



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης**

**Τομέας Συστημάτων Παραγωγής**

**Εργαστήριο Ηλεκτρικών Κυκλωμάτων και Ηλεκτρονικής**

**ΕΝΤΑΞΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ  
ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΓΙΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ  
ΜΕ ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**του**

**ΚΟΝΔΥΛΗ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ**

**ΓΕΩΡΓΙΑΚΗΣ ΠΑΥΛΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής**

**ΧΑΝΙΑ**

**ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2008**

*Στον πατέρα μου Μιχαήλ  
την μητέρα μου Αναστασία  
και τον αδελφό μου Γιάννη*

## 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. Γεωργιάκη 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. Γεωργιάκη 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. Νικόλο 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 και το αδελφό 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.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου που ήταν πάντα κοντά μου και στα εύκολα και στα δύσκολα.

## **ABSTRACT**

This thesis presents the solution of the cost minimization unit commitment problem using GAMS software. The electric power production units that are studied are thermal. For a given time period of  $T$  hours, the load forecast has to be met by  $N$  thermal units with known (given) technical specifications. It is requested to calculate, for each hour, the production schedule of thermal units, so as to minimise the total production cost at the time period of these  $T$  hours. 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 cost minimization unit commitment problem. Results for four case studies are presented and discussed. Moreover, the results of the proposed method are compared with the results of other methods.

## **KEYWORDS**

Unit Commitment, Cost Minimization, GAMS Software, Generation Scheduling, Power System Operation.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάζει την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τη ελαχιστοποίηση του κόστους με το λογισμικό GAMS. Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που μελετώνται είναι θερμικοί. Το πρόβλημα της ένταξης θερμικών μονάδων με βάση το κόστος διατυπώνεται ως εξής: Για μια δοσμένη χρονική περίοδο  $T$  ωρών, είναι για κάθε ώρα γνωστή η πρόβλεψη φορτίου:  $\{P_D(t), t = 1, 2, \dots, T\}$ . Κάθε ώρα υπάρχουν  $N$  διαθέσιμες θερμικές μονάδες παραγωγής, των οποίων είναι γνωστά (δεδομένα) τα τεχνικά χαρακτηριστικά. Ζητείται να υπολογιστεί, για κάθε ώρα, το πρόγραμμα ένταξης των θερμικών μονάδων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος κατά τη χρονική περίοδο αυτών των  $T$  ωρών. 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. Ακόμα γίνεται έλεγχος των αποκλίσεων των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθόδου με τα αποτελέσματα άλλων μεθόδων.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Ένταξη Μονάδων, Ελαχιστοποίηση Κόστους, Λογισμικό GAMS, Προγραμματισμός Παραγωγής, Λειτουργία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας.

# ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

|       |                                          |    |
|-------|------------------------------------------|----|
| 1.1   | Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας           | 1  |
| 1.2   | Σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας   | 2  |
| 1.2.1 | Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί                   | 2  |
| 1.2.2 | Θερμικοί σταθμοί με ΜΕΚ                  | 8  |
| 1.2.3 | Θερμικοί σταθμοί με αεροστροβίλους       | 9  |
| 1.2.4 | Υδροηλεκτρικοί σταθμοί                   | 10 |
| 1.2.5 | Ηλιακά πάρκα                             | 13 |
| 1.2.6 | Αιολικά πάρκα                            | 14 |
| 1.3   | Ένταξη μονάδων παραγωγής                 | 14 |
| 1.4   | Η ένταξη μονάδων παραγωγής στην Ελλάδα   | 15 |
| 1.5   | Απελευθέρωση αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας | 15 |
| 1.6   | Αντικείμενο της εργασίας                 | 16 |
| 1.7   | Περιεχόμενο της εργασίας                 | 17 |
| 1.8   | Βιβλιογραφία                             | 17 |

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS

|          |                                                        |    |
|----------|--------------------------------------------------------|----|
| 2.1      | Εισαγωγή                                               | 19 |
| 2.2      | Χαρακτηριστικά γλώσσας προγραμματισμού GAMS            | 19 |
| 2.2.1    | Η εντολή Sets                                          | 21 |
| 2.2.2    | Η εντολή Scalars                                       | 22 |
| 2.2.3    | Οι εντολές Parameters και Tables                       | 22 |
| 2.2.4    | Κανόνες μαθηματικών παραστάσεων κατά την ανάθεση τιμών | 23 |
| 2.2.5    | Η εντολή Variables                                     | 24 |
| 2.2.6    | Η εντολή Equations                                     | 25 |
| 2.2.7    | Η εντολή Model                                         | 26 |
| 2.2.8    | Η εντολή Solve                                         | 27 |
| 2.2.9    | Η εντολή Display και τα αρχεία εξόδου του GAMS         | 27 |
| 2.2.10   | Δηλώσεις υπό συνθήκη και επαναληπτικές δομές           | 27 |
| 2.2.11   | Χρήση του GDX εργαλείου στο GAMS                       | 28 |
| 2.2.11.1 | GDXXRW                                                 | 29 |
| 2.2.11.2 | GDX εντολές ανάγνωσης και εγγραφής                     | 29 |
| 2.2.11.3 | Χρήσιμα σύμβολα για την χρήση του GDXXRW               | 30 |
| 2.3      | Συμπεράσματα                                           | 31 |
| 2.4      | Βιβλιογραφία                                           | 31 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΚΕΡΔΟΣ**

|         |                                             |    |
|---------|---------------------------------------------|----|
| 3.1     | Εισαγωγή                                    | 33 |
| 3.2     | Μαθηματικό μοντέλο                          | 33 |
| 3.2.1   | Περιγραφή                                   | 33 |
| 3.2.2   | Συμβολισμοί                                 | 33 |
| 3.2.3   | Αντικειμενική Συνάρτηση                     | 34 |
| 3.2.4   | Περιορισμοί                                 | 35 |
| 3.2.4.1 | Λειτουργικά όρια μονάδων                    | 35 |
| 3.2.4.2 | Ελάχιστος χρόνος ένταξης μονάδας            | 35 |
| 3.2.4.3 | Ελάχιστος χρόνος κράτησης μονάδας           | 35 |
| 3.2.4.4 | Περιορισμός αναρρίχησης κατά την εκκίνηση   | 35 |
| 3.2.4.5 | Περιορισμός μείωσης εξόδου κατά την κράτηση | 36 |
| 3.2.4.6 | Περιορισμοί κατάστασης μονάδων              | 36 |
| 3.2.4.7 | Αρχικές συνθήκες                            | 36 |
| 3.2.4.8 | Περιορισμός της ζήτησης                     | 36 |
| 3.3     | Μαθηματικές μέθοδοι επίλυσης                | 36 |
| 3.3.1   | Μέθοδος πλήρους απαρίθμησης                 | 37 |
| 3.3.2   | Μέθοδος δυναμικού προγραμματισμού           | 37 |
| 3.3.3   | Μέθοδος διακλάδωσης και φραγής              | 37 |
| 3.4     | Τεχνητές μέθοδοι βελτιστοποίησης            | 37 |
| 3.4.1   | Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα                    | 38 |
| 3.4.2   | Γενετικοί Αλγόριθμοι                        | 38 |
| 3.4.3   | Μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης            | 38 |
| 3.5     | Προτεινόμενη επίλυση με λογισμικό GAMS      | 39 |
| 3.5.1   | Baron Solver                                | 39 |
| 3.5.2   | Μεθοδολογία                                 | 39 |
| 3.6     | Βιβλιογραφία                                | 42 |

### **ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΗΘΗΚΑΝ**

|       |                                               |    |
|-------|-----------------------------------------------|----|
| 4.1   | Εισαγωγή                                      | 43 |
| 4.2   | Επίλυση με εναλλαγές περιορισμών              | 43 |
| 4.2.1 | Σενάριο 1: Επίλυση με 2 περιορισμούς          | 44 |
| 4.2.2 | Σενάριο 2: Επίλυση με 4 περιορισμούς          | 44 |
| 4.2.3 | Σενάριο 3: Επίλυση με 4 περιορισμούς          | 45 |
| 4.2.4 | Σενάριο 4: Επίλυση με όλους τους περιορισμούς | 46 |

|       |                                                                                 |    |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.2.5 | Συμπεράσματα                                                                    | 46 |
| 4.3   | Προγραμματισμός με πλήρη την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς      | 47 |
| 4.3.1 | Δίκτυο 3 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 20 ωρών                       | 47 |
| 4.3.2 | Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων                                              | 49 |
| 4.3.3 | Δίκτυο 5 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 6 ωρών                        | 51 |
| 4.3.4 | Συμπεράσματα                                                                    | 53 |
| 4.4   | Προγραμματισμός με ‘χαλάρωση’ της αντικειμενικής συνάρτησης και των περιορισμών | 53 |
| 4.4.1 | Έλεγχος αποκλίσεων                                                              | 53 |
| 4.4.2 | Δίκτυο 10 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 24 ωρών                      | 55 |
| 4.Α   | Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων                                              | 57 |
| 4.4.3 | Δίκτυο 20 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 24 ωρών                      | 59 |
| 4.Β   | Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων                                              | 61 |
| 4.4.4 | Δίκτυο 60 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 24 ωρών                      | 63 |
| 4.Γ   | Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων                                              | 66 |
| 4.4.5 | Δίκτυο 100 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 24 ωρών                     | 69 |
| 4.Δ   | Γραφική αναπαράσταση αποτελεσμάτων                                              | 74 |
| 4.4.6 | Συμπεράσματα                                                                    | 76 |
| 4.5   | Σύγκριση μεθόδου                                                                | 76 |
| 4.5.1 | Δίκτυο 10 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 24 ωρών                      | 77 |
| 4.5.2 | Δίκτυο 20 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 24 ωρών                      | 79 |
| 4.5.3 | Δίκτυο 60 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 24 ωρών                      | 81 |
| 4.5.4 | Δίκτυο 100 μονάδων παραγωγής για τον προγραμματισμό 24 ωρών                     | 84 |
| 4.5.5 | Συμπεράσματα                                                                    | 90 |
| 4.6   | Βιβλιογραφία                                                                    | 91 |

|                    |                              |           |
|--------------------|------------------------------|-----------|
| <b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5:</b> | <b>ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ</b> | <b>93</b> |
|--------------------|------------------------------|-----------|



### 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 ελαχιστοποίηση του κόστους. 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 την ελαχιστοποίηση του κόστους, 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 ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται σε κατηγορίες, ανάλογα με το είδος της πρωτογενούς ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική, το είδος του καυσίμου και την τεχνολογία. Έτσι υπάρχουν:

1. Οι Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί
2. Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί
3. Οι θερμικοί σταθμοί με μηχανές εσωτερικής καύσης
4. Οι θερμικοί σταθμοί με αεριοστροβίλους
5. Οι πυρηνικοί σταθμοί
6. Τα ηλιακά πάρκα
7. Τα αιολικά πάρκα

### 1.2.1 Ατμοηλεκτρικοί Σταθμοί

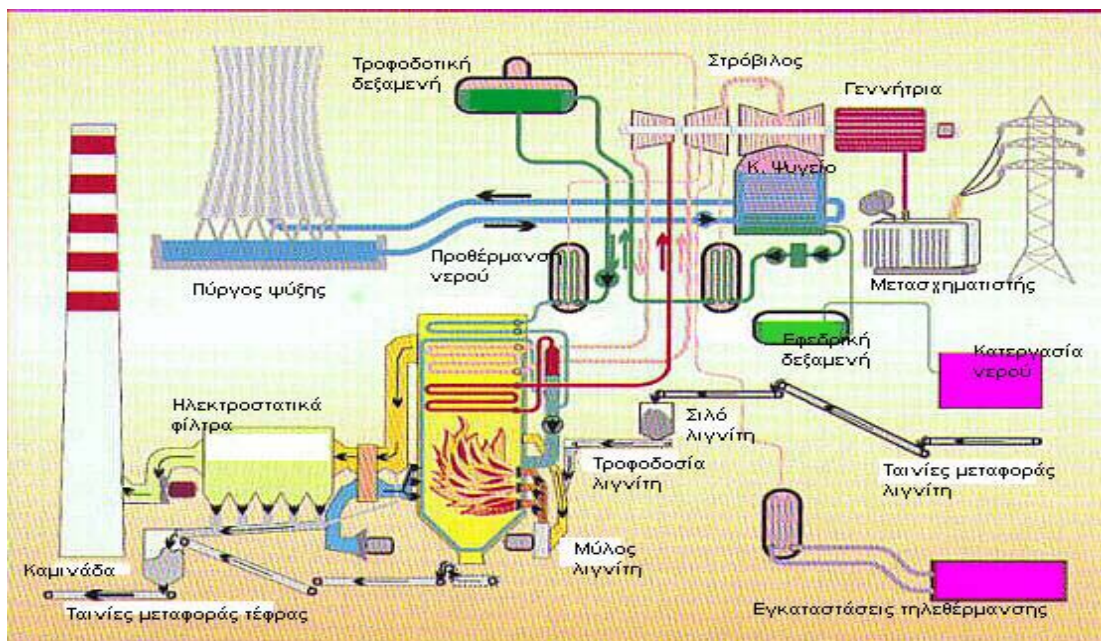
Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής είναι οι πιο οικονομικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες. Στο Σχήμα 1.2.1 φαίνεται το διάγραμμα ενός ατμοηλεκτρικού σταθμού το οποίο σε πολύ γενικές γραμμές μπορεί να περιγραφεί με τον εξής τρόπο : Σε έναν πολύ μεγάλο λέβητα θερμαίνεται νερό με την θερμότητα που παράγεται από την καύση του καυσίμου (πχ. λιγνίτης) και ατμοποιείται. Ο παραγόμενος ατμός οδηγείται στον ατμοστροβίλο και τον αναγκάζει να περιστραφεί. Στον άξονα του

στροβίλου συνδέεται ο άξονας της ηλεκτρικής γεννήτριας που περιστρέφεται και παράγει ηλεκτρική ενέργεια.

### Περιγραφή λειτουργίας λιγνιτικής μονάδας

Το καύσιμο (λιγνίτης χαμηλής θερμογόνου δύναμης), οδηγείται με ταινιοδρόμους στο σιλό των μύλων, απ' όπου με ειδικό εξοπλισμό (τροφοδότες) καταλήγει στους μύλους όπου αλέθεται. Ο λιγνίτης υπό μορφή σκόνης οδηγείται για καύση σε ειδικούς καυστήρες οι οποίοι θερμαίνουν τους ατμολέβητες για ατμοποίηση του νερού.

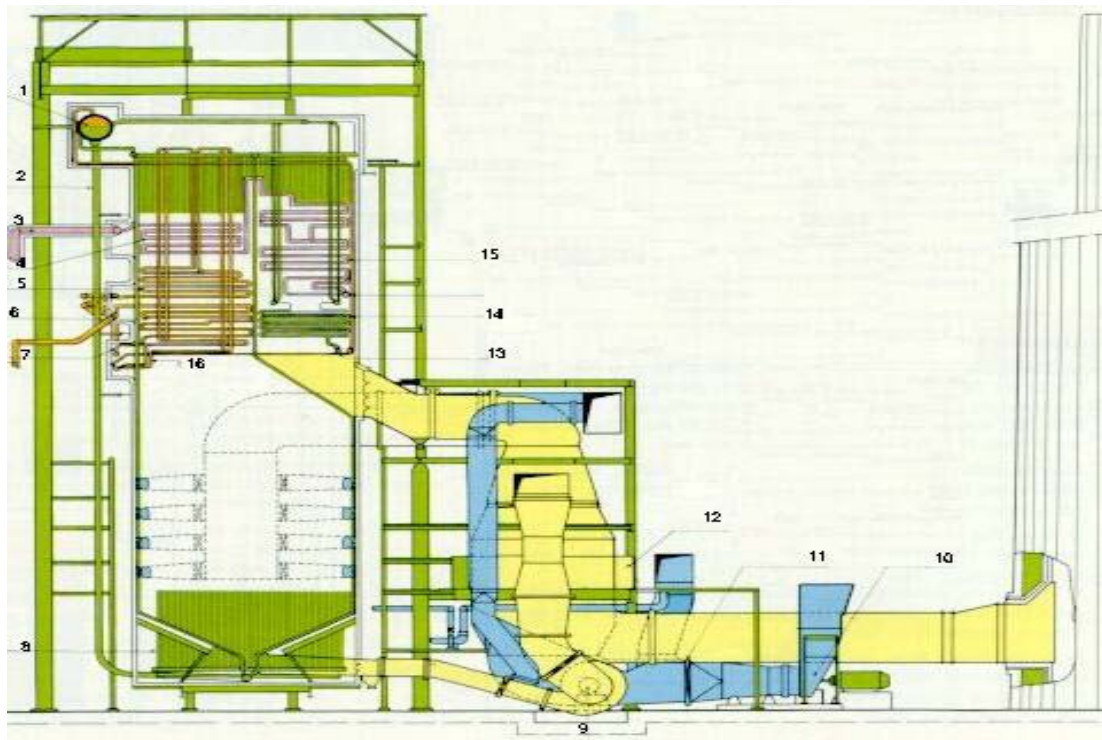
Ο ατμολέβητας που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού ύδατος λειτουργεί σε 540 βαθμούς Κελσίου και πίεσης 170 ατμοσφαιρών (υπέρθερμος ατμός). Ο ατμός αυτός



**Σχήμα 1.1:** Διάγραμμα Ατμοηλεκτρικού Σταθμού

οδηγείται με ατμαγωγούς στο στρόβιλο τον οποίο και στρέφει με 3.000 στροφές το λεπτό. Ο ατμός μετά την εκτόνωσή του στο στρόβιλο, συμπυκνώνεται στο συμπυκνωτή και μέσω προθερμαντών νερού οδηγείται ξανά στο λέβητα για να συνεχίσει την ίδια διαδικασία. Ο ατμοστρόβιλος στρέφει τη γεννήτρια, η οποία παράγει ηλεκτρικό ρεύμα. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, μέσω του μετασχηματιστή ανύψωσης 20 kV/400 kV, καταλήγει στο Εθνικό δίκτυο διαμέσου των Κέντρων Υπερυψηλής Τάσης (KYT).

## Λέβητας



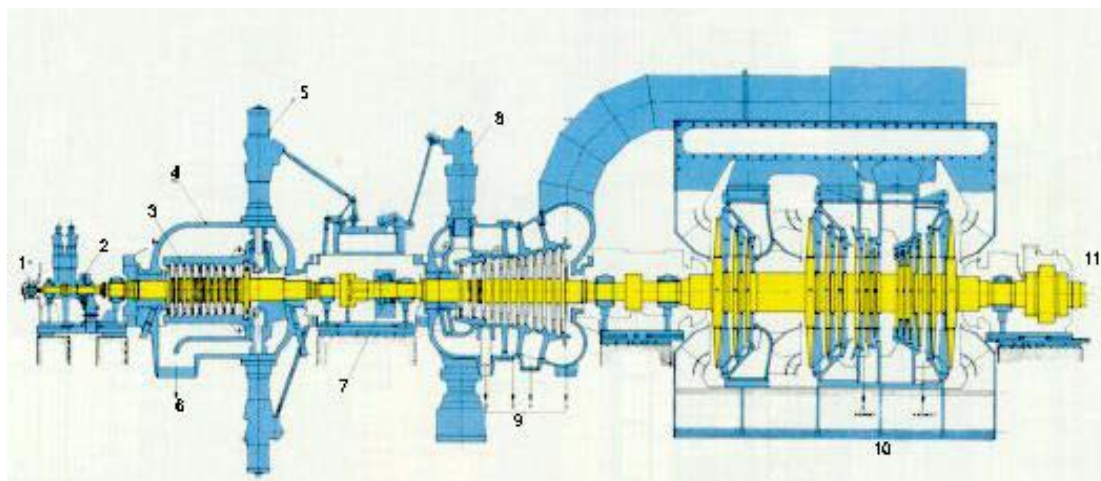
**Σχήμα 1.2:** Λέβητας ατμοηλεκτρικής μονάδας

1. Τύμπανο
2. Αυλοί καθόδου
3. Έξοδος ανάθερμου
4. Αναθερμαντής υψηλής θερμοκρασίας
5. Υπερ/ντής υψηλής θερμοκρασίας
6. Υπερ/ντής υψηλής θερμοκρασίας
7. Εξοδος υπερθερμού ατμού
8. Αυλοί ανόδου
9. Ανεμιστήρας ανακυκλοφορίας καυσαερίων
10. Ανεμιστήρες καταθλίψεως
11. Προθερμαντές αέρος δι' ατμού
12. Προθερμαντές αέρος δια καυσαερίων
13. Συλλέκτης εισόδου οικονομίας
14. Οικονομητήρας
15. Αναθερμαντής χαμηλής θερμοκρασίας
16. Υπερθερμαντής χαμηλής θερμοκρασίας

Είναι το τμήμα του εργοστασίου στο οποίο παράγεται ο ατμός με θέρμανση νερού. Υπάρχουν πολλοί τύποι λεβήτων αλλά στις ατμοηλεκτρικές μονάδες χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά υδραυλωτοί λέβητες, που αποτελούνται από μεγάλο αριθμό σωλήνων (που λέγονται αυλοί) που διαμορφώνονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε ανάμεσά τους

εξωτερικά να υπάρχει χώρος για την καύση του καυσίμου και στο εσωτερικό τους να περνά το νερό για να θερμαίνεται. Για την αύξηση της πόδοσης του λέβητα χρησιμοποιούνται τόσο οι προθερμαντές νερού όσο και οι υπερθερμαντές ατμού με την χρήση τη θερμότητας των καπναερίων και επαναθέρμανσης του ήδη χρησιμοποιηθέντος ατμού.

### Στρόβιλος



**Σχήμα 1.3:** Στρόβιλος ατμοηλεκτρικής μονάδας

1. Ρυθμιστής στροφών
2. Κύρια αντλία λίπανσης
3. Εσωτερικό κέλυφος
4. Εξωτερικό κέλυφος
5. Ρυθμιστικές δικλείδες υψηλής πίεσης
6. Απομάστευση βαθμίδα υψηλής πίεσης. Έξοδος βαθμίδα υψηλής πίεσης
7. Ωστικός τριβέας
8. Ρυθμιστικές δικλείδες μέσης πίεσης
9. Απομάστευση βαθμίδα μέσης πίεσης
10. Συμπυκνωτής στροβίλου. Βαθμίδα χαμηλής πίεσης
11. Προς γεννήτρια

Ο στρόβιλος που φαίνεται στο Σχήμα 1.3 είναι της Μονάδας Νο 2 του ΑΗΣ Λαυρίου και είναι κατασκευής του Γαλλικού οίκου ALSTHOM. Από τα χαρακτηριστικά της κατασκευής του αναφέρονται η ονομαστική του ισχύς 300 MW, η πίεση ατμού 151 kg/cm<sup>2</sup> και η θερμοκρασία ατμού 540 βαθμοί Κελσίου. Είναι στρόβιλος δράσης κυρίως, σταθερής πίεσης, περιλαμβάνει τρεις βαθμίδες, δηλαδή της βαθμίδα υψηλής, μέσης και χαμηλής πίεσης σε διάταξη TANDEM. Οι βαθμίδες υψηλής πίεσης και μέσης έχουν διπλά εξωτερικά κελύφη ενώ στη βαθμίδα χαμηλής πίεσης υπάρχουν τρεις έξοδοι για το ψυγείο. Ο ρυθμιστής στροφών χρησιμοποιεί ηλεκτρονικά και υδραυλικά συστήματα για τη ρύθμιση που δημιουργούν ιδανικές σχεδόν συνθήκες ρύθμισης. Η ονομαστική ισχύς της γεννήτριας είναι 353 MVA με ονομαστική τάση 21kV, συν φ =0,85. Ο δρομέας και ο στάτης είναι υδρογονόψυκτοι. Το τύλιγμα του στάτη ψύχεται πρόσθετα με νερό.

Στον στρόβιλο η ενέργεια του ατμού μετατρέπεται σε μηχανική. Αποτελείται από ένα κύριο άξονα όπου είναι στερεωμένα περιφερειακά σε ορισμένες θέσεις πτερύγια που λέγονται κινητά εφόσον κινούνται κατά την περιστροφή του άξονα. Μεταξύ τους υπάρχουν



είτε ακροφύσια ή άλλα πτερύγια σταθερά στερεωμένα στο κέλυφος της μηχανής. Ο ατμός προσπίπτοντας στα πτερύγια μετατρέπει την ενέργειά του σε κινητική περιστρέφοντας τον άξονα του στρόβιλου.

Ο στρόβιλος θα λειτουργεί ικανοποιητικά όταν περιστρέφεται με υψηλό αριθμό στροφών που είναι 3000rpm για την παραγωγή ρεύματος 50 Hz. Ο αριθμός στροφών πρέπει να είναι απόλυτα σταθερός και για τον λόγο αυτό συνοδεύεται από ένα ρυθμιστή στροφών που ρυθμίζει την παροχή ατμού.

### Ψυγείο

Ο ατμός που βγαίνει από τον στρόβιλο οδηγείται στο ψυγείο όπου ψύχεται και υγροποιείται και επιστρέφει στον λέβητα με την βοήθεια αντλιών. Ο ατμός περνά από σωλήνες γύρω από τους οποίους περνά το ψυκτικό υγρό και τους ψύχει. Είναι φανερό ότι χρειάζονται μεγάλες ποσότητες ψυκτικού υγρού που παρέχεται από την θάλασσα, λίμνες ή ποτάμια και σε περίπτωση που δεν υπάρχουν από μεγάλους πύργους ψύξης με μεγάλη επιφάνεια επαφής με τον αέρα.

### Βοηθητικές εγκαταστάσεις

Εκτός των παραπάνω τριών μηχανών υπάρχει και ένα πλήθος μικρότερων που εξυπηρετούν διάφορες εγκαταστάσεις όπως οι εγκαταστάσεις μεταφοράς καυσίμου, απομάκρυνσης τέφρας, καθαρισμού αλάτων, τροφοδοσίας νερού, λίπανσης κλπ



Σχήμα 1.4: Φίλτρο λιγνιτικής μονάδας

Ενα ηλεκτροστατικό φίλτρο (Η/Φ) αποτελείται από εναλλάξ διατεταγμένες πλάκες και πλαίσια συρμάτων στα οποία εφαρμόζεται ηλεκτρική τάση 40-85 kV, αναπτύσσοντας κατ' αυτό τον τρόπο ένα ισχυρότατο ηλεκτρικό πεδίο.

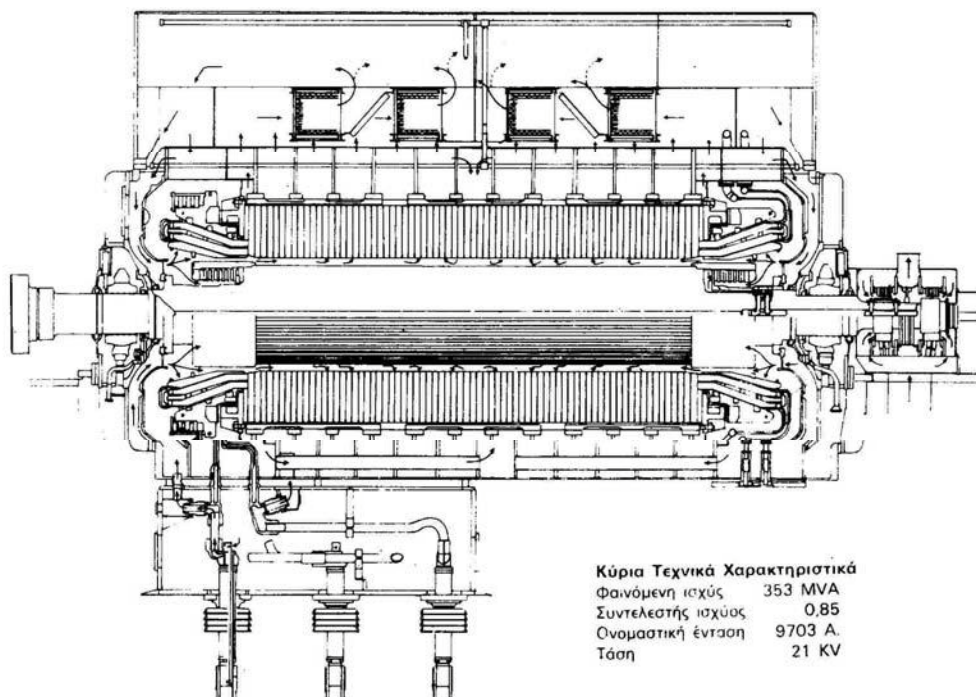
Η λειτουργία τους στηρίζεται στην ηλεκτρική φόρτιση των σωματιδίων της τέφρας λόγω του αναπτυσσόμενου ηλεκτρικού πεδίου και στη συνέχεια την συγκέντρωσή τους στις πλάκες των φίλτρων. Ανά τακτά χρονικά διαστήματα, μία μηχανική διάταξη σφυριών χτυπάει τις πλάκες τινάζοντας την τέφρα που λόγω της βαρύτητας συγκεντρώνεται στις χοάνες των φίλτρων, ενώ στη συνέχεια, με την βοήθεια ρεύματος αέρα, μεταφέρεται στα σιλό της τέφρας.

Η απόσυρση της τέφρας από τα σιλό, γίνεται μέσω ταινιοδρόμων σε ειδικούς χώρους των ορυχείων, αποθέσεις, που κατά κανόνα είναι παλιά χρησιμοποιημένα ορυχεία, πετυχαίνοντας με αυτόν το τρόπο την ανάπλαση του εδάφους των εξαντλημένων ορυχείων.

