



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Βέλτιστη Χρήση Πόρων Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας
με Χρήση MatLab**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Μουκουργιώτης Γρηγόριος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Ιούλιος 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

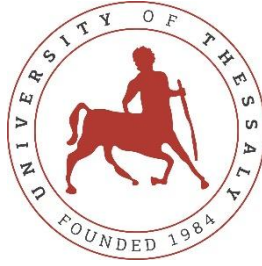
**Βέλτιστη Χρήση Πόρων Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας
με Χρήση MatLab**

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Μουκουργιώτης Γρηγόριος

Επιβλέπων: Μπαργιώτας Δημήτριος

Ιούλιος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

Optimal Use of Power System Resources using MatLab

MSc Thesis

Moukourgiotis Grigorios

Supervisor: Bargiotas Dimitrios

July 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Μπαργιώτας Δημήτριος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Τσουκαλάς Ελευθέριος

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Δασκαλοπούλου Ασπασία

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Γρηγόριος Μουκουργιώτης

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this MSc thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Grigorios Moukourgiotis

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους με στήριξαν και με βοήθησαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Καταρχάς, ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Δημήτριο Μπαργιώτα, για την καθοδήγηση, τη στήριξη και τις πολύτιμες συμβουλές του καθ' όλη τη διάρκεια της έρευνας και της συγγραφής της εργασίας. Η εμπειρία και η γνώση του υπήρξαν καθοριστικές για την επιτυχή ολοκλήρωσή της.

Εν συνεχεία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα αξιότιμα μέλη της επιτροπής, κ. Τσουκαλά Ελευθέριο και την κα. Δασκαλοπούλου Ασπασία, χωρίς την συμβολή των οποίων η παρούσα εργασία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί επιτυχώς.

Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την αρραβωνιαστικιά μου, Ελεάννα Καραγεώργου, για την αμέριστη υποστήριξη, την κατανόηση και την ενθάρρυνσή της, που μου έδωσαν δύναμη και κουράγιο σε κάθε δύσκολη στιγμή.

Τέλος, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένειά μου για την αγάπη, την υπομονή και την συμπαράστασή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Χωρίς τη στήριξή τους, τίποτα από όλα αυτά δεν θα ήταν εφικτό.

Σε όλους, ευχαριστώ θερμά!

Βέλτιστη Χρήση Πόρων Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας Με Χρήση MatLab

Μουκουργιώτης Γρηγόριος

Περίληψη

Ο σύγχρονος κόσμος εξαρτά την επιβίωση και την ευημερία του από την ηλεκτρική ενέργεια. Οι ανάγκες του κόσμου όμως, συνεχώς μεταβάλλονται και επομένως και η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια αλλάζει για να συναντήσει και να καλύψει αυτές τις ανάγκες. Αυτό που παρατηρείται, είναι ότι όσο τα χρόνια περνούν, οι ανάγκες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ολοένα και αυξάνονται. Έτσι, θα πρέπει συνεχώς να αναζητούνται καλύτεροι και πιο αποδοτικοί τρόποι, ώστε να παρέχεται η κάλυψη της απαιτούμενης από την κοινωνία ενέργειας, με ό,τι αυτό συνεπάγεται. Δεδομένου όμως, ότι η μεγαλύτερη αδυναμία της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η δύσκολη, σχεδόν αδύνατη, μακροχρόνια αποθήκευσή της, υπάρχουν συγκεκριμένες συνιστώσες που πρέπει να λαμβάνονται υπ' όψη, προκειμένου αυτή να καταναλώνεται ταυτόχρονα με την παραγωγή της.

Έτσι, καθίσταται απαραίτητο να γνωρίζουμε ποιο είναι εκείνο το χρονικό διάστημα μέσα στην ημέρα, στον μήνα ή ακόμη και στον χρόνο, κατά το οποίο απαιτείται περισσότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, για την κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών. Για να γίνει αυτό δυνατό, είναι σημαντικό να υπάρχει ένα σύστημα βελτιστοποίησης, που θα στοχεύει στην ανάλυση και επίλυση όλων των πιθανών προβλημάτων που μπορεί να παρεμποδίσουν το έργο αυτό.

Στόχος αυτής της εργασίας, είναι να παρουσιάσει το ζήτημα αυτό υπό το πρίσμα της μελέτης περίπτωσης, να θέσει προβλήματα και ερωτήματα ως προς τις ανάγκες που παρουσιάζει η σύγχρονη κοινωνία σε όλο τους το φάσμα και τους περιορισμούς που υπάρχουν λόγω της αδυναμίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και πως αυτή η αδυναμία μπορεί να καλυφθεί με το βέλτιστο δυνατό τρόπο. Με την χρήση του λογισμικού MATLAB, δίνονται υποθετικά σενάρια και στη συνέχεια αυτά γεννούν τα ερωτήματα που

η εργασία καλείται να απαντήσει το τελευταίο της κομμάτι, την παραγωγή συμπερασμάτων.

Τα συμπεράσματα αυτά, διακρίνονται κυρίως στο ποιες δυσκολίες και προβλήματα παρουσιάζονται κατά την ενεργειακή μετάβαση και πώς προχωρούμε στην επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης, εστιάζοντας στην βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πόρων και στην εισαγωγή φωτοβολταϊκών για την κάλυψη των αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα της ένταξης μονάδων στο σύστημα με το βέλτιστο τρόπο, ενώ στο Κεφάλαιο 5 παρουσιάζεται η περεταίρω ενίσχυση των πλεονεκτημάτων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με την ένταξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Γίνεται ξεκάθαρο δηλαδή, μέσα από την εργασία, ότι υπάρχει τεράστια ανάγκη για την βελτιστοποίηση χρήσης των πόρων ενός ηλεκτρικού συστήματος, αλλά ακόμη ότι η εισαγωγή φωτοβολταϊκών στο σύστημα αποτελεί μια από τις ιδανικότερες λύσεις για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών με τον πιο πράσινο δυνατό τρόπο.

Θα μπορούσαμε λοιπόν, να χωρίσουμε την έρευνα αυτή, σε δύο μέρη. Το πρώτο μέρος, θα είναι περισσότερο θεωρητικό, καθώς θα παρουσιάζει το ακριβές αντικείμενο αυτής της εργασίας, θα εμβαθύνει περισσότερο στην έννοια της βελτιστοποίησης και πως χρησιμοποιείται ο μαθηματικός της τύπος για να υπολογίσουμε τις παραμέτρους που λαμβάνουμε υπόψη όταν μιλάμε για κάλυψη αναγκών ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και η λογική σύμφωνα με την οποία δομείται και λειτουργεί το πρόγραμμα MATLAB.

Όσον αφορά στο δεύτερο και πρακτικό μέρος, θα αξιοποιηθούν τα εργαλεία που προαναφέρθηκαν για την μελέτη και παροχή αποτελεσμάτων σχετικά με τη βέλτιστη χρήση των πόρων ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συνέχεια, αφού συλλεχθούν τα αποτελέσματα και παρουσιαστούν σε γραφικές παραστάσεις και σε πίνακες δεδομένων, θα γίνει μια εμβάθυνση στα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα δεδομένα αυτά.

Λέξεις-κλειδιά:

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Βελτιστοποίηση, Βέλτιστος Προγραμματισμός Παραγωγής, Λογισμικό MATLAB, Πρόβλημα Ένταξης Μονάδων

Optimal use of power system resources using MatLab

Moukourgiotis Grigorios

Abstract

The modern world depends on electricity for its survival and prosperity. The world's needs, however, are constantly changing and therefore the demand for electricity changes to meet and cover these needs. What is observed, is that as the years go by, the needs of electricity production keep increasing. Thus, better and more efficient ways should be constantly sought, in order to provide the coverage of the energy required by society, with all that this entails. However, given that the greatest weakness of electricity is its difficult, almost impossible, long-term storage, there are specific components that must be taken into account, in order for it to be consumed at the same time as its production.

Thus, it becomes necessary to know what is that period of time in the day, in the month or even in the year, during which more electricity production is required to meet our energy needs. To make this possible, it is important to have an optimization system, which will aim to analyze and solve all possible problems that may hinder this project.

The aim of this paper is to present this issue in the light of the case study, to raise problems and questions regarding the needs presented by modern society in all their spectrum and the limitations that exist due to the inability to store electricity and how this weakness can be covered in the best possible way. Using the MATLAB software, hypothetical scenarios are given and then these generate the questions that the paper is asked to answer in its last part, the conclusion generation.

These conclusions are mainly distinguished by the difficulties and problems that arise during the energy transition and how we proceed in achieving sustainable development goals, focusing on the introduction of photovoltaics to cover the above. Chapter 4 presents the advantages of integrating units into the system in the optimal manner, while Chapter 5 presents the further enhancement of the advantages in the electricity system with the

integration of renewable energy sources. It becomes clear, through the research in this paper, that there is a huge need to optimize the use of resources in an electrical system, but also that the introduction of photovoltaics into the system is one of the best solutions for meeting energy needs in the greenest possible way.

So, this research could be divided into two parts. The first part, will be more theoretical, since it will present the exact object of this work, it will go deeper into the concept of optimization and how its mathematical formula is used to calculate the parameters we take into account when we talk about meeting electricity needs, but and the logic by which the MATLAB program is structured and operates.

Regarding the second and practical part, the aforementioned tools will be used to study and provide results regarding the optimal use of the resources of an electricity system. Then, after the results have been collected and presented in graphs and data tables, an in-depth look at the conclusions drawn from this data will be made.

Keywords:

Power System, Optimization, Optimal Scheduling, Unit Commitment Problem, MATLAB Software.

Πίνακας περιεχομένων

<i>Ευχαριστίες.....</i>	<i>xiii</i>
<i>Περίληψη.....</i>	<i>xv</i>
<i>Abstract</i>	<i>xvii</i>
<i>Πίνακας περιεχομένων.....</i>	<i>xix</i>
<i>Κατάλογος σχημάτων.....</i>	<i>xxi</i>
<i>Κατάλογος πινάκων</i>	<i>xxiii</i>
<i>Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή</i>	<i>1</i>
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	1
1.2 Οργάνωση του τόμου	2
<i>Κεφάλαιο 2 Πόροι συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.....</i>	<i>5</i>
2.1 Εισαγωγή.....	5
2.2 Φυσικοί Πόροι.....	5
2.3 Τεχνολογικοί Πόροι	8
2.4 Οικονομικοί Πόροι.....	10
2.5 Το Ελληνικό Ηλεκτρικό Δίκτυο	11
2.6 Μελλοντικές Προκλήσεις και Προοπτικές.....	11
<i>Κεφάλαιο 3 Ένταξη Μονάδων στο Σύστημα.....</i>	<i>13</i>
3.1 Εισαγωγή.....	13
3.2 Βελτιστοποίηση	16
3.3 Μέθοδοι Επίλυσης του Προβλήματος Ένταξης Μονάδων στο Σύστημα	18
3.4 Μαθηματικός ορισμός του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα.....	22
<i>Κεφάλαιο 4 Επίλυση προβλήματος της Ένταξης Μονάδων στο Σύστημα</i>	<i>25</i>
4.1 Εισαγωγή.....	25
4.1.1 Τα δεδομένα του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα	26

4.2 Επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα με γνώμονα το κόστος .	29
4.3 Επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα με γνώμονα το κέρδος .	34
4.4 Σύγκριση των δυο προσεγγίσεων	38
Κεφάλαιο 5 Ένταξης Μονάδων στο Σύστημα με Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών	
Ενέργειας	43
5.1 Εισαγωγή.....	43
5.1.1 Οικονομικά Κόστη Φωτοβολταϊκών Συστημάτων	44
5.1.2 Πλεονεκτήματα Φ/Β στο Πρόβλημα Ένταξης Μονάδων	45
5.1.3 Μειονεκτήματα Φ/Β στο Πρόβλημα Ένταξης Μονάδων	46
5.1.4 Επίδραση στο Πρόβλημα Ένταξης Μονάδων	47
5.1.5 Παραδοχές της μελέτης	47
5.1.6 Δεδομένα της μελέτης	49
5.2 Επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα με ενσωμάτωση	
φωτοβολταϊκών και γνώμονα το κόστος.....	51
5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων της ένταξης φωτοβολταϊκών με γνώμονα το κόστος	56
5.4 Επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα με ενσωμάτωση	
φωτοβολταϊκών και γνώμονα το κέρδος.....	57
5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων της ένταξης φωτοβολταϊκών με γνώμονα το κέρδος	62
5.6 Ένταξη μονάδων στο σύστημα με ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε μη ιδανικές συνθήκες	
.....	64
5.6.1 Παραδοχές της μελέτης	64
5.6.2 Δεδομένα της μελέτης	65
5.7 Επίλυση του προβλήματος της ένταξη μονάδων στο σύστημα με ενσωμάτωση	
φωτοβολταϊκών σε μη ιδανικές συνθήκες	67
5.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων με ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών με και χωρίς ιδανικές	
συνθήκες.....	72
Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα.....	75
Βιβλιογραφία.....	77

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 2.1: Παραγωγή λιγνίτη από το 2004 έως το 2020	6
Σχήμα 2.2: Μείωση Παραγωγής λιγνίτη 2019 και 2020	6
Σχήμα 2.3: Παραγωγή ενέργειας ανά πηγή προέλευσης	8
Σχήμα 2.4: Παραγωγή μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας	10
Σχήμα 3.1: Διαδικασία Βελτιστοποίησης	17
Σχήμα 4.1: Προφίλ ζήτησης ενέργειας του συστήματος ανά ώρα	27
Σχήμα 4.2: Πρόγραμμα παραγωγής ανά γεννήτρια	33
Σχήμα 4.3: Συνολικό πρόγραμμα παραγωγής	33
Σχήμα 4.4: Πρόγραμμα παραγωγής ανά γεννήτρια	37
Σχήμα 4.5: Συνολικό πρόγραμμα παραγωγής	38
Σχήμα 4.6: Προγράμματα παραγωγής για τις δυο προσεγγίσεις	39
Σχήμα 5.1: Καμπύλη πάπιας Φ/Β	44
Σχήμα 5.2: Σύγκριση των προφίλ ζήτησης	51
Σχήμα 5.3: Πρόγραμμα παραγωγής ανά μονάδα	55
Σχήμα 5.4: Συνολικό πρόγραμμα παραγωγής	55
Σχήμα 5.5: Διαμοιρασμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα σε Φ/Β και γεννήτριες.....	56
Σχήμα 5.6: Πρόγραμμα παραγωγής ανά μονάδα	61
Σχήμα 5.7: Συνολικό πρόγραμμα παραγωγής	61
Σχήμα 5.8: Διαμοιρασμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα σε φωτοβολταϊκά και γεννήτριες.....	62
Σχήμα 5.9: Σύγκριση των προφίλ ζήτησης για τις γεννητριες μετά την ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών.....	67
Σχήμα 5.10: Πρόγραμμα παραγωγής ανά μονάδα	71
Σχήμα 5.11: Συνολικό πρόγραμμα παραγωγής	71
Σχήμα 5.12: Διαμοιρασμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα σε φωτοβολταϊκά και γεννήτριες.....	72

Κατάλογος πινάκων

Πίνακας 4.1: Δεδομένα του συστήματος.....	26
Πίνακας 4.2: Δεδομένα παραγωγής και κόστη γεννητριών	28
Πίνακας 4.3: Δεδομένα χρόνου λειτουργίας γεννητριών	29
Πίνακας 4.4: Παραγωγή μονάδων ανά ώρα	30
Πίνακας 4.5: Ποσοστιαία φόρτιση μονάδων ανά ώρα.....	31
Πίνακας 4.6: Κατάσταση γεννητριών ανά ώρα.....	32
Πίνακας 4.7: Παραγωγή μονάδων ανά ώρα	34
Πίνακας 4.8: Ποσοστιαία φόρτιση μονάδων ανά ώρα.....	35
Πίνακας 4.9: Κατάσταση μονάδων ανά ώρα	36
Πίνακας 5.1: Ποσοστό Μέγιστης Παραγωγής Φ/Β ανά ημέρα	48
Πίνακας 5.2: Νέο προφίλ ζήτησης ενέργειας	50
Πίνακας 5.3: Παραγωγή μονάδων ανά ώρα	52
Πίνακας 5.4: Ποσοστιαία φόρτιση μονάδων ανά ώρα.....	53
Πίνακας 5.5: Κατάσταση γεννητριών ανά ώρα.....	54
Πίνακας 5.6: Παραγωγή μονάδων ανά ώρα	58
Πίνακας 5.7: Ποσοστιαία φόρτιση μονάδων ανά ώρα.....	59
Πίνακας 5.8: Κατάσταση μονάδων ανά ώρα	60
Πίνακας 5.9: Ποσοστό Μέγιστης Παραγωγής Φ/Β ανά ημέρα	64
Πίνακας 5.10: Νέο προφίλ ζήτησης ενέργειας	66
Πίνακας 5.11: Παραγωγή μονάδων ανά ώρα	68
Πίνακας 5.12: Ποσοστιαία φόρτιση μονάδων ανά ώρα.....	69
Πίνακας 5.13: Κατάσταση μονάδων ανά ώρα	70

Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή

Ένα από τα κομβικότερα σημεία, που άλλαξε την πορεία της ιστορίας όχι μόνο της χώρας μας αλλά και ολόκληρου του κόσμου, ήταν η ανακάλυψη του ηλεκτρισμού. Ξαφνικά ο ατμός, το πετρέλαιο και το φωταέριο εγκαταλείφθηκαν ως πηγές φωτός και ενέργειας. Μια νέα μορφή ενέργειας ήταν σε θέση να καλύψει τις ανάγκες του κόσμου με έναν τρόπο οικονομικότερο, ασφαλέστερο αλλά και φιλικότερο προς το περιβάλλον. Αυτή, δεν ήταν άλλη από την ηλεκτρική ενέργεια, η οποία ξεκίνησε να παράγεται από το 1881 και ήρθε στην πρωτεύουσα της Ελλάδας το 1889. Έκτοτε, πολλά μέρη της χώρας απέκτησαν τους δικούς τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι λειτουργούσαν διανέμοντας ηλεκτρική ενέργεια με συνεχές ρεύμα. Με την ανακάλυψη όμως του εναλλασσόμενου ρεύματος μετά το 1945 και την εφαρμογή του από το 1950 και έπειτα στη χώρα μας, η διανομή του ρεύματος από πόλη σε πόλη και από σπίτι σε σπίτι έγινε ακόμη γρηγορότερη και οικονομικότερη, φέρνοντας την εξέλιξη ακόμη ένα βήμα πιο κοντά στο σήμερα. Από τότε, έχουν αλλάξει πολλά πράγματα στο πως η ενέργεια παράγεται και διανέμεται, αλλά αυτή που παραμένει σταθερή, είναι η έρευνα των επιστημόνων και των μηχανικών για την ανακάλυψη νέων τρόπων ώστε να επιτυγχάνεται η βέλτιστη κάλυψη των αναγκών της ανθρωπότητας.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική εργασία, επιχειρεί την μελέτη ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την εύρεση των πόρων που αυτό αξιοποιεί, αλλά και της βέλτιστης χρήσης των πόρων αυτών. Στη συνέχεια, με τη συμβολή του λογισμικού MATLAB, οι πόροι αυτοί θα μελετηθούν προκειμένου να προκύψει η βέλτιστη χρήση αυτών για την κάλυψη μιας υποθετικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Το πως δηλαδή, ουσιαστικά, θα μπορέσει το σύστημα, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, να αξιοποιήσει όλους τους πόρους που διαθέτει για να καλύψει τις ανάγκες του. Αρχικά θα γίνει επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων στο σύστημα με γνώμονα το κόστος, ενώ αμέσως μετά θα επιλυθεί το ίδιο πρόβλημα με γνώμονα το κέρδος. Έπειτα θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των δυο προσεγγίσεων. Ακόμη θα μελετηθεί η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

στο σύστημα, καθώς και η επιρροή της στο πρόβλημα της ένταξης μονάδων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Το Κεφάλαιο 1, είναι περισσότερο εισαγωγικό κεφάλαιο, προκειμένου ο αναγνώστης να εξοικειωθεί με το θέμα που διαπραγματεύεται η εργασία και να ενταχθεί έτσι στο αντικείμενό της.

Το Κεφάλαιο 2, εστιάζει στους πολυάριθμους πόρους ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επίσης εστιάζει και στα ποσοστά χρήσης τους σε βάθος χρόνων στην Ελλάδα.

Στο Κεφάλαιο 3 γίνεται λόγος για το πρόβλημα της ένταξης μονάδων στο σύστημα. Δίνονται οι απαραίτητοι ορισμοί και αναλύονται όλα τα επιμέρους χαρακτηριστικά του. Ακόμη, αναφέρονται οι βασικότεροι τρόποι επίλυσης του προβλήματος, οι μαθηματικές εξισώσεις που το προσομοιάζουν, αλλά και οι κυριότερες μορφές με τις οποίες το πρόβλημα συναντάται στην πράξη.

Το Κεφάλαιο 4, επιλύει το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα με δυο διαφορετικούς τρόπους. Αρχικά με γνώμονα το κόστος, ενώ αμέσως μετά θα επιλυθεί το ίδιο πρόβλημα με γνώμονα το κέρδος. Έπειτα θα συγκριθούν τα αποτελέσματα των δυο προσεγγίσεων.

