδώ όμως, παρατηρείται καλύτερα η συμπεριφορά της παραγομένης ισχύος και του συνολικού κέρδους σε συνάρτηση με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία δίνεται και για τις 24 ώρες. Αναλυτικότερα, τα γραφήματα αποκαλύπτουν μια σταδιακή αύξηση τόσο στην παραγόμενη ισχύ όσο και στο συνολικό κέρδος. Αυτό εμφανίζεται από τις πρώτες ώρες, όπου η ζήτηση είναι χαμηλή, και άρα η τιμή πώλησης βρίσκεται σε χαμηλά επίπεδα, μέχρι τις ώρες όπου η ζήτηση και η τιμή πώλησης βρίσκονται στις μέγιστες τιμές τους. Αντίστοιχα, παρατηρείται και η σταδιακή πτώση της παραγόμενης ισχύος του συστήματος και του συνολικού κέρδους όταν η τιμή πώλησης αρχίζει να μειώνεται.

Όπως και προηγουμένως, έτσι και για το δίκτυο των 40 μανάδων παραγωγής, για τις ώρες με χαμηλή τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας η γραφική παράσταση του κέρδους παρουσιάζει ζημία. Όμως, η ζημία αυτή αντισταθμίζεται στις επόμενες ώρες από το συνολικό κέρδος που επιτυγχάνεται.

Ένας επιπλέον λόγος που συμβάλει σ΄ αυτό είναι ότι κάθε μονάδα παραγωγής έχει περιορισμούς αναρρίχησης κατά την εκκίνηση της και μείωσης εξόδου κατά την κράτηση της. Δηλαδή, μία μονάδα παραγωγής δεν μπορεί από την πρώτη ώρα ένταξής της να παράγει το μέγιστο της παραγωγής της και δεν μπορεί αντίστοιχα σε περίπτωση κράτησης της να μειώσει την παραγωγή της στο μηδέν μέσα σε μία ώρα. Οπότε εμφανίζεται για ορισμένες ώρες του προγραμματισμού να υπάρχει ελάχιστη ζημία στην εταιρία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρόμοια συμπεράσματα με αυτά που παρουσιάστηκαν στα παραπάνω γραφήματα, μπορούν να εξαχθούν και για την περίπτωση του δικτύου των 80 μονάδων παραγωγής, δηλαδή όσο αφορά την συνολική παραγόμενη ισχύ του δικτύου και το συνολικό κέρδος για κάθε ώρα του προγραμματισμού.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ–ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε η επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη μεγιστοποίηση του κέρδους σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας με το λογισμικό GAMS.

Το πρόβλημα της ένταξης μονάδων με βάση το κέρδος διατυπώνεται ως εξής: για μία εταιρία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με N μονάδες παραγωγής, και για δοσμένη χρονοσειρά τιμών πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτείται να προσδιοριστούν οι χρόνοι εκκίνησης και σταματήματος και η ισχύς εξόδου όλων των μονάδων παραγωγής κάθε χρονική στιγμή t στη διάρκεια μίας χρονικής περιόδου προγραμματισμού T, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί το συνολικό κέρδος της ηλεκτρικής εταιρίας, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς των μονάδων.

Το πρόβλημα της ένταξης μονάδων με βάση το κέρδος είναι ένα δύσκολο πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού, μη γραμμικό και μεγάλης κλίμακας. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού αναπτύχθηκε κώδικας στο λογισμικό GAMS, το οποίο είναι λογισμικό για επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Το λογισμικό που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων για τη μεγιστοποίηση του κέρδους σε τέσσερα διαφορετικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με διαφορετικό πλήθος μονάδων παραγωγής και για διαφορετικές ώρες προγραμματισμού. Τα κύρια συμπεράσματα ήταν τα ακόλουθα:

1. Οι μονάδες παράγουν το μέγιστο κέρδος τις ώρες όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλή και παράγουν τη μέγιστη ισχύ τους.
2. Οι μονάδες είναι κρατημένες κατά τις ώρες όπου η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή.
3. Όσο αυξάνει το πλήθος των περιορισμών λειτουργίας των μονάδων τόσο μειώνονται τα κέρδη τους.
4. Η ένταξη μίας μονάδας μπορεί να έχει ζημία κατά την ώρα ένταξης που όμως μπορεί να αντισταθμιστεί γρήγορα τις επόμενες ώρες.
5. Για δοσμένες μονάδες και συνθήκες της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι μονάδες με τα χαμηλότερα οριακά κόστη (σε σχέση με τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας), με χαμηλά κόστη εκκίνησης, και με υψηλή ικανότητα παραγωγής δίνουν τα μεγαλύτερα συνολικά κέρδη.

Ορισμένες εφικτές μελλοντικές επεκτάσεις της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι οι ακόλουθες:

1. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θεωρήθηκε ότι οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν αμιγώς θερμικές και το πρόβλημα επιλύθηκε για τους περιορισμούς που διέπουν τις μονάδες αυτές. Σε μία μελλοντική επέκταση θα μπορούσαν να ληφθούν υπόψη και άλλου είδους μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όπως υδροηλεκτρικές μονάδες και να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί λειτουργίας των μονάδων αυτών.

2. Θα μπορούσε να εισαχθεί η στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Πρέπει πάντα να υπάρχει ικανή στρεφόμενη εφεδρεία στο σύστημα ώστε η απώλεια μίας μονάδας να μην προκαλεί μεγάλη πτώση συχνότητας.

3. Θα μπορούσε να επιλυόταν το πρόβλημα της ένταξης μονάδων με βάση το κέρδος με τον αλγόριθμο επίλυσης του GAMS για το μη γραμμικό μικτό ακέραιο προγραμματισμό και να γινόταν σύγκριση των αποτελεσμάτων με αυτά της προτεινόμενης μεθοδολογίας επίλυσης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.