## Στροβιλογεννήτρια

Οι γεννήτριες των ατμοηλεκτρικών σταθμών είναι ειδικής μορφής με μεγάλου μήκους άξονα, μικρής σχετικά διαμέτρου επαγωγικό τύμπανο δρομέα και μικρού αριθμού πόλων, συνήθως δύο. Η διέγερση τροφοδοτείται από συνεχές ρεύμα που παράγει η διεγέρτρια συνεχούς ρεύματος που συνδέεται στον ίδιο άξονα. Η παραγόμενη τάση είναι συνήθως 15 KV και οδηγείται στους μετασχηματιστές όπου ανυψώνεται η τάση μέχρις ότου εξισωθεί με την τάση του δικτύου μεταφοράς.

ΤΟΜΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ ΑΗΣ ΚΑΡΔΙΑΣ



Σχήμα 1.5: Τομή στροβιλογεννήτριας

## Όργανα

Σε κάθε σταθμό υπάρχουν πολλά όργανα αυτοματισμού και μετρήσεων όπως αυτόματοι ρυθμιστές στροφών στροβίλου, ρυθμιστές ρεύματος διέγερσης για σταθεροποίηση της τάσης, αυτόματοι διακόπτες προστασίας από βραχυκυκλώματα και υπερφορτίσεις, αυτόματοι ηλεκτρονόμοι για την τροφοδοσία αντλιών νερού, ανεμιστήρων, αντλιών λίπανσης κλπ

Συνήθως σε κάθε ατμοηλεκτρικό σταθμό υπάρχει μιά αίθουσα ελέγχου από όπου γίνονται μετρήσεις και χειρισμοί από μακριά για την ρύθμιση όλων των μεταβλητών που είναι απαραίτητο. Βασική αρχή για την λειτουργία κάθε τέτοιου σταθμού είναι να μην γίνονται ούτε και να επιτρέπεται να γίνονται απότομες μεταβολές τιμών ορισμένων μεγεθών διότι αυτό πιθανόν να καταστρέψει την εγκατάσταση (πχ. πιθανή αιτία ατυχήματος Τσέρνομπιλ μετά από αστοχία πειράματος).

Κάθε ατμοηλεκτρική μονάδα καταναλώνει περίπου το 10% της ενέργειας που παράγει για δικές της ανάγκες και για τον λόγο αυτό υπάρχει ένας δικός της υποσταθμός.

Ο βαθμός απόδοσης των ατμοηλεκτρικών μονάδων είναι περίπου 30% και οι απώλειες συγκεντρώνονται κυρίως στον λέβητα ( περίπου 16%), στο ψυγείο (περίπου 54%) και ελάχιστες είναι στην γεννήτρια ( περίπου 1%).

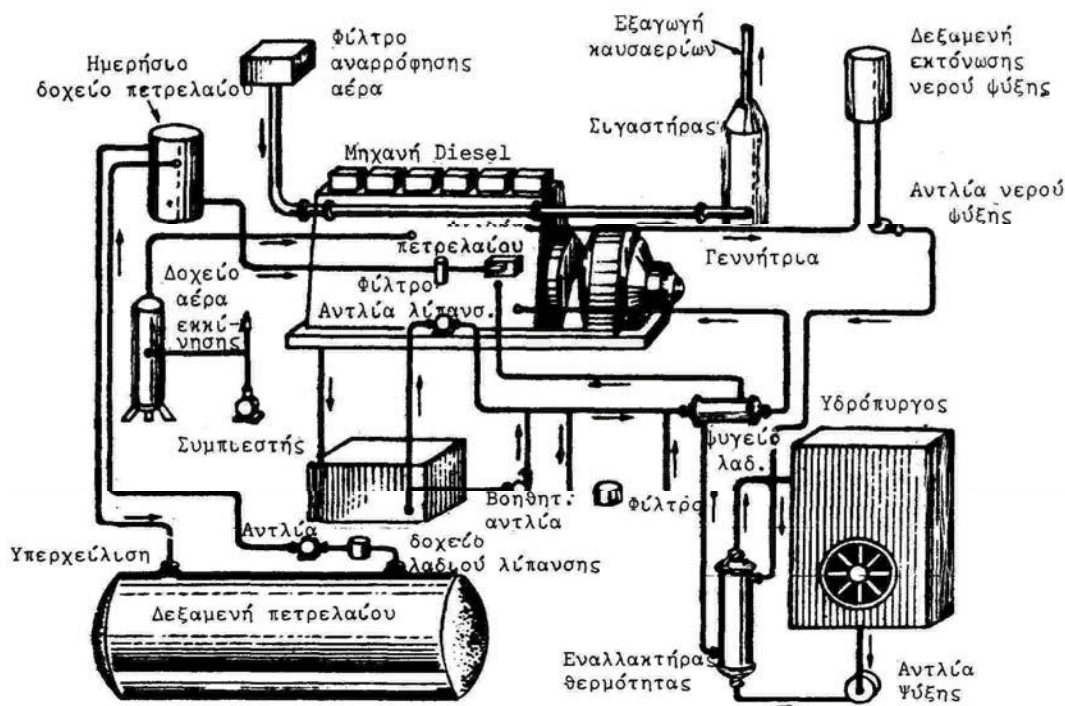
Για την τροφοδοσία των βοηθητικών κυκλωμάτων σε περίπτωση ανάγκης υπάρχουν συστοιχίες συσσωρευτών. [1.8]

### 1.2.2 Θερμικοί σταθμοί με ΜΕΚ

Οι αυτόνομοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούν μηχανές εσωτερικής καύσης Diesel και βρίσκονται συνήθως σε πολλά νησιά της χώρας μας. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούνται διότι οι αεριοστρόβιλοι είναι ασύμφοροι για μικρές ισχύς πχ της τάξης των μερικών MW.

Οι ΜΕΚ ονομάζονται έτσι διότι η καύση του καυσίμου γίνεται μέσα σε αυτές ενώ στους ατμοστρόβιλους γίνεται έξω από αυτούς (στον λέβητα). Τα βασικά πλεονεκτήματα των μηχανών Diesel ως προς τις ατμοκίνητες είναι

1. Οι ΜΕΚ είναι ελαφρότερες για την ίδια ισχύ
2. Μπαίνουν σε λειτουργία και φορτίζονται αμέσως
3. Δεν έχουν πολύπλοκες εγκαταστάσεις
4. Έχουν καλύτερο βαθμό απόδοσης σε μικρές και μέσες ισχύς (ως 5 MW)
5. Χρειάζονται λιγότερο χώρο για τις εγκαταστάσεις
6. Λειτουργούν με λίγο προσωπικό



Σχήμα 1.6: Μονάδα παραγωγής που κινείται με μηχανή Diesel.



Τα βασικά μειονεκτήματα είναι :

1. Χρειάζονται συχνά συντήρηση και ειδικευμένο προσωπικό
2. Παθαίνουν συχνά βλάβες

Οι μηχανές diesel έχουν καλό βαθμό απόδοσης όταν λειτουργούν στα 75 ως 80 % της ονομαστικής ισχύος αλλά αυτός μειώνεται πολύ όταν λειτουργούν κάτω από το 50 % της ονομαστικής τους ισχύος. Οι σταθμοί με MEK συνήθως παράγουν ενέργεια με εναλλασσόμενο ρεύμα χαμηλής τάσης 220/380V και σπάνια σε τάση 15KV.

Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται σχηματικά μια μονάδα παραγωγής με μηχανή εσωτερικής καύσης [1.8]

### 1.2.3 Θερμικοί σταθμοί με αεριοστρόβιλους

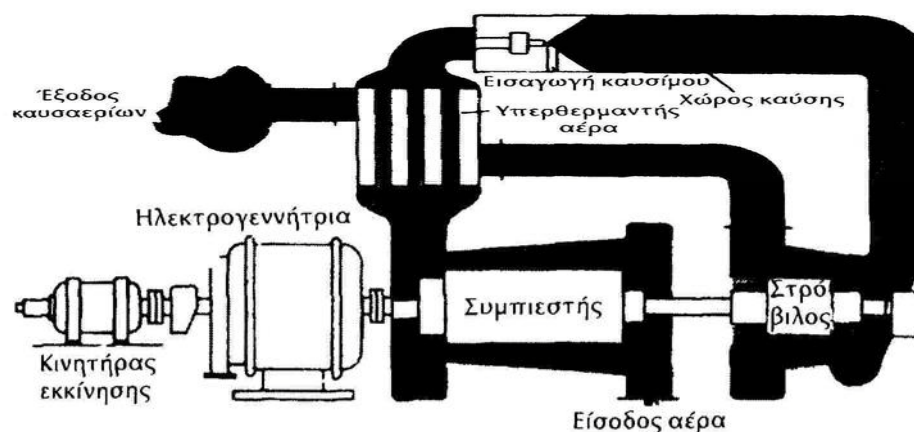
Οι αεριοστρόβιλοι είναι περιστροφικές μηχανές όπως οι ατμοστρόβιλοι και ανήκουν στις MEK. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται είναι ελαφρύ πετρέλαιο με απόσταξη αν και μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο βαρύτερο πετρέλαιο όσο και φυσικό αέριο. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες αεριοστρόβιλων (ανοικτού, κλειστού, μικτού κυκλώματος) αλλά σήμερα χρησιμοποιούνται σχεδόν αποκλειστικά οι αεριοστρόβιλοι ανοικτού κυκλώματος.

Τα βασικά πλεονεκτήματα των αεριοστρόβιλων σε σχέση με τους ατμοστρόβιλους είναι

1. Οι αεριοστρόβιλοι είναι απλούστερες μηχανές οπότε χρειάζονται λιγότερο και λιγότερα ειδικευόμενο προσωπικό και απλούστερη συντήρηση.
2. Δεν χρειάζονται νερό τροφοδοσίας
3. Ξεκινούν εύκολα και γρήγορα φτάνουν στην πλήρη φόρτιση με αποτέλεσμα να μπορούν να εξυπηρετήσουν αιχμές φορτίου.
4. Έχουν χαμηλές πιέσεις λειτουργίας

Τα βασικά μειονεκτήματα των αεριοστρόβιλων σε σχέση με τους ατμοστρόβιλους είναι

1. Τα καύσιμά τους είναι ακριβά
2. Έχουν μικρότερο βαθμό απόδοσης



Σχήμα 1.7: Παραστατικό διάγραμμα λειτουργίας αεριοστρόβιλου

Στο Σχήμα 1.7 φαίνεται το παραστατικό διάγραμμα λειτουργίας αεριοστροβίλου.

Ο αεριοστροβίλος απο πλείται από έναν κύριο άξονα που στην μιά του άκρη έχει τον κυρίως αεριοστροβίλο και στην άλλη έναν περιστροφικό συμπιεστή. Ο αεριοστροβίλος στρέφει τον άξονα, παρασύροντας τον συμπιεστή σε περιστροφή, συγχρόνως με το φορτίο που είναι η ηλεκτρογεννήτρια. Στον συμπιεστή εισάγεται ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος με την περιστροφή των περυγίων του συμπιεστή συμπιέζεται και θερμαίνεται. Βγαίνοντας από τον συμπιεστή ο αέρας μπαίνει στον θάλαμο καύσης, όπου κατά ένα μέρος του ανακατεύεται με τα καυσάερια, κατεβάζει την θερμοκρασία τους και το μίγμα εκτονώνεται στις διαδοχικές βαθμίδες του στροβίλου προκαλώντας την περιστροφή τους. Στην εκκίνηση το όλο σύστημα χρειάζεται εξωτερική επέμβαση που πραγματοποιείται με ηλεκτροκινητήρα που παραμένει συνδεδεμένος μέχρι να αποκτήσει ο αεριοστροβίλος ορισμένο αριθμό στροφών και να αυτοσυντηρείται.

Σε σύγκριση με τις μηχανές Diesel ο αεριοστροβίλος έχει τα εξής πλεονεκτήματα

1. Δεν έχει τμήματα που εκτελού παλινδρομικές κινήσεις με αποτέλεσμα απλούστερη κατασκευή και ελάχιστες μηχανικές απώλειες
2. Δεν παρουσιάζονται προβλήματα ζυγοστάθμισης και έδρης
3. Η συντήρηση είναι απλούστερη και φθηνότερη
4. Δεν χρειάζεται νερό ψύξης
5. Δεν υπάρχουν μεγάλες πιέσεις
6. Η λειτουργία είναι πιο ομαλή και αθόρυβη

Υπάρχουν όμως και ένα σοβαρό μειονέκτημα που είναι ο μικρός βαθμός απόδοσης της τάξης του 20% που μπορεί να αυξηθεί στο 35% με πρόσθετες βελτιώσεις που όμως αυξάνουν σοβαρά την πολυπλοκότητα και τις απαιτήσεις.

#### 1.2.4 Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

Το αρχικό κόστος ενός υδροηλεκτρικού σταθμού είναι μεγάλο και οι τεχνικές δυσκολίες πάρα πολλές. Οι βασικές δαπάνες είναι οι εξής

1. Οι απαλλοτριώσεις που συνήθως δεν είναι μεγάλο ποσό
2. Τα κτίρια, οι λίμνες, τα φράγματα και οι υδαταγωγοί με κόστος πάνω από το 50% του συνολικού
3. Οι υδροστροβίλοι και οι γεννήτριες αποτελούν σημαντική δαπάνη
4. Οι δρόμοι, γέφυρες, σιδηροτροχιές μεγάλου κόστους λόγω συνήθως δύσβατων περιοχών
5. Μεταφορά μηχανών και υλικών

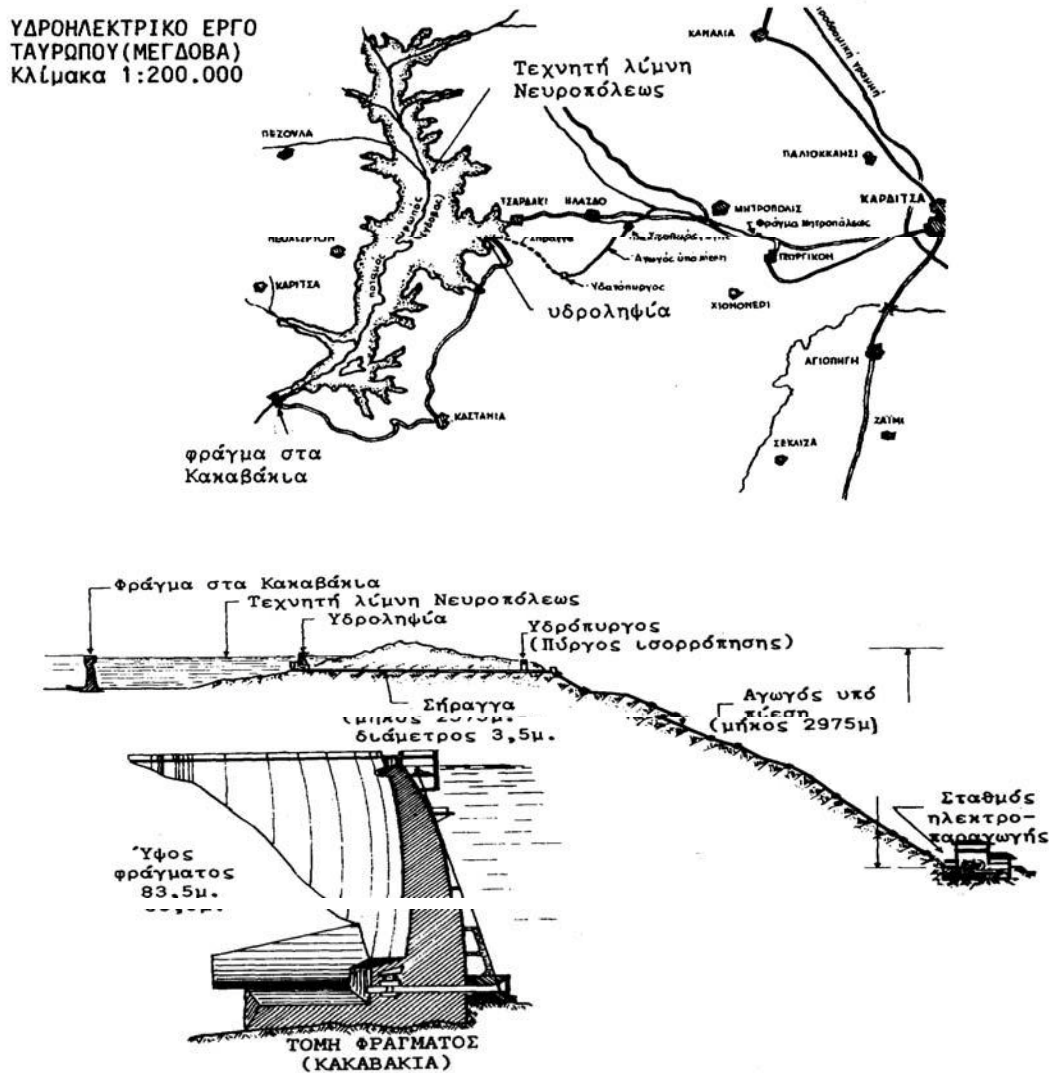
Σαν τυπική περίπτωση ενός υδροηλεκτρικού έργου στο Σχήμα 18 φαίνεται το υδροηλεκτρικό έργο του Ταυρωπού.

Τα φράγματα μπορεί να είναι χωμάτινα, λίθινα και με οπλισμένο σκυρόδεμα. Στα σημεία υδροληψίας υπάρχουν φίλτρα για να παίρνεται καθαρό νερό. Ο πύργος ισορροπίας δίνει σταθερότητα στη λειτουργία του σταθμού εκτονώνοντας τις πιέσεις σε περιπτώσεις απότομων μεταβολών.

Μετά την συμπλήρωση του έργου (σε 2 ως 5 χρόνια) το κόστος λειτουργίας είναι ασήμαντο και συνήθως η λειτουργία του σταθμού συνδυάζεται και με άρδευση αγροτικών εκτάσεων. Σε ορισμένες περιπτώσεις το νερό αντλείται για να ξαναχρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις κάλυψης μεγάλων αιχμών φορτίου.

Οι υδατοπτώσεις, ανάλογα με το ύψος πτώσης διακρίνονται σε χαμηλές (ύψος πτώσης μέχρι 25 μέτρα), μέσες (από 25 ως 100 μέτρα) και υψηλές (πάνω από 100 μέτρα).

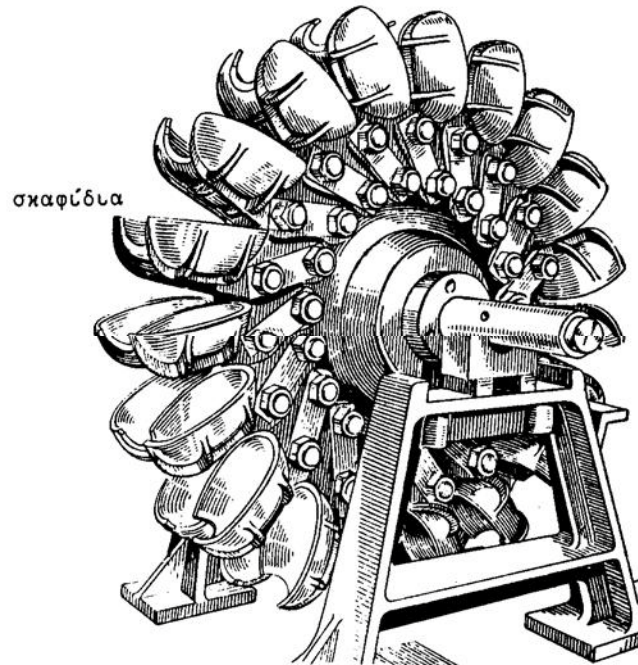
Για την μετατροπή της κινητικής ενέργειας του νερού σε ηλεκτρική χρησιμοποιούνται οι υδροστρόβιλοι που διακρίνονται σε δύο κατηγορίες τους υδροστρόβιλους δράσης (ή Pelton) και αντίδρασης (Francis ή Kaplan).



Σχήμα 1.8: Υδροηλεκτρικό έργο Ταυρωπού

Στους υδροστρόβιλους δράσης το νερό οδηγείται σε σταθερά πτερύγια ή ακροφύσια όπου μετατρέπεται όλη η ενέργειά του σε κινητική. Στη συνέχεια το νερό χτυπά πάνω στα κινητά πτερύγια που είναι τοποθετημένα στην περιφέρεια ενός τροχού ο οποίος έτσι περιστρέφεται. Ένας τέτοιος τροχός φαίνεται στο Σχήμα 1.9. Οι υδροστρόβιλοι τύπου Pelton χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει μεγάλο ύψος πτώσης (πάνω από 100 μέτρα) και μικρή παροχή νερού. Ο βαθμός απόδοσης κυμαίνεται από 80 ως 90% για μικρές και μεγάλες ισχύς αντίστοιχα.

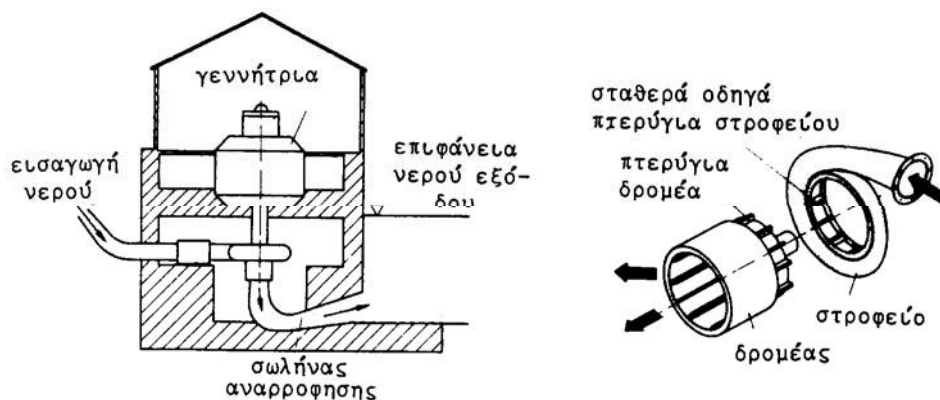
Στους υδροστρόβιλους αντίδρασης μόνο ένα μέρος της δυναμικής ενέργειας του νερού μετατρέπεται σε κινητική ενώ το υπόλοιπο παραμένει με μορφή δυναμικής ενέργειας ή πίεσης. Για τον λόγο αυτό οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης μπορούν να εργάζονται ακόμα και όταν το νερό ρέει ελεύθερα αλλά και όταν κατευθύνεται σε δεξαμενή που βρίσκεται σε μεγαλύτερο ύψος από τον υδροστρόβιλο.



Σχήμα 1.9: Τροχός υδροστρόβιλου Pelton.

Οι υδροστρόβιλοι αντίδρασης διακρίνονται στους ελικοφόρους (όπως ο Kaplan) και στους μη ελικοφόρους (όπως ο Francis). Συνήθως κατασκευάζονται με κατακόρυφο άξονα σε αντίθεση με τους υδροστρόβιλους δράσης που κατασκευάζονται με οριζόντιο άξονα.

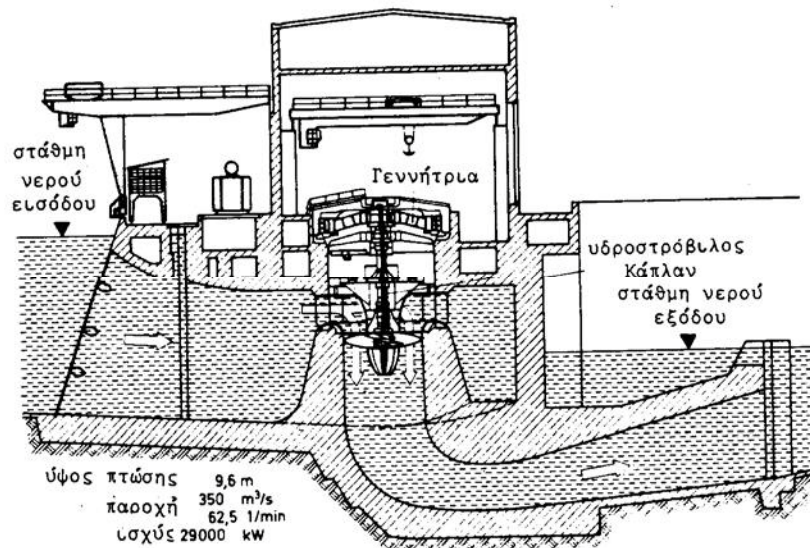
Οι υδροστρόβιλοι Francis χρησιμοποιούνται σε υδατοπτώσεις μέσου ύψους (από 60 ως 600 μέτρα) και μέσης παροχής όπως είναι οι περισσότερες της χώρας μας (πχ. Λάδωνας, Καστράκι, Κρεμαστά). Ένα σχηματικό διάγραμμα υδροστρόβιλου Francis φαίνεται στο Σχήμα 1.10.



Σχήμα 1.10: Υδροστρόβιλος Francis



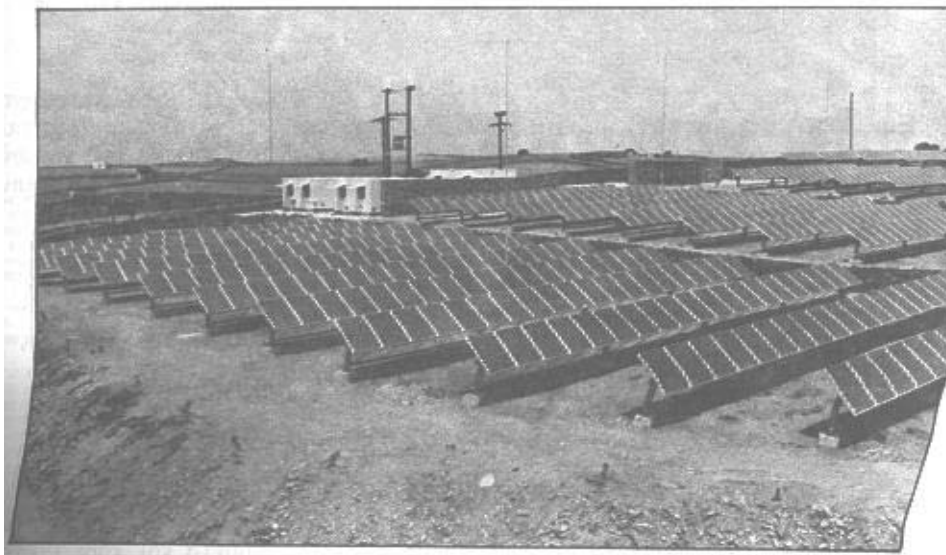
Οι υδροστρόβιλοι Kaplan χρησιμοποιούνται σε υδατοπτώσεις μικρού ύψους (από 2 ως 60 μέτρα) και μεγάλης παροχής νερού. Δεν χρησιμοποιούνται στη χώρα μας διότι δεν υπάρχουν μεγάλες παροχές νερού. Ένα σχηματικό διάγραμμα υδροηλεκτρικού σταθμού με υδροστρόβιλο Kaplan φαίνεται στο Σχήμα 1.11. [1.8]



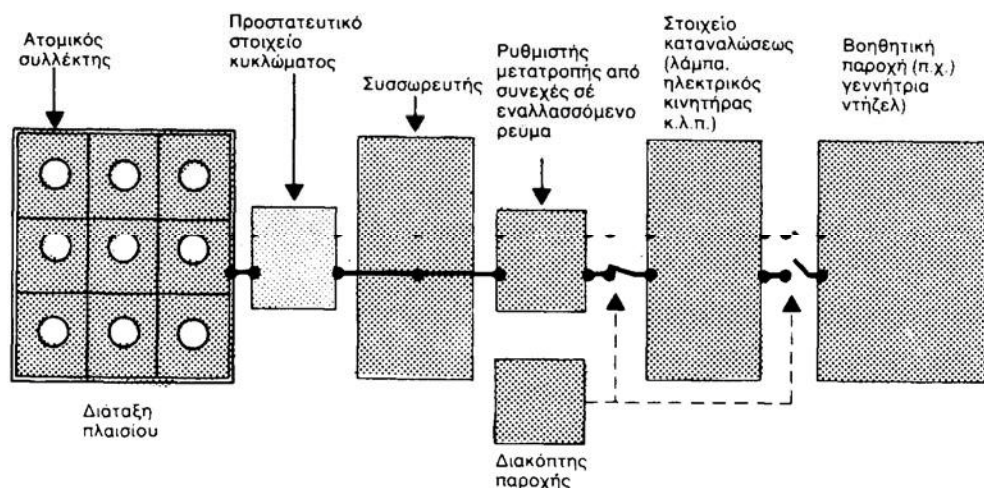
Σχήμα 1.11: Υδροστρόβιλος Kaplan

### 1.2.5 Ηλιακά Πάρκα

Τα ηλιακά πάρκα αποτελούνται από συστοιχίες ηλιακών συλλεκτών με φωτοβολταϊκά στοιχεία, όπως αυτές του Σχήματος 1.12, οι οποίες παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα με την μορφή συνεχούς τάσης. Κατά κανόνα το παραγόμενο ρεύμα φορτίζει συσσωρευτές ή η τάση των οποίων μέσω αντιστροφes μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη για να χρησιμοποιηθεί είτε τοπικά ή να διανεμηθεί μέσω δικτύου διανομής. Συνήθως παράλληλα με το ηλιακό πάρκο υπάρχουν και άλλες συμβατικές πηγές ηλεκτρικής ενέργειας όπως οι σταθμοί παραγωγής με γεννήτριες που κινούνται από μηχανές εσωτερικής καύσεως ή αεριοστρόβιλους. Ένα γενικό διάγραμμα ενός τυπικού μικτού ηλεκτρικού συστήματος με φωτοβολταϊκά στοιχεία φαίνεται στο Σχήμα 1.13.