Το Κεφάλαιο 5, εστιάζει κατά κύριο λόγο στην ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα, καθώς και στην επιρροή τους στο πρόβλημα της ένταξης μονάδων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Παρουσιάζονται διαγραμματικά οι αλλαγές στο σύστημα και γίνεται σύγκριση των αποτελεσμάτων του κεφαλαίου 4 με αυτά του κεφαλαίου 5. Επιπλέον γίνεται σύγκριση της ενσωμάτωσης φωτοβολταϊκών μονάδων με και χωρίς ιδανικές συνθήκες λειτουργίας.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, τα αποτελέσματα της ερευνητικής διαδικασίας που ακολουθήθηκε μελετώνται σε βάθος και αποδομούνται κριτικά, προκειμένου να έχουμε τη διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Κεφάλαιο 2 Πόροι συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

2.1 Εισαγωγή

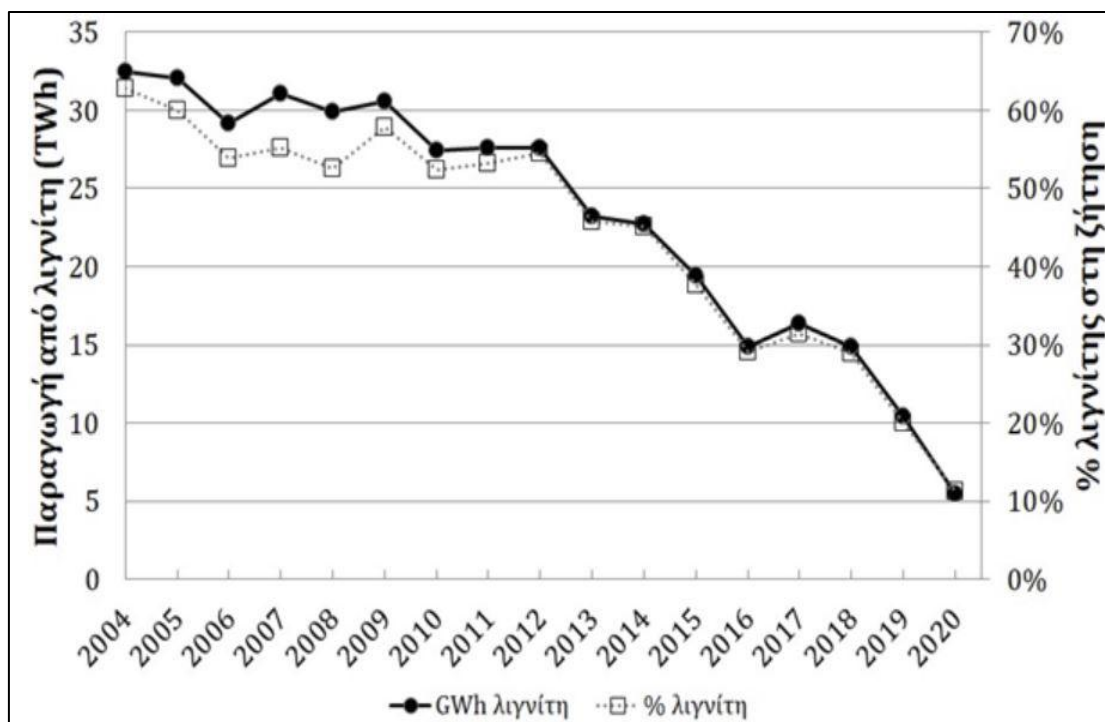
Η ηλεκτρική ενέργεια, λειτουργεί με ένα σύστημα πολύπλοκης υποδομής, βασιζόμενο σε πολυποίκιλους πόρους, προκειμένου να παραχθεί, να μεταφερθεί και να διανεμηθεί. Οι πόροι αυτοί μπορούν να κατανεμηθούν ανάλογα με τους παράγοντες που συντελούν στην προέλευσή τους σε φυσικούς, τεχνολογικούς, ανθρώπινους και οικονομικούς. Στην Ελλάδα, ο κύριος διαχειριστής της μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας του ηλεκτρικού δικτύου είναι ο ΑΔΜΗΕ, δηλαδή ο Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, σε συνεργασία με τον διαχειριστή της διανομής την ηλεκτρικής ενέργειας, ΔΕΔΔΗΕ (Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας). Η Ελλάδα, έχει μεγάλο αριθμό και ποικιλία φυσικών, ορυκτών και ανανεώσιμων πόρων στη διάθεσή της, ειδικά αν συγκριθεί με άλλες Ευρωπαϊκές και μη χώρες ανάλογου μεγέθους. Έτσι, θα μπορούσε από πολλούς να χαρακτηριστεί και προνομιούχα, καθώς για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, έχει στο δυναμικό της πολλές πηγές ενέργειας. Εκτός αυτού, διαθέτει και ανθρώπινο δυναμικό, έτοιμο να διαχειριστεί τις προκλήσεις, να συντρέξει τις έρευνες ανάπτυξης και να χρηματοδοτήσει τις προσπάθειες για την καινοτομία του δικτύου. Παρακάτω, θα γίνει αναφορά στους πόρους, οι οποίοι όπως προαναφέρθηκε, αποτελούν αρωγοί στην προσπάθεια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτοί, με τη σειρά τους, θα καταταμηθούν ανάλογα με την προέλευσή τους [2].

2.2 Φυσικοί Πόροι

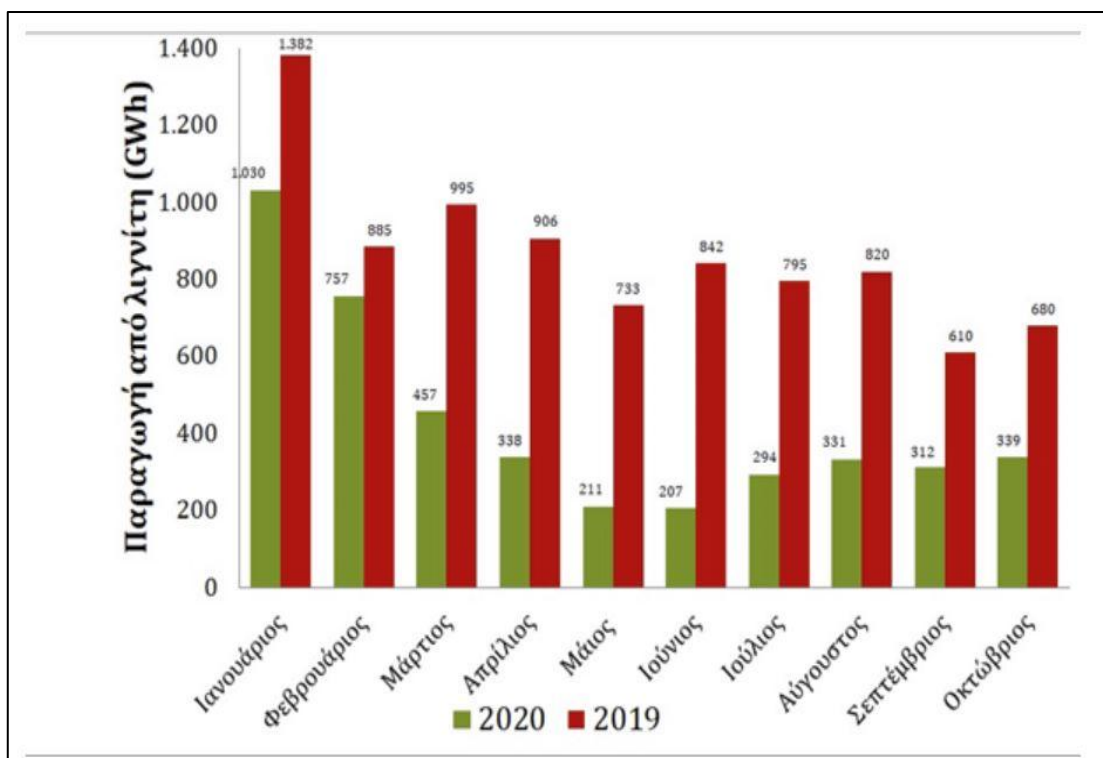
Στους φυσικούς πόρους, εντάσσονται όλες οι πρώτες ύλες που μπορούν να αξιοποιηθούν προκειμένου να επιτευχθεί η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Η Ελλάδα, αξιοποιεί:

- Τον Λιγνίτη, όπου για πολλά έτη συντελούσε την βασική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Ελλάδας, εξαιτίας της ευρείας διαθεσιμότητάς του εντός συνόρων και αποτελεί, ως και σήμερα, ένα μεγάλο μέρος της παραγωγής ηλεκτρισμού, παρότι για λόγους προστασίας του περιβάλλοντος, έχει περιοριστεί κατά πολύ η χρήση του. Ο περιορισμός της χρήσης φαίνεται ξεκάθαρα με το πέρασ

των χρόνων στο Σχήμα 2.1 καθώς και στο Σχήμα 2.2 όπου γίνεται σύγκριση στα έτη 2019 και 2020 [1,4].



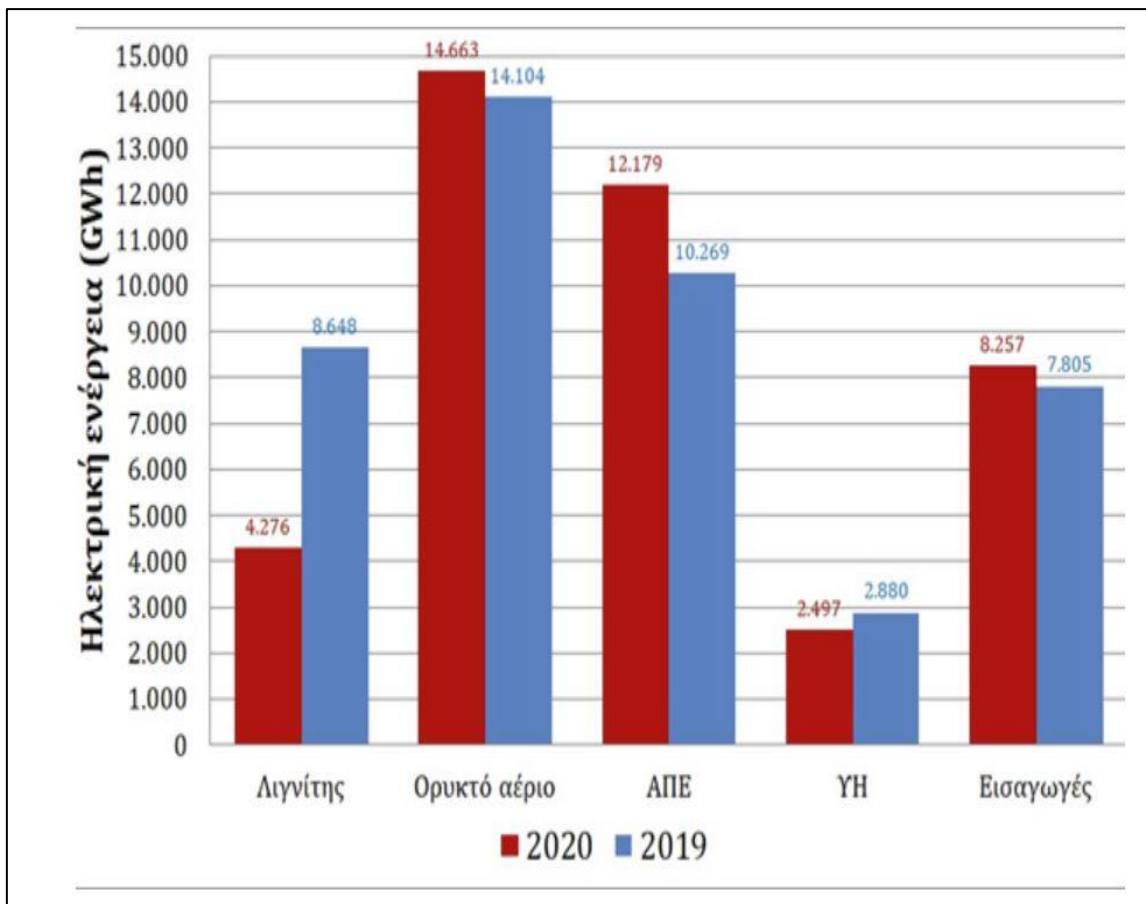
Σχήμα 2.1: Παραγωγή λιγνίτη από το 2004 έως το 2020



Σχήμα 2.2: Μείωση Παραγωγής λιγνίτη 2019 και 2020

- Το Φυσικό Αέριο, το οποίο επίσης αποτελεί βασική πηγή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τείνει να αντικαταστήσει τον λιγνίτη. Αυτό, γιατί ενώ διαθέτει υψηλή απόδοση, είναι λιγότερο ζημιογόνο σε σύγκριση με αυτόν.
- Τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Είναι γνωστό, ότι τα τελευταία κυρίως χρόνια, η Ελλάδα προσπαθεί, και περισσότερο μάλλον σε σύγκριση με χώρες που έχουν τα δεδομένα της, να μειώσει τις εκπομπές αερίου και να συντελέσει στη βιώσιμη ανάπτυξη του περιβάλλοντος. Επομένως, αξιοποιεί ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, για την κάλυψη των ενεργειακών της αναγκών.
- Την Υδροηλεκτρική Ενέργεια, όπου χάρη στα φράγματα που κατασκευάζει η ΔΕΗ, προσφέρεται μεγάλη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με σταθερότητα, αξιοπιστία και προστασία για το περιβάλλον.
- Τέλος, την Βιομάζα και Γεωθερμία, σε μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τα προαναφερθέντα, αλλά με μεγάλη προοπτική ανάπτυξης και εκμετάλλευσης ως εναλλακτική πηγή ενέργειας στο μέλλον.

Στο Σχήμα 2.3 φαίνεται το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας σε KWH ανά πηγή προέλευσης, καθώς και η διαφοροποίηση της το 2019 σε σχέση με το 2020.



Σχήμα 2.3: Παραγωγή ενέργειας ανά πηγή προέλευσης

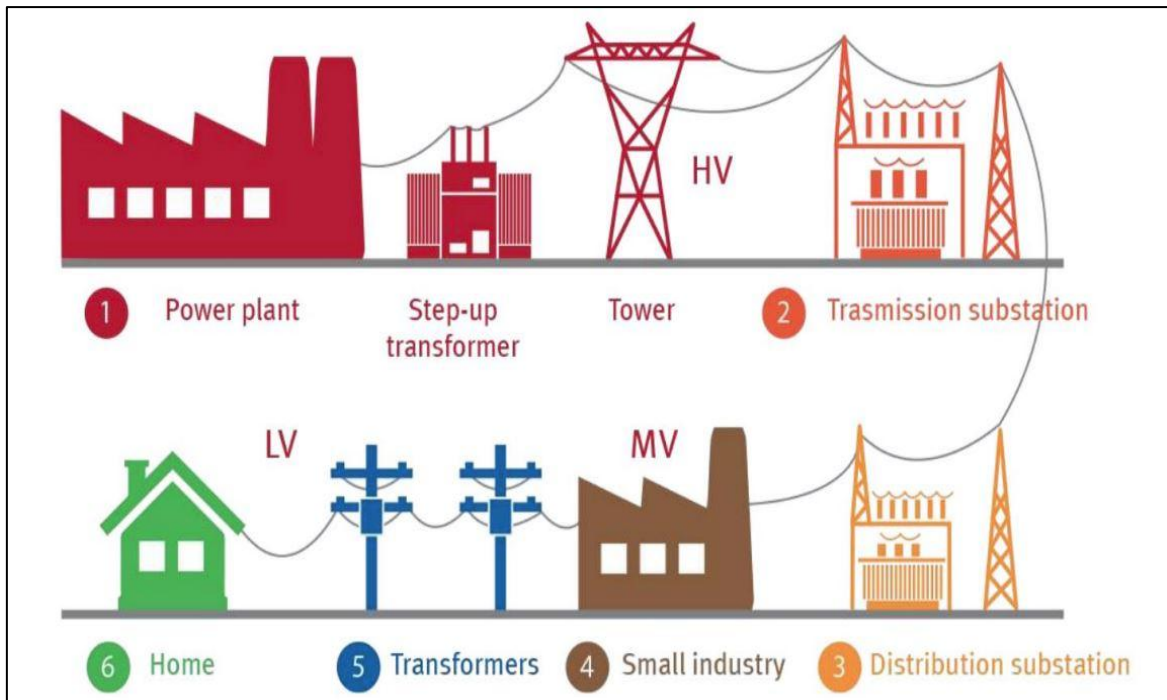
2.3 Τεχνολογικοί Πόροι

Σε αυτή την κατηγορία, ενάγονται οι υποδομές και οι τεχνολογίες που συνιστούν αρωγοί στην παραγωγή, στη μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας τες έτσι, αναπόσπαστο κομμάτι του ελληνικού δικτύου. Αυτοί, χωρίζονται στους:

- Σταθμούς Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας, οι οποίοι περιλαμβάνουν θερμικούς σταθμούς, σταθμούς ΑΠΕ και υδροηλεκτρικούς σταθμούς.
- Δίκτυο Μεταφοράς, το οποίο, είναι υπεύθυνο για τη σταθερότητα και την αξιοπιστία με την οποία πραγματοποιείται η μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας και, όπως έχει προαναφερθεί, εμπίπτει στη διαχείριση ΑΔΜΗΕ.

- Δίκτυο Διανομής, όπου γίνεται λόγος κυρίως για χαμηλής και μέσης τάσης δίκτυο, που διανέμεται και καλύπτει τις ανάγκες των καταναλωτών και εμπίπτει στη διαχείριση ΔΕΔΔΗΕ.
- Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας, μέσω των οποίων πραγματοποιείται η αποθήκευση ενέργειας. Για να γίνει αυτό δυνατό, χρησιμοποιούνται συσσωρευτές και μεγάλοι αντλησιοταμιευτικοί σταθμοί, οι οποίοι λειτουργούν σαν μπαταρίες μαζικής αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτός ο τρόπος αποθήκευσης ενέργειας, λειτουργεί συνδυαστικά με την ενσωμάτωση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και είναι ένας τομέας με προοπτικές ανάπτυξης στο μέλλον [3].
- Έξυπνα Δίκτυα και Μετρητές, οι οποίοι από κοινού διαχειρίζονται και βελτιώνουν πρώτων τη ζήτηση και έπειτα την κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ανθρώπινοι Πόροι. Σε αυτό το σημείο συγκαταλέγεται το ανθρώπινο δυναμικό που εργάζεται και ερευνά νέους και βελτιωμένους τρόπους λειτουργίας, συντήρησης και ανάπτυξης του ηλεκτρικού δικτύου. Μέσα σε αυτούς συμπεριλαμβάνονται μηχανικοί, τεχνικοί, ερευνητές και διοικητικά στελέχη. Όλοι τους, μέσω της διαρκούς εκπαίδευσης και κατάρτισής τους πάνω στον τομέα της ενέργειας, συμβάλλουν καταλυτικά στην αποτελεσματικότητα και στην καινοτομία του ηλεκτρικού δικτύου.

Το Σχήμα 2.4 αποτελεί ένα οπτικό μέσο επεξήγησης των παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, η ΔΕΗ είναι υπεύθυνη για το σημείο 1 (Παραγωγή ενέργειας), στην συνέχεια από το σημείο 2 έως το σημείο 3 είναι υπεύθυνος ο ΑΔΜΗΕ (Μεταφοράς ενέργειας) και τέλος από το σημείο 3 και έπειτα αποτελεί ευθύνη του ΔΕΔΔΗΕ (Διανομή ενέργειας) [4].



Σχήμα 2.4: Παραγωγή μεταφορά και διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

2.4 Οικονομικοί Πόροι

Δεν θα μπορούσε να μην γίνει αναφορά, στον κύριο λόγο ανάπτυξης και λειτουργίας του ηλεκτρικού συστήματος. Αυτός, δεν είναι άλλος, από τους επενδυτικούς πόρους, οι οποίοι μπορεί να είναι:

- Ιδιωτικοί, μέσω ιδιωτικών εταιριών που επενδύουν στην ανάπτυξη νέων τεχνολογιών και υποδομών παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας.
- Δημόσιοι, οι οποίοι προέρχονται από κρατικές χρηματοδοτήσεις για την αξιοποίησή τους με έργα υποδομών, όπως η επέκταση του ηλεκτρικού δικτύου μεταφοράς και διανομής.
- Ευρωπαϊκοί, στους οποίους συγκαταλέγεται κάθε ευρωπαϊκό πρόγραμμα χρηματοδότησης και κονδύλιο, που έχει ως στόχο την ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσής τους.

2.5 Το Ελληνικό Ηλεκτρικό Δίκτυο

Σε αυτό εμπεριέχονται η Ηπειρωτική Ελλάδα αλλά και τα ελληνικά νησιά και κατανέμεται σε:

- Διασυνδεδεμένο Σύστημα, στο οποίο περιλαμβάνονται κάποια νησιά που συνδέονται μέσω υποβρύχιων καλωδίων αλλά και το ηπειρωτικό δίκτυο.
- Μη Διασυνδεδεμένο Σύστημα, στο οποίο περιλαμβάνονται τα νησιά που βασίζονται ακόμα σε τοπικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να καλύψουν τις ανάγκες τους. Οι σταθμοί αυτοί λειτουργούν με την καύση πετρελαίου, κάνοντας την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ζημιογόνα, τόσο στον προϋπολογισμό του κράτους αλλά και στο περιβάλλον. Ωστόσο και σε πολλές από αυτές τις περιπτώσεις, υπάρχουν σχέδια διασύνδεσης με το ηπειρωτικό δίκτυο, όπως στην περίπτωση των Κυκλάδων ή της Κρήτης.

2.6 Μελλοντικές Προκλήσεις και Προοπτικές

Η Ελλάδα βρίσκεται σε ένα σημείο τομής, με αρκετές προκλήσεις, που είναι ικανές να επηρεάσουν σημαντικά το μέλλον του ενεργειακού της συστήματος. Κάποιες από αυτές, έχουν προαναφερθεί, αλλά μπορεί να γίνει μια κατηγοριοποίησή τους ως εξής:

- Απεξάρτηση από τον Λιγνίτη: Είναι σημαντικό να βρεθεί ένας τρόπος αξιοποίησης καθαρών πηγών ενέργειας, προκειμένου να καταργηθεί η ανάγκη λειτουργίας λιγνιτικών μονάδων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Ανάπτυξη των ΑΠΕ: Μολονότι υπάρχει μεγάλη ανάπτυξη στη χρήση αιολικής και ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, υπάρχει περιθώριο βελτίωσης στον τρόπο αποθήκευσης αυτής της ενέργειας αλλά και στη χωροταξική κατανομή της.
- Ενεργειακή Απόδοση και Ευφυή Δίκτυα: Αν αναπτυχθούν οι δυνατότητες των έξυπνων μετρητών και την ευφυών δικτύων, θα είναι σε θέση με μεγαλύτερη

ακρίβεια να μειώνουν τις απώλειες του δικτύου και να βελτιώνουν την απόδοσή του.