Σχήμα 1.12: Φωτοβολταϊκό πάρκο



**Σχήμα 1.13:** Σχηματική παράσταση μικτού ηλεκτρικού συστήματος

### 1.2.6 Αιολικά Πάρκα

Τα αιολικά πάρκα αποτελούνται από πολλές συστοιχίες ανεμογεννητριών που εκμεταλλεύονται την αιολική ενέργεια που υπάρχει σε αρκετές περιοχές με ικανοποιητικές ταχύτητες ανέμου. Η ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια αλλά ούτε η τιμή της παραγόμενης τάσης ούτε η συχνότητα είναι σταθερές διότι εξαρτώνται από την ταχύτητα του ανέμου. Έτσι, ενδιαμέσο βήμα είναι η μετατροπή της παραγόμενης τάσης σε συνεχή μέσω ανορθωτή και η φόρτιση συσσωρευτών σε αυτόνομα συστήματα ή η μετατροπή της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση μέσω αντιστροφέα και η σύνδεσή της με το υπάρχον δίκτυο καταναλωτών ή η χρήση ασύγχρονης γεννήτριας και η άμεση σύζευξή της με το δίκτυο.[1.8]

## 1.3 ΕΝΤΑΞΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Ένα από τα κύρια αντικείμενα όταν ελέγχουμε μεγάλα συστήματα παραγωγής ενέργειας, είναι να κάνουμε την καλύτερη χρήση των διαθέσιμων πηγών μας. Για να το καταφέρουμε αυτό χρειαζόμαστε έναν αξιόλογο σχεδιασμό. Μια ωριαία βάση, προϋποθέτει τον ντετερμινισμό της εξαγόμενης παραγωγής από κάθε συγκεκριμένη μονάδα του συστήματος παραγωγής με σκοπό να ικανοποιηθεί η απαιτούμενη ζήτηση που μας έχει δοθεί. Στις περισσότερες περιπτώσεις η αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής. Η μεγαλύτερη εισφορά στο κόστος παραγωγής είναι η κατανάλωση καύσιμης ύλης. Άλλοι παράγοντες που συνεισφέρουν είναι το κόστος λειτουργίας και το κόστος συντήρησης. Τα τελευταία χρόνια, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες άρχισαν να συνεισφέρουν με μεγαλύτερο βάρος και οικονομική επιβάρυνση σε ρυπαντικά αέρια, όπως το  $\text{CO}_2$ . Όταν η παραγωγή από ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας έχει σχεδιαστεί υπάρχουν δύο πολύπλοκοι παράγοντες:

- Η ζήτηση δεν είναι συνεχής κατά την διάρκεια της ημέρας
- Οι μονάδες δεν μπορούν να παράγουν συνεχόμενα από το μηδέν στην μέγιστη χωρητικότητα. Επίσης, η ελάχιστη παραγωγή είναι οριοθετημένη από μια μη μηδενική τιμή.

Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι μονάδες σε ένα δοσμένο σύστημα παραγωγής ενέργειας να μην είναι συνέχεια ανοιχτές για να εξοικονομούν κόστος αυτές πρέπει να ανοίγουν και να κλείνουν σε εξάρτηση με την ζήτηση κάθε χρονικού διαστήματος.

Το πρόβλημα εύρεσης του βέλτιστου προγραμματισμού ανοιχτή/ κλειστή για κάθε μονάδα σε ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας ονομάζεται « πρόβλημα ένταξης μανάδων» (UCP). [1.6]

#### 1.4 Η ΕΝΤΑΞΗ ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ

Η Διεύθυνση Διαχείρισης Ενέργειας (ΔΔΕ) ξεκίνησε τη λειτουργία της στα τέλη Μαρτίου του 2001 με κύριο στόχο τη βελτιστοποίηση της χρήσης των Μονάδων Παραγωγής. Το συγκεκριμένο αντικείμενο της βελτιστοποίησης είναι να επιτυγχάνεται το ελάχιστο κόστος παραγωγής της KWh μέσα από την καλή διαχείριση (που σημαίνει καλές επιδόσεις κάθε Μονάδας και άριστος συνδυασμός των θερμικών και υδροηλεκτρικών Μονάδων για κάλυψη του φορτίου) και συγχρόνως να εξασφαλίζεται η επαρκής και απρόσκοπτη παροχή Η/Ε στους πελάτες μας.

Στη συνέχεια θα δούμε πώς γεννήθηκε η ανάγκη για τη δημιουργία της ΔΔΕ και ποιο είναι το έργο της. Η απελευθέρωση της αγοράς στον τομέα της ενέργειας και ειδικό περα στον τομέα του ηλεκτρισμού, έφερε στο προσκήνιο επιτακτικά την ανάγκη εκσυγχρονισμού της ΔΕΗ Α.Ε., προκειμένου να μπορέσει να λειτουργήσει ανταγωνιστικά και ισότιμα με άλλες μεγάλες εταιρείες ηλεκτρισμού. Παράλληλα, έγινε αναπροσαρμογή του θεσμικού πλαισίου στη χώρα με τη δημιουργία δύο ανεξάρτητων οργάνων, του ΔΕΣΜΗΕ Α.Ε. (Διαχειριστής του Ελληνικού Συστήματος μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας) και της ΡΑΕ (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας).

Με τη δημιουργία του ΔΕΣΜΗΕ Α.Ε. οριοθετείται η λειτουργία της Μεταφοράς σε ένα αντικειμενικό πλαίσιο, δηλαδή σε ένα πλαίσιο που δεν κάνει διακρίσεις μεταξύ της ΔΕΗ Α.Ε. και άλλων προμηθευτών / παραγωγών για πρόσβαση στο Σύστημα και στους καταναλωτές. Έτσι ένα μεγάλο μέρος της Μεταφοράς, που υπήγετο στη ΔΕΗ Α.Ε., υπάγεται τώρα στο ΔΕΣΜΗΕ Α.Ε., με προμετωπίδα το Κέντρο Ελέγχου Ενέργειας αλλά και άλλες βασικές λειτουργίες. Μεταξύ των δραστηριοτήτων του ΔΕΣΜΗΕ Α.Ε. είναι η κατανομή του φορτίου, η διαχείριση των διασυνδέσεων, η παρακολούθηση και οικονομική εκκαθάριση των αποκλίσεων μεταξύ της προσφερόμενης (από τους προμηθευτές) και της ζητούμενης (από τους καταναλωτές) ενέργειας κ.λπ. [1.7]

#### 1.5 ΑΠΕΛΕΥΘΕΡΩΣΗ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

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].

## 1.6 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Αντικείμενο της εργασίας είναι η βελτιστοποίηση της ένταξης θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους. 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 ελαχιστοποίηση του κόστους. Τέλος, παρουσιάζονται ορισμένες περιπτώσεις που μελετήθηκαν καθώς και η εξαγωγή συμπερασμάτων από αυτές και εναλλακτικές μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος..



## 1.7 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, δίνοντας ορισμούς και περιγράφοντας σημαντικές εισαγωγικές διαδικασίες, 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 ελαχιστοποίηση του κόστους που μελετήθηκαν, καθώς επίσης και τα αποτελέσματα αυτών.

Τέλος, στο **Κεφάλαιο 5**, παρατίθενται τα γενικά συμπεράσματα που προέκυψαν από τα προηγούμενα κεφάλαια.

## 1.8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1.1] A. J. Wood and B. F. Wollenberg *Power Generation, Operation & Control*, New York: John Wiley & Sons, 1984.
- [1.2] Π. Γεωργιάκης, *Ηλεκτρική Οικονομία*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σεπτέμβριος 2006.
- [1.3] S. Hunt and G. Shuttleworth, *Competition and Choice in Electricity*, England, West Sussex: John Wiley & Sons, 1996.
- [1.4] C. J. S. Chan, "Development of a profit maximisation unit commitment program," MSc thesis, Dept. Electrical Eng. and Electronics, UMIST, September 2000.
- [1.5] Offer (1998), *Review of Electricity Trading Arrangements: Proposals, July 1998* Birmingham, Office of Electricity Regulation.
- [1.6] T. I. Halldorsson, *Unit Commitment for Combined Heat and Power Production*, Denmark: Technical University of Denmark, DTU, Spring 2003.
- [1.7] Χ. Ποσειδών. (2002, Φεβ.). Δραστηριότητες και στόχοι της Διεύθυνσης Διαχείρισης Ενέργειας. ΔΕΗ Α.Ε. [Online]. Available: [http:// www.tee.gr](http://www.tee.gr)
- [1.8] Γ. Κυραναστάσης, *Βιομηχανικά Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Καβάλα: ΤΕΙ Καβάλας, 2008.

## **ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ GAMS**

### **2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Το GAMS (General Algebraic Modeling System) είναι ένα περιβάλλον H/Y 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, χρησιμοποώντας μία συμπαγή και αποδοτική μορφή δείκτη.
2. Ο διαχωρισμός της μοντελοποίησης του προβλήματος από την τεχνική επίλυσή του. Ο χρήστης καταγράφει το μοντέλο και το αναθέτει σε κάποιον από τους διαθέσιμους επίλυτές (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 να 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 ανάθεσεις 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.

Πίνακας 2.1: Ορισμένες εντολές του GAMS.

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

### 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 αντιστοίχιση 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 τερματίζεται 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 περισσότερων 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 περισσότερων 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.



**Πίνακας 2.2:** Ορισμένες συναρτήσεις του GAMS με μαθηματική λειτουργία.

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

### 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.

**Πίνακας 2.3:** Τύποι μεταβλητών του GAMS.

| Λέξη Κώδικα     | Τύπος Μεταβλητής | Κατώτατο Όριο | Ανώτατο Όριο | Περιγραφή                                                                                         |
|-----------------|------------------|---------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>free</b>     | ελεύθερη         | $-inf$        | $+inf$       | Χωρίς περιορισμούς. Τα προκαθορισμένα όρια μπορούν να αλλαχθούν από το χρήστη                     |
| <b>positive</b> | θετική           | 0             | $+inf$       | Δεν επιτρέπονται αρνητικές τιμές. Το προκαθορισμένο ανώτατο όριο μπορεί να αλλαχθεί από το χρήστη |
| <b>negative</b> | αρνητική         | $-inf$        | 0            | Δεν επιτρέπονται θετικές τιμές. Το προκαθορισμένο κατώτατο όριο μπορεί να αλλαχθεί από το χρήστη  |
| <b>binary</b>   | δυναδική         | 0             | 1            | Διακριτή μεταβλητή που παίρνει τιμή '0' ή '1'                                                     |

|                |         |   |     |                                                                                                                    |
|----------------|---------|---|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>integer</b> | ακέραιη | 0 | 100 | Διακριτή μεταβλητή που παίρνει ακέραιες τιμές μεταξύ των ορίων. Ο χρήστης μπορεί να αλλάξει τα προκαθορισμένα όρια |
|----------------|---------|---|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

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.

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

| 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 |

### 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 ';':

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

| 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     |
| mpc    | Μαθηματικά Προγράμματα με Περιορισμούς Ισορροπίας    |
| cns    | Φραγμένα Μη-γραμμικά Συστήματα                       |

### 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 στο χείρι 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 συνθήκηN-1, εντολές N-1
else εντολέςN);

```

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.

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

| Έκφραση <code>''\$''</code>                     | Έκφραση <code>''if – then – else''</code>                                                  |
|-------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| <code>c('p2','m1')\$(z.l &gt;= 70)=0.01;</code> | <code>If(z.l &gt;= 70,<br/>c('p2','m1')=0.01;<br/>);</code>                                |
| <code>c('p2','m1') =0.01\$(z.l &gt;= 70)</code> | <code>If(z.l &gt;= 70,<br/>c('p2','m1')=0.01;<br/>else<br/>c('p2','m1')=0.0;<br/>);</code> |

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`.

### 2.2.11 Χρήση του GDX εργαλείου στο GAMS

Το αρχείο GDX είναι ένα αρχείο που αποθηκεύει τις τιμές ενός ή περισσότερων συμβόλων του GAMS όπως σύνολα, μεταβλητές παραμέτρων και εξισώσεις. Τα αρχεία GDX μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προετοιμάσουν τα στοιχεία για ένα πρό βρο GAMS, να παρουσιάσουν τα αποτελέσματα ενός προτύπου GAMS, να αποθηκεύσουν αποτελέσματα του ίδιου προτύπου που χρησιμοποιεί τις διαφορετικές παραμέτρους κ.λπ.... Ένα αρχείο GDX δεν αποθηκεύει μια πρότυπη διατύπωση ή εκτελέσιμες δηλώσεις.

Τα αρχεία GDX είναι δυαδικά αρχεία που είναι φορητά μεταξύ των διαφορετικών πλατφορμών. Γράφονται χρησιμοποιώντας bytes στην πλατφόρμα υλικού που δημιουργούνται επάνω, αλλά μπορούν να διαβαστούν σε μια πλατφόρμα χρησιμοποιώντας διαφορετικά bytes.

Οι χρήστες μπορούν επίσης να γράψουν τα προγράμματά τους χρησιμοποιώντας τα αρχεία GDX με τη χρησιμοποίηση του `gdxio.dll` (`gdxio.so` κοινόχρηστα αντικείμενα).

### 2.2.11.1 GDXXRW

Το GDXXRW είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται για να διαβάζει και να γράφει στοιχεία Excel. το GDXXRW μπορεί να διαβάσει πολλαπλές σειρές από ένα λογιστικό φύλλο (spreadsheet) και να γράψει τα στοιχεία σε ένα GDX αρχείο, ή να διαβάσει από ένα αρχείο GDX, και να γράψει τα στοιχεία στις διαφορετικές σειρές μέσα σε ένα λογιστικό φύλλο (spreadsheet).

Χρήση:

gdxxrw Inputfile {Outputfile} {Options} [Symbols]

Οι παράμετροι μπορούν επίσης να διαβαστούν από ένα αρχείο κειμένων η χρήση ενός αρχείου για τις παραμέτρους υποδεικνύεται βάζοντας μπροστά από το όνομα του αρχείου ένα @ (σημάδι AT). Κατά την ανάγνωση των παραμέτρων από ένα αρχείο κειμένων, οι γραμμές αρχίζουν με \* (αστερίσκο), αγνοούνται και δρουν ως σχόλιο. Οι παράμετροι μπορούν επίσης να διαβαστούν από μια περιοχή ενός λογιστικού φύλλου (spreadsheet).

Τα αρχεία χωρίς ένα πλήρες όνομα πορειών υπο τίθεται ότι βρίσκονται στον τρέχων κατάλογο κατά τη χρησιμοποίηση μιας εντολής DOS. Κατά χρησιμοποίηση του GAMSIDE, αυτά τα την αρχεία υποτίθεται ότι βρίσκονται στον τρέχων κατάλογο του προγράμματος. Η χρήση των ονομάτων των αρχείων με τα ενσωματωμένα κενά επιτρέπεται εφ' όσον εσωκλείεται το όνομα των αρχείων σε εισαγωγικά (").

### 2.2.11.2 GDX εντολές ανάγνωσης και εγγραφής

Ο πιο κάτω πίνακας παρουσιάζει τις εντολές που είναι διαθέσιμες για την ανάγνωση δεδομένων από ένα GDX αρχείο στο GAMS κατά την συρραφή ενός μοντέλου στο GAMS.

**Πινάκας 2.7:** Εντολές ανάγνωσης.

| <i>Εντολή</i>      | <i>Παράμετροι</i>     | <i>Περιγραφή</i>                                                                          |
|--------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|
| \$GDXIN            |                       | Κλείνει το τρέχων GDX αρχείο εισόδου                                                      |
|                    | Όνομα αρχείου         | Διευκρινίζεται το όνομα του αρχείου                                                       |
| \$LOAD<br>\$LOADDC |                       | Βάζει σε λίστα όλα τα σύμβολα του GDX αρχείου                                             |
|                    | id1 id2 ... idn       | Διαβάζει τα σύμβολα του GAMS id1 id2... idn από το GDX αρχείο                             |
|                    | id1=gdxid1 id2=gdxid2 | Διαβάζει τα σύμβολα του GAMS id1, id2 με αντίστοιχα ονόματα gdxid1, gdxid2 στο GDX αρχείο |

Ο πιο κάτω πίνακας παρουσιάζει τις εντολές που είναι διαθέσιμες για την εγγραφή δεδομένων σε ένα GDX αρχείο στο GAMS κατά την συρραφή ενός μοντέλου στο GAMS.

**Πίνακας 2.8:** Εντολές εγγραφής.

| Εντολή   | Παράμετροι            | Περιγραφή                                                                               |
|----------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| \$GDXOUT |                       | Κλείνει το τρέχων GDX αρχείο εξόδου                                                     |
|          | Όνομα αρχείου         | Διευκρινίζεται το όνομα του αρχείου                                                     |
| \$UNLOAD | id1 id2 .. idn        | Γράφει τα σύμβολα του GAMS id1 id2... idn στο GDX αρχείο                                |
|          | id1=gdxid1 id2=gdxid2 | Γράφει τα σύμβολα του GAMS id1, id2 με αντίστοιχα ονόματα gdxid1, gdxid2 στο GDX αρχείο |

Παρατηρήσεις :

- Μόνο ένα αρχείο GDX μπορεί να είναι ανοιχτό την ίδια στιγμή.
- Όταν διαβάζουμε δεδομένα, το σύμβολο που διαβάζεται πρέπει ήδη να έχει οριστεί στο GAMS
- Όταν εγγράφουμε δεδομένα, τα δεδομένα ενός αρχείου GDX που ήδη υπάρχει αντικαθίσταται με τα νέα δεδομένα.

### 2.2.11.3 Χρήσιμα σύμβολα για την χρήση του GDXXRW

Στον πιο κάτω πίνακα φαίνονται κάποιοι χρήσιμοι συμβολισμοί που χρειάζονται για να συντάξουμε σωστά τις εντολές του GDX εργαλείου για να μπορεί να γίνει σωστά η συνεργασία μεταξύ των GDX αρχείων, των λογιστικών φύλλων του EXCEL και του προγράμματος GAMS.

**Πίνακας 2.9:** Σύμβολα για την χρήση του GDXXRW

| Σύμβολο | Προσδιορισμός τύπου | Περιγραφή                                                                                                                                               |
|---------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Par     | GAMS_Param          | Προσδιορίζονται οι παράμετροι του GAMS που θα διαβαστούν από το αρχείο GDX και θα γραφτούν σε φύλλο εργασίας EXCEL, και το αντίθετο.                    |
| Equ     | GAMS_Equations      | Προσδιορίζονται οι εξισώσεις του GAMS που θα επεξεργαστούν                                                                                              |
| Var     | GAMS_Variable       | Προσδιορίζονται οι μεταβλητές που θα γραφτούν σε ένα φύλλο εργασίας EXCEL. Αναγνωρίζονται για τις μεταβλητές τα πεδία: .L, .M, .LO, .UP, .Prior, .Scale |
| Set     | GAMS_Set            | Προσδιορίζονται τα σύνολα (sets) που θα διαβαστούν από τα φύλλα εργασίας του EXCEL και θα καταχωρηθούν στο GAMS                                         |
| Rng     | EXCEL Range         | Ορίζει το πεδίο των κελιών στο EXCEL που υπάρχουν ή καταχωρούνται δεδομένα                                                                              |
| Dim     | integer             | Ορίζει το συνολικό μέγεθος στο EXCEL που υπάρχουν δεδομένα- σύμβολα                                                                                     |



|      |         |                                                                                                                                                   |
|------|---------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cdim | integer | Ορίζει το μέγεθος των στηλών, δηλαδή τον αριθμό των σειρών στο σύνολο των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για να οριστούν οι ετικέτες των στηλών |
| Rdim | integer | Ορίζει το μέγεθος των σειρών, δηλαδή τον αριθμό των στηλών στο σύνολο των δεδομένων που θα χρησιμοποιηθούν για να οριστούν οι ετικέτες των σειρών |

### 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

- [2.1] A. Brooke, D. Kendrick, A. Meeraus, and R. Raman. (2005, Dec.). GAMS: A Users Guide. GAMS Development Corporation, Washington DC. [Online]. Available: [http:// www.gams.com](http://www.gams.com)
- [2.2] B. A. Mc Carl. (2006, March). McCarl GAMS User Guide. Version 22.2. GAMS Development Corporation, Washington DC. [Online]. Available: [http:// www.gams.com](http://www.gams.com)
- [2.3] E. Castillo, A. J. Conejo, P. Pedregal, R. Garcia and N. Alguacil, *Building and Solving Mathematical Programming Models in Engineering and Science*, John Wiley, 2002, pp. 285-364.
- [2.4] D. Chattopadhyay, "Application of general algebraic modelling system to power system optimization," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 14, no. 1, pp. 15-22, Feb 1999.
- [2.5] Δ. Καραμπατζάκης, “Ένταξη μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για μεγιστοποίηση του κέρδους με το λογισμικό GAMS,” Διπλωματική διατριβή, Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2008.

## ΘΕΜΕΛΙΩΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΞΗΣ ΜΟΝΑΔΩΝ ΜΕ ΒΑΣΗ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο 1 είδαμε ότι υπάρχουν διάφορα είδη σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που χαρακτηρίζονται από το είδος των μονάδων παραγωγής που χρησιμοποιούν. Για την μοντελοποίηση και επίλυση του δικού μας προβλήματος ένταξης μονάδων παραγωγής με βάση το κόστος θεωρούμε ότι έχουμε θερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

*Σε αμυγώς θερμικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, το πρόβλημα της βέλτιστης ένταξης μονάδων (unit commitment) ορίζεται ως εξής:*

« Για μια δοσμένη χρονική περίοδο  $T$  ωρών, είναι για κάθε ώρα γνωστή η πρόβλεψη φορτίου:  $\{P_D(t), t = 1, 2, \dots, T\}$ . Κάθε ώρα υπάρχουν  $N$  διαθέσιμες θερμικές μονάδες παραγωγής, των οποίων είναι γνωστά (δεδομένα) τα τεχνικά χαρακτηριστικά. Ζητείται να υπολογιστεί, για κάθε ώρα, το πρόγραμμα ένταξης των θερμικών μονάδων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος κατά τη χρονική περίοδο αυτών των  $T$  ωρών. » [3.2]

### 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 κόστος 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 <sup>2</sup> h).        |
| $Cost(i, t)$ | 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).                                                                                                                                                                                           |
| $P(i, t)$       | Παραγωγή της μονάδας $i$ τη χρονική στιγμή $t$ (σε MW).                                                                                                                                                                                                   |
| $d(t)$          | 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

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:

(3.1)

$$Cost(i, t) = FC(i, t) \cdot I(i, t) + S U(i, t) \cdot I(i, t) \cdot [1 - I(i, t - 1)] + S D(i, t) \cdot I(i, t - 1) \cdot [1 - I(i, t)]$$

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 [3.4]:

$$FC(i, t) = C(i) \cdot [P(i, t)]^2 + B(i) \cdot P(i, t) + A(i) \quad (3.2)$$

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:

$$SU(i, t) = D(i) + E(i) \cdot \left[ 1 - \exp \left( -\frac{X_{off}(i, t)}{CT(i)} \right) \right] \quad (3.3)$$

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

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

$$\min_{I(i,t), P(i,t)} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Cost(i,t) \quad (3.4)$$

κάτω από τους 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:

$$P^{\min}(i) \cdot I(i,t) \leq P(i,t) \leq P^{\max}(i) \cdot I(i,t), \quad \forall i, \forall t \quad (3.5)$$

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:

$$\left[ X(i,t-1) - T^{up}(i) \right] \cdot [I(i,t-1) - I(i,t)] \geq 0, \quad \forall i, \forall t \quad (3.6)$$

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:

$$\left[ -X(i,t-1) - T^{down}(i) \right] \cdot [I(i,t) - I(i,t-1)] \geq 0, \quad \forall i, \forall t \quad (3.7)$$

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:

$$P(i,t) - P(i,t-1) \leq R^{up}(i), \quad \forall i, \forall t \quad (3.8)$$

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

Ο περιορισμός (3.8) 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:

$$P(i, t) \leq \max \left[ R^{up}(i), P^{\min}(i) \right], \quad \forall i, \forall t \quad (3.9)$$

#### 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:

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

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

Ο περιορισμός (3.10) 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:

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

#### 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 ελαχιστοποίηση του κόστους εκφράζεται με την παρακάτω σχέση:

$$\sum_{i=1}^N P(i, t) = d(t), \quad \forall i, \forall t \quad (3.12)$$

### 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 κόστος.

### 3.3.1 Μέθοδος πλήρους 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 μικρότερο συνολικό κόστος 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  $H/Y$ . 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

Όπως είδαμε και στο κεφάλαιο 3 οι επίλυση των κύριων προβλημάτων ή υποπροβλημάτων στο GAMS γίνονται με την βοήθεια έτοιμων solver. Έτσι, σε αυτή την ενότητα θα κάνουμε μια περιγραφή του solver που χρησιμοποιήσαμε για την επίλυση του προβλήματος ένταξης, καθώς και περιγραφή της μεθοδολογίας που χρησιμοποιήσαμε για την επίλυση μεγάλων συστημάτων παραγωγής.

#### 3.5.1 BARON SOLVER

Ο οδηγός βελτιστοποίησης διακλάδωσης και μείωσης (Branch-And-Reduce Optimization Navigator = BARON) είναι ένας solver του GAMS για γενική επίλυση μη γραμμικών προγραμμάτων (NLP) και προγραμμάτων μεικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού (MINLP).

Ενώ οι παραδοσιακοί αλγόριθμοι για NLP και MINLP εγγυώνται σύγκλιση μόνο σε ορισμένες περιπτώσεις κυρτότητας, ο BARON εφαρμόζει τους γενικούς αιτιοκρατικούς βελτιστοποιητικούς αλγόριθμους του είδους διακλάδωσης και φραγής, που εγγυώνται την παροχή γενικής λύσης σε αρκετές γενικές περιπτώσεις. Αυτοί περιλαμβάνουν την διαθεσιμότητα ενός πεπερασμένου κατώτατου και ανώτατου ορίου στις μεταβλητές και τις εκφράσεις τους στα NLP και MINLP για να λυθούν.

Ο BARON εφαρμόζει αλγορίθμους του είδους διακλάδωσης και φραγής βελτιώνοντας τους με μια ποικιλία από περιορισμούς αναπαραγωγής και τεχνικές δυαδικότητας για να μειώσει το φάσμα των μεταβλητών κατά την χρονική διαδρομή του αλγορίθμου.

#### 3.5.2 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Αρχικά, δεν γίνεται καμία αλλαγή στην αντικειμενική συνάρτηση αλλά ούτε και στους περιορισμούς. Γίνεται δηλαδή σε πρώτο βήμα η επίλυση του προβλήματος με αντικειμενική συνάρτηση την (3.4) και τους περιορισμούς (3.5) – (3.12), όπως αυτοί ορίστηκαν πιο πάνω, με την βοήθεια του solver BARON. Όπως θα δούμε παρακάτω η επίλυση αυτού του μοντέλου είναι πολύπλοκη και δίνει λύση για πολύ μικρά συστήματα, γι' αυτό πρέπει να γίνει κάποια 'χαλάρωση' του αρχικού προβλήματος.

Μετά από πολλές δοκιμές παρατηρούμε ότι το κόστος καυσίμου λαμβάνει περίπου το 98% του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ το κόστος εκκίνησης περίπου 1.5 % και κράτησης 0.5 %. Έτσι, αρχικά 'χαλαρώνουμε' λίγο τους περιορισμούς του προβλήματος αφαιρώντας τους περιορισμούς (3.6) και (3.7), που έχουν άμεση σχέση με την ελαχιστοποίηση του κόστους εκκίνησης, που βρίσκεται στην αντικειμενική μας συνάρτηση.

Με την αφαίρεση αυτών των περιορισμών το αρχικό μας πρόβλημα επικεντρώνεται στην βέλτιστη επίλυση του κόστους καυσίμου, δηλαδή στην εύρεση της ελάχιστης παραγόμενης ισχύς κάθε μονάδας για κάθε ώρα. Από το πολυώνυμο της συνάρτησης του κόστους καυσίμου μόνο οι δύο όροι έχουν σχέση με την παραγόμενη ισχύ  $P$ . Έτσι, κρατάμε έξω από



το πολυώνυμο και τον συντελεστή που είναι ανεξάρτητος της ισχύς  $P$ . Τελικά, καταλήγουμε στο υποπρόβλημα με αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμούς ως εξής:

Αντικειμενική συνάρτηση υποπροβλήματος:

$$FC(i, t) = C(i) \cdot [P(i, t)]^2 + B(i) \cdot P(i, t) \quad (3.13)$$

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω η αντικειμενική συνάρτηση του υποπροβλήματος είναι το κόστος καυσίμου εκφρασμένο μόνο με τους δύο συντελεστές τεχνικών χαρακτηριστικών των μονάδων παραγωγής, που εξαρτώνται από την παραγόμενη ισχύ των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτοί οι συντελεστές είναι, σύμφωνα και με τους ορισμούς της ενότητας 3.2.2, οι  $C(i)$  και  $B(i)$ .

Υπό των περιορισμών:

### 1. Λειτουργικά όρια μονάδων

Οι μονάδες μπορούν να παράγουν μέσα σε προκαθορισμένα όρια:

$$P^{\min}(i) \cdot I(i, t) \leq P(i, t) \leq P^{\max}(i) \cdot I(i, t), \quad \forall i, \forall t \quad (3.14)$$

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

### 2. 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:

$$\sum_{i=1}^N P(i, t) = d(t), \quad \forall i, \forall t \quad (3.15)$$

### 3. 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:

$$P(i, t) - P(i, t-1) \leq R^{up}(i), \quad \forall i, \forall t \quad (3.16)$$

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

### 4. Περιορισμός μείωσης κατά την έξοδο 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:

$$P(i, t-1) - P(i, t) \leq R^{down}(i), \quad \forall i, \forall t \quad (3.17)$$

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

Η επίλυση αυτού του υποπροβλήματος θα μας δώσει τις τιμές των μεταβλητών της ισχύς για κάθε μηχανή για κάθε ώρα, καθώς και των προγραμματισμό ένταξης των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτές τις τιμές μπορούμε να τις αντικαταστήσουμε στην αντικειμενική συνάρτηση του αρχικού μας μοντέλου του προβλήματος, όπως ορίστηκε στην ενότητα 3.2.3, μόνο που μετά τις αλλαγές που υποδείξαμε πιο πάνω, ορίζεται πλέον ως εξής:

Αντικειμενική συνάρτηση:

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:

(3.18)

$$Cost(i,t) = FC(i,t) + A(i) \cdot I(i,t) + S_{off}(i,t) \cdot I(i,t) \cdot [1 - I(i,t-1)] + S_{on}(i,t) \cdot I(i,t-1) \cdot [1 - I(i,t)]$$

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω κρατάμε έξω από το κόστος καυσίμου τον συντελεστή τεχνικών χαρακτηριστικών των μονάδων που δεν εξαρτάται από την παραγόμενη ισχύ των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός ο συντελεστής είναι ο  $A(i)$  και βλέπουμε στην σχέση (3.17), πως μετατρέπεται η συνάρτηση του συνολικού κόστους παραγωγής σε σχέση με την αρχική (3.1).

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 [3.4]:

$$FC(i,t) = C(i) \cdot [P(i,t)]^2 + B(i) \cdot P(i,t) \quad (3.19)$$

Όπως αναφέραμε και πιο πάνω κρατάμε έξω από το κόστος καυσίμου τον συντελεστή τεχνικών χαρακτηριστικών των μονάδων που δεν εξαρτάται από την παραγόμενη ισχύ των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός ο συντελεστής είναι ο  $A(i)$  και βλέπουμε στην σχέση (3.18), πως μετατρέπεται η συνάρτηση του κόστους καυσίμου παραγωγής σε σχέση με την αρχική (3.2).

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:

$$S_{off}(i,t) = D(i) + E(i) \cdot \left[ 1 - \exp \left( -\frac{X_{off}(i,t)}{CT(i)} \right) \right] \quad (3.20)$$

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

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

$$\min_{I(i,t), P(i,t)} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N Cost(i,t) \quad (3.21)$$

Το υποπρόβλημα που καταλήγουμε προς επίλυση είναι το ίδιο ουσιαστικά υποπρόβλημα που χρησιμοποιείται και στον αλγόριθμο διάσπασης Benders. Όπως θα δούμε στο κεφάλαιο 4 με την επίλυση του προβλήματος, με αυτή τη μεθοδολογία, για μεγάλα και πολύ μεγάλα συστήματα πετυχαίνουμε απόκλιση από το κυρίως μοντέλο (αρχικό) απόκλιση -0,22 έως 0,32% (ενότητα 4.5).

### 3.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [3.1] N. P. Padhy, "Unit Commitment–A Bibliographical Survey," *IEEE Transactions On Power Systems*, Vol.19 No.2, May 2004.
- [3.2] Π. Γεωργιάκης, *Ηλεκτρική Οικονομία*, Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης, Σεπτέμβριος 2006.
- [3.3] C. J. S. Chan, "Development of a profit maximisation unit commitment program," MSc thesis, Dept. Electrical Eng. and Electronics, UMIST, September 2000.
- [3.4] S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis and V. Petridis, "A genetic algorithm solution to the unit commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 1, Feb. 1996.

## 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 ελαχιστοποίηση του κόστους, σύμφωνα με την διατύπωση που έγινε στο κεφάλαιο 3. Αρχικά, μελετάμε σενάρια προγραμματίζοντας συστήματα με πλήρη την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς. Εδώ θα δούμε την πολυπλοκότητα του προβλήματός μας, γι' αυτό και τα συστήματα που θα μελετηθούν θα είναι μικρά.

Γενικά για την πολυπλοκότητα μπορούμε να αναφέρουμε ότι για ένα σύστημα προς μελέτη αποδεικνύεται εύκολα ότι το σύνολο των πιθανών συνδυασμών ένταξης είναι  $2^{N \cdot T}$ , όπου N ο αριθμός των μονάδων παραγωγής και T ο χρονικός ορίζοντας μελέτης.

Στη συνέχεια θα μελετηθούν συστήματα μεγαλύτερα με 'χαλαρωμένη' την αντικειμενική συνάρτηση αλλά και τους περιορισμούς του προβλήματος.

Τέλος, θα γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων τις μεθόδου με άλλες μεθοδολογίες και με δεδομένα που προέρχονται από τη βιβλιογραφία [4.1].

### 4.2 ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΓΕΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ

Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστούν τέσσερα σενάρια εναλλάσσοντας τους περιορισμούς του μοντέλου για να προσδιορίσουμε την ορθότητά του. Σε όλα τα σενάρια εξετάζεται μικρό σύστημα τριών μονάδων για 24 ώρες.

Στο πρώτο σενάριο γίνεται επίλυση του αρχικού μοντέλου με αντικειμενική την (3.4) υπό τους περιορισμούς (3.5) και (3.12). Στο δεύτερο γίνεται επίλυση της αντικειμενικής (3.4) υπό τους περιορισμούς (3.5), (3.12), (3.8) και (3.10). Στο τρίτο γίνεται επίλυση της αντικειμενικής (3.4) υπό τους περιορισμούς (3.5), (3.12), (3.6) και (3.7). Τέλος, στο τέταρτο σενάριο γίνεται επίλυση της αντικειμενικής (3.4) υπό τους περιορισμούς (3.5) - (3.12).

Τα δεδομένα των σεναρίων είναι τα εξής:

**Πίνακας 4.1:** Δεδομένα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

| Δείκτης<br>μονάδας | $P^{min}$<br>(MW) | $P^{max}$<br>(MW) | $R^{up}$<br>(MW/h) | $R^{down}$<br>(MW/h) | $A$<br>(\$/h) | $B$<br>(\$/MWh) | $C$<br>(\$/MW <sup>2</sup> h) | $initial$<br>(h) | $D$<br>(\$/h) | $E$<br>(\$/h) | $CT$<br>(h) | $SD$<br>(\$/h) |
|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|----------------------|---------------|-----------------|-------------------------------|------------------|---------------|---------------|-------------|----------------|
| 1                  | 6                 | 30                | 12                 | 15                   | 31,72         | 26,2541         | 0,06975                       | -1               | 30            | 30            | 2           | 20             |
| 2                  | 22,8              | 114               | 23                 | 23                   | 11,57         | 20,3148         | 0,01459                       | -3               | 75            | 75            | 3           | 30             |
| 3                  | 37,5              | 150               | 38                 | 38                   | 15,22         | 26,7302         | 0,01921                       | -3               | 105           | 105           | 4           | 10             |

**Πίνακας 4.1(συνέχεια):** Δεδομένα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

| Δείκτης<br>μονάδας | <i>T<sub>up</sub></i><br>(h) | <i>T<sub>down</sub></i><br>(h) |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1                  | 1                            | 1                              |
| 2                  | 3                            | 2                              |
| 3                  | 4                            | 2                              |

**Πίνακας 4.2:** Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Κατανομή ζήτησης [4.2].

| Ωρα        | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ζήτηση(MW) | 50  | 80  | 110 | 140 | 170 | 200 | 230 | 260 | 290 | 250 |
| Ωρα        | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  |
| Ζήτηση(MW) | 220 | 190 | 160 | 130 | 100 | 70  | 100 | 150 | 180 | 220 |

#### 4.2.1 ΣΕΝΑΡΙΟ 1: ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ 2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Στο σενάριο αυτό γίνεται επίλυση της αντικειμενικής (3.4) υπό τους περιορισμούς (3.5) και (3.12).

Με βάση των δεδομένων των Πινάκων 4.1 και 4.2 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 3 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 20 ωρών είναι 82749,957\$, εκ των οποίων 82329,961\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου, 419,997\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης και 0\$ είναι το συνολικό κόστος κράτησης.

Από τον Πίνακα 4.3 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, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Παρατηρούμε ότι οι μονάδες παράγουν τη μέγιστη ή σχεδόν τη μέγιστη ισχύ τους τις ώρες που η ζήτηση είναι υψηλότερη, δηλαδή την 9<sup>η</sup> και 10<sup>η</sup> ώρα. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα

**Πίνακας 4.3:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 3 μονάδων για τις επόμενες 20 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |      |      |      |      |      |      |       |     |     |
|--------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-----|-----|
|        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     | 9   | 10  |
| 1      | 0    | 6    | 6    | 6    | 15   | 21   | 28   | 30    | 30  | 30  |
| 2      | 50   | 36,5 | 66,5 | 96,5 | 114  | 114  | 114  | 114   | 114 | 114 |
| 3      | 0    | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 41   | 65   | 88   | 116   | 146 | 106 |
| Μονάδα | Ωρες |      |      |      |      |      |      |       |     |     |
|        | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18    | 19  | 20  |
| 1      | 26   | 19   | 8,5  | 6    | 6    | 6    | 6    | 6     | 17  | 26  |
| 2      | 114  | 114  | 114  | 86,5 | 56,5 | 26,5 | 56,5 | 106,5 | 114 | 114 |
| 3      | 80   | 57   | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5  | 49  | 80  |