- Ενεργειακή Ασφάλεια και Διασυνδέσεις: Με την ενίσχυση των διασυνδέσεων τόσο σε γειτονικό- ευρωπαϊκό όσο και σε διεθνές επίπεδο, θα παγιωθεί η σταθερότητα στον ενεργειακό τομέα και θα ενεργοποιηθεί η ανταγωνιστικότητα και η παραγωγικότητα στις καινοτομίες.

Κεφάλαιο 3 Ένταξη Μονάδων στο Σύστημα

3.1 Εισαγωγή

Η Ένταξη Μονάδων (Unit Commitment-UC) εγείρει έναν κλασικό προβληματισμό βελτιστοποίησης (η οποία ως έννοια αναλύεται στην ενότητα 3.2) ως προς τον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας. Το πρόβλημα αυτό, εντείνεται κυρίως στο να καθοριστεί ο βέλτιστος χρονοπρογραμματισμός λειτουργίας των διαθέσιμων μονάδων παραγωγής, που να έχει ως στόχο την μείωση του λειτουργικού κόστους του συστήματος στο ελάχιστο. Επιλύοντας το πρόβλημα αυτό, όλα τα μέλη που συμμετέχουν στις ενεργειακές αγορές, από τους προμηθευτές ως και τους καταναλωτές θα απολαμβάνουν τα μέγιστα οφέλη, όπως η αξιοπιστία του συστήματος στον βέλτιστο βαθμό, με το μικρότερο δυνατό κόστος. Παρά τα προφανή οφέλη της βελτιστοποίησης, ωστόσο, θα ήταν παράληψη να μην αναφερθεί η πολυπλοκότητα του προβλήματος. Η μεγάλη κλίμακα δεδομένων, η περίτεχνη δομή του συστήματος παραγωγής και διανομής ενέργειας και η ποικιλομορφία τεchnικοοικονομικών περιορισμών, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Επομένως, αν κάποιος έπρεπε να συνοψίσει το πρόβλημα της ένταξης μονάδων θα το έκανε ως εξής: έχοντας ως δεδομένο ένα σύνολο παραγωγικών μονάδων, με ένα προκαθορισμένο προφίλ ζήτησης, για ένα προκαθορισμένο χρονικό πλαίσιο, ζητείται να προσδιοριστεί σε κάθε χρονικό σημείο του πλαισίου, το σύνολο των μονάδων που θα βρίσκονται σε λειτουργία, ώστε με αυτόν τον τρόπο, να καλύπτεται η ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος, λαμβάνοντας διαρκώς υπόψη τους προκαθορισμένους περιορισμούς λειτουργίας. Η πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνική αναπαράσταση του προβλήματος της ένταξης του προβλήματος της Ένταξης Μονάδων, είναι αυτή που το ενάγει σε ένα απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης [6,13,17]:

Ελαχιστοποίηση Κόστους Παραγωγής + Κόστος Εκκίνησης + Κόστος Τερματισμού Λειτουργίας (+ Κόστος Εκπομπής Ρύπων + Κόστος Συντήρησης).

Οι όροι αυτοί αναλύονται στην συνέχεια:

1. **Κόστος Παραγωγής:** Πρόκειται για το κόστος καυσίμου που αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή αναπαρίσταται μέσω γραμμικών ή τετραγωνικών συναρτήσεων και δεν είναι ασυνήθιστο να χρησιμοποιούνται τεχνικές γραμμικοποίησης της συνάρτησης, έτσι ώστε να μειωθεί ο υπολογιστικός χρόνος. Από την άλλη, το κόστος μοντελοποιείται με σταθερούς, γραμμικούς και τετραγωνικούς όρους.
2. **Κόστος Εκπομπής Ρύπων:** Πρόκειται, όπως είναι φανερό από τον τίτλο, για την εκπομπή ρύπων, οι οποίοι προκύπτουν από την παραγωγή ενέργειας. Αυτοί εξαρτώνται από την κατανάλωση καυσίμου αλλά και από τους περιορισμούς από τις τιμές άνθρακα στην Ε.Ε.
3. **Κόστος Συντήρησης:** Πρόκειται για το κόστος συντήρησης της συνεχιζόμενης λειτουργίας της μονάδας. Αντιπροσωπεύεται συνήθως με μια γραμμική συνάρτηση, είτε συγχωνεύεται με το κόστος παραγωγής.
4. **Κόστος Εκκίνησης:** Πρόκειται για το κόστος που ενέχει το καύσιμο που χρησιμοποιείται για την εκκίνηση μιας μονάδας. Περιγράφεται με μια εκθετική συνάρτηση, η οποία εξαρτάται από τον χρόνο αδράνειας της μονάδας, είτε με μια βηματική συνάρτηση, αν υπάρχει η πρόβλεψη να μετατραπεί σε γραμμική.
5. **Κόστος Τερματισμού Λειτουργίας:** Είναι το κόστος εξόδου από την παραγωγική διαδικασία. Συνήθως παραβλέπεται, επειδή είναι σταθερό.
6. **Στρατηγικές Μείωσης Κόστους:** Πρόκειται για σύγχρονες μονάδες που αξιοποιούν έναν συνδυασμένο κύκλο φυσικού αερίου, προκειμένου να περιορίσουν τις λιγνιτικές μονάδες, έτσι ώστε να εφαρμοστούν οι πολιτικές προστασίας του περιβάλλοντος και των εκπομπών άνθρακα. Έτσι, με έναν καλό προγραμματισμό, είναι σε θέση να μειώσουν τους ρύπους αλλά και το κόστος καυσίμου κατά ένα σημαντικό ποσοστό [5,6].

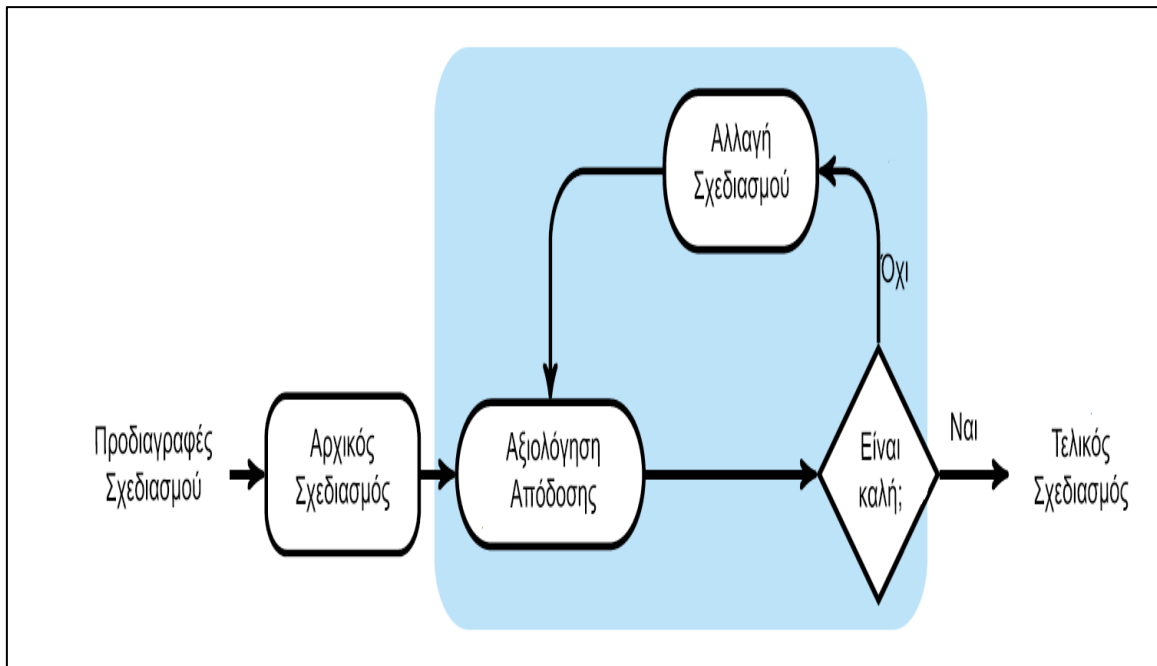
Λαμβάνοντας υπόψη όλα τα παραπάνω, αλλά ταυτόχρονα θέλοντας να επιλυθεί επιτυχώς το πρόβλημα της αποτελεσματικής ένταξης μονάδων στο σύστημα, κρίνεται σκόπιμο για την πορεία της εργασίας να ληφθούν υπόψη μερικοί ακόμη περιορισμοί. Αυτοί κατονομάζονται ως:

1. Περιορισμός Ζήτησης: Σε αυτή την περίπτωση ελέγχεται αν η παραγόμενη ενέργεια καλύπτει τη ζήτηση, λαμβάνοντας υπόψη τυχόν περιπτώσεις εφεδρείας ή απώλειας.
2. Περιορισμός Εφεδρείας: Εξασφαλίζεται η διαθεσιμότητα της ενέργειας σε περίπτωση που προκύψει κάποια έκτακτη ανάγκη.
3. Περιορισμοί Εκπομπής Ρύπων: Αναφέρονται στους τρόπους με τους οποίους μπορούν να περιοριστούν οι ρύποι κατά τη λειτουργία του συστήματος.
4. Ελάχιστος Χρόνος Λειτουργίας: Ελέγχει τον ελάχιστο και μέγιστο χρόνο που μπορεί ένα σύστημα να υπάρξει εντός και εκτός λειτουργίας, χωρίς να προκύψει κάποιο τεχνικό πρόβλημα.
5. Περιορισμοί Λειτουργίας: Αφορά τους τεχνικούς περιορισμούς καθώς και τα προβλήματα συντήρησης ή βλαβών.
6. Όρια Φόρτισης: Ελέγχεται κατά πόσο η παραγωγή κάθε μονάδας είναι εντός του επιτρεπόμενου εύρους.
7. Τεχνητά Όρια: Ελέγχεται κατά πόσο διαφοροποιείται η παραγωγή ανάλογα με τις διαδοχικές χρονικές στιγμές για να εξασφαλιστεί η ομαλή λειτουργία του συστήματος.

8. Λογικοί Περιορισμοί: Με αυτούς διασφαλίζεται η σωστή εκκίνηση και τερματισμός λειτουργίας της μονάδας.
9. Περιορισμοί Δικτύου: Παρόλο που συχνά παραλείπονται λόγω της πολυπλοκότητας στην καταγραφή τους, οι περιορισμοί δικτύου πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν ώστε να γίνονται γνωστά, τα όρια του δικτύου [5,6].

3.2 Βελτιστοποίηση

Σε προηγούμενο υποκεφάλαιο, αναφέρθηκε ο όρος «βελτιστοποίηση», ως παράμετρος της ένταξης μονάδων (Unit Commitment – UC). Προκειμένου λοιπόν να γίνει πλήρως αντιληπτός ο προβληματισμός αυτός, κρίνεται σκόπιμο να δοθεί μια ερμηνεία της. Βελτιστοποίηση, εξ' ορισμού, είναι η προσπάθεια και αναζήτηση βέλτιστων παραμέτρων ενός περίπλοκου συστήματος. Στα μαθηματικά, σημαίνει την εύρεση ενός ολικού μεγίστου ή ελαχίστου μιας συνάρτησης που υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, δηλαδή τη μηχανική, ενυπάρχει στο πώς θα επιτευχθεί η μέγιστη βέλτιστη κατάσταση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με βάση μια μέτρηση, ή ένα σύνολο μετρήσεων. Ο σχεδιαστής ενός συστήματος βελτιστοποίησης, συμπεριλαμβάνει το πρόβλημα αναλύοντας τις παραμέτρους που θέλει να λάβει υπόψη, παραθέτει τις σταθερές και τους περιορισμούς με μεγάλη προσοχή, καθότι οποιαδήποτε αδιευκρίνιστη διατύπωση παραμέτρων, μπορεί να οδηγήσει σε λάθος συμπέρασμα. Κατόπιν, προσφέρει έναν αρχικό σχεδιασμό, προκειμένου ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης, να ξεκινήσει να βελτιώνει τον σχεδιασμό. Αυτό θα συνεχιστεί έως ότου να βρεθεί η βέλτιστη λύση ή να εξαντληθούν οι πόροι ή ο χρόνος που έχει δοθεί. Όσο αυτή η διαδικασία λαμβάνει χώρα, πάλι ο σχεδιαστής, είναι υπεύθυνος να επιβλέπει τη διαδικασία εκπόνησης των συμπερασμάτων, για να διασφαλίσει ότι η λύση θα έχει την επιθυμητή εφαρμογή. Στο Σχήμα 3.1, παρουσιάζεται η διαδικασία αυτή σε οπτικοποιημένη μορφή, προκειμένου η αλληλουχία των δράσεων να γίνει πιο εύληπτη [7].



Σχήμα 3.1: Διαδικασία Βελτιστοποίησης

Όπως μπορεί κανείς λοιπόν να συμπεράνει από την απεικόνιση και την περιγραφή της βελτιστοποίησης, υπάρχουν πολλά πλεονεκτήματα στην αξιοποίησή της. Μερικά από αυτά είναι η μείωση των ανθρώπινων λαθών κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, η επιτάχυνση της διαδικασίας σχεδιασμού καθώς και η προσβασιμότητα σε αποτελέσματα. Ωστόσο, η αξιοποίησή της έρχεται με ορισμένα προβλήματα όπως η λανθασμένη επιλογή αλγορίθμου, η ανακριβής διατύπωση των περιορισμών ή των παραμέτρων ή η περιορισμένη υπολογιστική ισχύς. Αν ο σχεδιαστής, δεν έχει κατανοήσει σωστά ή επαρκώς το πρόβλημα, ώστε να επιλέξει τον κατάλληλο αλγόριθμο, μπορεί να οδηγήσει σε μη βέλτιστες λύσεις ή σε αδύνατη λύση του προβλήματος, κάτι που ακυρώνει την καθαυτού λειτουργία της βελτιστοποίησης. Επίσης, πολλοί σχεδιαστές τείνουν να χρησιμοποιούν πολλούς αλγόριθμους, έχοντας την εντύπωση ότι θα οδηγηθούν σε πιο έγκυρες ενδείξεις, κάτι που πολλές φορές δεν ισχύει και δεν φτάνουν στο βέλτιστο αποτέλεσμα. Παρ' όλα αυτά όμως, κανείς δεν μπορεί να αρνηθεί, ότι παρά τη δυσκολία που ενυπάρχει στον τρόπο αξιοποίησής της, αν οι παράμετροι και όλα τα δεδομένα δοθούν και παρακολουθηθούν σωστά, η βελτιστοποίηση παραμένει η καλύτερη μέθοδος επίλυσης των προβλημάτων ένταξης μονάδων [7].

3.3 Μέθοδοι Επίλυσης του Προβλήματος Ένταξης Μονάδων στο Σύστημα

Κατά τη διάρκεια σχεδιασμού του προγράμματος λειτουργίας ενός συστήματος ενέργειας, το ανθρώπινο δυναμικό που εργάζεται πάνω στον τρόπο με τον οποίο αυτό το σύστημα θα σχεδιαστεί και κατόπιν θα λειτουργεί, έχει να αντιμετωπίσει μια σειρά προβλημάτων τα οποία μπορεί να επηρεάσουν την ομαλή λειτουργία του δικτύου άμεσα και έμμεσα, όπως για παράδειγμα μια αυξημένη ζήτηση για ενέργεια, σε αντίθεση με μειωμένη διαθεσιμότητα ή ένα μεγάλο κόστος παραγωγής. Προκειμένου να αποφευχθούν τα προβλήματα αυτά, υπάρχουν ορισμένοι μέθοδοι που αξιοποιούν, ώστε να προτείνουν λύσεις ή να προλαμβάνουν πιθανές προκλήσεις κατά των σχεδιασμό. Αυτές οι μέθοδοι, είναι οι εξείς:

- Εξαντλητική Αρίθμηση (Exhaustive Enumeration – EE): Με αυτό τον όρο εννοείται η επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων, εξετάζοντας όλους τους δυνατούς συνδυασμούς κατάστασης των μονάδων παραγωγής, μέχρι να βρεθεί η καλύτερη. Για να γίνει αυτό πιο σαφές, ακολουθεί ένα παράδειγμα. Έστω ότι υπάρχουν M μονάδες, και ο χρονικός ορίζοντας της προσομοίωσης είναι T . Τότε, οι πιθανοί συνδυασμοί που εξετάζονται παρουσιάζονται ως $(2M-1)T(2^M - 1)^T(2M-1)T$. Αυτό σημαίνει ότι όσο οι μονάδες αυξάνονται, τόσο θα αυξάνονται και οι χρονικοί περίοδοι, κάτι που αναγκάζει τον υπολογιστή να προβεί σε πιο συνδυαστικούς και περισσότερους υπολογισμούς απ' όσους είναι σε θέση να διαχειριστεί. Αυτό από τη μία περιορίζει τη χρήση της εξαντλητικής αρίθμησης σε προβλήματα μικρής κλίμακας, στα οποία η συγκεκριμένη μέθοδος μπορεί να προσεγγίσει τη βέλτιστη λύση με υψηλή ακρίβεια [6].
- Έμπειρα Συστήματα (Expert Systems – ES): Τα έμπειρα συστήματα, αποτελούν μία από τις πλέον αμέτρητες εφαρμογές της τεχνητής νοημοσύνης. Όπως εργάζεται η τεχνητή νοημοσύνη λοιπόν, έτσι και τα έμπειρα συστήματα, είναι σε θέση να αξιοποιούν παλιότερες γνώσεις και εμπειρικούς κανόνες με βάση την "εμπειρία" που είναι καταχωρημένη σε αυτά, με τον ίδιο τρόπο που θα το έκανε και ένας άνθρωπος με εξειδικευμένες γνώσεις. Στη δική μας περίπτωση, όπου επιθυμούμε

την ένταξη μονάδων παραγωγής ρεύματος, τα έμπειρα συστήματα, θα εφαρμόσουν τους κανόνες που τους έχουν δοθεί (π.χ. "αν η ζήτηση αυξηθεί πάνω από Χ, τότε ενεργοποίησε τη μονάδα Υ"). Στη συνέχεια, θα αναλύσουν τα δεδομένα από το σύστημα σε πραγματικό χρόνο (π.χ. κατανάλωση, κόστος, διαθέσιμες μονάδες), ώστε να είναι σε θέση να προτείνουν λύσεις για το ποιες μονάδες να μπουν σε λειτουργία, πότε και για πόσο. Είναι ένας τρόπος επίλυσης που παρουσιάζει σημαντικά οφέλη, όπως το να είναι το χαμηλό υπολογιστικό κόστος και να υπάρχει η ικανότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου δεδομένων. Παρ' όλα αυτά όμως, το να υλοποιηθεί ένας τέτοιος τρόπος επίλυσης προβλήματος είναι αρκετά απαιτητικός ως προς τον χειρισμό της τεχνητής νοημοσύνης. Αυτό γιατί δεν είναι σε θέση να διαχειριστούν την τυχαιότητα απρόβλεπτων παραγόντων και δεν θα προκύψουν βέλτιστες λύσεις, αν δεν τους δοθούν τα σωστά και ακριβή δεδομένα. Γι' αυτό τον λόγο, σταδιακά εγκαταλείπεται η εκτεταμένη χρήση τους [6].

- Μέθοδος Λίστας Προτεραιότητας (Priority List – PL): Ο συγκεκριμένος τρόπος είναι από τους παλαιότερους και απλούστερους που αξιοποιούνται στην επίλυση προβλημάτων. Λειτουργεί ταξινομώντας τις μονάδες παραγωγής με αύξουσα σειρά κόστους. Έπειτα, σε κάθε χρονική περίοδο (πχ μέρα ή ώρα), ξεκινά να ενεργοποιεί πρώτα τη φθηνότερη μονάδα παραγωγής και συνεχίζει με φθίνουσα σειρά, ώσπου να καλυφθεί η απαιτούμενη ποσότητα παραγωγής. Βέβαια, αυτή η λύση συνήθως βελτιστοποιείται με κάποιες πιο εξελιγμένες τεχνικές επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων στο σύστημα, καθότι η μέθοδος είναι υπερβολικά απλή από μόνη της. Παρότι είναι γρήγορη και μαθηματικά θεμελιωμένη, από μόνη της πολλές φορές δεν οδηγεί σε βέλτιστες λύσεις, γιατί και πάλι, δεν λαμβάνει υπόψη πιο πολύπλοκους παράγοντες (π.χ. περιορισμοί, τεχνικές λεπτομέρειες κ.ά.) [6].
- Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic – FL): Όπως μπορεί να γίνει αρκετά αντιληπτό και από την επωνομασία της, η ασαφής λογική λειτουργεί ενσωματώνοντας την αβεβαιότητα και τις μη καθορισμένες τιμές στη διαδικασία επίλυσης. Δεν

λειτουργεί δηλαδή, με απόλυτες τιμές (π.χ. "ναι ή όχι", "0 ή 1"), αλλά δουλεύει με "ενδιάμεσες" καταστάσεις, όπως "λίγο", "πολύ", "μέτρια" κ.λπ. Στη συνέχεια, μέσω λογικών κανόνων, αξιολογεί τους κινδύνους από την αβεβαιότητα του φορτίου, όπως για παράδειγμα την πιθανότητα να μην παραχθεί αρκετή ενέργεια λόγω τυχαίων διαταραχών. Ως τρόπος επίλυσης όμως χρησιμοποιείται και αυτή σε συνδυασμό με άλλες μεθόδους, γιατί ενώ είναι σε θέση να παρουσιάσει μια αρκετά καλή απεικόνιση της πραγματικότητας και ευελιξία σε περίπλοκα συστήματα, δεν μπορεί να εντοπίσει βέλτιστες λύσεις. Επιπροσθέτως, υπάρχει σημαντική δυσκολία στην κατανόηση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων της και χρειάζεται ένας έμπειρος σχεδιαστής για να τη λειτουργήσει [6].