#### 4.2.2 ΣΕΝΑΡΙΟ 2: ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ 4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Στο σενάριο αυτό γίνεται επίλυση της αντικειμενικής (3.4) υπό τους περιορισμούς (3.5), (3.12), (3.8) και (3.10).

Με βάση των δεδομένων των Πινάκων 4.1 και 4.2 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 3 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 20 ωρών είναι 83683,734\$, εκ των οποίων 83423,734\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου, 240\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης και 20\$ είναι το συνολικό κόστος κράτησης.

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, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Παρατηρούμε ότι οι μονάδες παράγουν τη μέγιστη ή σχεδόν τη μέγιστη ισχύ τους τις ώρες που η ζήτηση είναι υψηλότερη, δηλαδή την 9<sup>η</sup> και 10<sup>η</sup> ώρα. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα

**Πίνακας 4.4:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 3 μονάδων για τις επόμενες 20 ώρες.

| Μονάδα | Ώρες |     |       |      |      |      |      |      |       |      |
|--------|------|-----|-------|------|------|------|------|------|-------|------|
|        | 1    | 2   | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9     | 10   |
| 1      | 12   | 15  | 16    | 18   | 20   | 21   | 28   | 30   | 30    | 28   |
| 2      | 0    | 23  | 46    | 69   | 92   | 114  | 114  | 114  | 114   | 114  |
| 3      | 38   | 42  | 48    | 53   | 58   | 65   | 88   | 116  | 146   | 108  |
| Μονάδα | Ώρες |     |       |      |      |      |      |      |       |      |
|        | 11   | 12  | 13    | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19    | 20   |
| 1      | 26   | 19  | 15,5  | 14   | 7    | 0    | 7    | 18   | 19,5  | 25,5 |
| 2      | 114  | 114 | 101,5 | 78,5 | 55,5 | 32,5 | 55,5 | 78,5 | 101,5 | 114  |
| 3      | 80   | 57  | 43    | 38   | 37,5 | 70   | 37,5 | 53,5 | 59    | 80,5 |

#### 4.2.3 ΣΕΝΑΡΙΟ 3: ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ 4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Στο σενάριο αυτό γίνεται επίλυση της αντικειμενικής (3.4) υπό τους περιορισμούς (3.5), (3.12), (3.6) και (3.7).

Με βάση των δεδομένων των Πινάκων 4.1 και 4.2 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 3 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 20 ωρών είναι 82749,957\$, εκ των οποίων 82329,961\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου, 419,997\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης και 0\$ είναι το συνολικό κόστος κράτησης.

Από τον Πίνακα 4.5 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, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Παρατηρούμε ότι οι μονάδες παράγουν τη μέγιστη ή σχεδόν τη μέγιστη ισχύ τους τις ώρες που η ζήτηση είναι υψηλότερη, δηλαδή την 9<sup>η</sup> και 10<sup>η</sup> ώρα. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα

**Πίνακας 4.5:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 3 μονάδων για τις επόμενες 20 ώρες.

| Μονάδα | Ώρες |      |      |      |     |     |     |     |     |     |
|--------|------|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| 1      | 0    | 6    | 6    | 6    | 15  | 21  | 28  | 30  | 30  | 30  |
| 2      | 50   | 36,5 | 66,5 | 96,5 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 | 114 |
| 3      | 0    | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 41  | 65  | 88  | 116 | 146 | 106 |

| Μονάδα | Ωρες |     |      |      |      |      |      |       |     |     |
|--------|------|-----|------|------|------|------|------|-------|-----|-----|
|        | 11   | 12  | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18    | 19  | 20  |
| 1      | 26   | 19  | 8,5  | 6    | 6    | 6    | 6    | 6     | 17  | 26  |
| 2      | 114  | 114 | 114  | 86,5 | 56,5 | 26,5 | 56,5 | 106,5 | 114 | 114 |
| 3      | 80   | 57  | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 37,5  | 49  | 80  |

#### 4.2.4 ΣΕΝΑΡΙΟ 4: ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΟΛΟΥΣ ΤΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Στο σενάριο αυτό γίνεται επίλυση της αντικειμενικής (3.4) υπό τους περιορισμούς (3.5) - (3.12).

Με βάση των δεδομένων των Πινάκων 4.1 και 4.2 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 3 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 20 ωρών είναι 90284,613\$, εκ των οποίων 89819,613\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου, 370\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης και 90\$ είναι το συνολικό κόστος κράτησης.

Από τον Πίνακα 4.6 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, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Παρατηρούμε ότι οι μονάδες παράγουν τη μέγιστη ή σχεδόν τη μέγιστη ισχύ τους τις ώρες που η ζήτηση είναι υψηλότερη, δηλαδή την 9<sup>η</sup> και 10<sup>η</sup> ώρα. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα

**Πίνακας 4.6:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 3 μονάδων για τις επόμενες 20 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |    |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------|------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | 1    | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| 1      | 12   | 8  | 0   | 0   | 0   | 12  | 24  | 30  | 30  | 15  |
| 2      | 0    | 0  | 0   | 0   | 23  | 46  | 69  | 92  | 114 | 114 |
| 3      | 38   | 72 | 110 | 140 | 147 | 142 | 137 | 138 | 146 | 121 |

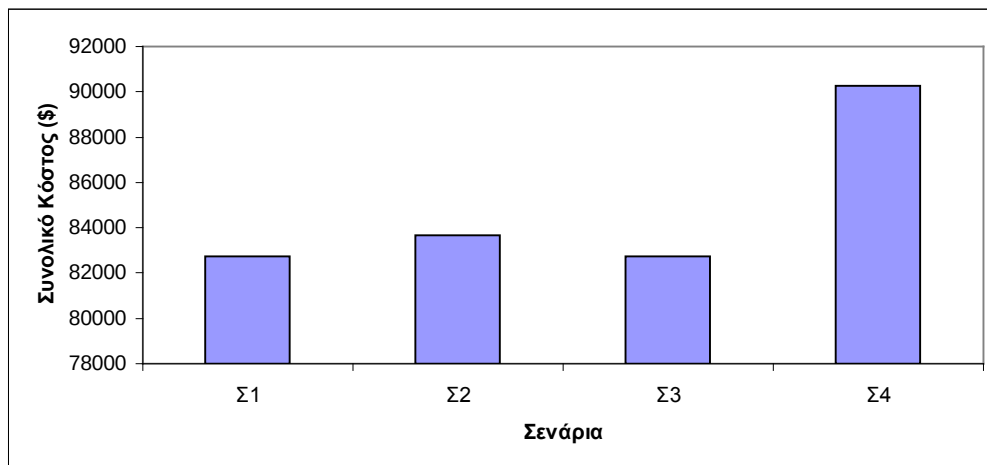
| Μονάδα | Ωρες |    |         |    |    |    |     |     |     |     |
|--------|------|----|---------|----|----|----|-----|-----|-----|-----|
|        | 11   | 12 | 13      | 14 | 15 | 16 | 17  | 18  | 19  | 20  |
| 1      | 0    | 12 | 20,0971 | 19 | 15 | 0  | 0   | 12  | 24  | 30  |
| 2      | 114  | 92 | 69      | 49 | 23 | 0  | 0   | 0   | 23  | 46  |
| 3      | 106  | 86 | 70,9029 | 65 | 62 | 70 | 100 | 138 | 133 | 144 |

#### 4.2.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Μετά την υλοποίηση των τεσσάρων σεναρίων πιο πάνω μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα γράφημα, το οποίο να περιέχει τα τέσσερα σενάρια ως προς τα αντίστοιχα κόστη καθ' ενός. Έτσι, προκύπτει το Σχήμα 4.1 πιο κάτω.

Στο Σχήμα 4.1 συμβολίζονται με, Σ1 το σενάριο 1, Σ2 το σενάριο 2, Σ3 το σενάριο 3 και Σ4 το σενάριο 4. Παρατηρώντας το Σχήμα 4.2.1 βλέπουμε ότι στο Σ1 σημειώνεται το χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τα άλλα σενάρια κάτι που περιμέναμε, αφού σε αυτό το σενάριο έχουμε τους λιγότερους περιορισμούς. Τα Σ2 και Σ3 εκτελούνται με τον ίδιο αριθμό περιορισμών και γι' αυτό θα περιμέναμε να είχαν είτε περίπου ίσο συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είτε ένα από τα δυο σενάρια να έχει λίγο περισσότερο ή λιγότερο από το άλλο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούμε ότι το Σ2 σημειώνει λίγο περισσότερο συνολικό κόστος παραγωγής από ό,τι το Σ3 και αυτό οφείλεται στο ότι οι

περιορισμοί (3.8) και (3.10) περιορίζουν περισσότερο το πρόβλημα από ότι οι περιορισμοί (3.6) και (3.7). Επίσης, παρατηρούμε ότι το Σ3 τυχαίνει να έχει το ίδιο συνολικό κόστος με το Σ1. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί εύκολα, αφού οι περιορισμοί (3.6) και (3.7) που προσθέτουμε στο Σ3 δεν επηρεάζουν το πρόβλημα με τις συγκεκριμένες αρχικές καταστάσεις των μονάδων μας, καθώς πληρούνται και οι περιορισμοί σύμφωνα με τους ελάχιστους χρόνους κράτησης και λειτουργίας των μονάδων μας. Τέλος, παρατηρούμε ότι το Σ4 σημειώνει το μεγαλύτερο συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κάτι που ήταν αναμενόμενο, αφού κατά την εκτέλεση του λαμβάνονται όλοι οι περιορισμοί, όπως αυτοί ορίστηκαν στο κεφάλαιο 3.



Σχήμα 4.1: Σύγκριση συνολικού κόστους σεναρίων

### 4.3 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕ ΠΛΗΡΗ ΤΗΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΥΣ

Σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί ο προγραμματισμός ένταξης/ κράτησης των θερμικών μονάδων με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους λαμβάνοντας υπόψη την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος (3.1) όπως αυτή αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3, και τους περιορισμούς (3.5) – (3.12), όπως αυτοί αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3. Όπως, έχουμε προαναφέρει το πρόβλημα ένταξης μονάδων παραγωγής με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους είναι πολύπλοκο και ο υπολογιστικός φόρτος πολύ μεγάλος, για τον λόγο αυτό το μοντέλο σε αυτή την ενότητα θα εξεταστεί για 3 θερμικές μονάδες για 20 ώρες και για 5 μονάδες για 6 ώρες. Αυτό μας δίνει υπολογιστικό φόρτο  $2^{60}$  συνδυασμούς ένταξης και  $2^{30}$ , αντίστοιχα.

#### 4.3.1 ΔΙΚΤΥΟ 3 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 20 ΩΡΩΝ

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα δεδομένα των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η ζήτηση για την χρονική περίοδο των 20 ωρών.

Πίνακας 4.7: Δεδομένα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

| Δείκτης μονάδας | $P^{min}$ (MW) | $P^{max}$ (MW) | $R^{up}$ (MW/h) | $R^{down}$ (MW/h) | $A$ (\$/h) | $B$ (\$/MWh) | $C$ (\$/MW <sup>2</sup> h) | $initial$ (h) | $D$ (\$/h) | $E$ (\$/h) | $CT$ (h) | $SD$ (\$/h) |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-------------------|------------|--------------|----------------------------|---------------|------------|------------|----------|-------------|
| 1               | 6              | 30             | 12              | 15                | 31,72      | 26,2541      | 0,06975                    | -1            | 30         | 30         | 2        | 20          |
| 2               | 22,8           | 114            | 23              | 23                | 11,57      | 20,3148      | 0,01459                    | -3            | 75         | 75         | 3        | 30          |
| 3               | 37,5           | 150            | 38              | 38                | 15,22      | 26,7302      | 0,01921                    | -3            | 105        | 105        | 4        | 10          |



**Πίνακας 4.7(συνέχεια):** Δεδομένα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

| Δείκτης<br>μονάδας | <i>T<sub>up</sub></i><br>(h) | <i>T<sub>down</sub></i><br>(h) |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1                  | 1                            | 1                              |
| 2                  | 3                            | 2                              |
| 3                  | 4                            | 2                              |

**Πίνακας 4.8:** Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα

| Ωρα        | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ζήτηση(MW) | 50  | 80  | 110 | 140 | 170 | 200 | 230 | 260 | 290 | 250 |
| Ωρα        | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  |
| Ζήτηση(MW) | 220 | 190 | 160 | 130 | 100 | 70  | 40  | 70  | 100 | 130 |

Με βάση των δεδομένων των Πινάκων 4.7 και 4.8 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 3 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 20 ωρών είναι 77917\$, εκ των οποίων 77547\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου, 300\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης και 70\$ είναι το συνολικό κόστος κράτησης.

Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζεται το πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 3 μονάδων, που έδωσε ο κώδικας βελτιστοποίησης του GAMS και στον Πίνακα 4.10 παρουσιάζεται το αντίστοιχο πλάνο παραγωγής.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 4.9 είναι, ότι τις ώρες που έχουμε την πιο αυξημένη ζήτηση τότε βρίσκονται σε λειτουργία και οι τρεις μονάδες παραγωγής. Αυτές είναι οι ώρες 6<sup>η</sup>, 7<sup>η</sup>, 8<sup>η</sup>, 9<sup>η</sup>, 10<sup>η</sup>, όπου η ζήτηση είναι μεγαλύτερη ή ίση των 200MW.

Επίσης, παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου μέχρι την 10<sup>η</sup> ώρα εκκινούν όλο και περισσότερες μονάδες παραγωγής στο σύστημα, λόγω της αύξησης της ζήτησης. Αντίθετα, μετά την 10<sup>η</sup> ώρα που μειώνεται κρατούνται όλο και περισσότερες.

**Πίνακας 4.9:** Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 3 μονάδων για τις 20 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|        | 1    | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| 1      | 1    | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 2      | 0    | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 3      | 1    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Μονάδα | Ωρες |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|        | 11   | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 1      | 0    | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 2      | 1    | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 3      | 1    | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |

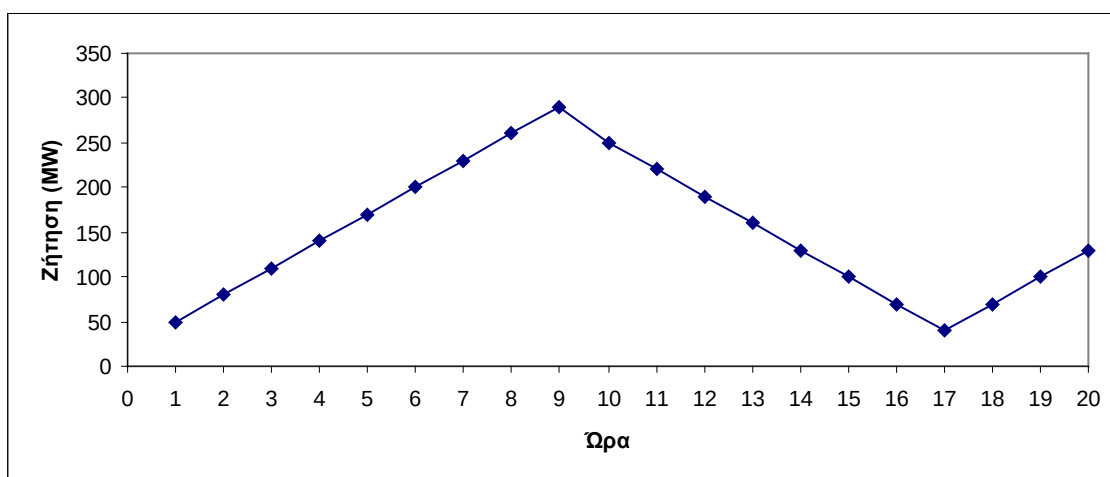
Από τον Πίνακα 4.10 γίνεται εμφανή η σταδιακή αύξηση του ρυθμού παραγωγής μίας μονάδας (όριο αναρρίχησης κατά την εκκίνηση) από την χρονική περίοδο που αυτή εντάσσεται μέχρι να φτάσει στην μέγιστη τιμή παραγωγής της, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Παρατηρούμε ότι οι μονάδες παράγουν τη μέγιστη ή σχεδόν τη μέγιστη ισχύ τους τις ώρες που η ζήτηση είναι υψηλότερη, δηλαδή την 9<sup>η</sup> και 10<sup>η</sup> ώρα. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα

**Πίνακας 4.10:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 3 μονάδων για τις επόμενες 20 ώρες.

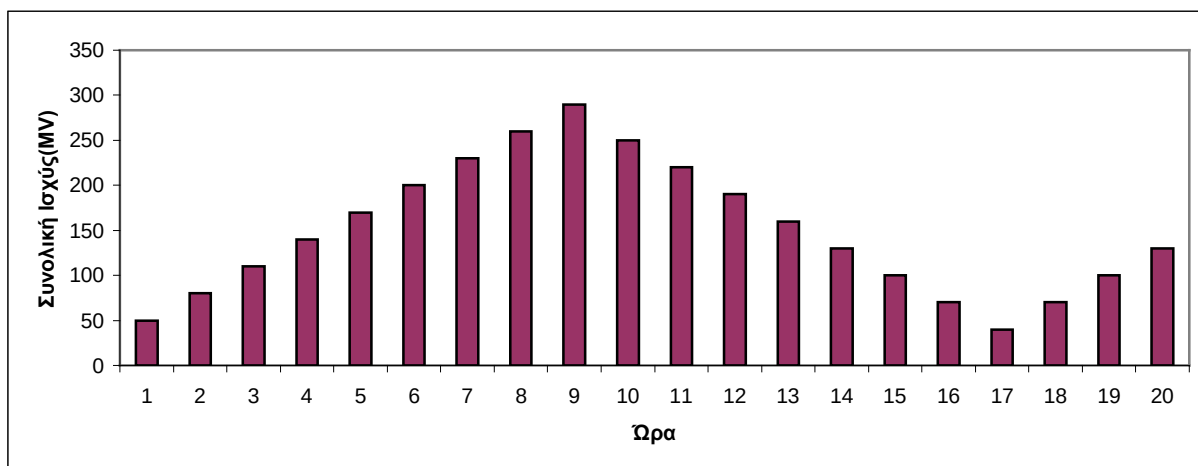
| Μονάδα | Ωρες |     |       |      |     |     |     |     |     |     |
|--------|------|-----|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | 1    | 2   | 3     | 4    | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
| 1      | 12   | 8   | 0     | 0    | 0   | 12  | 24  | 30  | 30  | 15  |
| 2      | 0    | 0   | 0     | 0    | 23  | 46  | 69  | 92  | 114 | 114 |
| 3      | 38   | 72  | 110   | 140  | 147 | 142 | 137 | 138 | 146 | 121 |
| Μονάδα | Ωρες |     |       |      |     |     |     |     |     |     |
|        | 11   | 12  | 13    | 14   | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  |
| 1      | 0    | 0   | 0     | 6    | 14  | 7   | 0   | 7   | 14  | 21  |
| 2      | 114  | 114 | 109,5 | 86,5 | 86  | 63  | 40  | 63  | 86  | 109 |
| 3      | 106  | 76  | 50,5  | 37,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

### 4.3.2 ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο Σχήμα 4.2 φαίνεται η ζήτηση τις ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Όπως παρατηρούμε η ζήτηση αυξάνεται διαρκώς μέχρι την 9<sup>η</sup> ώρα που παίρνει την μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια αρχίζει και μειώνεται μέχρι την 17<sup>η</sup> ώρα που λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της και τέλος αυξάνεται μέχρι την 20<sup>η</sup> ώρα.

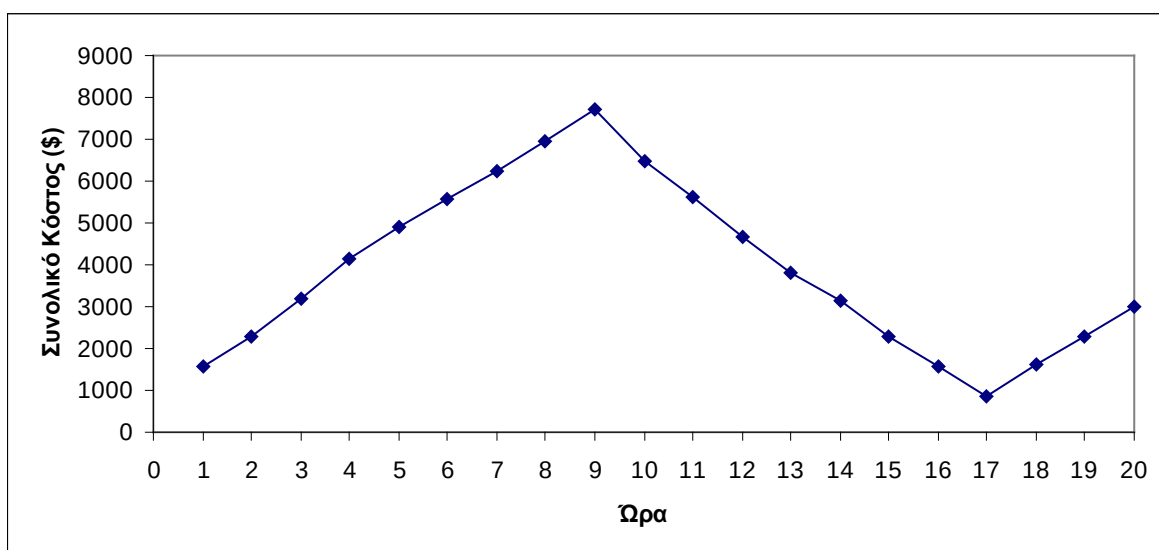
**Σχήμα 4.2:** Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Κατανομή ζήτησης [4.1]

Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται ότι η συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα αυξάνεται μέχρι την 9<sup>η</sup> ώρα που σημειώνεται η μέγιστη ζήτηση και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι την 17<sup>η</sup> ώρα και τέλος αυξάνεται μέχρι την 20<sup>η</sup> ώρα. Δηλαδή, όπως φαίνεται ακολουθείται η κατανομή της ζήτησης που είδαμε στο Σχήμα 4.2 καλύπτοντας την ζήτηση σε κάθε ώρα.



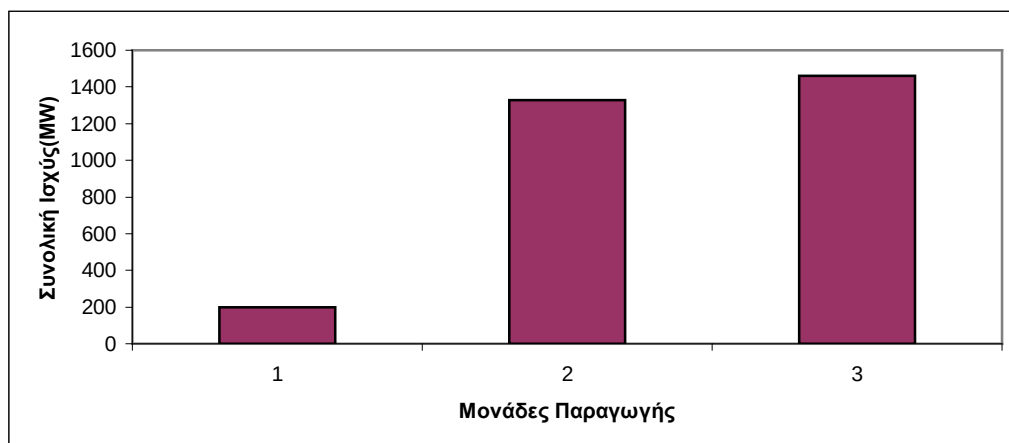
**Σχήμα 4.3:** Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα.

Στο Σχήμα 4.4 παρατηρούμε ότι το συνολικό κόστος μεγιστοποιείται την 9<sup>η</sup> ώρα 7726\$, όπου η ζήτηση είναι μέγιστη και ελαχιστοποιείται την 17<sup>η</sup> ώρα 868\$, όπου η ζήτηση είναι η ελάχιστη. Αυτό είναι λογικό, αφού όσο μεγαλώνει η ζήτηση τόσο μεγαλώνει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρειάζονται να εκκινήσουν νέες μηχανές που αυξάνουν το κόστος. Έτσι, το συνολικό κόστος για κάθε ώρα είναι ανάλογο της ζήτησης που σημειώνεται κάθε ώρα.



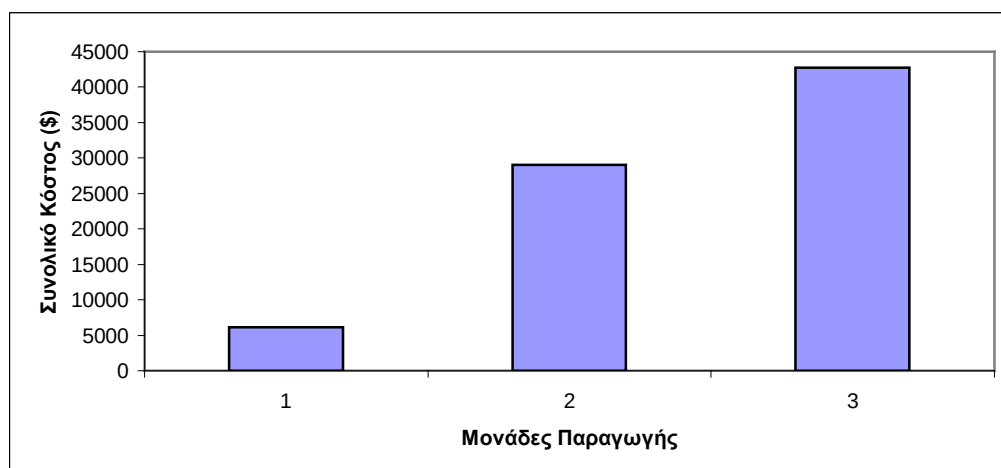
**Σχήμα 4.4:** Συνολικό κόστος για κάθε ώρα.

Στο Σχήμα 4.5 φαίνεται ότι η μονάδα 3 συμμετέχει περισσότερο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράγοντας 1461 MW. Μεγάλο ποσοστό συμμετοχής έχει και η μονάδα 2 παράγοντας 1329 MW. Τέλος, φαίνεται ότι η μονάδα 1 συμμετέχει πολύ λιγότερο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αφού παράγει 200 MW.



Σχήμα 4.5: Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε μονάδα.

Στο Σχήμα 4.6 φαίνεται ότι η μονάδα 3 έχει το μεγαλύτερο συνολικό κόστος 42740\$, η μονάδα 2 έχει συνολικό κόστος 26061\$ και η μονάδα ένα παρουσιάζει το ελάχιστο συνολικό κόστος 6117\$. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα, αφού όπως είδαμε στο Σχήμα 4.5 η μονάδα 1 παρήγαγε περισσότερη συνολική ισχύ από την 2 και η 2 από την 1.



Σχήμα 4.6: Συνολικό κόστος για κάθε μονάδα.

#### 4.3.3 ΔΙΚΤΥΟ 5 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 6 ΩΡΩΝ

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα δεδομένα των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η ζήτηση για την χρονική περίοδο των 6 ωρών.

Πίνακας 4.11: Δεδομένα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

| Δείκτης μονάδας | $P^{min}$ (MW) | $P^{max}$ (MW) | $R^{up}$ (MW/h) | $R^{down}$ (MW/h) | $A$ (\$/h) | $B$ (\$/MWh) | $C$ (\$/MW <sup>2</sup> h) | $initial$ (h) | $D$ (\$/h) | $E$ (\$/h) | $CT$ (h) | $SD$ (\$/h) |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-------------------|------------|--------------|----------------------------|---------------|------------|------------|----------|-------------|
| 1               | 6              | 30             | 12              | 15                | 31,72      | 26,2541      | 0,06975                    | -1            | 30         | 30         | 2        | 20          |
| 2               | 22,8           | 114            | 23              | 23                | 11,57      | 20,3148      | 0,01459                    | -3            | 75         | 75         | 3        | 30          |
| 3               | 37,5           | 150            | 38              | 38                | 15,22      | 26,7302      | 0,01921                    | -3            | 105        | 105        | 4        | 10          |
| 4               | 80             | 230            | 150             | 150               | 44,85      | 15,2835      | 0,00563                    | -5            | 225        | 225        | 6        | 40          |
| 5               | 100            | 400            | 250             | 250               | 64,16      | 8,3391       | 0,01059                    | -10           | 500        | 500        | 8        | 20          |

**Πίνακας 4.11(συνέχεια):** Δεδομένα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

| Δείκτης<br>μονάδας | <i>T<sub>up</sub></i><br>(h) | <i>T<sub>down</sub></i><br>(h) |
|--------------------|------------------------------|--------------------------------|
| 1                  | 1                            | 1                              |
| 2                  | 3                            | 2                              |
| 3                  | 4                            | 2                              |
| 4                  | 5                            | 3                              |
| 5                  | 8                            | 5                              |

**Πίνακας 4.12:** Ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

| Ωρα        | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   |
|------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Ζήτηση(MW) | 350 | 400 | 425 | 480 | 520 | 555 |

Με βάση των δεδομένων των Πινάκων 4.11 και 4.12 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 5 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 6 ωρών είναι 37577\$, εκ των οποίων 36672\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου και 905\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης.

Στον Πίνακα 4.13 παρουσιάζεται το πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 5 μονάδων, που έδωσε ο κώδικας βελτιστοποίησης του GAMS και στον Πίνακα 4.14 παρουσιάζεται το αντίστοιχο πλάνο παραγωγής.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 4.13 είναι, ότι η μονάδα 1 δεν χρειάζεται να εκκινήσει σε καμία από τις 6 ώρες. Αντίθετα, παρατηρούμε ότι οι μονάδες 4 και 5 μένουν ανοιχτές και τις 6 ώρες πράγμα που είναι λογικό, αφού είναι οι μόνες που μπορούν να παράγουν αρκετά μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας με τους ίδιους σχεδόν συντελεστές κόστους καυσίμου των άλλων μονάδων, καθώς επίσης έχουν και των μεγαλύτερο ρυθμό αύξησης και ελάττωσης της παραγόμενης ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας.

Επίσης, παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου εκκινούν όλο και περισσότερες μονάδες παραγωγής στο σύστημα, λόγω της αύξησης της ζήτησης.

**Πίνακας 4.13:** Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 5 μονάδων για τις 6 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |   |   |   |   |   |
|--------|------|---|---|---|---|---|
|        | 1    | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 3      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 4      | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 5      | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Από τον Πίνακα 4.14 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. Επίσης, φαίνεται ότι η μονάδα 1 δεν παράγει ποτέ ισχύ, αφού δεν χρειάζεται να ενταχθεί. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα

**Πίνακας 4.14:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 5 μονάδων για τις 6 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |     |     |         |         |         |
|--------|------|-----|-----|---------|---------|---------|
|        | 1    | 2   | 3   | 4       | 5       | 6       |
| 1      | 0    | 0   | 0   | 0       | 0       | 0       |
| 2      | 0    | 0   | 0   | 0       | 0       | 22,8    |
| 3      | 0    | 0   | 0   | 0       | 0       | 37,5    |
| 4      | 100  | 80  | 80  | 99,322  | 125,438 | 108,919 |
| 5      | 250  | 320 | 345 | 380,678 | 394,562 | 385,781 |

#### 4.3.4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως είπαμε και στην εισαγωγή η πολυπλοκότητα του προβλήματός μας είναι μεγάλη και αυτό επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα των πιο πάνω ενοτήτων. Το σύστημα των 3<sup>ων</sup> μονάδων δίνει λύση σε λογικό χρονικό διάστημα ό αν εξετάστηκε για 2 0 ώρες και το σύστημα των 5 μονάδων για 6 ώρες. Και τα δύο συστήματα για μελέτη άνω των ωρών που εξετάστηκαν δεν δίνουν λύση για χρόνο άνω τις μιας ώρας.

Το λογισμικό GAMS που δοκιμάστηκαν τα πιο πάνω σενάρια είναι εγκατεστημένο σε laptop με τα εξής χαρακτηριστικά:

**Επεξεργαστή:** Intel Core 2 Duo processor T5600

(1.83 GHz, 667 MHz FSB, 2MB L2 cache)

**RAM:** 2GB DDR2

Τα στατιστικά για κάθε σενάριο είναι τα εξής:

1. 3 μονάδες, 20 ώρες : Επαναλήψεις: 189 Χρόνος: 00:16:40

2. 5 μονάδες, 6 ώρες : Επαναλήψεις: 231 Χρόνος: 00:02:53

#### 4.4 ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕ ‘ΧΑΛΑΡΩΣΗ’ ΤΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ

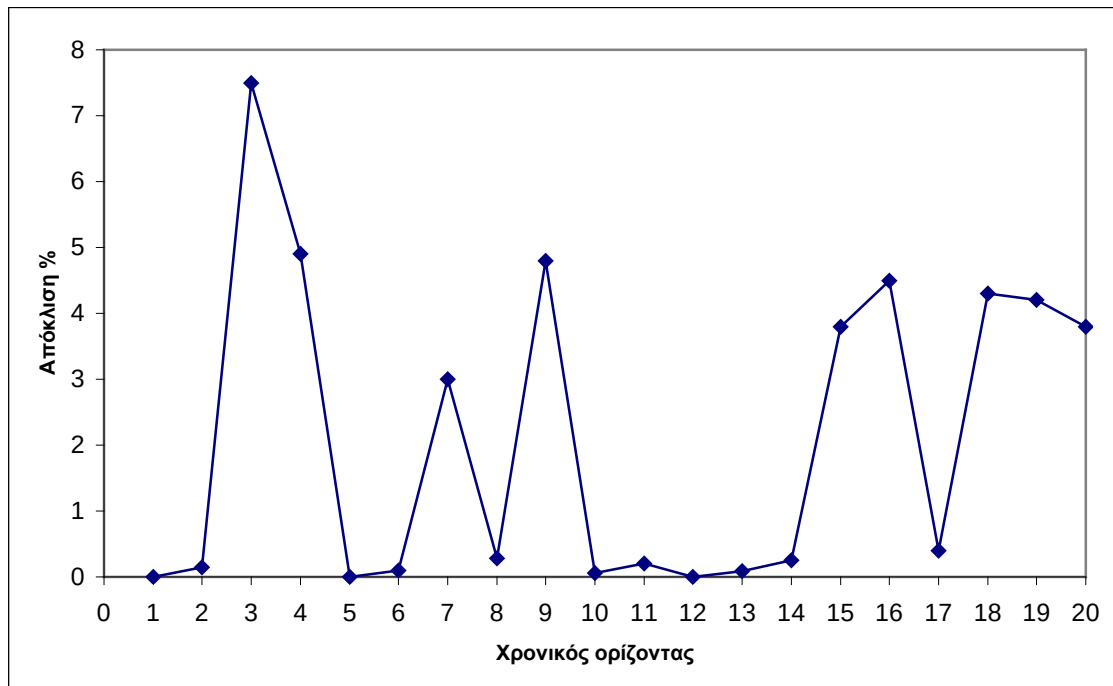
Σε αυτή την ενότητα αρχικά θα ελέγξουμε την απόκλιση που έχει η μεθοδολογία που προτείνουμε στο κεφάλαιο 3. Στη συνέχεια θα πραγματοποιηθεί προγραμματισμός σε τέσσερα διαφορετικά σενάρια. Το πρώτο αποτελείται από ένα σύστημα 10 μονάδων, το δεύτερο 20 μονάδων, το τρίτο 60 μονάδων και το τέταρτο 1 00 μονάδων. Και τα τέσσερα συστήματα μελετώνται για χρονικό ορίζοντα 24<sup>ων</sup> ωρών.

##### 4.4.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΠΟΚΛΙΣΕΩΝ

Όπως είπαμε στο κεφάλαιο 3 θα λύσουμε σε πρώτο βήμα το υποπρόβλημα με αντικειμενική συνάρτηση (3.13) και τους περιορισμούς (3.14) – (3.17) και στη συνέχεια θα δεχτούμε την λύση αυτή και θα αντικαταστήσουμε τις τιμές αυτές στην αντικειμενική συνάρτηση (3.1).

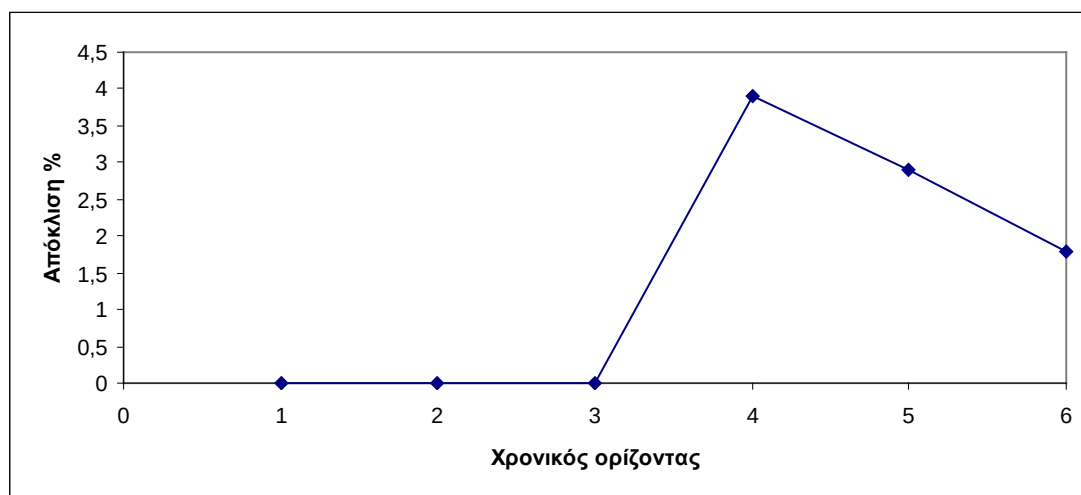
Τώρα ελέγχουμε τις αποκλίσεις που έχει η μεθοδολογία που προτείνουμε συγκρίνοντας τα αποτελέσματά της με τα αποτελέσματα των σεναρίων τις ενότητας 4.3. Για το σενάριο με 3<sup>εις</sup> μονάδες για 20 ώρες, ελέγχουμε την απόκλιση του συνολικού κόστους ξεκινώντας με χρονικό ορίζοντα προγραμματισμού  $T = 1$  ώρα έως  $T = 20$  ώρες. Αντίστοιχα, για το σενάριο με 5 μονάδες για 6 ώρες, ελέγχουμε την απόκλιση του συνολικού κόστους ξεκινώντας με χρονικό ορίζοντα  $T = 1$  ώρα έως  $T = 6$  ώρες.

Στο σχήμα 4.7 παρατηρούμε ότι στη σύγκριση με το πρώτο σενάριο της ενότητας 4.3 έχουμε την μεγαλύτερη απόκλιση 7,5%, που σημειώνεται για πολύ μικρό χρονικό ορίζοντα  $T = 3$ . Επίσης φαίνεται ότι 11 από τις 20 αποκλίσεις βρίσκονται στο διάστημα  $[0, 0.5]$  και άλλες 8 στο διάστημα  $[3, 5]$ . Τελικά, παίρνουμε μια αναμενόμενη τιμή απόκλισης περίπου 2%.



Σχήμα 4.7: Αποκλίσεις από σενάριο με 3<sup>εις</sup> μονάδες για 20 ώρες.

Στο σχήμα 4.8 παρατηρούμε ότι στη σύγκριση με το δεύτερο σενάριο της παραγράφου 4.3 έχουμε την μεγαλύτερη απόκλιση 3,9%, που σημειώνεται για μικρό χρονικό ορίζοντα  $T = 4$ . Επίσης, βλέπουμε ότι μέχρι χρονικό ορίζοντα  $T = 3$  έχουμε απόκλιση 0%. Μετά τον χρονικό ορίζοντα  $T = 4$  παρατηρούμε μείωση της απόκλισης και τελικά παίρνουμε αναμενόμενη τιμή απόκλισης περίπου 1,4%.



Σχήμα 4.8: Αποκλίσεις από σενάριο με 5 μονάδες για 6 ώρες.

#### 4.4.2 ΔΙΚΤΥΟ 10 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Στους παρακάτω πίνακες παρατίθενται τα δεδομένα των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και η ζήτηση για την χρονική περίοδο των 24 ωρών.

Πίνακας 4.15: Δεδομένα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

| Δείκτης μονάδας | $P^{min}$ (MW) | $P^{max}$ (MW) | $R^{up}$ (MW/h) | $R^{down}$ (MW/h) | $A$ (\$/h) | $B$ (\$/MWh) | $C$ (\$/MW <sup>2</sup> h) | $initial$ (h) | $D$ (\$/h) | $E$ (\$/h) | $CT$ (h) | $SD$ (\$/h) |
|-----------------|----------------|----------------|-----------------|-------------------|------------|--------------|----------------------------|---------------|------------|------------|----------|-------------|
| 1               | 6              | 30             | 12              | 15                | 31,72      | 26,2541      | 0,06975                    | -1            | 30         | 30         | 2        | 20          |
| 2               | 22,8           | 114            | 23              | 23                | 11,57      | 20,3148      | 0,01459                    | -3            | 75         | 75         | 3        | 30          |
| 3               | 37,5           | 150            | 38              | 38                | 15,22      | 26,7302      | 0,01921                    | -3            | 105        | 105        | 4        | 10          |
| 4               | 80             | 230            | 150             | 150               | 44,85      | 15,2835      | 0,00563                    | -5            | 225        | 225        | 6        | 40          |
| 5               | 100            | 400            | 250             | 250               | 64,16      | 8,3391       | 0,01059                    | -10           | 500        | 500        | 8        | 20          |
| 6               | 140            | 350            | 70              | 120               | 177,0575   | 10,8616      | 0,00153                    | 10            | 500        | 500        | 8        | 20          |
| 7               | 100            | 400            | 50,5            | 100               | 310,0021   | 7,4921       | 0,00194                    | 10            | 500        | 500        | 8        | 50          |
| 8               | 100            | 400            | 50,5            | 100               | 311,9102   | 7,5031       | 0,00195                    | 10            | 500        | 500        | 8        | 15          |
| 9               | 54,25          | 155            | 55              | 78                | 143,5972   | 10,7583      | 0,00487                    | 5             | 105        | 105        | 5        | 40          |
| 10              | 68,95          | 197            | 55              | 99                | 259,131    | 23           | 0,00259                    | -4            | 225        | 225        | 6        | 35          |

Πίνακας 4.15(συνέχεια): Δεδομένα μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

| Δείκτης μονάδας | $T_{up}$ (h) | $T_{down}$ (h) |
|-----------------|--------------|----------------|
| 1               | 1            | 1              |
| 2               | 3            | 2              |
| 3               | 4            | 2              |
| 4               | 5            | 3              |
| 5               | 8            | 5              |
| 6               | 8            | -5             |
| 7               | 8            | -5             |
| 8               | 8            | -5             |
| 9               | 5            | -3             |
| 10              | 5            | -4             |





|    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
| 5  | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400 | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 6  | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |
| 7  | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 8  | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 9  | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0   | 0   | 59  | 54  |
| 10 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197 | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |

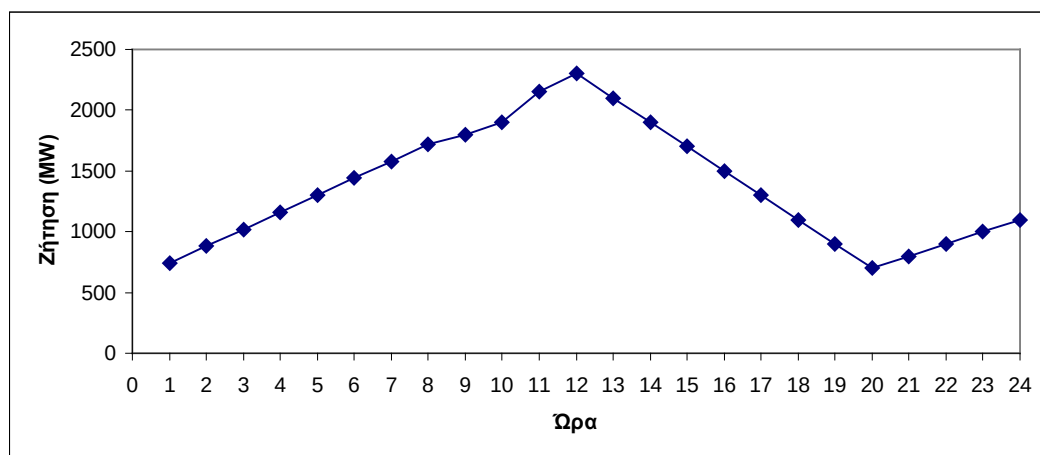
Τα στατιστικά του σεναρίου είναι τα εξής:

Επαναλήψεις: 0

Χρόνος: 00:00:03

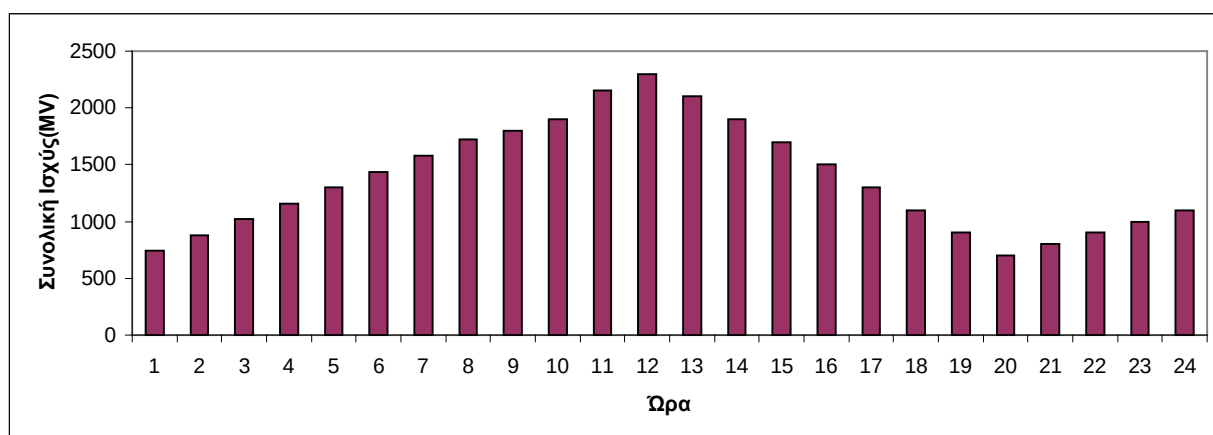
#### 4.Α ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο Σχήμα 4.9 φαίνεται η ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Όπως παρατηρούμε η ζήτηση αυξάνεται διαρκώς μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα που παίρνει την μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια αρχίζει και μειώνεται μέχρι την 20<sup>η</sup> ώρα που λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της και τέλος αυξάνεται μέχρι την 24<sup>η</sup> ώρα.



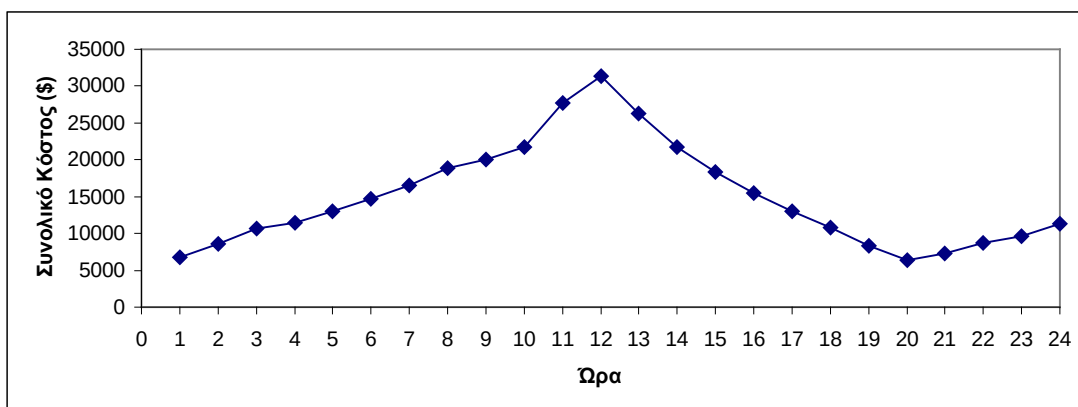
Σχήμα 4.9: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Κατανομή ζήτησης [4.1]

Στο Σχήμα 4.10 φαίνεται ότι η συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα αυξάνεται μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα που σημειώνεται η μέγιστη ζήτηση και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι την 20<sup>η</sup> ώρα και τέλος αυξάνεται μέχρι την 24<sup>η</sup> ώρα. Δηλαδή, όπως φαίνεται ακολουθείται η κατανομή της ζήτησης που είδαμε στο Σχήμα 4.9 καλύπτοντας την ζήτηση σε κάθε ώρα.



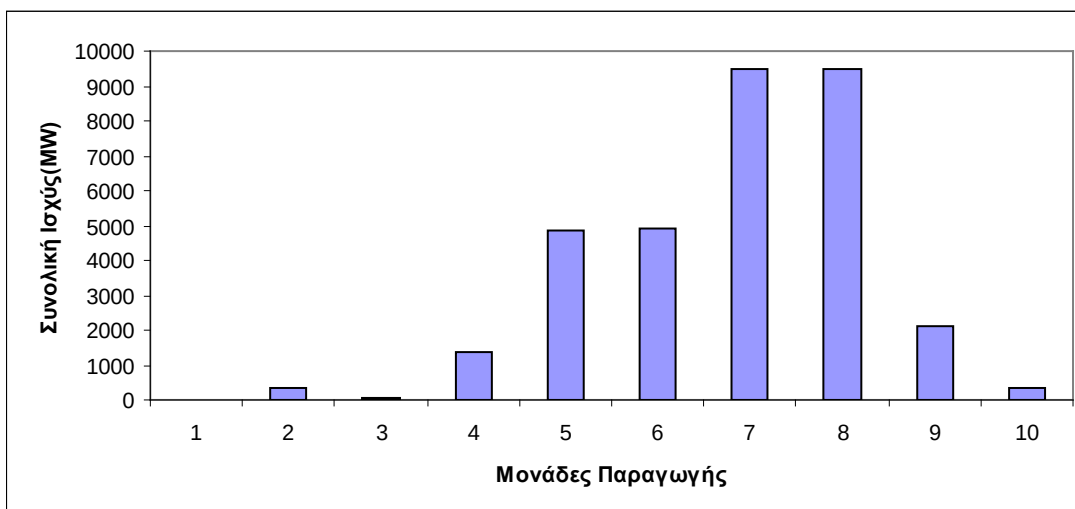
Σχήμα 4.10: Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα.

Στο Σχήμα 4.11 παρατηρούμε ότι το συνολικό κόστος μεγιστοποιείται την 12<sup>η</sup> ώρα 31359\$, όπου η ζήτηση είναι μέγιστη και ελαχιστοποιείται την 20<sup>η</sup> ώρα 6376\$, όπου η ζήτηση είναι η ελάχιστη. Αυτό είναι λογικό, αφού όσο μεγαλώνει η ζήτηση τόσο μεγαλώνει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρειάζονται να εκκινήσουν νέες μηχανές που αυξάνουν το κόστος. Έτσι, το συνολικό κόστος για κάθε ώρα είναι ανάλογο της ζήτησης που σημειώνεται κάθε ώρα.



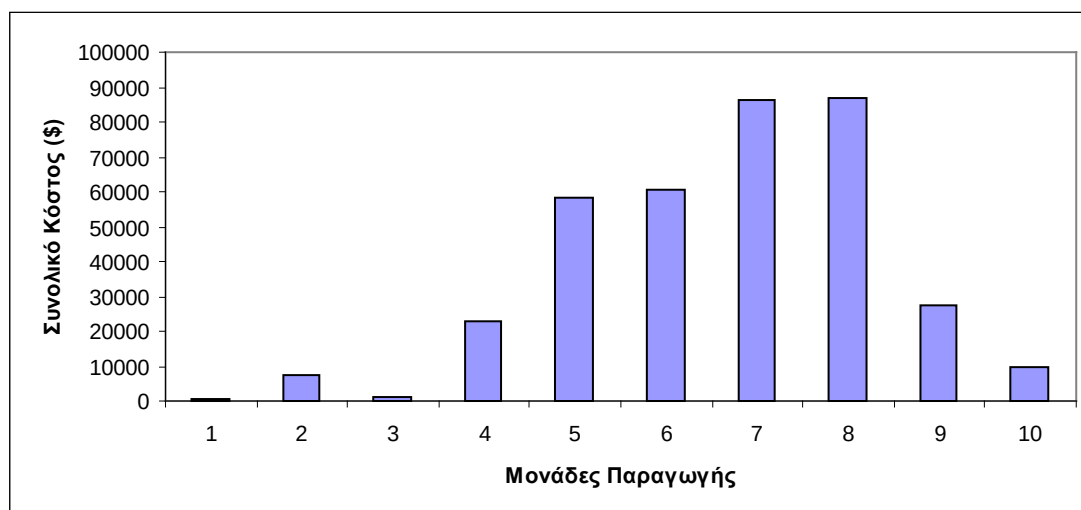
**Σχήμα 4.11:** Συνολικό κόστος για κάθε ώρα.

Στο Σχήμα 4.12 φαίνεται ότι οι μονάδες 7 και 8 συμμετέχουν περισσότερο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράγοντας 9482 MW και 9463 MW, αντίστοιχα. Λίγότερο ποσοστό συμμετοχής έχουν και οι μονάδες 5 και 6 παράγοντας 4881 MW και 4935 MW, αντίστοιχα. Τέλος, οι υπόλοιπες μονάδες φαίνεται να συμβάλουν πολύ λίγο στην παραγωγή παράγοντας κάτω από 2200 – 39 MW.



**Σχήμα 4.12:** Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε μονάδα.

Στο Σχήμα 4.13 φαίνεται ότι οι μονάδες 7 και 8 έχουν το μεγαλύτερο συνολικό κόστος 86567\$ και 86588\$, αντίστοιχα. Οι μονάδες 5 και 6 έχουν συνολικό κόστος 58482\$ και 60720\$, αντίστοιχα. Οι υπόλοιπες μονάδες έχουν συνολικό κόστος κάτω των 3000\$. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα σύμφωνα και με το Σχήμα 4.12 πιο πάνω.



Σχήμα 4.13: Συνολικό κόστος για κάθε μονάδα.

#### 4.4.3 ΔΙΚΤΥΟ 20 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Σε αυτό το σενάριο θα εξετάσουμε 20 μονάδες για 24 ώρες, γι' αυτό το λόγο θα διπλασιάσουμε τα δεδομένα των μονάδων του Πίνακα 4.15. Παράλληλα με τον διπλασιασμό αυτόν θα διπλασιάσουμε και την ζήτηση του Πίνακα 4.16 και έτσι παίρνουμε τον Πίνακα 4.19.

Πίνακας 4.19: Ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

| Ωρα        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ζήτηση(MW) | 1480 | 1760 | 2040 | 2320 | 2600 | 2880 | 3160 | 3440 | 3600 | 3800 | 4300 | 4600 |
| Ωρα        | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
| Ζήτηση(MW) | 4200 | 3800 | 3400 | 3000 | 2600 | 2200 | 1800 | 1400 | 1600 | 1800 | 2000 | 2200 |

Με βάση των δεδομένων του διπλάσιου Πίνακα 4.15 και του Πίνακα 4.19 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 20 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 24 ωρών είναι 722223\$, εκ των οποίων 712633\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου, 8950\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης και 640\$ είναι το συνολικό κόστος κράτησης.

Στον Πίνακα 4.20 παρουσιάζεται το πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 20 μονάδων, που έδωσε ο κώδικας βελτιστοποίησης του GAMS και στον Πίνακα 4.21 παρουσιάζεται το αντίστοιχο πλάνο παραγωγής.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 4.20 είναι, ότι οι μονάδες 7, 8, 17 και 18 είναι ενταγμένες από την 1<sup>η</sup> μέχρι και 24<sup>η</sup> ώρα. Παρατηρούμε ότι την 12<sup>η</sup> ώρα που η ζήτηση κορυφώνεται έχουν εκκινήσει όλες οι μονάδες παραγωγής.

Επίσης, παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα εκκινούν όλο και περισσότερες μονάδες παραγωγής στο σύστημα, λόγω της αύξησης της ζήτησης. Αντίθετα, μετά την 12<sup>η</sup> ώρα που μειώνεται κρατούνται όλο και περισσότερες.

**Πίνακας 4.20:** Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 20 μονάδων για τις 24 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|        | 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 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 2      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 3      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 4      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 5      | 0    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 6      | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 7      | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 8      | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 9      | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| 10     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 11     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 12     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 13     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 14     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 15     | 0    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 16     | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 17     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 18     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 19     | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| 20     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |

Από τον Πίνακα 4.21 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, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Επίσης, φαίνεται ότι οι μονάδες 6, 7, 8, 16, 17 και 18 παράγουν σχεδόν πάντα την μέγιστη ισχύ τους. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα.

**Πίνακας 4.21:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 20 μονάδων για τις 24 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |      |     |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |     |
|--------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
|        | 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   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 2      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 3      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 4      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 5      | 0    | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 6      | 0    | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |
| 7      | 372  | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 8      | 368  | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 9      | 0    | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0   | 0   | 59  | 54  |
| 10     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 11     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 12     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 13     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 14     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15     | 0    | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 16     | 0    | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |

|    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
| 17 | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 18 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 19 | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0   | 0     | 0   | 59  | 54  |     |
| 20 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197 | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   |     |

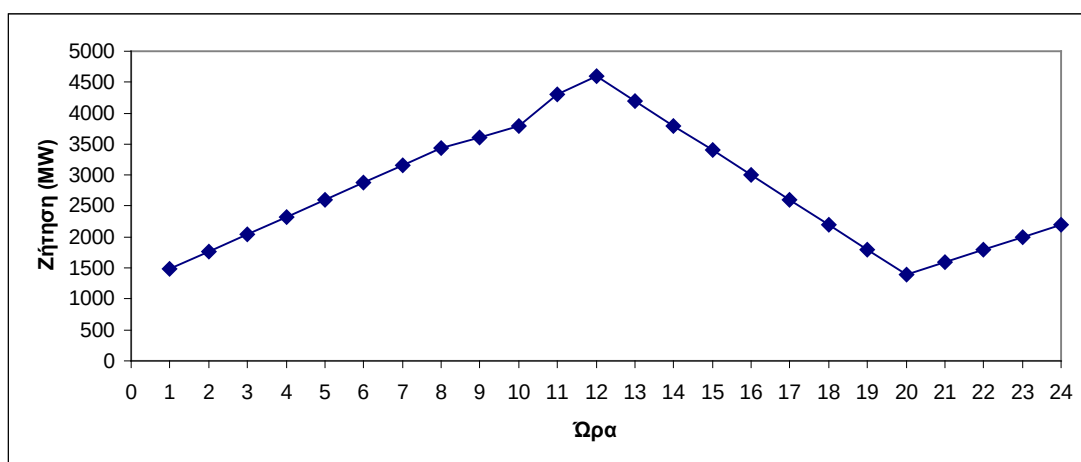
Τα στατιστικά του σεναρίου είναι τα εξής:

Επαναλήψεις: 1

Χρόνος: 00:00:11

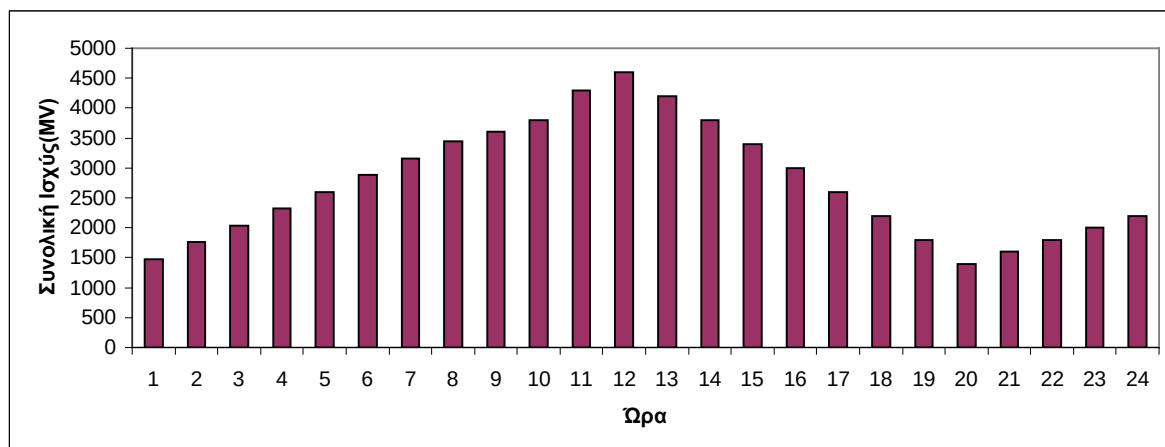
#### 4.B ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο Σχήμα 4.14 φαίνεται η ζήτηση τις ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Όπως παρατηρούμε η ζήτηση αυξάνεται διαρκώς μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα που παίρνει την μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια αρχίζει και μειώνεται μέχρι την 20<sup>η</sup> ώρα που λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της και τέλος αυξάνεται μέχρι την 24<sup>η</sup> ώρα.



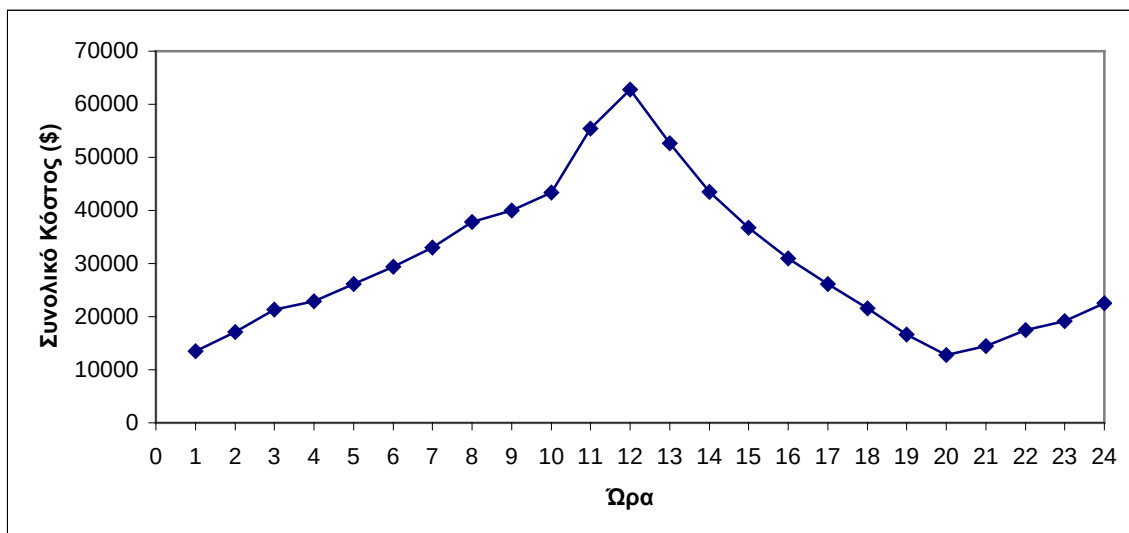
Σχήμα 4.14: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Κατανομή ζήτησης [4.1]

Στο Σχήμα 4.15 φαίνεται ότι η συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα αυξάνεται μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα που σημειώνεται η μέγιστη ζήτηση και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι την 20<sup>η</sup> ώρα και τέλος αυξάνεται μέχρι την 24<sup>η</sup> ώρα. Δηλαδή, όπως φαίνεται ακολουθείται η κατανομή της ζήτησης που είδαμε στο Σχήμα 4.14 καλύπτοντας την ζήτηση σε κάθε ώρα.



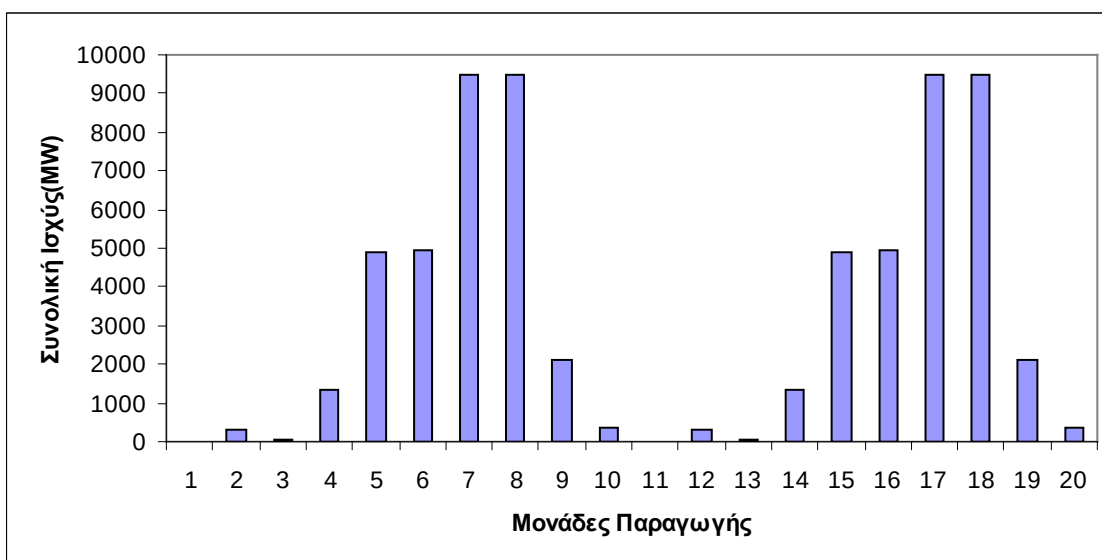
Σχήμα 4.15: Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα.

Στο Σχήμα 4.16 παρατηρούμε ότι το συνολικό κόστος μεγιστοποιείται την 12<sup>η</sup> ώρα 62718\$, όπου η ζήτηση είναι μέγιστη και ελαχιστοποιείται την 20<sup>η</sup> ώρα 12752\$, όπου η ζήτηση είναι η ελάχιστη. Αυτό είναι λογικό, αφού όσο μεγαλώνει η ζήτηση τόσο μεγαλώνει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρειάζονται να εκκινήσουν νέες μηχανές που αυξάνουν το κόστος. Έτσι, το συνολικό κόστος για κάθε ώρα είναι ανάλογο της ζήτησης που σημειώνεται κάθε ώρα.



**Σχήμα 4.16:** Συνολικό κόστος για κάθε ώρα.

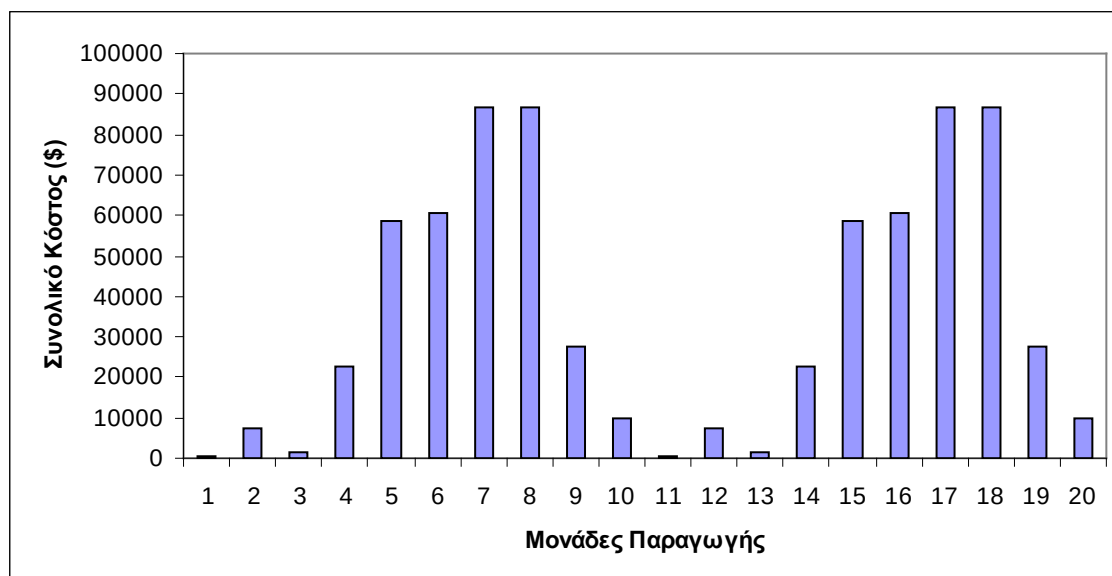
Στο Σχήμα 4.17 φαίνεται ότι οι μονάδες 7, 8, 17 και 18 συμμετέχουν περισσότερο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράγοντας 9482 MW και 9463 MW, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*7 - \*8. Λιγότερο ποσοστό συμμετοχής έχουν και οι μονάδες 5, 6, 15 και 16 παράγοντας 4881 MW και 4935 MW, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*5 - \*6. Τέλος, οι υπόλοιπες μονάδες φαίνεται να συμβάλουν πολύ λίγο στην παραγωγή παράγοντας κάτω από 2200 – 39 MW.



**Σχήμα 4.17:** Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε μονάδα.

Στο Σχήμα 4.18 φαίνεται ότι οι μονάδες 7, 8, 17 και 18 έχουν το μεγαλύτερο συνολικό κόστος 86567\$ και 86588\$, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*7 - \*8. Οι μονάδες 5, 6, 15 και

16 έχουν συνολικό κόστος 58482\$ και 60720\$, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*5 - \*6. Οι υπόλοιπες μονάδες έχουν συνολικό κόστος κάτω των 30000\$. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα σύμφωνα και με το Σχήμα 4.17 πιο πάνω.



Σχήμα 4.18: Συνολικό κόστος για κάθε μονάδα.

#### 4.4.4 ΔΙΚΤΥΟ 60 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Σε αυτό το σενάριο θα εξετάσουμε 60 μονάδες για 24 ώρες, γι' αυτό το λόγο θα εξαπλάσιάζουμε τα δεδομένα των μονάδων του Πίνακα 4.15. Παράλληλα με τον εξαπλασιασμό αυτόν θα εξαπλάσιάζουμε και την ζήτηση του Πίνακα 4.16 και έτσι παίρνουμε τον Πίνακα 4.22.

Πίνακας 4.22: Ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

| Ωρα        | 1     | 2     | 3     | 4    | 5    | 6    | 7    | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|------------|-------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ζήτηση(MW) | 4440  | 5280  | 6120  | 6960 | 7800 | 8640 | 9480 | 10320 | 10800 | 11400 | 12900 | 13800 |
| Ωρα        | 13    | 14    | 15    | 16   | 17   | 18   | 19   | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    |
| Ζήτηση(MW) | 12600 | 11400 | 10200 | 9000 | 7800 | 6600 | 5400 | 4200  | 4800  | 5400  | 6000  | 6600  |

Με βάση των δεδομένων του εξαπλάσιου Πίνακα 4.15 και του Πίνακα 4.22 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 60 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 24 ωρών είναι 2166669\$, εκ των οποίων 2137899\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου, 26850\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης και 1920\$ είναι το συνολικό κόστος κράτησης.

Στον Πίνακα 4.23 παρουσιάζεται το πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 60 μονάδων, που έδωσε ο κώδικας βελτιστοποίησης του GAMS και στον Πίνακα 4.24 παρουσιάζεται το αντίστοιχο πλάνο παραγωγής.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 4.23 είναι, ότι οι μονάδες 7, 8, 17, 18, 27, 28, 37, 38, 47, 48, 57 και 58 είναι ενταγμένες από την 1<sup>η</sup> μέχρι και 24<sup>η</sup> ώρα. Παρατηρούμε ότι την 12<sup>η</sup> ώρα που η ζήτηση κορυφώνεται έχουν εκκινήσει όλες οι μονάδες παραγωγής.



**Πίνακας 4.23:** Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 60 μονάδων για τις 24 ώρες.

[illegible]

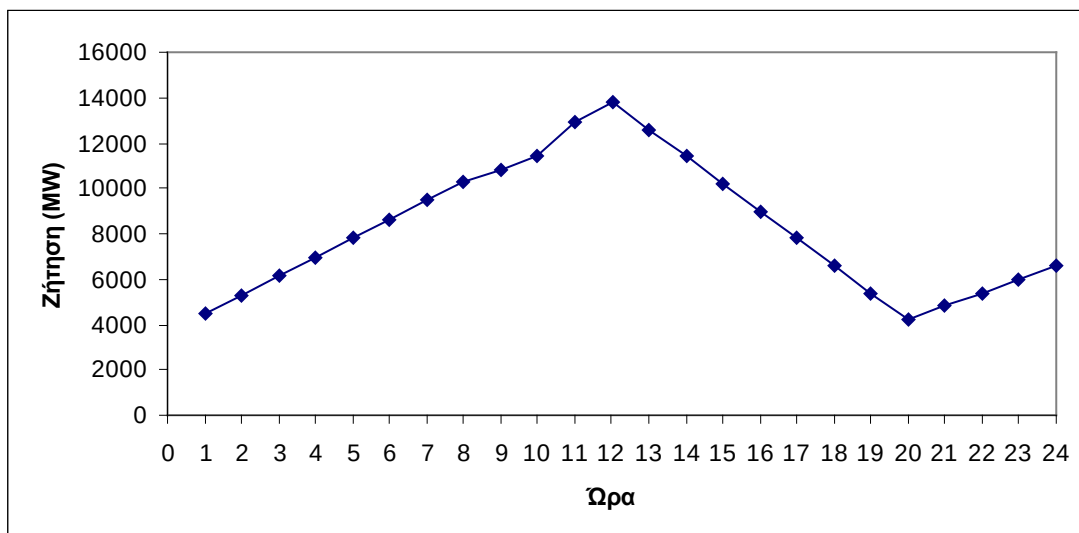
Από τον Πίνακα 4.24 γίνεται εμφανή η σταδιακή αύξηση του ρυθμού παραγωγής μίας μονάδας (όριο αναρρίχησης κατά την εκκίνηση) από την χρονική περίοδο που αυτή εντάσσεται μέχρι να φτάσει στην μέγιστη τιμή παραγωγής της, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Επίσης, φαίνεται ότι οι μονάδες 6, 7, 8, 16, 17, 18, 26, 27, 28, 36, 37, 38, 46, 47, 48, 56, 57 και 58 παράγουν σχεδόν πάντα την μέγιστη ισχύ τους. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα.

[illegible]

|    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |      |     |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
| 24 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 25 | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 26 | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |
| 27 | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 28 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 29 | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0   | 0   | 59  | 54  |
| 30 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 31 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 32 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 33 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 34 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 35 | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 36 | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |
| 37 | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 38 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 39 | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0   | 0   | 59  | 54  |
| 40 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 41 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 42 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 43 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 44 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 45 | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 46 | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |
| 47 | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 48 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 49 | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0   | 0   | 59  | 54  |
| 50 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 51 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 52 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 53 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 54 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 55 | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 56 | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |
| 57 | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 58 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 59 | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0   | 0   | 59  | 54  |
| 60 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |

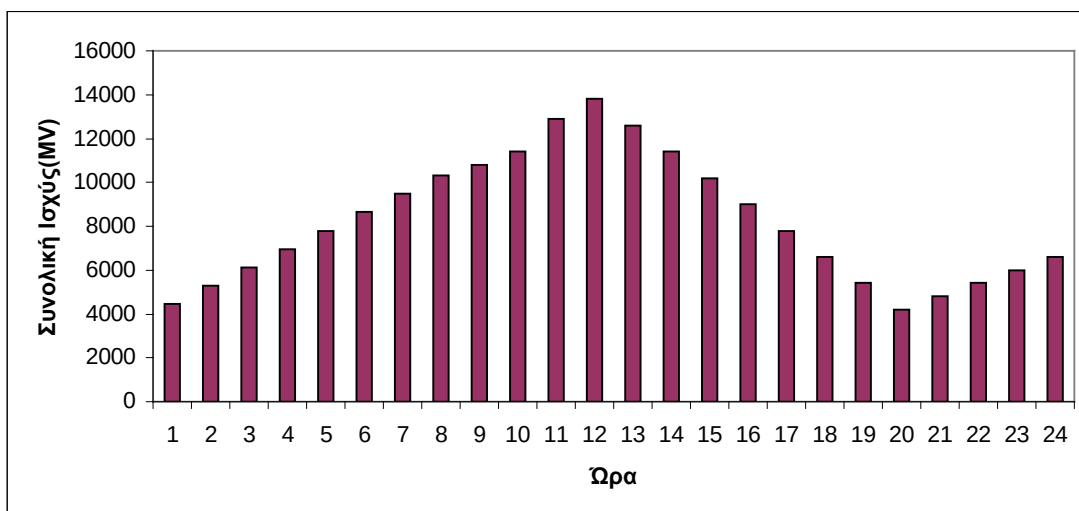
#### 4.Γ ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο Σχήμα 4.19 φαίνεται η ζήτηση τις ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Όπως παρατηρούμε η ζήτηση αυξάνεται διαρκώς μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα που παίρνει την μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια αρχίζει και μειώνεται μέχρι την 20<sup>η</sup> ώρα που λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της και τέλος αυξάνεται μέχρι την 24<sup>η</sup> ώρα.



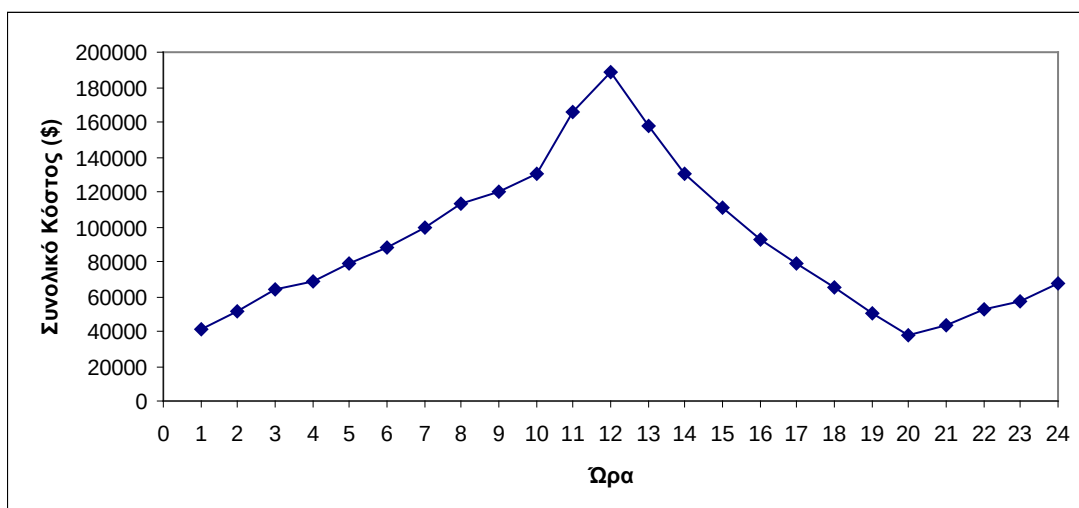
**Σχήμα 4.19:** Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Κατανομή ζήτησης [4.1]

Στο Σχήμα 4.20 φαίνεται ότι η συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα αυξάνεται μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα που σημειώνεται η μέγιστη ζήτηση και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι την 20<sup>η</sup> ώρα και τέλος αυξάνεται μέχρι την 24<sup>η</sup> ώρα. Δηλαδή, όπως φαίνεται ακολουθείται η κατανομή της ζήτησης που είδαμε στο Σχήμα 4.19 καλύπτοντας την ζήτηση σε κάθε ώρα.



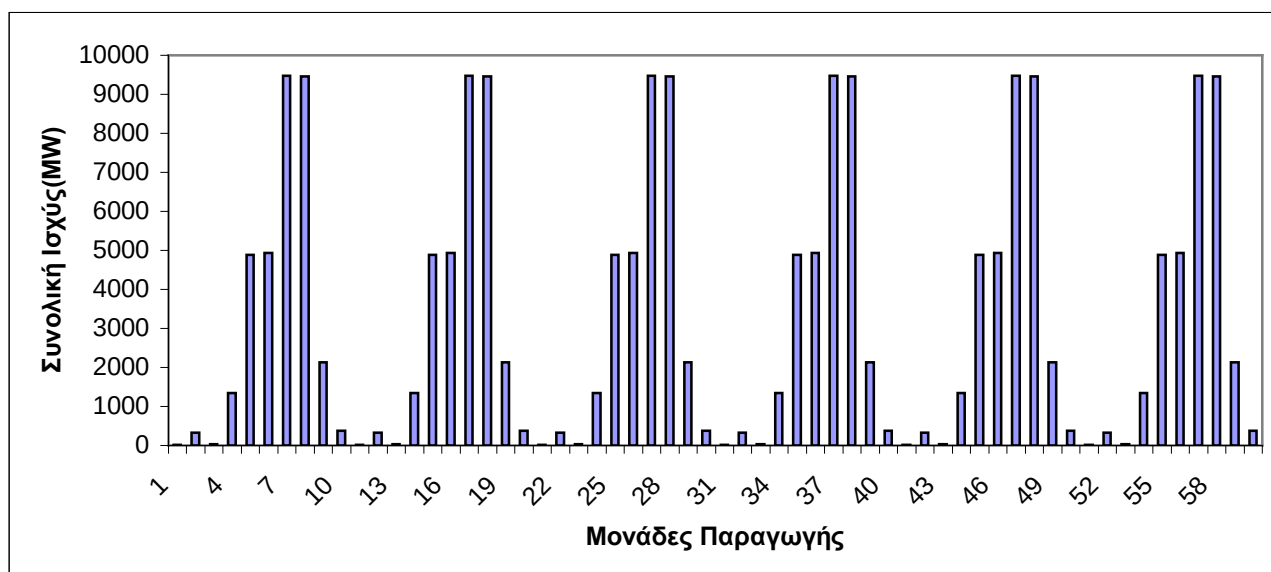
**Σχήμα 4.20:** Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα.

Στο Σχήμα 4.21 παρατηρούμε ότι το συνολικό κόστος μεγιστοποιείται την 12<sup>η</sup> ώρα 188154\$, όπου η ζήτηση είναι μέγιστη και ελαχιστοποιείται την 20<sup>η</sup> ώρα 38256\$, όπου η ζήτηση είναι η ελάχιστη. Αυτό είναι λογικό, αφού όσο μεγαλώνει η ζήτηση τόσο μεγαλώνει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρειάζονται να εκκινήσουν νέες μηχανές που αυξάνουν το κόστος. Έτσι, το συνολικό κόστος για κάθε ώρα είναι ανάλογο της ζήτησης που σημειώνεται κάθε ώρα.



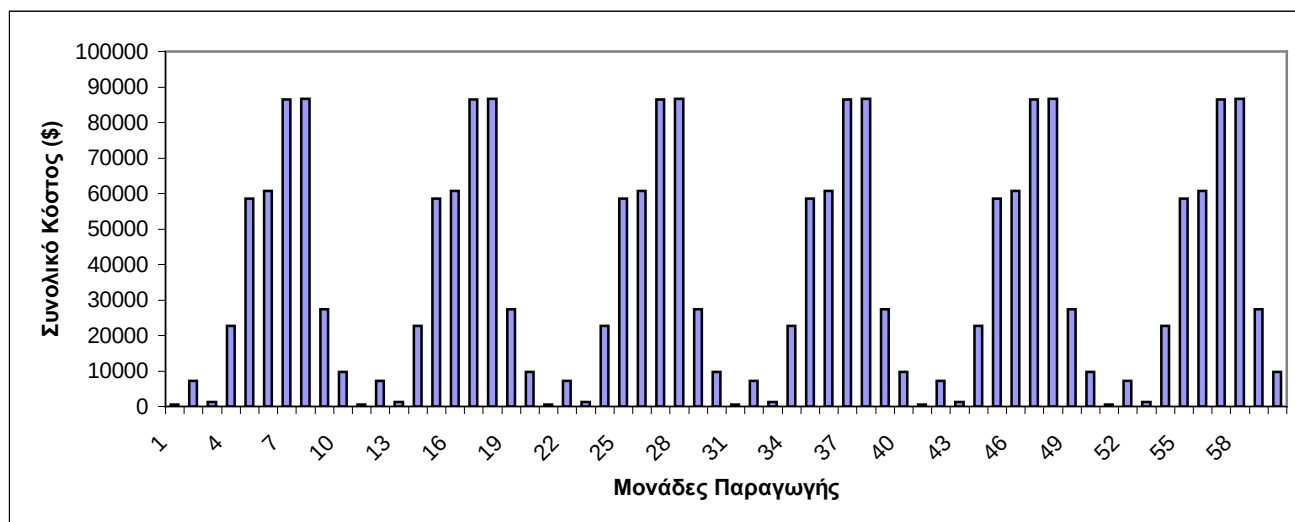
**Σχήμα 4.21:** Συνολικό κόστος για κάθε ώρα.

Στο Σχήμα 4.22 φαίνεται ότι οι μονάδες 7, 8, 17, 18, 27, 28, 37, 38, 47, 48, 57 και 58 συμμετέχουν περισσότερο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράγοντας 9482 MW και 9463 MW, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*7 - \*8. Λιγότερο ποσοστό συμμετοχής έχουν και οι μονάδες 5, 6, 15 και 16 παράγοντας 4881 MW και 4935 MW, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*5 - \*6. Τέλος, οι υπόλοιπες μονάδες φαίνεται να συμβάλουν πολύ λίγο στην παραγωγή παράγοντας κάτω από 2200 – 39 MW.



**Σχήμα 4.22:** Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε μονάδα.

Στο Σχήμα 4.23 φαίνεται ότι οι μονάδες 7, 8, 17, 18, 27, 28, 37, 38, 47, 48, 57 και 58 έχουν το μεγαλύτερο συνολικό κόστος 86567\$ και 86588\$, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*7 - \*8. Οι μονάδες 5, 6, 15, 16, 25, 26, 35, 36, 45, 46, 55 και 56 έχουν συνολικό κόστος 58482\$ και 60720\$, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*5 - \*6. Οι υπόλοιπες μονάδες έχουν συνολικό κόστος κάτω των 30000\$. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα σύμφωνα και με το Σχήμα 4.22 πιο πάνω.



Σχήμα 4.23: Συνολικό κόστος για κάθε μονάδα.

#### 4.4.5 ΔΙΚΤΥΟ 100 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Σε αυτό το σενάριο θα εξετάσουμε 100 μονάδες για 24 ώρες, γι' αυτό το λόγο θα δεκαπλασιάσουμε τα δεδομένα των μονάδων του Πίνακα 4.15. Παράλληλα με τον δεκαπλασιασμό αυτόν θα δεκαπλασιάσουμε και την ζήτηση του Πίνακα 4.16 και έτσι παίρνουμε τον Πίνακα 4.25.

Πίνακας 4.25: Ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

| Ωρα        | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     | 9     | 10    | 11    | 12    |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ζήτηση(MW) | 7400  | 8800  | 10200 | 11600 | 13000 | 14400 | 15800 | 17200 | 18000 | 19000 | 21500 | 23000 |
| Ωρα        | 13    | 14    | 15    | 16    | 17    | 18    | 19    | 20    | 21    | 22    | 23    | 24    |
| Ζήτηση(MW) | 21000 | 19000 | 17000 | 15000 | 13000 | 11000 | 9000  | 7000  | 8000  | 9000  | 10000 | 11000 |

Με βάση των δεδομένων του δεκαπλάσιου Πίνακα 4.15 και του Πίνακα 4.25 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 100 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 24 ωρών είναι 3611110\$, εκ των οποίων 35363160\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου, 44750\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης και 3200\$ είναι το συνολικό κόστος κράτησης.

Στον Πίνακα 4.26 παρουσιάζεται το πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 100 μονάδων, που έδωσε ο κώδικας βελτιστοποίησης του GAMS και στον Πίνακα 4.27 παρουσιάζεται το αντίστοιχο πλάνο παραγωγής.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 4.26 είναι, ότι οι μονάδες 7, 8, 17, 18, 27, 28, 37, 38, 47, 48, 57, 58, 67, 68, 77, 78, 87, 88, 97 και 98 είναι ενταγμένες από την 1<sup>η</sup> μέχρι και 24<sup>η</sup> ώρα. Παρατηρούμε ότι την 12<sup>η</sup> ώρα που η ζήτηση κορυφώνεται έχουν εκκινήσει όλες οι μονάδες παραγωγής.

Επίσης, παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα εκκινούν όλο και περισσότερες μονάδες παραγωγής στο σύστημα, λόγω της αύξησης της ζήτησης. Αντίθετα, μετά την 12<sup>η</sup> ώρα που μειώνεται κρατούνται όλο και περισσότερες.