- **Νευρωνικά Δίκτυα (Neural Networks – NN):** Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούν μια πιο εξελιγμένη τεχνική επίλυσης προβλημάτων που αφορούν την ένταξη μονάδων στο σύστημα. Για να το πετύχει, αξιοποιεί την τεχνητή νοημοσύνη, όπως και τα Έμπειρα Συστήματα. Είναι βασισμένα στην αναγνώριση προτύπων μέσα από δεδομένα εκπαίδευσης. Παρέχονται δηλαδή στον υπολογιστή, πρότυπα παλαιότερων προβλημάτων και αναλύοντάς τα, μαθαίνουν να προβλέπουν καταστάσεις ή να προτείνουν λύσεις. Έτσι είναι εξοικειωμένα με τη διαχείριση πολύπλοκων και μεγάλης κλίμακας προβλημάτων και είναι σε θέση να προτείνουν λύσεις αρκετά κοντά στη βέλτιστη. Παρ' όλα αυτά, όσο η πολυπλοκότητα αυξάνεται, τόσο περισσότερες είναι οι πιθανότητες να μην παράγουν ικανοποιητικές λύσεις κατά την αναζήτηση και για να μη συμβαίνει αυτό, ο σχεδιαστής πρέπει να είναι αρκετά περιγραφικός εκπαιδύοντας την τεχνητή νοημοσύνη, κάτι που απαιτεί εκτενείς υπολογιστικούς πόρους και καταστεί τη μέθοδο αυτή, λιγότερο συμφέρουσα [6].
- **Προβλήματα Βελτιστοποίησης (Optimization Problems – OP):** Η συγκεκριμένη μέθοδος επίλυσης προβλημάτων, που αφορούν την ένταξη μονάδων, αποτελεί την πιο διαδεδομένη επιλογή επίλυσης προβλημάτων. Βασίζεται στην βελτιστοποίηση μιας αντικειμενικής συνάρτησης, την οποία την ορίζουμε από πριν. Στη συνέχεια λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς που τις δίνουμε και εκείνη χρησιμοποιώντας τεχνικές που παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη επιτυχία ως τώρα, οδηγείται στον

εντοπισμό της βέλτιστης λύσης, που καλύπτει την επίλυση του προβλήματος, με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Σαν μέθοδος, είναι από τις ακριβέστερες, ενώ παράλληλα, συνοδεύεται από πλούσια βιβλιογραφική έρευνα, ώστε ο σχεδιαστής να έχει την υποστήριξη που χρειάζεται στη δόμηση μιας συνάρτησης. Ένα μειονέκτημα που παρουσιάζει, είναι ότι σε μεγαλύτερα προβλήματα χρειάζεται αρκετός χρόνος για να γίνουν οι υπολογισμοί και ειδικά όταν το πρόβλημα είναι πολύπλοκο, χρειάζεται γραμμικοποίηση, δηλαδή απλούστευση, κάτι που θέτει υπό αμφισβήτηση την ακρίβεια των αποτελεσμάτων [6].

- Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic Programming – DP): Ο δυναμικός προγραμματισμός, είναι από τις βασικότερες τεχνικές επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης, όπως για παράδειγμα το πότε και ποιες μονάδες πρέπει να ενεργοποιούνται ή να απενεργοποιούνται, ανάλογα με την χρονική περίοδο που βρισκόμαστε, ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος λειτουργίας ή παραγωγής των μονάδων χωρίς αυτό να σημαίνει την μείωση της αποδοτικότητας. Είναι σε θέση να επιτρέπει την εξέταση όλων των πιθανών μεταβλητών, με βάση ένα προκαθορισμένο μοτίβο αποφάσεων (πχ. Δυαδική απεικόνιση μονάδων: 1= ενεργή, 0= ανενεργή). Ο τρόπος που λειτουργεί, είναι βήμα-βήμα, να υπολογίζει και να αποθηκεύει το χαμηλότερο δυνατό κόστος, για κάθε πιθανή κατάσταση, εξετάζοντας όλους τους πιθανούς συνδυασμούς, ενώ ταυτόχρονα “κρατά” τί ήταν καλύτερο στο παρελθόν, για να πάρει καλύτερες αποφάσεις στο μέλλον. Αν και προσφέρει τη μέγιστη ακρίβεια στην αναζήτηση της βέλτιστης λύσης, η μεθοδολογία απαιτεί σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους, καθιστώντας την, μη πρακτική, τουλάχιστον για μεγάλης κλίμακας συστήματα [6].
- Γραμμικός και Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear and Non-Linear Programming – LP & NLP): Τα συγκεκριμένα προγράμματα, αποτελούν τον κορμό της μαθηματικής βελτιστοποίησης και αξιοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα που διαφέρει ανάμεσα στον Γραμμικό Προγραμματισμό (LP), όπου όλες οι μεταβλητές είναι συνεχείς και οι σχέσεις μεταξύ τους είναι γραμμικές ή τον Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (NLP), ο οποίος χρησιμοποιεί να μεν συνεχείς μεταβλητές όπως

ο Γραμμικός, αλλά εμπλέκει και μη γραμμικές συναρτήσεις ή περιορισμούς. Όλα τα είδη γραμμικού προγραμματισμού, παρέχουν μεγάλη ακρίβεια στους υπολογισμούς τους, αλλά παρουσιάζουν περιορισμένη χρήση λόγω της πολυπλοκότητας των προβλημάτων NLP [18].

3.4 Μαθηματικός ορισμός του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα

Ο κύριος στόχος της ένταξης μονάδων (Unit Commitment, UC) είναι ο προγραμματισμός της λειτουργίας των θερμικών, υδροηλεκτρικών και ανανεώσιμων μονάδων σε έναν ορίζοντα T χρονικών διαστημάτων (π.χ. 24 ώρες), ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος παραγωγής, ενώ ταυτόχρονα καλύπτεται η ζήτηση και τηρούνται όλοι οι λειτουργικοί περιορισμοί. Πιο συγκεκριμένα, η μοντελοποίηση του προβλήματος παρουσιάζεται ως εξής [8,9]:

Δείκτες:

- $t \in T$: Χρονικές περιόδους (π.χ. ώρες)
- $i \in I$: Μονάδες παραγωγής

Μεταβλητές:

- $U_{i,t} \in \{0,1\}$: Δυαδική μεταβλητή ένταξης μονάδας i την ώρα t
- $P_{i,t}$: Ισχύς παραγωγής της μονάδας i την ώρα t
- $SU_{i,t} \in \{0,1\}$: Εκκίνηση μονάδας i την ώρα t

Παράμετροι:

- D_t : Ζήτηση συστήματος την ώρα t
- $P_i^{\min}, P_i^{\max}$: Ελάχιστη και μέγιστη ισχύς μονάδας i
- $C_i(P)$: Κόστος λειτουργίας της μονάδας i
- SC_i : Κόστος εκκίνησης μονάδας i
- T_i^{up}, T_i^{down} : Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας / αδράνειας

Στόχος συνάρτησης κόστους:

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^I [C_i(P_{i,t}) + SC_i * SU_{i,t}]$$

Περιορισμοί:

Ισορροπία Ισχύος:

$$\sum_{i=1}^I P_{i,t} = D_t, \forall t \in T$$

Όρια Ισχύος:

$$P_i^{\min} * U_{i,t} \leq P_{i,t} \leq P_i^{\max} * U_{i,t}, \forall i \in I, t \in T$$

Ορισμός Εκκίνησης:

$$SU_{i,t} \geq U_{i,t} - U_{i,t-1}, \forall i \in I, t \in T$$

Ελάχιστος Χρόνος Λειτουργίας:

$$\sum_{k=t}^{t=T_i^{up}-1} U_{i,k} > T_i^{up} * SU_{i,t}, \forall t, i$$

Ελάχιστος Χρόνος Αδράνειας:

$$\sum_{k=t}^{t=T_i^{down-1}} 1 - U_{i,k} > T_i^{down-1} * U_{i,t-1} - U_{i,t}, \forall t, i$$

Κεφάλαιο 4 Επίλυση προβλήματος της Ένταξης Μονάδων στο Σύστημα

4.1 Εισαγωγή

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα επιλυθεί το πρόβλημα της ένταξης μονάδων στο σύστημα με 2 τρόπους. Ο πρώτος τρόπος θα έχει στόχο την επίλυση του προβλήματος με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του κόστους ενώ ο δεύτερος τρόπος βασίζεται στην μεγιστοποίηση του κέρδους. Η επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων με γνώμονα το κόστος στοχεύει στον καθορισμό των μονάδων παραγωγής που θα λειτουργούν κάθε ώρα, έτσι ώστε να καλύπτεται η ζήτηση με το ελάχιστο συνολικό κόστος. Το πρόβλημα περιλαμβάνει τόσο το κόστος λειτουργίας κάθε γεννήτριας όσο και το κόστος εκκίνησής της. Η βελτιστοποίηση γίνεται υπό τεχνικούς περιορισμούς, όπως τα όρια ισχύος, ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας και αδράνειας. Πρόκειται για ένα μικτό ακέραιο πρόβλημα που επιλύεται με υπολογιστικές μεθόδους, όπως ο γραμμικός προγραμματισμός, εξασφαλίζοντας οικονομικά αποδοτική και αξιόπιστη λειτουργία του ηλεκτρικού συστήματος. Ο δεύτερος τρόπος, αποσκοπεί στην επίλυση του ίδιου προβλήματος με γνώμονα το μέγιστο δυνατό κέρδος. Η επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων με γνώμονα το κέρδος επικεντρώνεται στη μέγιστη αξιοποίηση των μονάδων παραγωγής ώστε να επιτυγχάνεται το μεγαλύτερο οικονομικό όφελος. Αντί να ελαχιστοποιείται μόνο το κόστος, ο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της διαφοράς μεταξύ εσόδων από την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας και του κόστους λειτουργίας και εκκίνησης των μονάδων. Το πρόβλημα περιλαμβάνει τεχνικούς περιορισμούς (όρια ισχύος, χρόνοι λειτουργίας/αδράνειας) και λαμβάνει υπόψη την τιμή αγοράς ενέργειας. Επιλύεται με μεθόδους μικτού ακέραιου προγραμματισμού, διασφαλίζοντας ότι η επιλεγμένη διάταξη μονάδων αποφέρει το μέγιστο δυνατό κέρδος.

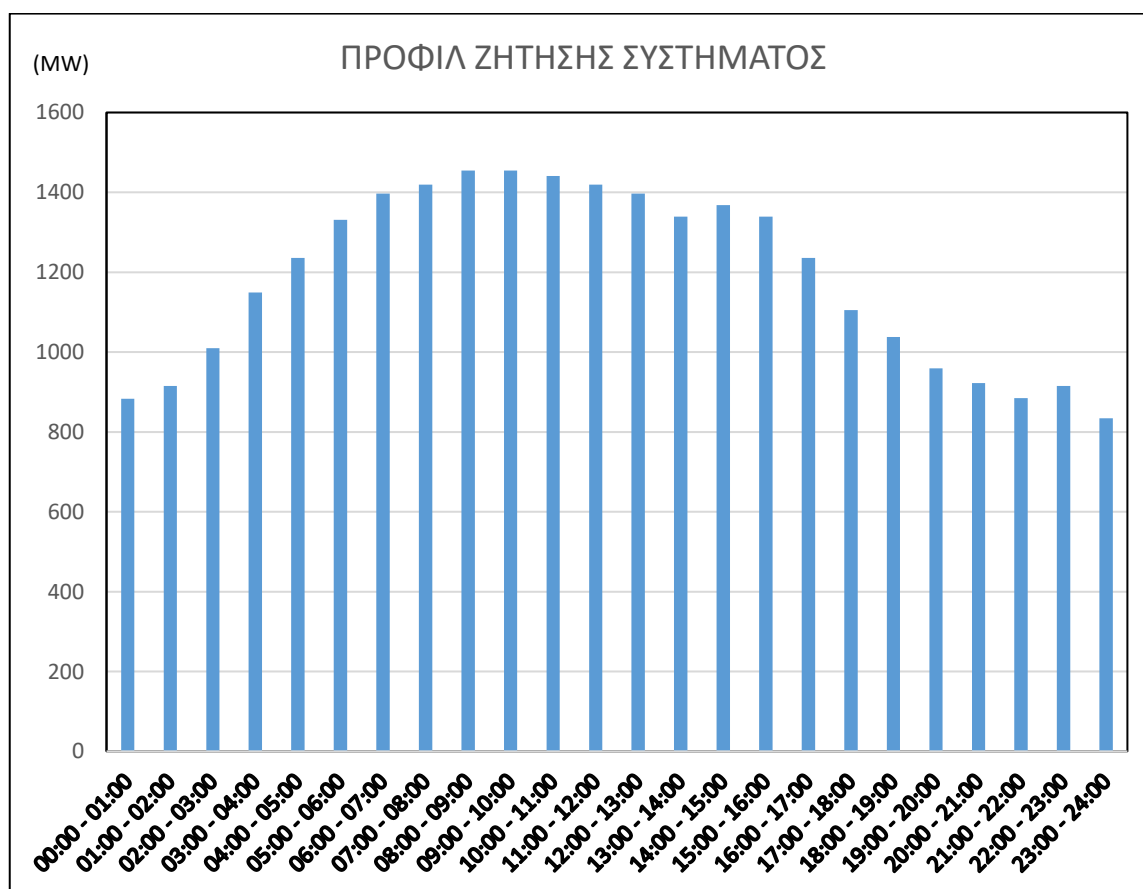
4.1.1 Τα δεδομένα του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα

Αρχικά, απαραίτητη προϋπόθεση για την επίλυση του προβλήματος είναι ο ξεκάθαρος ορισμός όλων των δεδομένων του. Για της ανάγκες της εργασίας, θα χρησιμοποιηθεί ένα υποθετικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο διαθέτει 8 γεννήτριες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στον Πίνακα 4.1, παρουσιάζονται για κάθε ώρα της ημέρας η οριακή τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας (λ), δηλαδή το κόστος που προστίθεται (ή αφαιρείται) από τη συνολική συνάρτηση κόστους, όταν αυξάνεται κατά 1 μονάδα η ζήτηση ή η προσφορά ενέργειας. Στον Πίνακα 4.1 παρουσιάζονται ακόμη οι ωριαίες ηλεκτρικές ανάγκες του συστήματος σε KWh. Για κάθε ώρα λοιπόν της ημέρας, υπάρχει η αντίστοιχη οριακή τιμή ενέργειας, καθώς και η ανάγκη του συστήματος για ενέργεια. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το προφίλ ζήτησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα μιας υποθετικής ημέρας λειτουργίας. Το συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, καλείται η εργασία να καλύψει με τον βέλτιστο δυνατό τρόπο με τη χρήση του λογισμικού MatLab.

Πίνακας 4.1: Δεδομένα του συστήματος

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΟΡΙΑΚΗ ΤΙΜΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑ (λ)	ΖΗΤΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (MWh)
00:00 - 01:00	14.72	883
01:00 - 02:00	15.62	915
02:00 - 03:00	14.72	1010
03:00 - 04:00	14.73	1149
04:00 - 05:00	14.83	1236
05:00 - 06:00	15.72	1331
06:00 - 07:00	20.21	1397
07:00 - 08:00	23.4	1419
08:00 - 09:00	23.86	1455
09:00 - 10:00	21.27	1455
10:00 - 11:00	19.83	1441

11:00 - 12:00	17.38	1419
12:00 - 13:00	17.96	1397
13:00 - 14:00	17.75	1339
14:00 - 15:00	18.51	1368
15:00 - 16:00	17.65	1339
16:00 - 17:00	23.45	1236
17:00 - 18:00	18.38	1105
18:00 - 19:00	18.54	1038
19:00 - 20:00	18.52	959
20:00 - 21:00	20.59	922
21:00 - 22:00	20.52	885
22:00 - 23:00	20.5	915
23:00 - 24:00	15.62	834



Σχήμα 4.1: Προφίλ ζήτησης ενέργειας του συστήματος ανά ώρα

Στον Πίνακα 4.2 και Πίνακα 4.3 παρουσιάζονται τα δεδομένα των γεννητριών που θα ληφθούν υπόψιν στους υπολογισμούς. Πιο συγκεκριμένα, κάθε γεννήτρια διαθέτει μέγιστο και ελάχιστο όριο παραγωγής. Για παράδειγμα η γεννήτρια G1, δεν είναι ικανή να παράγει περισσότερο από 200 MWh ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς επίσης δεν ενεργοποιείται για παραγωγή μικρότερη από 80 MWh. Επιπλέον κάθε γεννήτρια διαθέτει κόστος εκκίνησης και απενεργοποίησης. Αυτό σημαίνει ότι όταν μια γεννήτρια καλείται να λειτουργήσει η να διακόψει την λειτουργίας της, έχει το αντίστοιχο κόστος, το οποίο είναι απαραίτητο αν ληφθεί υπόψιν κατά την διάρκεια προγραμματισμού λειτουργίας της συγκεκριμένης γεννήτριας. Οι συχνές ενεργοποιήσεις και απενεργοποιήσεις μια γεννήτριας συμβάλουν στην αύξηση του κόστους λειτουργίας, πράγμα που δεν βοηθά στην βέλτιστη χρήση των πόρων ενός ηλεκτρικού συστήματος. Ακόμη, κάθε γεννήτρια διαθέτει και ελάχιστους χρόνους λειτουργίας και απενεργοποίησης. Αν σε κάποια χρονική περίοδο της ημέρας, η ζήτηση ενέργειας αυξηθεί ή μειωθεί απότομα, το σύστημα καλείται να ανταποκριθεί όσο πιο άμεσα γίνεται, λαμβάνοντας υπόψιν τους χρόνους λειτουργίας και απενεργοποίησης κάθε γεννήτριας, ώστε να επιλεγεί ο σωστός συνδυασμός γεννητριών [12].

Πίνακας 4.2: Δεδομένα παραγωγής και κόστη γεννητριών

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (MW)	ΜΕΓΙΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ (MW)	ΚΟΣΤΟΣ ΑΠΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ (€/MW)	ΚΟΣΤΟΣ ΕΚΚΙΝΗΣΗΣ (€/MW)
G1	80	200	42.6	42.6
G2	120	320	50.6	50.6
G3	50	150	57.1	57.1
G4	250	520	47.1	47.9
G5	80	280	56.6	56.9
G6	50	150	141.5	141.5
G7	30	110	42.6	42.6
G8	20	60	57.1	57.1

Πίνακας 4.3: Δεδομένα χρόνου λειτουργίας γεννητριών

ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ	ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ (Ωρες)	ΕΛΑΧΙΣΤΟΣ ΧΡΟΝΟΣ ΑΠΕΝΕΡΓΟΠΟΙΗΣΗΣ (Ωρες)
G1	3	2
G2	4	2
G3	3	2
G4	5	3
G5	4	2
G6	3	2
G7	3	2
G8	0	0

4.2 Επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα με γνώμονα το κόστος

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό MatLab, έχοντας εισάγει όλα τα δεδομένα και ενσωματώσει όλους τους περιορισμούς, επιλύεται το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα με βάση το κόστος. Η μοντελοποίηση και η επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων μπορεί να γίνει σχετικά εύκολα με την χρήση λογισμικών, όπως το CPLEX. Έχουν αναπτυχθεί επίσης διάφορες γλώσσες προγραμματισμού και πακέτα μοντελοποίησης, όπως η MatLab (YALMIP) [10]. Για την συγκεκριμένη εργασία, έχει χρησιμοποιηθεί η προσέγγιση του ακέραιου μικτού γραμμικού προγραμματισμού. Με τη χρήση του λογισμικού MatLab προκύπτουν τα αποτελέσματα την επίλυσης του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα με γνώμονα το κόστος [10,12]. Στον Πίνακα 4.4 διαμορφώνεται η παραγωγή κάθε μονάδας ανά ώρα λειτουργίας της. Το άθροισμα της παραγωγής των γεννητριών για κάθε ώρα οφείλει να ισούται με το σύνολο της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Στην προσέγγιση με βάση το κόστος, δίνεται μέγιστη βαρύτητα στην επίτευξη της ολοκληρωτικής κάλυψης του φορτίου ζήτησης.

Πίνακας 4.4: Παραγωγή μονάδων ανά ώρα

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1 (MWh)	G2 (MWh)	G3 (MWh)	G4 (MWh)	G5 (MWh)	G6 (MWh)	G7 (MWh)	G8 (MWh)
	00:00 - 01:00	0	0	150	453	221	0	0	60
	01:00 - 02:00	110	0	150	395	201	0	0	60
	02:00 - 03:00	150	120	130	291	145	72	55	48
	03:00 - 04:00	190	150	150	277	143	102	77	60
	04:00 - 05:00	200	150	150	295	150	132	99	60
	05:00 - 06:00	200	160	150	331	170	150	110	60
	06:00 - 07:00	200	180	150	358	189	150	110	60
	07:00 - 08:00	200	188	150	372	190	150	110	60
	08:00 - 09:00	200	190	150	395	200	150	110	60
	09:00 - 10:00	200	190	150	395	200	150	110	60
	10:00 - 11:00	200	190	150	385	196	150	110	60
	11:00 - 12:00	200	188	150	372	190	150	110	60
	12:00 - 13:00	200	180	150	358	189	150	110	60
	13:00 - 14:00	200	168	150	331	170	150	110	60
	14:00 - 15:00	200	174	150	345	180	150	110	60
	15:00 - 16:00	200	168	150	331	170	150	110	60
	16:00 - 17:00	200	150	150	291	150	138	98	60
	17:00 - 18:00	200	130	150	250	127	110	82	56
	18:00 - 19:00	200	120	150	250	110	90	70	48
	19:00 - 20:00	200	120	150	250	85	60	58	36
	20:00 - 21:00	188	120	150	250	80	50	52	32
	21:00 - 22:00	170	120	143	250	80	50	46	26
	22:00 - 23:00	183	120	150	250	80	50	50	32
	23:00 - 24:00	149	120	125	250	80	50	38	22

Στον Πίνακα 4.5 φαίνεται η ποσοστιαία φόρτιση των μονάδων ανά ώρα λειτουργίας. Ορισμένες μονάδες λόγω των ευνοϊκών δεδομένων τους λειτουργούν στην μέγιστη δυναμική τους για πολλές ώρες, ενώ άλλες γεννήτριες ενεργοποιούνται απλά και μόνο για να καλύπτουν την διαφορά ζήτησης και παραγωγής ενέργειας.