**Πίνακας 4.26:** Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 100 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 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 2      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 3      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 4      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 5      | 0    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 6      | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 7      | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 8      | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 9      | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| 10     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 11     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 12     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 13     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 14     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 15     | 0    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 16     | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 17     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 18     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 19     | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| 20     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 21     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 22     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 23     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 24     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 25     | 0    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 26     | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 27     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 28     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 29     | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| 30     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 31     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 32     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 33     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 34     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 35     | 0    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 36     | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 37     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 38     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 39     | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| 40     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 41     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 42     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 43     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 44     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 45     | 0    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| 46     | 0    | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| 47     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 48     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |

|    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 49 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 50 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 51 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 52 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 53 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 54 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 55 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 56 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 57 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 58 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 59 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 60 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 61 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 62 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 63 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 64 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 65 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 66 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 67 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 68 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 69 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 71 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 72 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 73 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 74 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 75 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 76 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 77 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 78 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 79 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 81 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 82 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 83 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 84 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 85 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| 86 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 87 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 88 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 89 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 90 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 91 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 92 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 93 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 94 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 95 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 96 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 97 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 98 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 99 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 |



100 | 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

Από τον Πίνακα 4.27 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, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Επίσης, φαίνεται ότι οι μονάδες 6, 7, 8, 16, 17, 18, 26, 27, 28, 36, 37, 38, 46, 47, 48, 56, 57, 58, 66, 67, 68, 76, 77, 78, 86, 87, 88, 96, 97 και 98 παράγουν σχεδόν πάντα την μέγιστη ισχύ τους. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα.

**Πίνακας 4.27:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 100 μονάδων για τις 24 ώρες.

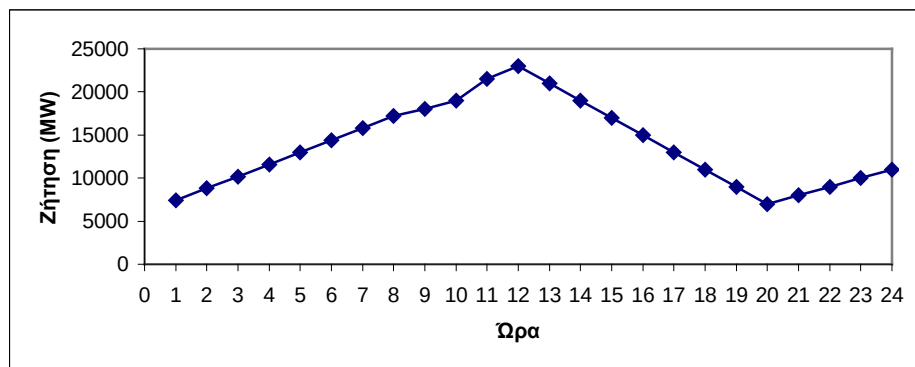
| Μονάδα | Ώρες |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |      |     |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |     |
|--------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|
|        | 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   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 2      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 3      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 4      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 5      | 0    | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 6      | 0    | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |
| 7      | 372  | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 8      | 368  | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 9      | 0    | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0   | 0   | 59  | 54  |
| 10     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 11     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 12     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 13     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 14     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 15     | 0    | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 16     | 0    | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |
| 17     | 372  | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 18     | 368  | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 19     | 0    | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0   | 0   | 59  | 54  |
| 20     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 21     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 22     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 23     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 24     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 25     | 0    | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 26     | 0    | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |
| 27     | 372  | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 28     | 368  | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 29     | 0    | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0   | 0   | 59  | 54  |
| 30     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 31     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 32     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 33     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 34     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 35     | 0    | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |
| 36     | 0    | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |
| 37     | 372  | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |

|    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |      |     |     |     |     |     |     |     |       |       |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-------|-----|-----|-----|-----|
| 38 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400   | 400 | 400 | 400 |     |
| 39 | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0     | 0   | 59  | 54  |     |
| 40 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 41 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 42 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 43 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 44 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 45 | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0     | 100 | 141 | 106 |     |
| 46 | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 140 |     |
| 47 | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 48 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 49 | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0     | 0   | 59  | 54  |     |
| 50 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 51 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 52 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 53 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 54 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 55 | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0     | 100 | 141 | 106 |     |
| 56 | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 140 |     |
| 57 | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 58 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 59 | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0     | 0   | 59  | 54  |     |
| 60 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 61 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 62 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 63 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 64 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 65 | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0     | 100 | 141 | 106 |     |
| 66 | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 140 |     |
| 67 | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 68 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 69 | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0     | 0   | 59  | 54  |     |
| 70 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 71 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 72 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 73 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 74 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 75 | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0     | 100 | 141 | 106 |     |
| 76 | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 140 |     |
| 77 | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 78 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 79 | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0     | 0   | 59  | 54  |     |
| 80 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 81 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 82 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 83 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 84 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230   | 230  | 230 | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 0   |     |
| 85 | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0     | 100 | 141 | 106 |     |
| 86 | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0     | 0   | 0   | 140 |     |
| 87 | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |
| 88 | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |       |      |     |     |     |     |     |     |     |       |     |     |     |     |    |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|----|
| 89  | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0     | 0   | 0   | 0   | 59  | 54 |
| 90  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| 91  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 14,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| 92  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 110,5 | 114  | 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| 93  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 39,5 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| 94  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 80  | 109 | 195 | 230 | 230   | 230  | 195 | 80  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   | 0  |
| 95  | 0   | 100 | 100 | 142 | 156 | 170 | 275 | 335 | 38  | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 315 | 195 | 156 | 106 | 100 | 0     | 0   | 100 | 141 | 106 |    |
| 96  | 0   | 0   | 140 | 158 | 254 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350 | 350   | 350  | 350 | 350 | 350 | 350 | 254 | 140 | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 140 |    |
| 97  | 372 | 392 | 365 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 352,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |    |
| 98  | 368 | 388 | 361 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400   | 400  | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 400 | 347,5 | 400 | 400 | 400 | 400 |    |
| 99  | 0   | 0   | 54  | 60  | 90  | 120 | 155 | 155 | 155 | 155 | 155   | 155  | 155 | 155 | 155 | 155 | 90  | 54  | 0   | 0     | 0   | 0   | 59  | 54  |    |
| 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 104,5 | 197  | 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0     | 0   | 0   | 0   | 0   |    |

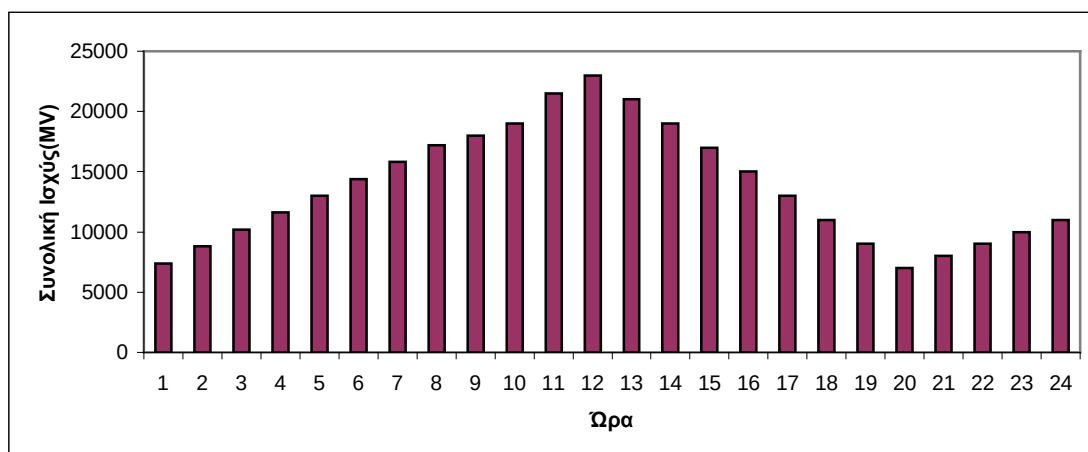
#### 4.Δ ΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΠΑΡΑΣΤΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Στο Σχήμα 4.24 φαίνεται η ζήτηση τις ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Όπως παρατηρούμε η ζήτηση αυξάνεται διαρκώς μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα που παίρνει την μέγιστη τιμή της και στη συνέχεια αρχίζει και μειώνεται μέχρι την 20<sup>η</sup> ώρα που λαμβάνει την ελάχιστη τιμή της και τέλος αυξάνεται μέχρι την 24<sup>η</sup> ώρα.



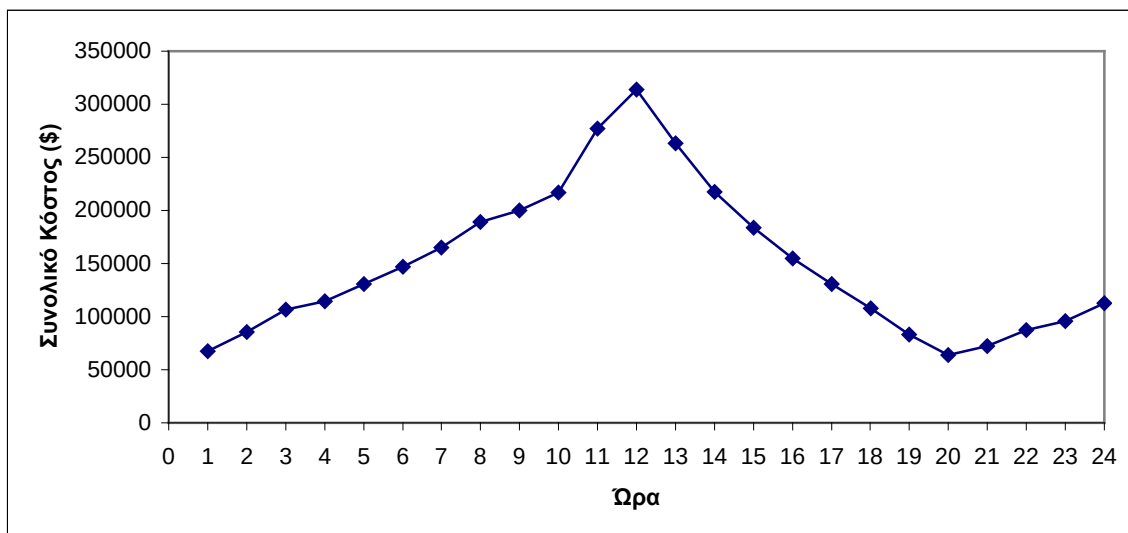
Σχήμα 4.24: Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα. Κατανομή ζήτησης [4.1]

Στο Σχήμα 4.25 φαίνεται ότι η συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα αυξάνεται μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα που σημειώνεται η μέγιστη ζήτηση και στη συνέχεια μειώνεται μέχρι την 20<sup>η</sup> ώρα και τέλος αυξάνεται μέχρι την 24<sup>η</sup> ώρα. Δηλαδή, όπως φαίνεται ακολουθείται η κατανομή της ζήτησης που είδαμε στο Σχήμα 4.24 καλύπτοντας την ζήτηση σε κάθε ώρα.



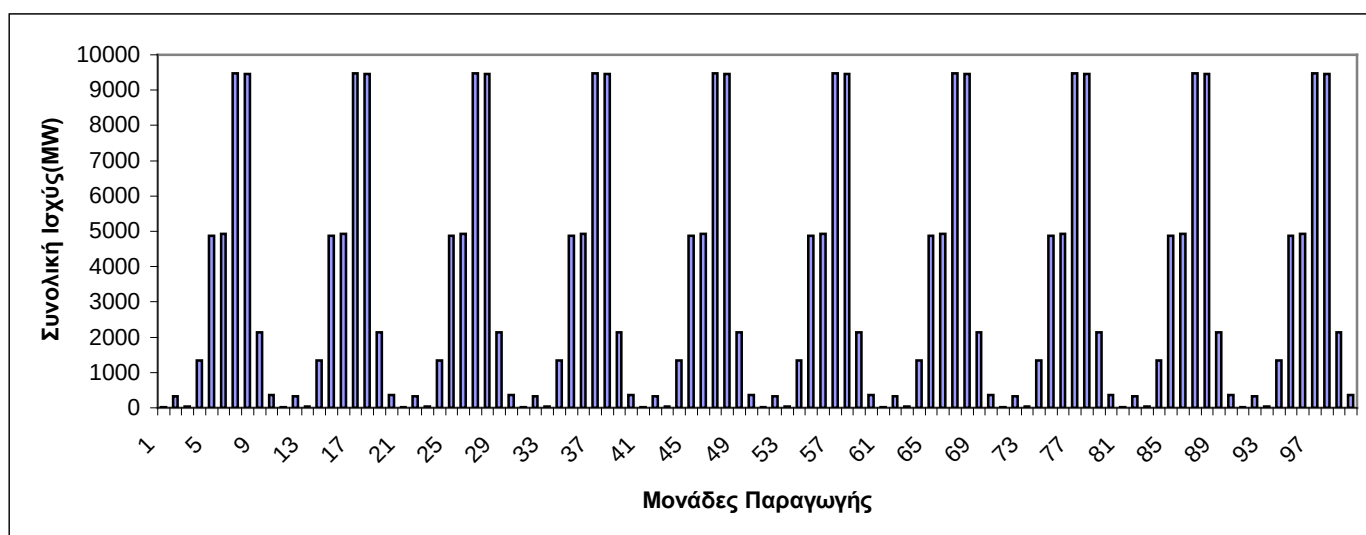
Σχήμα 4.25: Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε ώρα.

Στο Σχήμα 4.26 παρατηρούμε ότι το συνολικό κόστος μεγιστοποιείται την 12<sup>η</sup> ώρα 313590\$, όπου η ζήτηση είναι μέγιστη και ελαχιστοποιείται την 20<sup>η</sup> ώρα 63760\$, όπου η ζήτηση είναι η ελάχιστη. Αυτό είναι λογικό, αφού όσο μεγαλώνει η ζήτηση τόσο μεγαλώνει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και χρειάζονται να εκκινήσουν νέες μηχανές που αυξάνουν το κόστος. Έτσι, το συνολικό κόστος για κάθε ώρα είναι ανάλογο της ζήτησης που σημειώνεται κάθε ώρα.



Σχήμα 4.26: Συνολικό κόστος για κάθε ώρα.

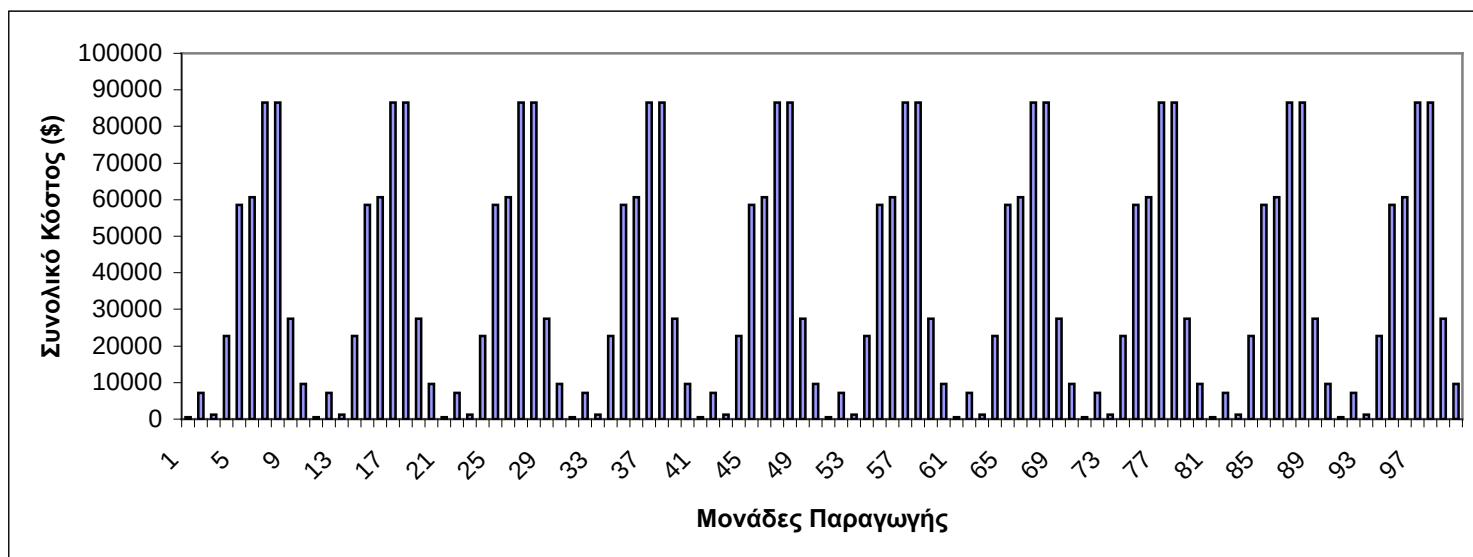
Στο Σχήμα 4.27 φαίνεται ότι οι μονάδες 7, 8, 17, 18, 27, 28, 37, 38, 47, 48, 57, 58, 67, 68, 77, 78, 87, 88, 97 και 98 συμμετέχουν περισσότερο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παράγοντας 9482 MW και 9463 MW, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*7 - \*8. Λιγότερο ποσοστό συμμετοχής έχουν και οι μονάδες 5, 6, 15 και 16 παράγοντας 4881 MW και 4935 MW, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*5 - \*6. Τέλος, οι υπόλοιπες μονάδες φαίνεται να συμβάλουν πολύ λίγο στην παραγωγή παράγοντας κάτω από 2200 – 39 MW.



Σχήμα 4.27: Συνολική παραγόμενη ισχύς για κάθε μονάδα.

Στο Σχήμα 4.28 φαίνεται ότι οι μονάδες 7, 8, 17, 18, 27, 28, 37, 38, 47, 48, 57, 58, 67, 68, 77, 78, 87, 88, 97 και 98 έχουν το μεγαλύτερο συνολικό κόστος 86567\$ και 86588\$, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*7 - \*8. Οι μονάδες 5, 6, 15, 16, 25, 26, 35, 36, 45, 46, 55,

56, 65, 66, 75, 76, 85, 86, 95 και 96 έχουν συνολικό κόστος 58482\$ και 60720\$, αντίστοιχα ανά ζεύγος μονάδων \*5 - \*6. Οι υπόλοιπες μονάδες έχουν συνολικό κόστος κάτω των 30000\$. Αυτά τα αποτελέσματα ήταν αναμενόμενα σύμφωνα και με το Σχήμα 4.27 πιο πάνω.



Σχήμα 4.28: Συνολικό κόστος για κάθε μονάδα

#### 4.4.6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε στο σύστημα των δέκα μονάδων, αν οι μονάδες 3 και 10 είχαν διαφορετικές τεχνικές προδιαγραφές, τότε το σύστημά μας θα εκπλήρωνε και τους περιορισμούς 3.6 και 3.7. Δηλαδή, αν η μονάδα 3 είχε ελάχιστο χρόνο λειτουργίας 1 αντί για 4 και η μονάδα 10 είχε ελάχιστο χρόνο λειτουργίας 3 αντί για 5, τότε θα εκπλήρωναν τους περιορισμούς 3.6 και 3.7 και θα ήταν πλήρως αποδεκτή η λύση. Κατά συνέπεια το ίδιο θα έπρεπε να ισχύει μέχρι το σύστημα των 100 μονάδων, για τις μονάδες 13, 20, 23, 30, 33, 40, 43, 50, 53, 60, 63, 70, 73, 80, 83, 90, 93 και 100.

#### 4.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΟΥ

Σε αυτή την ενότητα θα συγκρίνουμε την μέθοδο που προτείναμε στο κεφάλαιο 3 με άλλες μεθόδους επίλυσης και θα καταγράψουμε τις αποκλίσεις που προκύπτουν στο τελικό συνολικό κόστος. Συγκεκριμένα θα συγκριθεί με τα αποτελέσματα της επίλυσης του προβλήματος με γενετικό αλγόριθμο, που δίδονται στη βιβλιογραφία [4.1].

Τα δεδομένα των μονάδων, της ζήτησης, αλλά και των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων τα δανειζόμαστε από την δημοσίευση “A genetic algorithm solution to the unit commitment problem” από τους Καζαρή, Μπακιρτζή και Πετρίδη, του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, του Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου [4.1].

Τα δεδομένα που δανειζόμαστε έχουν ως εξής:

**Πίνακας 4.28:** Δεδομένα μονάδων

|                          | Unit 1  | Unit 2  | Unit 3 | Unit 4  | Unit 5  |
|--------------------------|---------|---------|--------|---------|---------|
| Pmax (MW)                | 455     | 455     | 130    | 130     | 162     |
| Pmin (MW)                | 150     | 150     | 20     | 20      | 25      |
| a (\$/h)                 | 1000    | 970     | 700    | 680     | 450     |
| b (\$/MWh)               | 16,19   | 17,26   | 16,60  | 16,50   | 19,70   |
| c (\$/MW <sup>2</sup> h) | 0,00048 | 0,00031 | 0,002  | 0,00211 | 0,00398 |
| Min up (h)               | 8       | 8       | 5      | 5       | 6       |
| Min dn (h)               | 8       | 8       | 5      | 5       | 6       |
| Initial status (h)       | 8       | 8       | -5     | -5      | -6      |

|                          | Unit 6  | Unit 7  | Unit 8  | Unit 9  | Unit 10 |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Pmax (MW)                | 80      | 85      | 55      | 55      | 55      |
| Pmin (MW)                | 20      | 25      | 10      | 10      | 10      |
| a (\$/h)                 | 370     | 480     | 660     | 665     | 670     |
| b (\$/MWh)               | 22,26   | 27,74   | 25,92   | 27,27   | 27,79   |
| c (\$/MW <sup>2</sup> h) | 0,00712 | 0,00079 | 0,00413 | 0,00222 | 0,00173 |
| Min up (h)               | 3       | 3       | 1       | 1       | 1       |
| Min dn (h)               | 3       | 3       | 1       | 1       | 1       |
| Initial status (h)       | -3      | -3      | -1      | -1      | -1      |

**Πίνακας 4.29:** Ζήτηση για κάθε ώρα

| Ωρες      | Ζήτηση (MW) | Ωρες      | Ζήτηση (MW) |
|-----------|-------------|-----------|-------------|
| <b>1</b>  | 700         | <b>13</b> | 1400        |
| <b>2</b>  | 750         | <b>14</b> | 1300        |
| <b>3</b>  | 850         | <b>15</b> | 1200        |
| <b>4</b>  | 950         | <b>16</b> | 1050        |
| <b>5</b>  | 1000        | <b>17</b> | 1000        |
| <b>6</b>  | 1100        | <b>18</b> | 1100        |
| <b>7</b>  | 1150        | <b>19</b> | 1200        |
| <b>8</b>  | 1200        | <b>20</b> | 1400        |
| <b>9</b>  | 1300        | <b>21</b> | 1300        |
| <b>10</b> | 1400        | <b>22</b> | 1100        |
| <b>11</b> | 1450        | <b>23</b> | 900         |
| <b>12</b> | 1500        | <b>24</b> | 800         |

Όπως φαίνεται από τα δεδομένα δεν λαμβάνονται υπόψη οι περιορισμοί (3.8) και (3.11) και το κόστος κράτησης είναι μηδέν για όλες τις μονάδες.

#### 4.5.1 ΔΙΚΤΥΟ 10 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Τα δεδομένα των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν λαμβάνονται από τον Πίνακα 4.28, ενώ η ζήτηση για την χρονική περίοδο των 24 ωρών από τον πιο κάτω πίνακα.

**Πίνακας 4.30:** Ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

| Ωρα        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ζήτηση(MW) | 700  | 750  | 850  | 950  | 1000 | 1100 | 1150 | 1200 | 1300 | 1400 | 1450 | 1500 |
| Ωρα        | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
| Ζήτηση(MW) | 1400 | 1300 | 1200 | 1050 | 1000 | 1100 | 1200 | 1400 | 1300 | 1100 | 900  | 800  |

Με βάση των δεδομένων των Πινάκων 4.28 και 4.30 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 10 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 24 ωρών είναι 564556\$, εκ των οποίων 553836\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου και 10720\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης.

Στον Πίνακα 4.31 παρουσιάζεται το πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 10 μονάδων, που έδωσε ο κώδικας βελτιστοποίησης του GAMS και στον Πίνακα 4.32 παρουσιάζεται το αντίστοιχο πλάνο παραγωγής.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 4.31 είναι, ότι οι μονάδες 7 και 10 δεν χρειάστηκαν να εκκινήσουν καμία από τις 24 ώρες, ενώ οι μονάδες 1, 3 και 4 είναι ενταγμένες από την 1<sup>η</sup> μέχρι και 24<sup>η</sup>. Παρατηρούμε ότι την 11<sup>η</sup> και την 12<sup>η</sup> ώρα που η ζήτηση κορυφώνεται έχουν εκκινήσει οι περισσότερες μονάδες παραγωγής.

Επίσης, παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα εκκινούν όλο και περισσότερες μονάδες παραγωγής στο σύστημα, λόγω της αύξησης της ζήτησης. Αντίθετα, μετά την 12<sup>η</sup> ώρα που μειώνεται κρατούνται όλο και περισσότερες.

**Πίνακας 4.31:** Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 10 μονάδων για τις 24 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|        | 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      | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 2      | 0    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 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  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 4      | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 5      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 6      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 7      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 8      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 9      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 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  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |

Από τον Πίνακα 4.32 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, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Επίσης, φαίνεται ότι οι μονάδες 7 και 10 δεν παράγουν ποτέ ισχύ, αφού δεν χρειάζεται να ενταχθούν. Τέλος, φαίνεται ότι η μονάδα 1 παράγει πάντα την μέγιστη ισχύ της. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα.

**Πίνακας 4.32:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 10 μονάδων για τις 24 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | 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      | 455  | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |
| 2      | 0    | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |

|    |     |    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 3  | 115 | 62 | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |
| 4  | 130 | 83 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |
| 5  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 6  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 7  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 8  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 9  | 0   | 0  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 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   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |

Τα στατιστικά του σεναρίου είναι τα εξής:

Επανάληψεις: 0

Χρόνος: 00:00:03

Απόκλιση: -0,22%

**Παρατήρηση!** Εκτός των περιορισμών (3 6) και (3 7) που βεβαίως δεν έχουμε λάβει υπόψη όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 3, βρίσκονται οι μονάδες 2, 5 και 6 στις ώρες 1, 19, 20 και 21.

#### 4.5.2 ΔΙΚΤΥΟ 20 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Σε αυτό το σενάριο θα εξετάσουμε 20 μονάδες για 24 ώρες, γι' αυτό το λόγο θα διπλασιάσουμε τα δεδομένα των μονάδων του Πίνακα 4.28. Παράλληλα με τον διπλασιασμό αυτόν θα διπλασιάσουμε και την ζήτηση του Πίνακα 4.30 και έτσι παίρνουμε τον Πίνακα 4.33.

**Πίνακας 4.33:** Ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

| Ωρα        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ζήτηση(MW) | 1400 | 1500 | 1700 | 1900 | 2000 | 2200 | 2300 | 2400 | 2600 | 2800 | 2900 | 3000 |
| Ωρα        | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
| Ζήτηση(MW) | 2800 | 2600 | 2400 | 2100 | 2000 | 2200 | 2400 | 2800 | 2600 | 2200 | 1800 | 1600 |

Με βάση των δεδομένων του διπλασίου Πίνακα 4.28 και του Πίνακα 4.33 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 20 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 24 ωρών είναι 1129112\$, εκ των οποίων 1107672\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου και 21440\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης.

Στον Πίνακα 4.34 παρουσιάζεται το πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 20 μονάδων, που έδωσε ο κώδικας βελτιστοποίησης του GAMS και στον Πίνακα 4.35 παρουσιάζεται το αντίστοιχο πλάνο παραγωγής.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 4.34 είναι, ότι οι μονάδες 7, 17, 10 και 20 δεν χρειάστηκαν να εκκινήσουν καμία από τις 24 ώρες, ενώ οι μονάδες 1, 3, 4, 11, 13 και 14 είναι ενταγμένες από την 1<sup>η</sup> μέχρι και 24<sup>η</sup>. Παρατηρούμε ότι την 11<sup>η</sup> και την 12<sup>η</sup> ώρα που η ζήτηση κορυφώνεται έχουν εκκινήσει οι περισσότερες μονάδες παραγωγής.

Επίσης, παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα εκκινούν όλο και περισσότερες μονάδες παραγωγής στο σύστημα, λόγω της αύξησης της ζήτησης. Αντίθετα, μετά την 12<sup>η</sup> ώρα που μειώνεται κρατούνται όλο και περισσότερες.



**Πίνακας 4.34:** Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 20 μονάδων για τις 24 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------|------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|        | 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      | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 2      | 0    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 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  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 4      | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 5      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 6      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 7      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 8      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 9      | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 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  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 11     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 12     | 0    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 13     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 14     | 1    | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| 15     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  |
| 16     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 17     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 18     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| 19     | 0    | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 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  |

Από τον Πίνακα 4.35 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, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Επίσης, φαίνεται ότι οι μονάδες 7, 10, 17 και 20 δεν παράγουν ποτέ ισχύ, αφού δεν χρειάζεται να ενταχθούν. Τέλος, φαίνεται ότι οι μονάδες 1 και 11 παράγουν πάντα την μέγιστη ισχύ τους. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα.

**Πίνακας 4.35:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 20 μονάδων για τις 24 ώρες.

| Μονάδα | Ωρες |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|        | 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      | 455  | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |
| 2      | 0    | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 3      | 115  | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |
| 4      | 130  | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |
| 5      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |
| 6      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 7      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 8      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 9      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 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   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 11     | 455  | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |
| 12     | 0    | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 13     | 115  | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |
| 14     | 130  | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |
| 15     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |

|    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |    |    |    |   |   |   |   |   |    |   |   |   |   |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|---|---|---|---|---|----|---|---|---|---|
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 68 | 80 | 80 | 68 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 68 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 0  | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 38 | 55 | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 19 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0  | 0  | 33 | 0  | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 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 |

Τα στατιστικά του σεναρίου είναι τα εξής:

Επαναλήψεις: 55      Χρόνος: 00:07:44      Απόκλιση: -1,68%

**Παρατήρηση!** Εκτός των περιορισμών (36) και (37) που βεβαίως δεν έχουμε λάβει υπόψη όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 3, βρίσκονται οι μονάδες 2, 12, 5, 6, 15 και 16 στις ώρες 1, 19, 20 και 21.

#### 4.5.3 ΔΙΚΤΥΟ 60 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Σε αυτό το σενάριο θα εξετάσουμε 60 μονάδες για 24 ώρες, γι' αυτό το λόγο θα εξαπλασιάσουμε τα δεδομένα των μονάδων του Πίνακα 4.28. Παράλληλα με τον εξαπλασιασμό αυτόν θα εξαπλασιάσουμε και την ζήτηση του Πίνακα 4.30 και έτσι παίρνουμε τον Πίνακα 4.36.

**Πίνακας 4.36:** Ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.

| Ωρα        | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Ζήτηση(MW) | 4200 | 4500 | 5100 | 5700 | 6000 | 6600 | 6900 | 7200 | 7800 | 8400 | 8700 | 9000 |
| Ωρα        | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   |
| Ζήτηση(MW) | 8400 | 7800 | 7200 | 6300 | 6000 | 6600 | 7200 | 8400 | 7800 | 6600 | 5400 | 4800 |

Με βάση των δεδομένων του εξαπλάσιου Πίνακα 4.28 και του Πίνακα 4.36 το κόστος παραγωγής, που αποφέρουν οι 60 μονάδες παραγωγής στον χρονικό ορίζοντα των 24 ωρών είναι 3387336\$, εκ των οποίων 3323016\$ είναι το συνολικό κόστος καυσίμου και 64320\$ είναι το συνολικό κόστος εκκίνησης.

Στον Πίνακα 4.37 παρουσιάζεται το πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 60 μονάδων, που έδωσε ο κώδικας βελτιστοποίησης του GAMS και στον Πίνακα 4.38 παρουσιάζεται το αντίστοιχο πλάνο παραγωγής.

Ένα συμπέρασμα που προκύπτει από τον Πίνακα 4.37 είναι, ότι οι μονάδες 7, 17, 10, 20, 27, 30, 37, 40, 47, 50, 57 και 60 δεν χρειάστηκαν να εκκινήσουν καμία από τις 24 ώρες, ενώ οι μονάδες 1, 3, 4, 11, 13, 14, 21, 23, 24, 31, 33, 34, 41, 43, 44, 51, 53 και 54 είναι ενταγμένες από την 1<sup>η</sup> μέχρι και 24<sup>η</sup>. Παρατηρούμε ότι την 11<sup>η</sup> και την 12<sup>η</sup> ώρα που η ζήτηση κορυφώνεται έχουν εκκινήσει οι περισσότερες μονάδες παραγωγής.

Επίσης, παρατηρούμε ότι με την πάροδο του χρόνου μέχρι την 12<sup>η</sup> ώρα εκκινούν όλο και περισσότερες μονάδες παραγωγής στο σύστημα, λόγω της αύξησης της ζήτησης. Αντίθετα, μετά την 12<sup>η</sup> ώρα που μειώνεται κρατούνται όλο και περισσότερες.

**Πίνακας 4.37:** Πλάνο εκκίνησης/κράτησης των 60 μονάδων για τις 24 ώρες.

[illegible]

|    |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |   |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 49 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 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 |
| 51 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 52 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 53 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 54 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 55 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 56 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 57 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 58 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 59 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 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 |

Από τον Πίνακα 4.38 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, καθώς και η σταδιακή μείωση του ρυθμού παραγωγής μιας μονάδας (όριο μείωσης εξόδου κατά την κράτηση). Επίσης, φαίνεται ότι οι μονάδες 7, 17, 10, 20, 27, 30, 37, 40, 47, 50, 57 και 60 δεν παράγουν ποτέ ισχύ, αφού δεν χρειάζεται να ενταχθούν. Τέλος, φαίνεται ότι οι μονάδες 1, 11, 21, 31, 41 και 51 παράγουν πάντα την μέγιστη ισχύ τους. Η ζήτηση καλύπτεται σε κάθε ώρα.

**Πίνακας 4.38:** Πλάνο παραγωγής (σε MW) των 60 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      | 455  | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |
| 2      | 0    | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 3      | 115  | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |
| 4      | 130  | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |
| 5      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |
| 6      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 7      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 8      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 9      | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 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   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 11     | 455  | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |
| 12     | 0    | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 13     | 115  | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |
| 14     | 130  | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |
| 15     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |
| 16     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 17     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 18     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 19     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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     | 455  | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |
| 22     | 0    | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 23     | 115  | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |
| 24     | 130  | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |
| 25     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |
| 26     | 0    | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |

|    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 27 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 28 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 29 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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   |     |
| 31 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 32 | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 33 | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 34 | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 35 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |
| 36 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 37 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 38 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 39 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 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   |     |
| 41 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 42 | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 43 | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 44 | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 45 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |
| 46 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 47 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 48 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 49 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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   |     |
| 51 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 52 | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 53 | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 54 | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 55 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |
| 56 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |
| 57 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 58 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 59 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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   |     |

Τα στατιστικά του σεναρίου είναι τα εξής:

Επαναλήψεις: 19

Χρόνος: 00:06:53

Απόκλιση: 0,32%

**Παρατήρηση!** Εκτός των περιορισμών (3 6) και (3 7) που βεβαίως δεν έχουμε λάβει υπόψη όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 3, βρίσκονται οι μονάδες 2, 12, 22, 32, 42, 52, 5, 6, 15, 16, 25, 26, 35, 36, 45, 46, 55 και 56 στις ώρες 1, 19, 20 και 21.

#### 4.5.4 ΔΙΚΤΥΟ 100 ΜΟΝΑΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟ 24 ΩΡΩΝ

Σε αυτό το σενάριο θα εξετάσουμε 100 μονάδες για 24 ώρες, γι' αυτό το λόγο θα δεκαπλασιάσουμε τα δεδομένα των μονάδων του Πίνακα 4.28. Παράλληλα με τον δεκαπλασιασμό αυτόν θα δεκαπλασιάσουμε και την ζήτηση του Πίνακα 4.30 και έτσι παίρνουμε τον Πίνακα 4.39.



[illegible]





|    |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 11 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 12 | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 13 | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 14 | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 15 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |     |
| 16 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 17 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 18 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 19 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 22 | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 23 | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 24 | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 25 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |     |
| 26 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 27 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 28 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 29 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 32 | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 33 | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 34 | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 35 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |     |
| 36 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 37 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 38 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 39 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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   |     |
| 41 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 42 | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 43 | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 44 | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 45 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |     |
| 46 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 47 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 48 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 49 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 52 | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 53 | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 54 | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 55 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |     |
| 56 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 57 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 58 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 59 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 62  | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |     |
| 63  | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 64  | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 65  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |     |
| 66  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 67  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |     |
| 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 69  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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  | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 72  | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 73  | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 74  | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 75  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |     |
| 76  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 77  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 78  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 79  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 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   |     |
| 81  | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 82  | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 83  | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 84  | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 85  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |     |
| 86  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 87  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 88  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 89  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 90  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 91  | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 |     |
| 92  | 0   | 150 | 150 | 235 | 285 | 385 | 435 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 455 | 335 | 285 | 385 | 455 | 455 | 455 | 385 | 185 | 150 |
| 93  | 115 | 62  | 115 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 88  |     |
| 94  | 130 | 83  | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 | 107 |     |
| 95  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 30  | 130 | 162 | 162 | 162 | 162 | 130 | 30  | 0   | 0   | 0   | 30  | 162 | 130 | 0   | 0   | 0   |     |
| 96  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 80  | 80  | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 68  | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 97  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 98  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 38  | 55  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 99  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 33  | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |
| 100 | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   | 0   |     |

Τα στατιστικά του σεναρίου είναι τα εξής:

Επαναλήψεις: 0

Χρόνος: 00:01:20

Απόκλιση: 0,32%

**Παρατήρηση!** Εκτός των περιορισμών (3 6) και (3 7) που βεβαίως δεν έχουμε λάβει υπόψη όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο 3, βρίσκονται οι μονάδες 2, 12, 22, 32, 42, 52, 62, 72, 82, 92, 5, 6, 15, 16, 25, 26, 35, 36, 45, 46, 55, 56, 65, 66, 75, 76, 85, 86, 95 και 96 στις ώρες 1, 19, 20 και 21.

#### 4.5.5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Συγκεντρώνοντας τελικά, μετά από τις πιο πάνω δοκιμές, παίρνουμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στον πιο κάτω πίνακα 4.42.

**Πίνακας 4.42:** Τιμή αντικειμενικής συνάρτησης (συνολικό κόστος λειτουργίας) όπως υπολογίστηκε με γενετικό αλγόριθμο [4.1] και με τον επιλύτη BARON του GAMS.

| Μονάδες | Συνολικό κόστος λειτουργίας (\$) από γενετικό αλγόριθμο (χειρότερη λύση) [4.1] | Συνολικό κόστος λειτουργίας (\$) από γενετικό αλγόριθμο (καλύτερη λύση) [4.1] | Συνολικό κόστος λειτουργίας (\$) από επιλύτη BARON του GAMS | Απόκλιση BARON/GAMS από την καλύτερη λύση του γενετικού αλγόριθμου (%) |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| 10      | 570 032                                                                        | 565 825                                                                       | 564 556                                                     | -0.22                                                                  |
| 20      | 1 132 059                                                                      | 1 126 243                                                                     | 1 107 672                                                   | -1.68                                                                  |
| 60      | 3 384 252                                                                      | 3 376 625                                                                     | 3 387 336                                                   | 0.32                                                                   |
| 100     | 5 637 914                                                                      | 5 627 437                                                                     | 5 645 560                                                   | 0.32                                                                   |

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 4.42 ο επιλύτης BARON του GAMS δίνει καλύτερη βέλτιστη λύση (μικρότερη τιμή της προς ελαχιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης του συνολικού κόστους λειτουργίας) σε σχέση με την καλύτερη λύση του γενετικού αλγόριθμου για συστήματα με 10 και με 20 μονάδες. Αντίθετα, για συστήματα με 60 και 100 μονάδες, η καλύτερη λύση του γενετικού αλγόριθμου είναι κατά 0.32% καλύτερη από τη λύση που βρίσκει ο επιλύτης BARON του GAMS.

Παρατηρούμε ότι οι αποκλίσεις των σεναρίων που σημειώνονται *βρίσκονται εντός των αποκλίσεων, που περιμέναμε να έχουμε, σύμφωνα με τους υπολογισμούς που πραγματοποιήσαμε στην ενότητα 4.3.1*, από την μεθοδολογία που προτείναμε.

Αυτή η απόκλιση, που σημειώνεται, σίγουρα οφείλεται στο ότι δεν λαμβάνουμε υπόψη τους περιορισμούς (3.6) και (3.7).

Τέλος, θα μπορούσαμε να αναφέρουμε πως τα αποτελέσματα των επιλύσεων των πιο πάνω ενοτήτων δεν μπορούν να γίνουν πλήρως αποδεκτά αν θέλουμε να έχουμε τους περιορισμούς (3.6) και (3.7), όμως αλλάζοντας τις προδιαγραφές κάποιων μονάδων, συγκριμένα εδώ των 2, 5 και 6, των ελάχιστων χρόνων που πρέπει να λειτουργούν και να κρατούνται θα μπορούσαν να γίνουν πλήρως αποδεκτά. Για παράδειγμα, αν η μονάδα 2 είχε ελάχιστο χρόνο κράτησης 1 αντί για 8, η 5 είχε ελάχιστο χρόνο λειτουργίας και κράτησης 3 αντί για 6 και η μονάδα 6 ελάχιστο χρόνο λειτουργίας 1 αντί για 3, τότε οι λύσεις των πιο πάνω σεναρίων θα ήταν πλήρως αποδεκτές, αφού θα πληρούσαν και τους περιορισμούς (3.6) και (3.7).

#### 4.6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [4.1] S. A. Kazarlis, A. G. Bakirtzis and V. Petridis, "A genetic algorithm solution to the unit commitment," *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 1, Feb. 1996.
- [4.2] C. Dang and M. Li. (2005, Oct.). A floating – point genetic algorithm for solving the unit commitment problem. *European Journal of Operation Research* 181. [Online]. Available: [http:// www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

## ΣΥΝΟΛΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή παρουσιάστηκε η επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με το λογισμικό GAMS.

Το πρόβλημα της ένταξης θερμικών μονάδων με βάση το κόστος διατυπώνεται ως εξής: Για μια δοσμένη χρονική περίοδο  $T$  ωρών, είναι για κάθε ώρα γνωστή η πρόβλεψη φορτίου:  $\{P_D(t), t = 1, 2, \dots, T\}$ . Κάθε ώρα υπάρχουν  $N$  διαθέσιμες θερμικές μονάδες παραγωγής, των οποίων είναι γνωστά (δεδομένα) τα τεχνικά χαρακτηριστικά. Ζητείται να υπολογιστεί, για κάθε ώρα, το πρόγραμμα ένταξης των θερμικών μονάδων, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος κατά τη χρονική περίοδο αυτών των  $T$  ωρών.

Το πρόβλημα της ένταξης μονάδων με βάση το κόστος 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.

Αρχικά, δοκιμάσαμε το λογισμικό, που αναπτύχθηκε για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων για την ελαχιστοποίηση του κόστους, σε τέσσερα διαφορετικά σενάρια για να ελέγξουμε την ορθότητα των αποτελεσμάτων του. Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε στα σενάρια ήταν ένα μικρό σύστημα με 3 μονάδες παραγωγής για 20 ώρες προγραμματισμού. Εκτελέσαμε τα σενάρια εναλλάσσοντας τους περιορισμούς από σενάριο σε σενάριο. Έτσι, το πρώτο περιελάμβανε 2 περιορισμούς, το δεύτερο και το τρίτο 4 περιορισμούς και το τέταρτο σενάριο όλους του περιορισμούς. Τα κύρια συμπεράσματα ήταν τα ακόλουθα:

1. Το σενάριο 1 σημειώνει το χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τα άλλα σενάρια κάτι που περιμέναμε, αφού σε αυτό το σενάριο έχουμε τους λιγότερους περιορισμούς.
2. Τα σενάρια 2 και 3 εκτελούνται με τον ίδιο αριθμό περιορισμών και γι' αυτό θα περιμέναμε να είχαν είτε περίπου ίσο συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, είτε ένα από τα δυο σενάρια να έχει λίγο περισσότερο ή λιγότερο από το άλλο. Στη συγκεκριμένη περίπτωση παρατηρούμε ότι το σενάριο 2 σημειώνει λίγο περισσότερο συνολικό κόστος παραγωγής από ότι το σενάριο 3 και αυτό οφείλεται στο ότι οι περιορισμοί (3.8) και (3.10) περιορίζουν περισσότερο το πρόβλημα από ότι οι περιορισμοί (3.6) και (3.7).
3. Τέλος, παρατηρούμε ότι το σενάριο 4 σημειώνει το μεγαλύτερο συνολικό κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κάτι που ήταν αναμενόμενο, αφού κατά την εκτέλεση του λαμβάνονται όλοι οι περιορισμοί, όπως αυτοί ορίστηκαν στο κεφάλαιο 3.

Στη συνέχεια, το λογισμικό που αναπτύχθηκε χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων για την ελαχιστοποίηση του κόστους σε τέσσερα διαφορετικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αποτελούνταν από

10, 20, 60 και 100 μονάδες και δοκιμάστηκαν για χρονικό ορίζοντα 24 ωρών. Τα κύρια συμπεράσματα ήταν τα ακόλουθα:

1. Όσο μεγαλώνει η ζήτηση κατά την διάρκεια του χρόνου τόσο περισσότερες μονάδες εκκινούν. Αντίθετα, όσο μειώνεται η ζήτηση τόσο περισσότερες μονάδες κρατούνται.
2. Τις ώρες που σημειώνεται μεγάλη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, που έχουν εκκινήσει, παράγουν την μέγιστη ή σχεδόν την μέγιστη επιτρεπόμενη ισχύ τους.
3. Η συνολική παραγωγή ισχύς ανά ώρα αυξάνεται ή μειώνεται όσο μεγαλώνει ή μικραίνει η ζήτηση κατά τη διάρκεια του χρόνου, αντίστοιχα. Καθώς επίσης, μεγιστοποιείται ή ελαχιστοποιείται την ώρα που σημειώνεται η μέγιστη ή ελάχιστη ζήτηση, αντίστοιχα.
4. Το συνολικό κόστος παραγωγής ανά ώρα αυξάνεται ή μειώνεται όσο μεγαλώνει ή μικραίνει η ζήτηση κατά τη διάρκεια του χρόνου, αντίστοιχα. Καθώς επίσης, μεγιστοποιείται ή ελαχιστοποιείται την ώρα που σημειώνεται η μέγιστη ή ελάχιστη ζήτηση, αντίστοιχα.
5. Οι μονάδες που είναι περισσότερες ώρες ενταγμένες συνεισφέρουν περισσότερο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, παράγοντας περισσότερη ισχύ. Όσο περισσότερες ώρες είναι ενταγμένη μια μονάδα τόσο μεγαλύτερο κόστος παραγωγής παρουσιάζει.

Τέλος, συγκρίναμε τα αποτελέσματα του λογισμικού που αναπτύξαμε με αποτελέσματα του γενετικού αλγορίθμου από την βιβλιογραφία [4.1]. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι από την βιβλιογραφία [4.1]. Μετά από τη σύγκριση σε τέσσερα διαφορετικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για 10, 20, 60 και 100 μονάδες για 24 ώρες έχουμε τελικά τα εξής συμπεράσματα:

1. Ο επιλύτης BARON του GAMS δίνει καλύτερη βέλτιστη λύση (μικρότερη τιμή της προς ελαχιστοποίηση αντικειμενικής συνάρτησης του συνολικού κόστους λειτουργίας) σε σχέση με την καλύτερη λύση του γενετικού αλγόριθμου για συστήματα με 10 και με 20 μονάδες.
2. Αντίθετα, για συστήματα με 60 και 100 μονάδες, η καλύτερη λύση του γενετικού αλγόριθμου είναι κατά 0.32% καλύτερη από τη λύση που βρίσκει ο επιλύτης BARON του GAMS.