Πίνακας 4.5: Ποσοστιαία φόρτιση μονάδων ανά ώρα

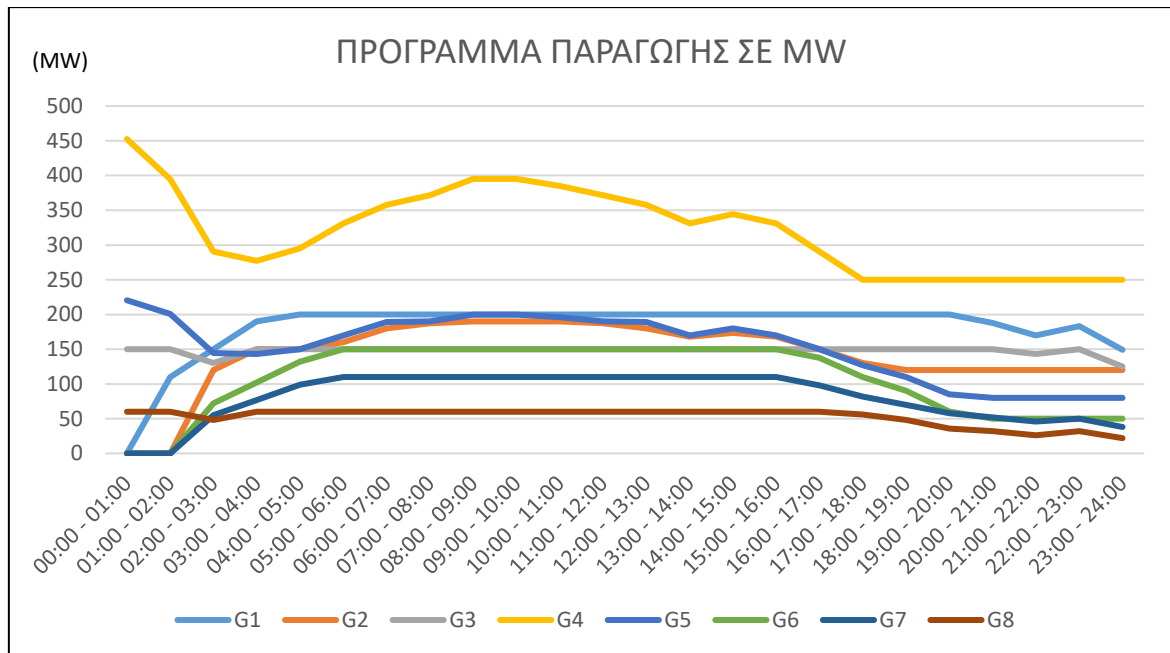
ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1(%)	G2(%)	G3(%)	G4(%)	G5(%)	G6(%)	G7(%)	G8(%)
	00:00 - 01:00	0	0	100	87	79	0	0	100
	01:00 - 02:00	55	0	100	76	72	0	0	100
	02:00 - 03:00	75	38	87	56	52	48	50	80
	03:00 - 04:00	95	47	100	53	51	68	70	100
	04:00 - 05:00	100	47	100	57	54	88	90	100
	05:00 - 06:00	100	50	100	64	61	100	100	100
	06:00 - 07:00	100	56	100	69	68	100	100	100
	07:00 - 08:00	100	59	100	71	68	100	100	100
	08:00 - 09:00	100	59	100	76	71	100	100	100
	09:00 - 10:00	100	59	100	76	71	100	100	100
	10:00 - 11:00	100	59	100	74	70	100	100	100
	11:00 - 12:00	100	59	100	71	68	100	100	100
	12:00 - 13:00	100	56	100	69	68	100	100	100
	13:00 - 14:00	100	53	100	64	61	100	100	100
	14:00 - 15:00	100	54	100	66	64	100	100	100
	15:00 - 16:00	100	53	100	64	61	100	100	100
	16:00 - 17:00	100	47	100	56	54	92	89	100
	17:00 - 18:00	100	41	100	48	45	73	75	93
	18:00 - 19:00	100	38	100	48	39	60	64	80
	19:00 - 20:00	100	38	100	48	30	40	53	60
	20:00 - 21:00	94	38	100	48	29	33	47	53
	21:00 - 22:00	85	38	95	48	29	33	42	43
	22:00 - 23:00	92	38	100	48	29	33	45	53
	23:00 - 24:00	75	38	83	48	29	33	35	37

Στον Πίνακα 4.6 παρουσιάζεται η κατάσταση των γεννητριών ανά ώρα. Ουσιαστικά με 1 συμβολίζεται η εκκίνηση λειτουργίας της γεννήτριας και με 0 συμβολίζεται η απενεργοποίηση της. Μελετώντας το Πίνακα 4.6, είναι Σημαντικό είναι να τονιστεί ότι στην συγκεκριμένη προσέγγιση καμία γεννήτρια δεν απενεργοποιείται συνεπώς δεν υπάρχει κόστος απενεργοποίησης.

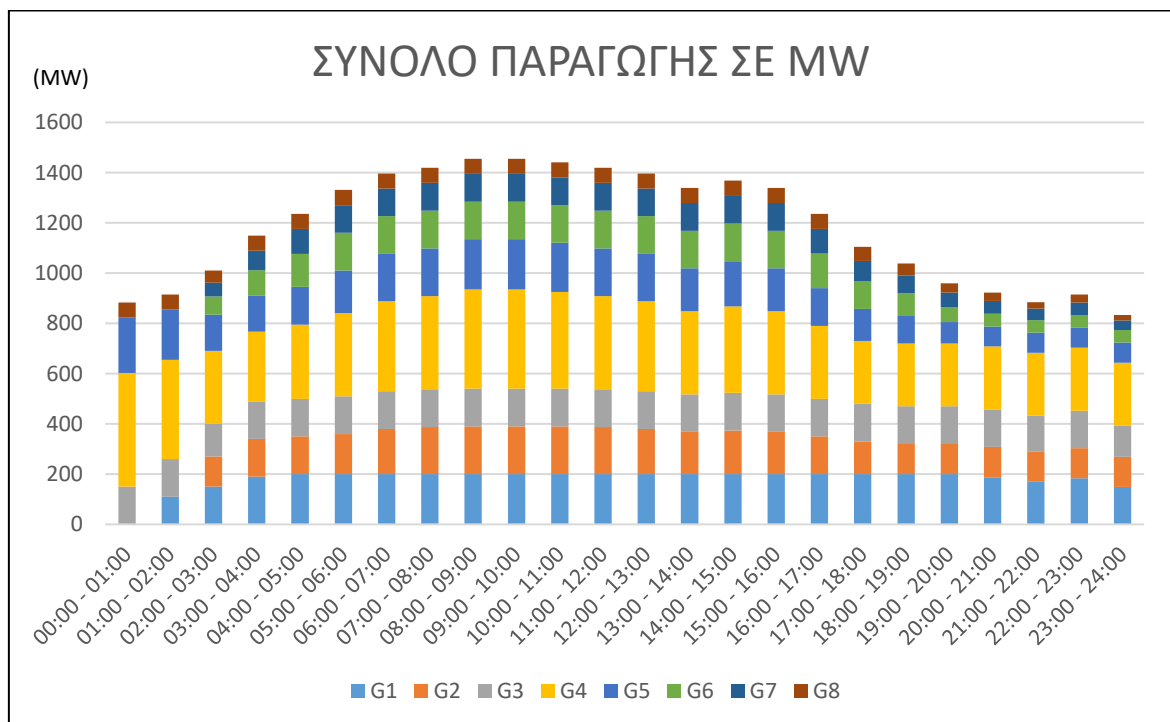
Πίνακας 4.6: Κατάσταση γεννητριών ανά ώρα

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
	00:00 - 01:00	0	0	1	1	1	0	0	1
	01:00 - 02:00	1	0	1	1	1	0	0	1
	02:00 - 03:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	03:00 - 04:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	04:00 - 05:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	05:00 - 06:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	06:00 - 07:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	07:00 - 08:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	08:00 - 09:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	09:00 - 10:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	10:00 - 11:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	11:00 - 12:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	12:00 - 13:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	13:00 - 14:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	14:00 - 15:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	15:00 - 16:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	16:00 - 17:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	17:00 - 18:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	18:00 - 19:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	19:00 - 20:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	20:00 - 21:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	21:00 - 22:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	22:00 - 23:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	23:00 - 24:00	1	1	1	1	1	1	1	1

Στο Σχήμα 4.2 και στο Σχήμα 4.3 βρίσκεται η γραφική απεικόνιση των προγραμμάτων παραγωγής για κάθε γεννήτρια, καθώς και το συνολικό πρόγραμμα παραγωγής, αντίστοιχα. Παρατηρώντας το πρόγραμμα παραγωγής, είναι εμφανές πως έχει υπάρξει ολοκληρωτική κάλυψη του προφίλ ζήτησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 4.2: Πρόγραμμα παραγωγής ανά γεννήτρια



Σχήμα 4.3: Συνολικό πρόγραμμα παραγωγής

4.3 Επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα με γνώμονα το κέρδος

Χρησιμοποιώντας και πάλι το λογισμικό MatLab, έχοντας εισάγει όλα τα δεδομένα και ενσωματώσει όλους τους περιορισμούς, επιλύεται το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα με βάση το κέρδος [10,12]. Έτσι, στον Πίνακα 4.7 διαμορφώνεται η νέα παραγωγή κάθε γεννήτριας ανά ώρα λειτουργίας της, όπως προκύπτει από τη νέα προσέγγιση.

Πίνακας 4.7: Παραγωγή μονάδων ανά ώρα

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1 (MWh)	G2 (MWh)	G3 (MWh)	G4 (MWh)	G5 (MWh)	G6 (MWh)	G7 (MWh)	G8 (MWh)
	00:00 - 01:00	0	0	0	250	80	0	0	0
	01:00 - 02:00	110	0	0	250	80	0	0	0
	02:00 - 03:00	86	0	0	250	80	0	0	0
	03:00 - 04:00	86	0	0	250	0	0	0	0
	04:00 - 05:00	120	0	80	250	0	0	0	0
	05:00 - 06:00	160	0	110	250	0	0	55	36
	06:00 - 07:00	200	130	140	264	130	80	77	48
	07:00 - 08:00	200	190	150	368	186	110	99	60
	08:00 - 09:00	200	190	150	395	200	140	110	60
	09:00 - 10:00	200	150	150	291	150	125	98	60
	10:00 - 11:00	200	130	150	250	120	95	76	48
	11:00 - 12:00	176	120	150	250	80	65	54	36
	12:00 - 13:00	200	120	150	250	90	60	58	36
	13:00 - 14:00	188	120	150	250	80	55	54	34
	14:00 - 15:00	200	120	150	250	100	75	62	42
	15:00 - 16:00	188	120	150	250	92	85	66	46
	16:00 - 17:00	200	160	150	318	148	115	88	58
	17:00 - 18:00	200	120	150	250	92	85	66	46
	18:00 - 19:00	200	120	150	250	100	75	66	42
	19:00 - 20:00	200	120	150	250	85	60	58	36
	20:00 - 21:00	188	120	150	250	80	50	52	32
	21:00 - 22:00	170	120	143	250	80	50	46	26
	22:00 - 23:00	176	120	145	250	80	60	52	32
	23:00 - 24:00	136	0	115	250	0	50	30	20

Στον Πίνακα 4.8 φαίνεται η νέα ποσοστιαία φόρτιση των γεννητριών ανά ώρα λειτουργίας. Στην προσέγγιση αυτή φαίνεται πως ορισμένες γεννήτριες αλλάζουν πιο συχνά το ποσοστό λειτουργίας τους, με στόχο πάντα την μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους.

Πίνακας 4.8: Ποσοστιαία φόρτιση μονάδων ανά ώρα

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1(%)	G2(%)	G3(%)	G4(%)	G5(%)	G6(%)	G7(%)	G8(%)
	00:00 - 01:00	0	0	0	48	29	0	0	0
	01:00 - 02:00	55	0	0	48	29	0	0	0
	02:00 - 03:00	43	0	0	48	29	0	0	0
	03:00 - 04:00	43	0	0	48	0	0	0	0
	04:00 - 05:00	60	0	53	48	0	0	0	0
	05:00 - 06:00	80	0	73	48	0	0	50	60
	06:00 - 07:00	100	41	93	51	46	53	70	80
	07:00 - 08:00	100	59	100	71	66	73	90	100
	08:00 - 09:00	100	59	100	76	71	93	100	100
	09:00 - 10:00	100	47	100	56	54	83	89	100
	10:00 - 11:00	100	41	100	48	43	63	69	80
	11:00 - 12:00	88	38	100	48	29	43	49	60
	12:00 - 13:00	100	38	100	48	32	40	53	60
	13:00 - 14:00	94	38	100	48	29	37	49	57
	14:00 - 15:00	100	38	100	48	36	50	56	70
	15:00 - 16:00	94	38	100	48	33	57	60	77
	16:00 - 17:00	100	50	100	61	53	77	80	97
	17:00 - 18:00	100	38	100	48	33	57	60	77
	18:00 - 19:00	100	38	100	48	36	50	60	70
	19:00 - 20:00	100	38	100	48	30	40	53	60
	20:00 - 21:00	94	38	100	48	29	33	47	53
	21:00 - 22:00	85	38	95	48	29	33	42	43
	22:00 - 23:00	88	38	97	48	29	40	47	53
	23:00 - 24:00	68	0	77	48	0	33	27	33

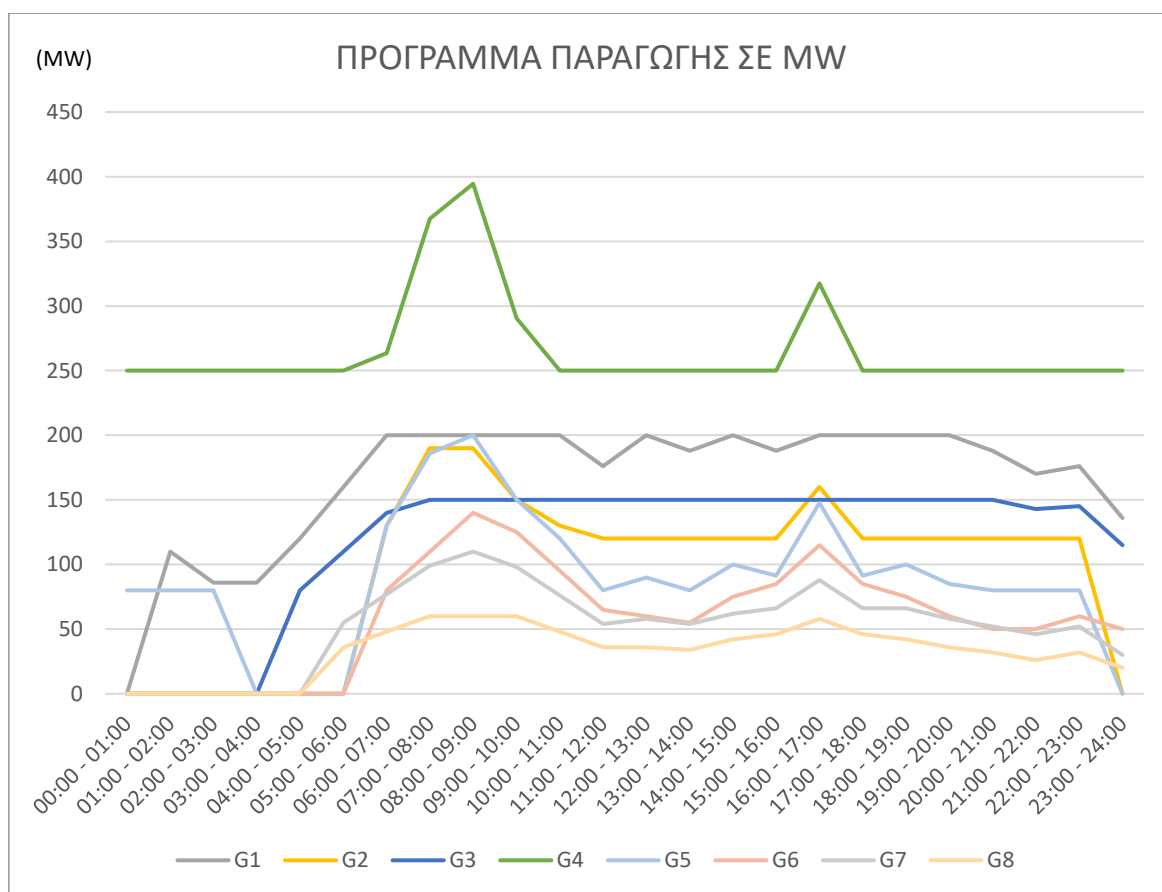
Στον Πίνακα 4.9 παρουσιάζεται η κατάσταση των γεννητριών ανά ώρα. Ουσιαστικά με 1 συμβολίζεται η εκκίνηση λειτουργίας της γεννήτριας και με 0 συμβολίζεται η απενεργοποίηση της. Μελετώντας το Πίνακα 4.9, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι στην συγκεκριμένη προσέγγιση υπάρχουν ενεργοποιήσεις και απενεργοποιήσεις γεννητριών σε αντίθεση με την προσέγγιση του κόστους. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους ενεργοποίησης και απενεργοποίησης γεννητριών, όμως το συνολικό κέρδος υπερκαλύπτει τα έξτρα κόστη.

Πίνακας 4.9: Κατάσταση μονάδων ανά ώρα

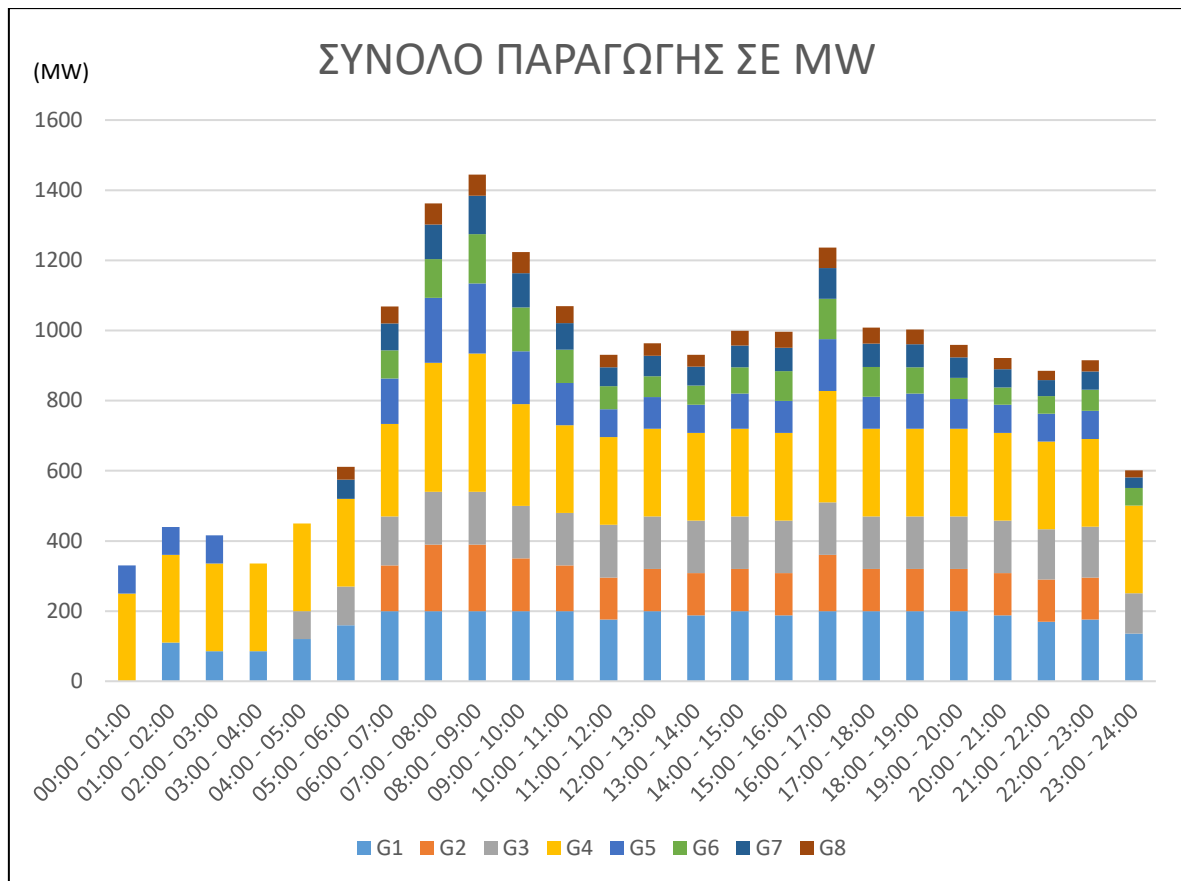
ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
	00:00 - 01:00	0	0	0	1	1	0	0	0
	01:00 - 02:00	1	0	0	1	1	0	0	0
	02:00 - 03:00	1	0	0	1	1	0	0	0
	03:00 - 04:00	1	0	0	1	0	0	0	0
	04:00 - 05:00	1	0	1	1	0	0	0	0
	05:00 - 06:00	1	0	1	1	0	0	1	1
	06:00 - 07:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	07:00 - 08:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	08:00 - 09:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	09:00 - 10:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	10:00 - 11:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	11:00 - 12:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	12:00 - 13:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	13:00 - 14:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	14:00 - 15:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	15:00 - 16:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	16:00 - 17:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	17:00 - 18:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	18:00 - 19:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	19:00 - 20:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	20:00 - 21:00	1	1	1	1	1	1	1	1

	21:00 - 22:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	22:00 - 23:00	1	1	1	1	1	1	1	1
	23:00 - 24:00	1	0	1	1	0	1	1	1

Στο Σχήμα 4.4 και στο Σχήμα 4.5 βρίσκεται η γραφική απεικόνιση των προγραμμάτων παραγωγής για κάθε γεννήτρια, καθώς και το συνολικό πρόγραμμα παραγωγής αντίστοιχα. Παρατηρώντας το πρόγραμμα παραγωγής, είναι εμφανές πως δεν υπάρχει ολοκληρωτική κάλυψη του προφίλ ζήτησης του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, ειδικά τις πρωινές ώρες.



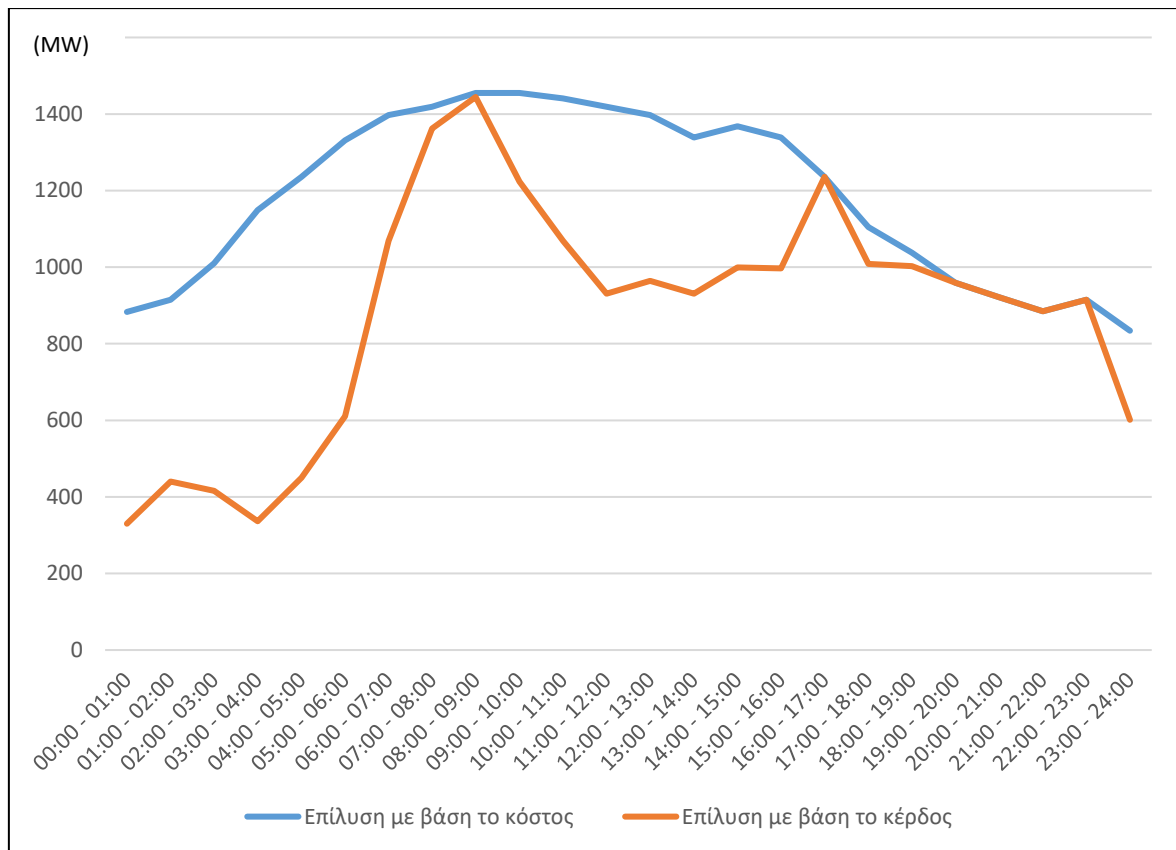
Σχήμα 4.4: Πρόγραμμα παραγωγής ανά γεννήτρια



Σχήμα 4.5: Συνολικό πρόγραμμα παραγωγής

4.4 Σύγκριση των δυο προσεγγίσεων

Συγκρίνοντας τις δυο προσεγγίσεις αυτές, δηλαδή την προσέγγιση της επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων με γνώμονα το κόστος και την προσέγγιση με γνώμονα το κέρδος, μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι η πιο σημαντική διαφορά φαίνεται στον διαφορετικό προγραμματισμό παραγωγής για τις γεννήτριες. Η προσέγγιση με βάση το κόστος είναι πιο πιστή στο προφίλ ζήτησης του συστήματος, ενώ η προσέγγιση με βάση το κέρδος επικεντρώνεται στην μεγιστοποίηση του κέρδους, με λιγότερο ενδιαφέρον στην άμεση κάλυψη του προφίλ ζήτησης. Στο Σχήμα 4.6 παρουσιάζεται η διαφορά των δύο προγραμμάτων παραγωγής.



Σχήμα 4.6: Προγράμματα παραγωγής για τις δυο προσεγγίσεις

Εκτός από τα προγράμματα παραγωγής, υπάρχουν περισσότερες διαφορές. Στην λύση του προβλήματος με βάση το κόστος, βρέθηκε ότι :

- α. Το κόστος εκκίνησης γεννητριών ανέρχεται στα 391,5 €
- β. Το κόστος απενεργοποίησης γεννητριών είναι 0 €
- γ. Το κόστος καυσίμου υπολογίζεται στα 495.970 €, άρα
- δ. Το Συνολικό κόστος είναι 496.361,5 €
- ε. Η συνολική παραγωγή 28.447 MWh

Στην λύση του προβλήματος με βάση το κέρδος, υπολογίζεται ότι:

- α. Το κόστος εκκίνησης γεννητριών είναι 448,4 €
- β. Το κόστος απενεργοποίησης γεννητριών είναι 163,8 €
- γ. Το κόστος καυσίμου ανέρχεται στα 354.570 €, άρα
- δ. Το Συνολικό κόστος είναι 355.182,2 €
- ε. Η Συνολική παραγωγή 21.102 MWh
- στ. Αφού η τιμή ενέργειας είναι 409.510 €
- ζ. Το κέρδος ανέρχεται στα 54.327,8 €

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των δύο προσεγγίσεων, αν τις συγκρίνουμε θα διακρίνουμε ότι:

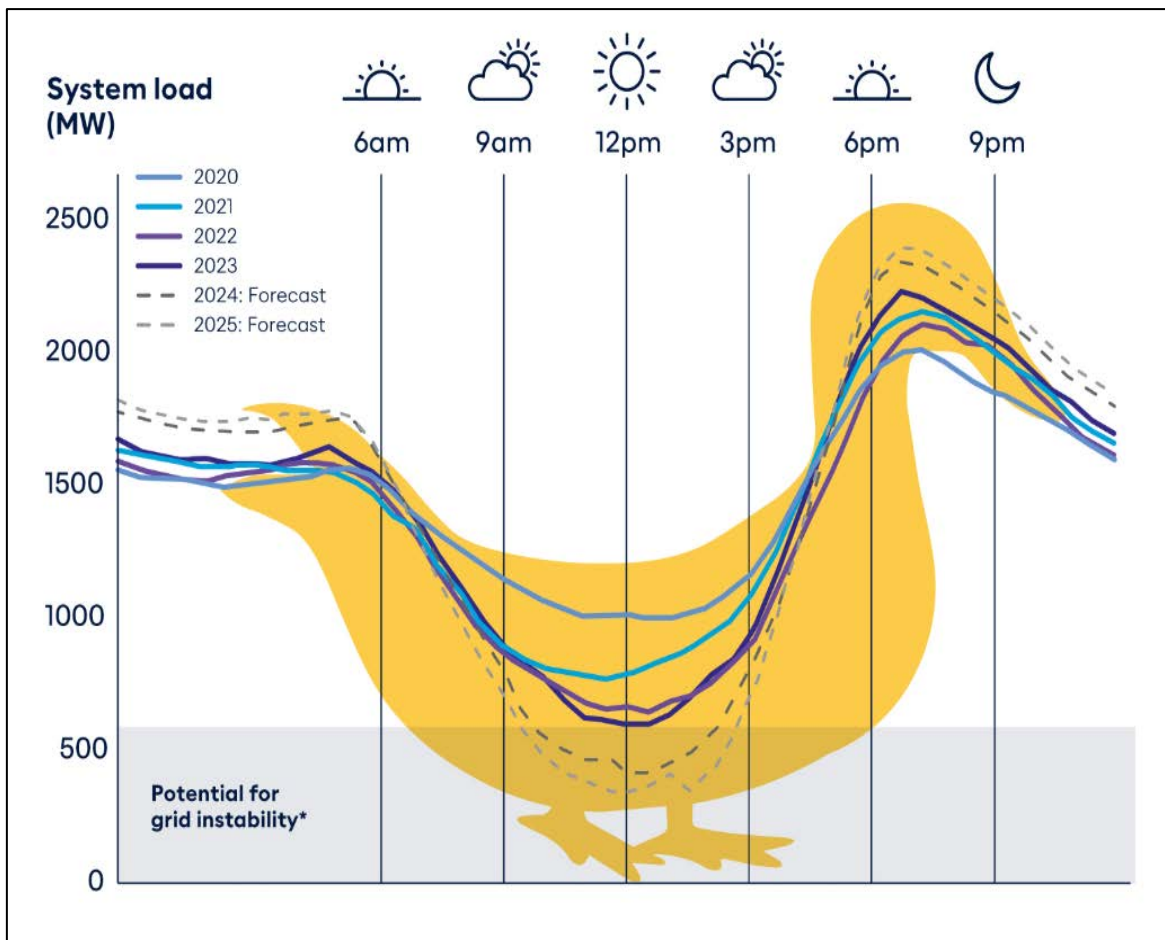
1. Η συνολική παραγωγή των μονάδων μειώθηκε ελάχιστα στην δεύτερη προσέγγιση, διότι δεν υπάρχει πλέον ο αυστηρός περιορισμός της ικανοποίησης της ζήτησης, αλλά κύριο και πρωταρχικό ρόλο παίζει η αύξηση του κέρδους και η μείωση του κόστους.
2. Τα κόστη εκκίνησης και τα κόστη απενεργοποίησης όλων των μονάδων του προβλήματος, αυξάνονται στην δεύτερη προσέγγιση, γεγονός που μαρτυρά ότι υπάρχουν συχνότερες και περισσότερες αλλαγές στην κατάσταση των μονάδων, με στόχο την κερδοφόρα χρήση τους. Αυτό είναι εμφανές και από το γεγονός ότι στην πρώτη προσέγγιση καμία μονάδα δεν απενεργοποιείται ποτέ ακόμη και αν υπάρχει μονάδα που μπορεί να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες πιο αποτελεσματικά.

3. Το συνολικό κόστος στην δεύτερη προσέγγιση παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα και σε συνδυασμό με τον συντελεστή αγοράς ενέργειας λ , οδηγεί σε μεγαλύτερα επίπεδα κέρδους.

Κεφάλαιο 5 Ένταξη Μονάδων στο Σύστημα με Ενσωμάτωση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

5.1 Εισαγωγή

Θα επιχειρηθεί να λυθεί το πρόβλημα της ένταξης μονάδων στο σύστημα με βασικό παράγοντα το κέρδος. Αυτό που θα αλλάξει όμως σε αντίθεση με τα αποτελέσματα που παρήχθησαν ως τώρα, είναι η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα. Συγκεκριμένα, θα αξιοποιηθούν τα φωτοβολταϊκά ως επιπρόσθετη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τις γεννήτριες. Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα, αποτελούν χωρίς καμία αμφιβολία τον βασικό πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης προς πιο βιώσιμες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Εισέρχονται, ολοένα και περισσότερο στα σύγχρονα ηλεκτρικά δίκτυα και αυτό οφείλεται στη ραγδαία μείωση του κόστους κατασκευής τους και στην αύξηση της ενεργειακής τους απόδοσης. Ωστόσο, τα φωτοβολταϊκά ως γνωστόν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια μόνο κατά τη διάρκεια της ημέρας και κυρίως τις ώρες ηλιοφάνειας. Αυτό δημιουργεί μια χαρακτηριστική επίδραση στην ημερήσια καμπύλη φορτίου. Αυτό σημαίνει ότι εντάσσοντάς τα στο ενεργειακό μείγμα, ο τρόπος επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων επηρεάζεται σημαντικά. Αυτό συμβαίνει κυρίως, επειδή πρέπει να επιτευχθεί η επιλογή κατάλληλων μονάδων παραγωγής στην κατάλληλη χρονική στιγμή, ώστε να καλυφθεί η ζήτηση για ενέργεια με το μικρότερο δυνατό κόστος, ενώ παράλληλα ο τρόπος αξιοποίησης των ανανεώσιμων πηγών παραμένει τεχνικά αποδοτικός. Επομένως, η ένταξη ενός μεγάλης ισχύος Φ/Β στο δίκτυο, πρέπει να συνοδεύεται από τη διαμόρφωση της λεγόμενης "καμπύλης πάπιας" ("duck curve"), η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1. Έτσι, το μεσημέρι, θα έχει βαθιά κοιλότητα, λόγω της αυξημένης ηλιοφάνειας, η οποία συνεπάγεται την αυξημένη παραγωγή στο Φ/Β. Αντίθετα, προς το απόγευμα-βράδυ θα υπάρχει απότομη αύξηση της ζήτησης καθώς μειώνεται η ηλιακή ακτινοβολία. Αυτό προκαλεί σημαντικές μεταβολές στις απαιτήσεις των συμβατικών μονάδων παραγωγής, οι οποίες μετά κατά συνέπεια πρέπει να προσαρμόζονται ταχύτατα για να καλύψουν τις αυξομειώσεις αυτές στην καθαρή ζήτηση [13,14].



Σχήμα 5.1: Καμπύλη πάτιας Φ/Β

5.1.1 Οικονομικά Κόστη Φωτοβολταϊκών Συστημάτων

Στα οικονομικά κόστη, κοστολογούνται από την αρχή ως το τέλος όλοι οι παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να επιτευχθεί η σωστή ένταξη της συγκεκριμένης ανανεώσιμης πηγής ενέργειας, ως τρόπος επίλυσης του προβλήματος. Τα κόστη αυτά ξεχωρίζουν ως:

- Αρχικό Κεφαλαιουχικό Κόστος, στο οποίο συμπεριλαμβάνεται το κόστος εγκατάστασης πάνελ, μετατροπέων, βάσεων στήριξης, το κόστος μελέτης, αδειοδότησης και σύνδεσης του Φ/Β με το δίκτυο. Σε αυτό το σημείο, καλό είναι γίνει αναφορά στο γεγονός ότι το κόστος αυτό έχει μειωθεί σημαντικά μέσα στην τελευταία δεκαετία, καθιστώντας τα Φ/Β μία από τις οικονομικότερες μορφές παραγωγής ενέργειας.

- **Λειτουργικό Κόστος** , το οποίο αφορά κυρίως στη συντήρηση των πάνελ και των μπαταριών, μιας και σε αντίθεση με τις θερμικές μονάδες, τα Φ/Β δεν απαιτούν καύσιμο, καθιστώντας το κόστος αυτό αρκετά χαμηλό.
- **Μηδενικό Οριακό Κόστος Παραγωγής:** Τα Φ/Β δεν έχουν μεταβλητό κόστος, άρα όταν είναι διαθέσιμα, προτιμώνται αυτόματα στην αγορά, εκτοπίζοντας ακριβότερες μονάδες.
- **Κόστος Ευελιξίας για το Σύστημα,** το οποίο αναφέρεται σε μια πιθανή επιπρόσθετη δαπάνη για υπηρεσίες εφεδρείας, αποθήκευσης ή ταχείας απόκρισης από συμβατικές μονάδες, εξαιτίας της διακοπτόμενης φύσης των Φ/Β [13].

5.1.2 Πλεονεκτήματα Φ/Β στο Πρόβλημα Ένταξης Μονάδων

Παρακάτω, παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα που αποφαίνεται να παρουσιάζουν τα Φ/Β άπαξ και χρησιμοποιηθούν ως τρόπος επίλυσης του προβλήματος της ζήτησης ενέργειας. Αυτά, είναι πολλά και παρατηρούνται τόσο σε οικονομικούς τομείς όσο και σε περιβαλλοντολογικούς. Παρουσιάζονται εν συντομία, ως εξής:

- **Μείωση Καυσίμων και Κόστους Λειτουργίας:** Η ένταξη Φ/Β στο ηλεκτρικό σύστημα μειώνει την ανάγκη λειτουργίας θερμικών μονάδων, περιορίζοντας την κατανάλωση καυσίμων και τις αντίστοιχες εκπομπές CO₂.
- **Σταθερότητα Οριακού Κόστους:** Εφόσον το οριακό κόστος των Φ/Β είναι μηδενικό, η λειτουργία τους οδηγεί σε χαμηλότερες τιμές χονδρικής και σταθερότερη αγορά ηλεκτρισμού.
- **Αποκέντρωση Παραγωγής:** Η δυνατότητα εγκατάστασης Φ/Β σε επίπεδο καταναλωτή (π.χ. σε στέγες) μειώνει τις απώλειες μεταφοράς και αυξάνει την ενεργειακή αυτονομία.

- Συμμόρφωση με Κλιματικούς Στόχους: Η ενσωμάτωσή τους βοηθά τα κράτη να πετύχουν στόχους μείωσης εκπομπών και αύξησης της διείσδυσης ΑΠΕ, όπως προβλέπεται από το Ευρωπαϊκό Green Deal.
- Προβλεψιμότητα Παραγωγής (σε ημερήσιο επίπεδο): Αν και εξαρτώνται από τον καιρό, τα Φ/Β έχουν σχετικά καλή προβλεψιμότητα παραγωγής μέσω μετεωρολογικών μοντέλων [13,15].

5.1.3 Μειονεκτήματα Φ/Β στο Πρόβλημα Ένταξης Μονάδων

Προκειμένου να παρουσιαστούν εξ' ολοκλήρου τα Φ/Β ως τρόπος επίλυσης του προβλήματος, είναι σημαντικό να παρουσιαστούν και οι περιορισμοί που ενυπάρχουν στην αξιοποίησή τους. Οι σημαντικότεροι, είναι:

- Διακοπτόμενη Παραγωγή: Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι επειδή η παραγωγή εξαρτάται πλήρως από την ηλιακή ακτινοβολία, η διακύμανση που έχει ο καιρός, δυσκολεύει τον προγραμματισμό ένταξης μονάδων, ιδίως σε συνδυασμό με τις αιχμές ζήτησης.
- Ανάγκη για Ευέλικτες Μονάδες ή Αποθήκευση: Η απότομη μείωση της Φ/Β παραγωγής (π.χ. λόγω νεφώσεων ή στο ηλιοβασίλεμα) απαιτεί την ταχεία ενεργοποίηση θερμικών μονάδων ή την ύπαρξη αποθηκευτικών μέσων.
- Προβλήματα Συγχρονισμού και Σταθερότητας: Τα Φ/Β δεν προσφέρουν αδρανειακή στήριξη στο δίκτυο (rotational inertia), κάτι που είναι κρίσιμο για τη συχνότητα και τη σταθερότητα σε περιπτώσεις διαταραχών.
- Αρνητικές Τιμές στην Αγορά: Σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και υψηλής Φ/Β παραγωγής, είναι πιθανό να δημιουργηθούν υπερπροσφορές ενέργειας, οδηγώντας ακόμα και σε αρνητικές τιμές στην αγορά.

- Χαμηλός Συντελεστής Χρησιμοποίησης: Τα Φ/Β λειτουργούν μόνο ένα μέρος της ημέρας, ενώ η μέση ετήσια αξιοποίηση (capacity factor) είναι μόλις 15-20% σε ευρωπαϊκές χώρες, σε αντίθεση με τις θερμικές μονάδες που έχουν πάνω από 70% [12,15].

5.1.4 Επίδραση στο Πρόβλημα Ένταξης Μονάδων

Η αξιοποίηση των φωτοβολταϊκών στον τρόπο επίλυσης του προβλήματος ένταξης μονάδων στο σύστημα, τροποποιεί κατά πολύ τον τρόπο σκέψης και εργασίας μας. Οι θερμικές μονάδες, πρέπει να προγραμματιστούν όχι μόνο με βάση τη ζήτηση, αλλά λαμβάνοντας υπόψη και τη μεταβαλλόμενη διαθεσιμότητα των Φ/Β. Αυτό, συνεπάγεται ότι θα προκύψει η ανάγκη πρόβλεψης Φ/Β παραγωγής σε καθημερινή βάση, ότι οι μονάδες βάσης (όπως λιγνιτικές) καθίστανται λιγότερο οικονομικές λόγω των συχνών εκκινήσεων/ διακοπών, οι μονάδες φυσικού αερίου ή υδροηλεκτρικά θα προτιμώνται για την ευελιξία τους και θα πρέπει να ενισχυθούν οι υποδομές αποθήκευσης Φ/Β, για την εξομάλυνση της παραγωγής [13,14,15].

5.1.5 Παραδοχές της μελέτης

Οι παραδοχές της μελέτης, είναι ουσιαστικά οι περιορισμοί που πρέπει να ληφθούν υπόψη και έχουν επιλεγεί για την απλούστευση του συνολικού προβλήματος με στόχο την καλύτερη δυνατή κατανόηση του. Οι παραδοχές είναι ότι:

1. Αγνοείται το αρχικό κεφαλαιουχικό κόστος: Το κόστος αυτό αγνοείται διότι ο στόχος είναι να παρουσιαστεί η επίλυση του προβλήματος της ένταξης των μονάδων και η επιρροή που επιφέρουν τα φωτοβολταϊκά στο κόστος και όχι να λάβει χώρα μια οικονομική μελέτη επένδυσης.
2. Λαμβάνουμε την προβλεψιμότητα ως δεδομένη: Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, τα φωτοβολταϊκά είναι απρόβλεπτα σε βάθος χρόνου (π.χ. σε βάθος έτους,) όμως σε ημερήσιο επίπεδο, είναι αρκετά προβλέψιμη η παραγωγή τους, με τη χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας πρόβλεψης του καιρού. Για την

μελέτη λοιπόν θα θεωρηθεί ότι αναφερόμαστε σε ευνοϊκές συνθήκες λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού συστήματος. (Ηλιόλουστη μέρα κατά την διάρκεια της, με καλή θερμοκρασία).

3. Τα κόστη καυσίμου και λειτουργίας: Τα κόστη αυτά είναι αμελητέα σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες και για το λόγο αυτό στην εργασία αυτή θεωρούνται μηδενικά.
4. Απόδοση φωτοβολταϊκής εγκατάστασης: Στην Ελλάδα το 2024 τα φωτοβολταϊκά έφτασαν σε σημείο να καλύπτουν το 25% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Με μια ρεαλιστική οπτική για την μελέτη που ακολουθεί έχει επιλεχθεί πως το φωτοβολταϊκό σύστημα θα καλύπτει το 20% της ζήτησης. Επιπλέον στον Πίνακα 5.1, παρουσιάζεται η μέση απόδοση μια τέτοιας εγκατάστασης ανά τις ώρες μιας ημέρας.

Πίνακας 5.1: Ποσοστό Μέγιστης Παραγωγής Φ/Β ανά ημέρα

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	Ποσοστό Μέγιστης Παραγωγής Φ/Β (%)
00:00 - 01:00	0
01:00 - 02:00	0
02:00 - 03:00	0
03:00 - 04:00	0
04:00 - 05:00	0
05:00 - 06:00	0
06:00 - 07:00	1
07:00 - 08:00	1
08:00 - 09:00	4
09:00 - 10:00	8

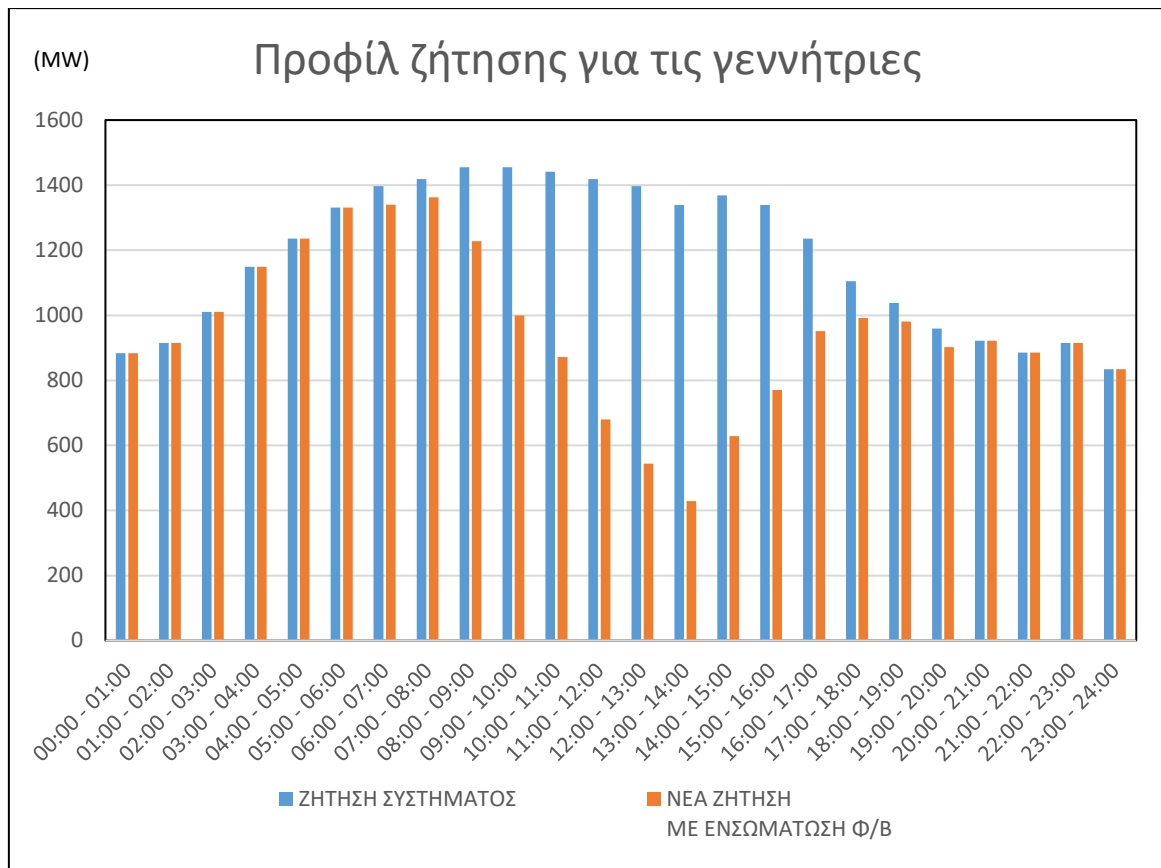
10:00 - 11:00	10
11:00 - 12:00	13
12:00 - 13:00	15
13:00 - 14:00	16
14:00 - 15:00	13
15:00 - 16:00	10
16:00 - 17:00	5
17:00 - 18:00	2
18:00 - 19:00	1
19:00 - 20:00	1
20:00 - 21:00	0
21:00 - 22:00	0
22:00 - 23:00	0
23:00 - 24:00	0

5.1.6 Δεδομένα της μελέτης

Λόγω του χαμηλού κόστους συντήρησης, κόστους καυσίμου και κόστους λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, επιλέγονται πάντα σαν ενεργές μονάδες στο σύστημα, τις ώρες λειτουργίας τους. Συνεπώς χρησιμοποιώντας τον Πίνακα 5.1 και τα δεδομένα της μελέτης, μετά την ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, παράγεται η νέα καμπύλη ζήτησης φορτίου που καλούνται οι γεννήτριες να καλύψουν. Η νέα καμπύλη διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.2. Επιπλέον στο Σχήμα 5.2 παρουσιάζεται η σύγκριση ανάμεσα στο αρχικό και το τελικό προφίλ ζήτησης για τις γεννήτριες.

Πίνακας 5.2: Νέο προφίλ ζήτησης ενέργειας

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΖΗΤΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (MWh)	ΝΕΑ ΖΗΤΗΣΗ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ Φ/Β ΓΙΑ ΤΙΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ (MWh)
00:00 - 01:00	883	883
01:00 - 02:00	915	915
02:00 - 03:00	1010	1010
03:00 - 04:00	1149	1149
04:00 - 05:00	1236	1236
05:00 - 06:00	1331	1331
06:00 - 07:00	1397	1340
07:00 - 08:00	1419	1362
08:00 - 09:00	1455	1227
09:00 - 10:00	1455	1000
10:00 - 11:00	1441	872
11:00 - 12:00	1419	679
12:00 - 13:00	1397	544
13:00 - 14:00	1339	429
14:00 - 15:00	1368	628
15:00 - 16:00	1339	770
16:00 - 17:00	1236	952
17:00 - 18:00	1105	991
18:00 - 19:00	1038	981
19:00 - 20:00	959	902
20:00 - 21:00	922	922
21:00 - 22:00	885	885
22:00 - 23:00	915	915
23:00 - 24:00	834	834



Σχήμα 5.2: Σύγκριση των προφίλ ζήτησης

5.2 Επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα με ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών και γνώμονα το κόστος

Χρησιμοποιώντας το λογισμικό MatLab, έχοντας εισάγει όλα τα δεδομένα και ενσωματώσει όλους τους περιορισμούς, επιλύεται το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα με βάση το κόστος και τα αριθμητικά αποτελέσματα παρουσιάζονται μέσα από πίνακες και σχήματα. Πιο συγκεκριμένα, στον Πίνακα 5.3 διαμορφώνεται η παραγωγή κάθε μονάδας ανά ώρα λειτουργίας της. Εύκολα παρατηρεί κανείς πως τις ώρες λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, αρκετές από τις γεννήτριες απενεργοποιούνται διότι η ζήτηση του φορτίου καλύπτεται επαρκώς από τα φωτοβολταϊκά.

Πίνακας 5.3: Παραγωγή μονάδων ανά ώρα

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1 (MWh)	G2 (MWh)	G3 (MWh)	G4 (MWh)	G5 (MWh)	G6 (MWh)	G7 (MWh)	G8 (MWh)	Φ/B (MWh)
	00:00 - 01:00	0	0	150	453	221	0	0	60	0
	01:00 - 02:00	110	0	150	395	201	0	0	60	0
	02:00 - 03:00	150	120	130	291	145	72	55	48	0
	03:00 - 04:00	190	150	150	277	143	102	77	60	0
	04:00 - 05:00	200	150	150	295	150	132	99	60	0
	05:00 - 06:00	200	160	150	331	170	150	110	60	0
	06:00 - 07:00	200	169	150	331	170	150	110	60	57
	07:00 - 08:00	200	171	150	345	180	146	110	60	57
	08:00 - 09:00	200	160	150	305	150	116	90	56	228
	09:00 - 10:00	188	120	150	250	94	86	68	44	455
	10:00 - 11:00	158	120	130	250	80	56	46	32	569
	11:00 - 12:00	140	120	115	250	0	0	34	20	740
	12:00 - 13:00	129	0	100	250	0	0	42	23	853
	13:00 - 14:00	89	0	70	250	0	0	0	20	910
	14:00 - 15:00	129	120	100	250	0	0	0	29	740
	15:00 - 16:00	146	120	120	250	80	0	34	20	569
	16:00 - 17:00	186	120	150	250	90	68	56	32	284
	17:00 - 18:00	200	120	150	250	99	70	62	40	114
	18:00 - 19:00	200	120	150	250	90	70	62	39	57
	19:00 - 20:00	176	120	150	250	80	50	46	30	57
	20:00 - 21:00	188	120	150	250	80	50	52	32	0
	21:00 - 22:00	170	120	143	250	80	50	46	26	0
	22:00 - 23:00	183	120	150	250	80	50	50	32	0
	23:00 - 24:00	149	120	125	250	80	50	38	22	0

Στον Πίνακα 5.4 φαίνεται η ποσοστιαία φόρτιση των μονάδων ανά ώρα λειτουργίας. Παρατηρείται και πάλι πως από τις 08:00 έως και τις 19:00 πολλές γεννήτριες, είτε μειώνουν την παραγωγή τους, είτε απενεργοποιούνται εντελώς.

Πίνακας 5.4: Ποσοστιαία φόρτιση μονάδων ανά ώρα

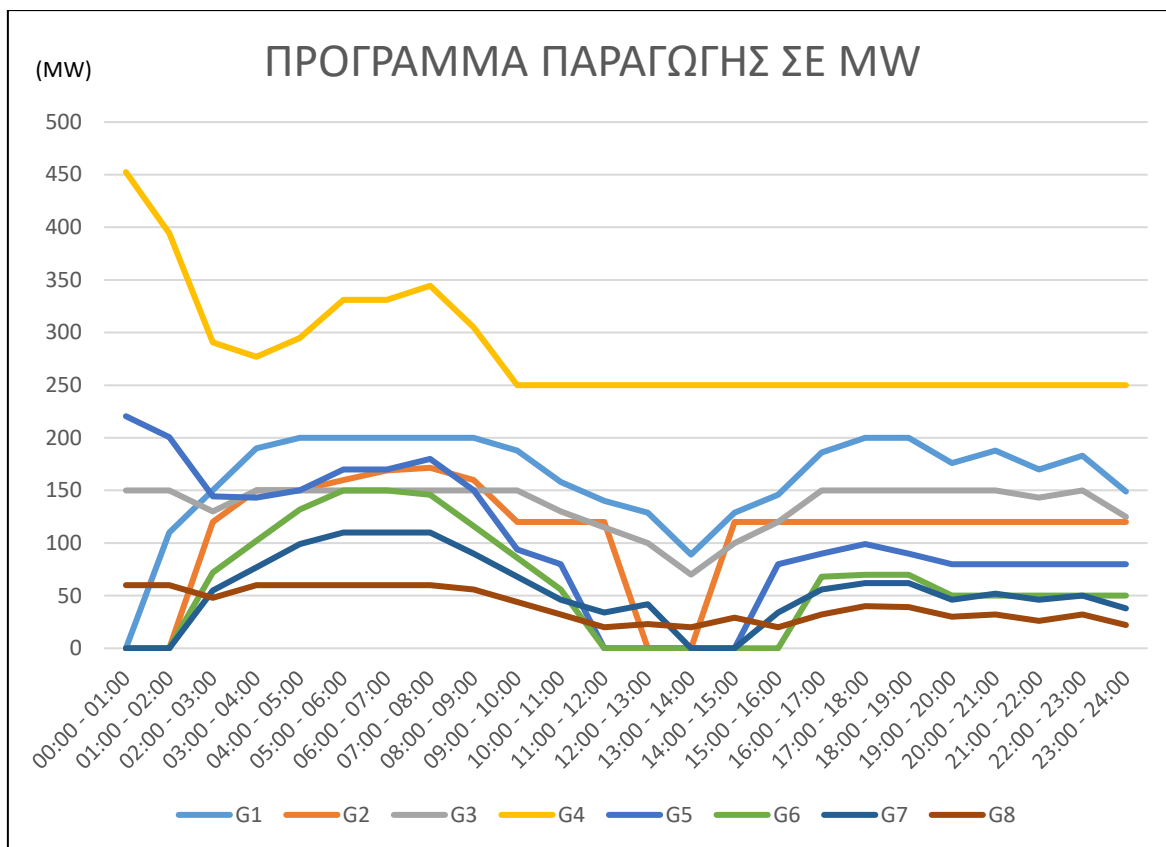
ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1 (%)	G2 (%)	G3 (%)	G4 (%)	G5 (%)	G6 (%)	G7 (%)	G8 (%)	Φ/B (%)
	00:00 - 01:00	0	0	100	87	79	0	0	100	0
	01:00 - 02:00	55	0	100	76	72	0	0	100	0
	02:00 - 03:00	75	38	87	56	52	48	50	80	0
	03:00 - 04:00	95	47	100	53	51	68	70	100	0
	04:00 - 05:00	100	47	100	57	54	88	90	100	0
	05:00 - 06:00	100	50	100	64	61	100	100	100	0
	06:00 - 07:00	100	53	100	64	61	100	100	100	100
	07:00 - 08:00	100	54	100	66	64	97	100	100	100
	08:00 - 09:00	100	50	100	59	54	77	82	93	100
	09:00 - 10:00	94	38	100	48	34	57	62	73	100
	10:00 - 11:00	79	38	87	48	29	37	42	53	100
	11:00 - 12:00	70	38	77	48	0	0	31	33	100
	12:00 - 13:00	65	0	67	48	0	0	38	38	100
	13:00 - 14:00	45	0	47	48	0	0	0	33	100
	14:00 - 15:00	65	38	67	48	0	0	0	48	100
	15:00 - 16:00	73	38	80	48	29	0	31	33	100
	16:00 - 17:00	93	38	100	48	32	45	51	53	100
	17:00 - 18:00	100	38	100	48	35	47	56	67	100
	18:00 - 19:00	100	38	100	48	32	47	56	65	100
	19:00 - 20:00	88	38	100	48	29	33	42	50	100
	20:00 - 21:00	94	38	100	48	29	33	47	53	0
	21:00 - 22:00	85	38	95	48	29	33	42	43	0
	22:00 - 23:00	92	38	100	48	29	33	45	53	0
	23:00 - 24:00	75	38	83	48	29	33	35	37	0

Στον Πίνακα 5.5 παρουσιάζεται η κατάσταση των γεννητριών ανά ώρα. Ουσιαστικά με 1 συμβολίζεται η εκκίνηση λειτουργίας της γεννήτριας και με 0 συμβολίζεται η απενεργοποίηση της. Μελετώντας το Πίνακα 5.5, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι υπάρχουν αρκετές αλλαγές στις καταστάσεις λειτουργίας των γεννητριών, διότι καλούνται να ανταποκριθούν στο πλάνο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μονάδων.

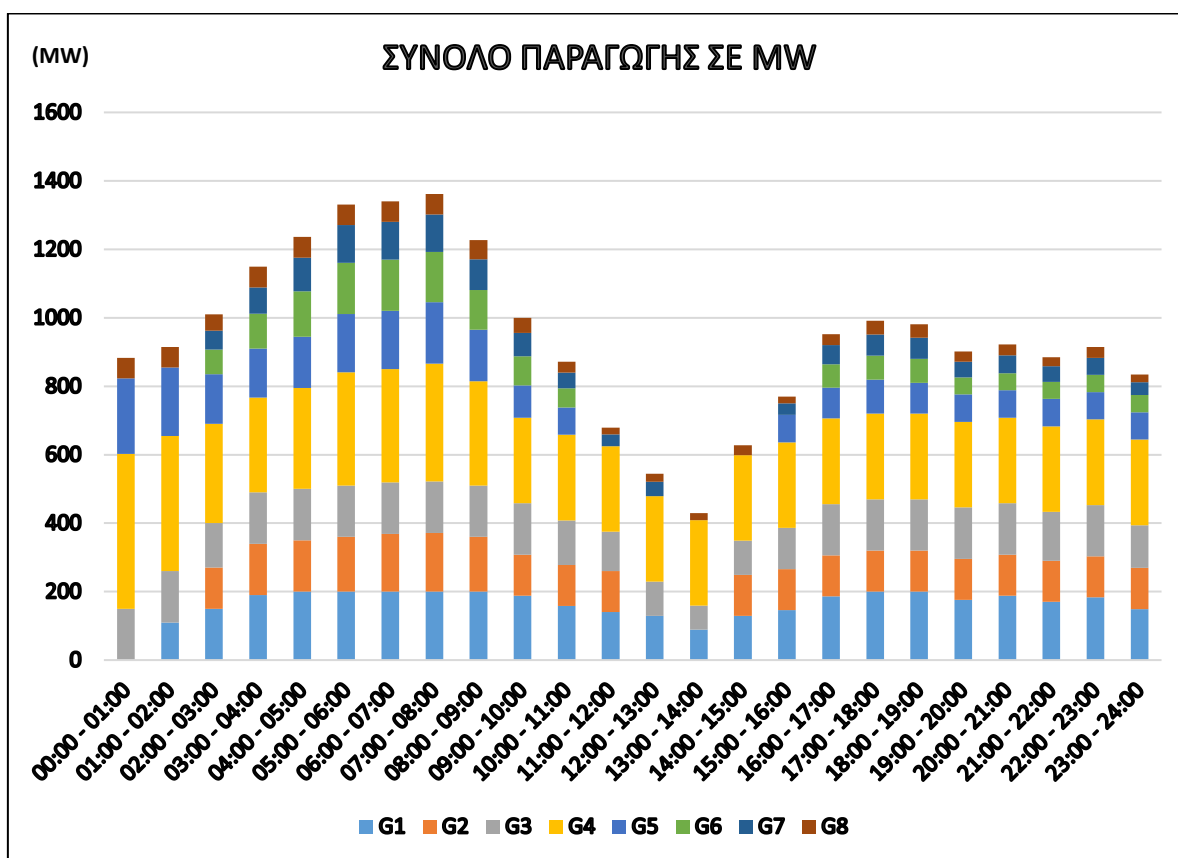
Πίνακας 5.5: Κατάσταση γεννητριών ανά ώρα

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	Φ/B
	00:00 - 01:00	0	0	1	1	1	0	0	1	0
	01:00 - 02:00	1	0	1	1	1	0	0	1	0
	02:00 - 03:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	03:00 - 04:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	04:00 - 05:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	05:00 - 06:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	06:00 - 07:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	07:00 - 08:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	08:00 - 09:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	09:00 - 10:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	10:00 - 11:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	11:00 - 12:00	1	1	1	1	0	0	1	1	1
	12:00 - 13:00	1	0	1	1	0	0	1	1	1
	13:00 - 14:00	1	0	1	1	0	0	0	1	1
	14:00 - 15:00	1	1	1	1	0	0	0	1	1
	15:00 - 16:00	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	16:00 - 17:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	17:00 - 18:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	18:00 - 19:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	19:00 - 20:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	20:00 - 21:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	21:00 - 22:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	22:00 - 23:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	23:00 - 24:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Στο Σχήμα 5.3 βρίσκεται η γραφική απεικόνιση των προγραμμάτων παραγωγής για κάθε γεννήτρια, ενώ στο Σχήμα 5.4 φαίνεται το συνολικό πρόγραμμα παραγωγής των γεννητριών.

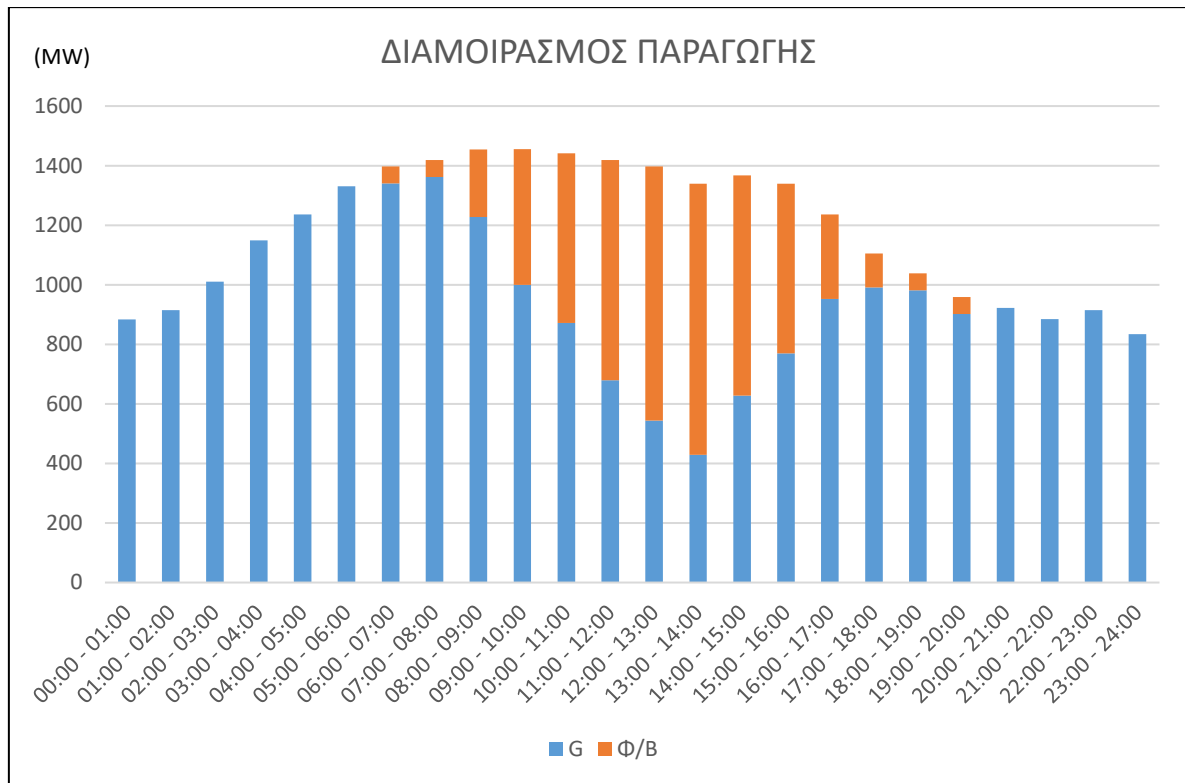


Σχήμα 5.3: Πρόγραμμα παραγωγής ανά μονάδα



Σχήμα 5.4: Συνολικό πρόγραμμα παραγωγής

Τέλος, στο Σχήμα 5.5 παρουσιάζεται διαισθητικά ο διαμοιρασμός της παραγωγής ανάμεσα στα φωτοβολταϊκά και τις γεννήτριες. Επιβεβαιώνεται δηλαδή το γεγονός πως κατά τις ώρες 06:00 έως 20:00 τα φωτοβολταϊκά λειτουργούν στο 100% διότι αποτελούν την πιο οικονομική λύση για παραγωγή ενέργειας του συστήματος.



Σχήμα 5.5: Διαμοιρασμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα σε Φ/Β και γεννήτριες

5.3 Σύγκριση αποτελεσμάτων της ένταξης φωτοβολταϊκών με γνώμονα το κόστος

Εκτός από τα προγράμματα παραγωγής που φαίνεται στο Σχήμα 5.5, υπάρχουν περισσότερες διαφορές. Στην λύση του προβλήματος με βάση το κόστος και ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών, βρέθηκαν τα εξής:

- Κόστος εκκίνησης γεννητριών: 683,1 €

- Κόστος απενεργοποίησης γεννητριών: 291,3 €
- Κόστος καυσίμου: 385.440 €
- Συνολικό κόστος: 386.414,4 €
- Συνολική παραγωγή 28.446 MWh

Σύμφωνα με όλα τα δεδομένα προκύπτουν και τα συμπεράσματα ότι:

1. Τόσο το κόστος εκκίνησης όσο και το κόστος απενεργοποίησης των γεννητριών αυξήθηκε λόγω της επίδρασης των φωτοβολταϊκών διότι το ωράριο λειτουργίας τους ανάγκασε περισσότερες γεννήτριες να εκκινήσουν τις πρωινές ώρες για να καλύψουν το φορτίο ζήτησης και έπειτα όταν τα φωτοβολταϊκά λειτούργησαν σε μεγάλο βαθμό, αρκετές από τις γεννήτριες έπρεπε να σταματήσουν λόγω εξοικονόμησης κόστους.
2. Λόγω του μηδενικού κόστους καυσίμου των φωτοβολταϊκών, το συνολικό κόστος καυσίμου μειώθηκε εσθήτα. Από το αρχικό κόστος της τάξης των 496.361,5 € έπεσε στα 386.414,4 €

5.4 Επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα με ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών και γνώμονα το κέρδος

Μέσα από τους πίνακες, παρουσιάζεται η επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων στο σύστημα με βάση το κέρδος. Στον Πίνακα 5.6 διαμορφώνεται η παραγωγή κάθε μονάδας ανά ώρα λειτουργίας της, στον Πίνακα 5.7 φαίνεται η ποσοστιαία φόρτιση των μονάδων ανά ώρα λειτουργίας, στον Πίνακα 5.8 με 1 συμβολίζεται η εκκίνηση της μονάδας και με 0 η μη έναρξη της, στο Σχήμα 5.6 βρίσκεται η γραφική απεικόνιση των

προγραμμάτων παραγωγής για κάθε μονάδα, στο Σχήμα 5.7 φαίνεται το συνολικό πρόγραμμα παραγωγής, και τέλος στο Σχήμα 5.8 ο διαμοιρασμός της παραγωγής [14,15].

Πίνακας 5.6: Παραγωγή μονάδων ανά ώρα

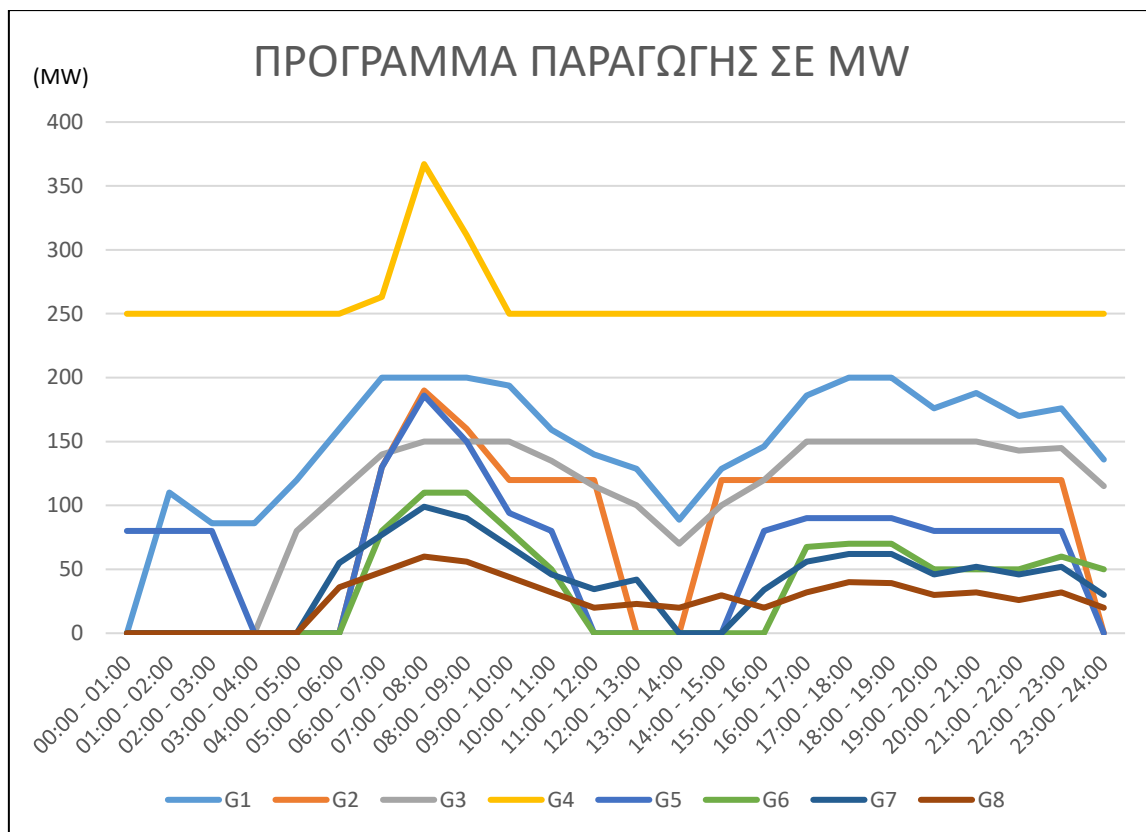
ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1 (MWh)	G2 (MWh)	G3 (MWh)	G4 (MWh)	G5 (MWh)	G6 (MWh)	G7 (MWh)	G8 (MWh)	Φ/B (MWh)
	00:00 - 01:00	0	0	0	250	80	0	0	0	0
	01:00 - 02:00	110	0	0	250	80	0	0	0	0
	02:00 - 03:00	86	0	0	250	80	0	0	0	0
	03:00 - 04:00	86	0	0	250	0	0	0	0	0
	04:00 - 05:00	120	0	80	250	0	0	0	0	0
	05:00 - 06:00	160	0	110	250	0	0	55	36	0
	06:00 - 07:00	200	130	140	263	130	80	77	48	57
	07:00 - 08:00	200	190	150	367	186	110	99	60	57
	08:00 - 09:00	200	160	150	311	150	110	90	56	228
	09:00 - 10:00	194	120	150	250	94	80	68	44	455
	10:00 - 11:00	159	120	135	250	80	50	46	32	569
	11:00 - 12:00	140	120	115	250	0	0	34	20	740
	12:00 - 13:00	129	0	100	250	0	0	42	23	853
	13:00 - 14:00	89	0	70	250	0	0	0	20	910
	14:00 - 15:00	129	120	100	250	0	0	0	30	740
	15:00 - 16:00	146	120	120	250	80	0	34	20	569
	16:00 - 17:00	186	120	150	250	90	67	56	32	284
	17:00 - 18:00	200	120	150	250	90	70	62	40	114
	18:00 - 19:00	200	120	150	250	90	70	62	39	57
	19:00 - 20:00	176	120	150	250	80	50	46	30	57
	20:00 - 21:00	188	120	150	250	80	50	52	32	0
	21:00 - 22:00	170	120	143	250	80	50	46	26	0
	22:00 - 23:00	176	120	145	250	80	60	52	32	0
	23:00 - 24:00	136	0	115	250	0	50	30	20	0

Πίνακας 5.7: Ποσοστιαία φόρτιση μονάδων ανά ώρα

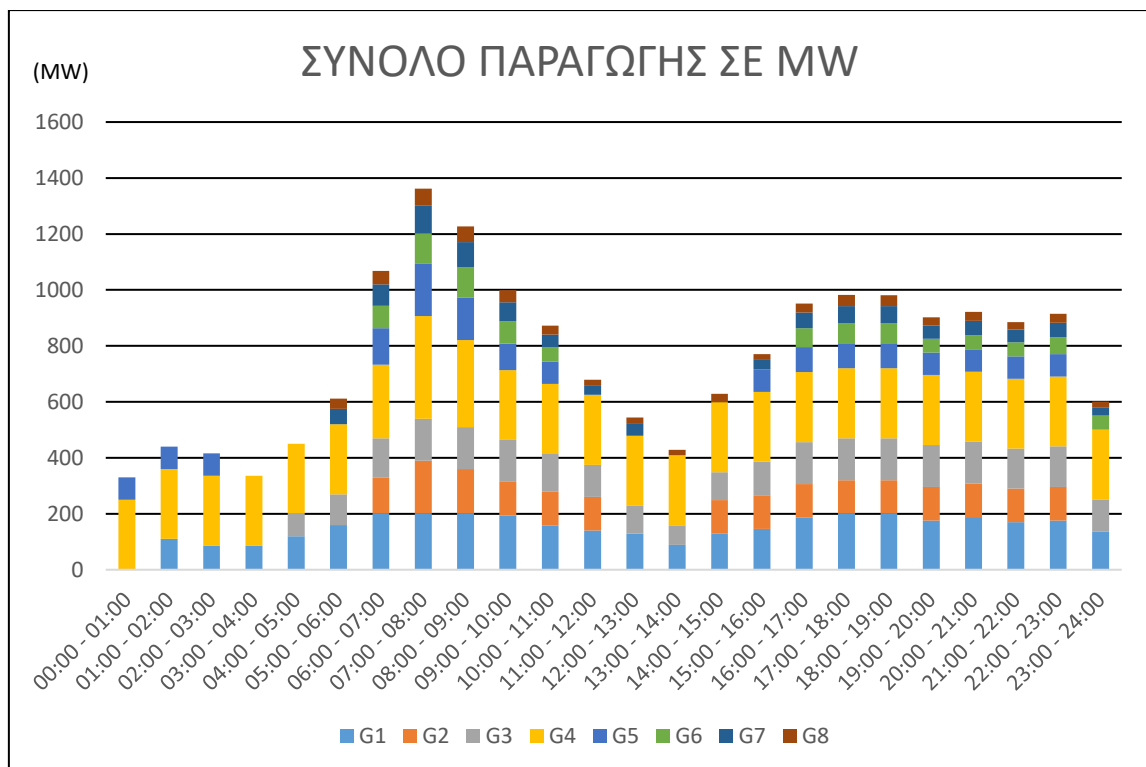
ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1 (%)	G2 (%)	G3 (%)	G4 (%)	G5 (%)	G6 (%)	G7 (%)	G8 (%)	Φ/B (%)
	00:00 - 01:00	0	0	0	48	29	0	0	0	0
	01:00 - 02:00	55	0	0	48	29	0	0	0	0
	02:00 - 03:00	43	0	0	48	29	0	0	0	0
	03:00 - 04:00	43	0	0	48	0	0	0	0	0
	04:00 - 05:00	60	0	53	48	0	0	0	0	0
	05:00 - 06:00	80	0	73	48	0	0	50	60	0
	06:00 - 07:00	100	41	93	51	46	53	70	80	100
	07:00 - 08:00	100	59	100	71	66	73	90	100	100
	08:00 - 09:00	100	50	100	60	54	73	82	93	100
	09:00 - 10:00	97	38	100	48	34	53	62	73	100
	10:00 - 11:00	80	38	90	48	29	33	42	53	100
	11:00 - 12:00	70	38	77	48	0	0	31	33	100
	12:00 - 13:00	64	0	67	48	0	0	38	38	100
	13:00 - 14:00	44	0	47	48	0	0	0	33	100
	14:00 - 15:00	64	38	67	48	0	0	0	49	100
	15:00 - 16:00	73	38	80	48	29	0	31	33	100
	16:00 - 17:00	93	38	100	48	32	45	51	53	100
	17:00 - 18:00	100	38	100	48	32	47	56	67	100
	18:00 - 19:00	100	38	100	48	32	47	56	65	100
	19:00 - 20:00	88	38	100	48	29	33	42	50	100
	20:00 - 21:00	94	38	100	48	29	33	47	53	0
	21:00 - 22:00	85	38	95	48	29	33	42	43	0
	22:00 - 23:00	88	38	97	48	29	40	47	53	0
	23:00 - 24:00	68	0	77	48	0	33	27	33	0

Πίνακας 5.8: Κατάσταση μονάδων ανά ώρα

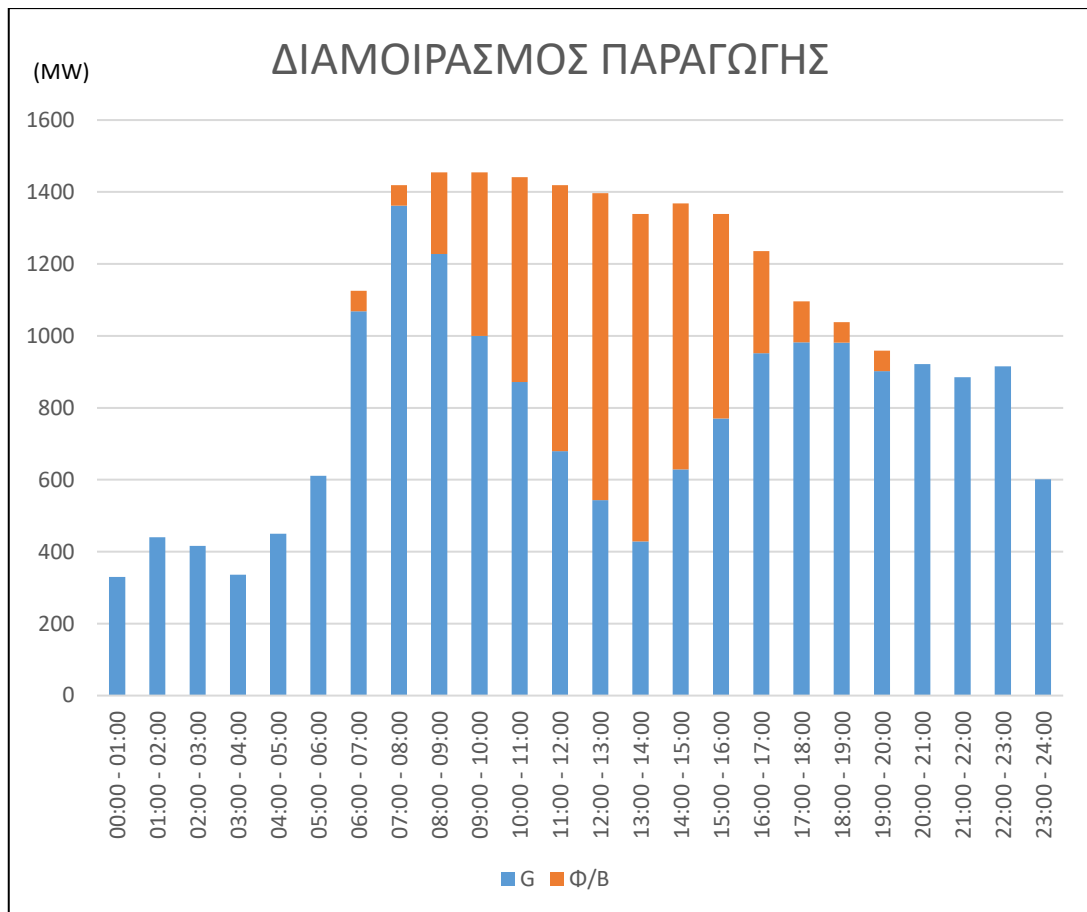
ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	Φ/B
	00:00 - 01:00	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	01:00 - 02:00	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	02:00 - 03:00	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	03:00 - 04:00	1	0	0	1	0	0	0	0	0
	04:00 - 05:00	1	0	1	1	0	0	0	0	0
	05:00 - 06:00	1	0	1	1	0	0	1	1	0
	06:00 - 07:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	07:00 - 08:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	08:00 - 09:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	09:00 - 10:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	10:00 - 11:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	11:00 - 12:00	1	1	1	1	0	0	1	1	1
	12:00 - 13:00	1	0	1	1	0	0	1	1	1
	13:00 - 14:00	1	0	1	1	0	0	0	1	1
	14:00 - 15:00	1	1	1	1	0	0	0	1	1
	15:00 - 16:00	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	16:00 - 17:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	17:00 - 18:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	18:00 - 19:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	19:00 - 20:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	20:00 - 21:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	21:00 - 22:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	22:00 - 23:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	23:00 - 24:00	1	0	1	1	0	1	1	1	0



Σχήμα 5.6: Πρόγραμμα παραγωγής ανά μονάδα



Σχήμα 5.7: Συνολικό πρόγραμμα παραγωγής



Σχήμα 5.8: Διαμοιρασμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα σε φωτοβολταϊκά και γεννήτριες

5.5 Σύγκριση αποτελεσμάτων της ένταξης φωτοβολταϊκών με γνώμονα το κέρδος

Στην λύση του προβλήματος με βάση το κέρδος και ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών, βρέθηκαν τα εξής :

- Κόστος εκκίνησης γεννητριών: 740 €
- Κόστος απενεργοποίησης γεννητριών: 455.1 €
- Κόστος καυσίμου: 304.330 €
- Συνολικό κόστος: 305. 525,1 €

- Συνολική παραγωγή: 23.992 MWh
- Τιμή ενέργειας: 409.677 €
- Κέρδος από γεννήτριες: 49,825 €
- Κέρδος από Φ/Β: 54,327 €
- Συνολικό κέρδος: 104.152 €

Σύμφωνα με τα δεδομένα, τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

1. Η συνολική παραγωγή των μονάδων μειώθηκε λιγότερο στο σενάριο ένταξης Φ/Β, σε σχέση με την επίλυση του προβλήματος με γνώμονα το κέρδος χωρίς την ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών. Πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει καλύτερη κάλυψη της αρχικής ζήτησης.
2. Τα κόστη εκκίνησης και τα κόστη απενεργοποίησης όλων των μονάδων του προβλήματος, αυξάνονται στην δεύτερη προσέγγιση, γεγονός που μαρτυρά ότι υπάρχουν συχνότερες και περισσότερες αλλαγές στην κατάσταση των μονάδων, λόγω της επίδρασης της περιορισμένης χρονικά λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μονάδων.
3. Το συνολικό κόστος στο σενάριο ένταξης φωτοβολταϊκών μονάδων και γνώμονα το κέρδος παραμένει σε χαμηλότερα επίπεδα και σε συνδυασμό με τον συντελεστή αγοράς ενέργειας λ, οδηγεί σε μεγαλύτερα επίπεδα κέρδους. Το κέρδος των γεννητριών λόγω της μείωσης παραγωγής είναι ελάχιστα χαμηλότερο, όμως σε συνδυασμό με το κέρδος των φωτοβολταϊκών, είναι εσθήτα μεγαλύτερο, σχεδόν διπλάσιο.

5.6 Ένταξη μονάδων στο σύστημα με ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε μη ιδανικές συνθήκες

5.6.1 Παραδοχές της μελέτης

Για να προχωρήσει η εργασία, θα δοθούν νέες παραδοχές στη μελέτη του προβλήματος, οι οποίες έχουν επιλεγεί για την απλούστευση του συνολικού προβλήματος με στόχο την καλύτερη δυνατή κατανόηση του. Οι παραδοχές είναι:

1. Προβλεψιμότητα: Όπως έχει αναφερθεί και προηγουμένως, τα φωτοβολταϊκά είναι απρόβλεπτα σε βάθος χρόνου, όμως σε ημερήσιο επίπεδο, είναι αρκετά προβλέψιμη η παραγωγή τους, με τη χρήση της σύγχρονης τεχνολογίας πρόβλεψης του καιρού. Πλέον, δεν θα υπάρχουν ιδανικές συνθήκες και θα θεωρηθεί πως λόγω ανεπάντεχης συννεφιάς τα φωτοβολταϊκά δεν συνεισφέρουν από τις 09:00 έως 12:00, από τις 14:00 έως 15:00 και από τις 16:00 έως τις 17:00. Η ημερήσια απόδοση παραγωγής τους φαίνεται στον Πίνακα 5.9.
2. Τα κόστη καυσίμου και λειτουργίας: Τα κόστη αυτά είναι αμελητέα σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες και για το λόγο αυτό στην εργασία αυτή θεωρούνται μηδενικά. Αγνοείται και πάλι το αρχικό κεφαλαιουχικό κόστος.

Πίνακας 5.9: Ποσοστό Μέγιστης Παραγωγής Φ/Β ανά ημέρα

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	Ποσοστό Μέγιστης Παραγωγής Φ/Β (%)
00:00 - 01:00	0
01:00 - 02:00	0
02:00 - 03:00	0
03:00 - 04:00	0
04:00 - 05:00	0
05:00 - 06:00	0

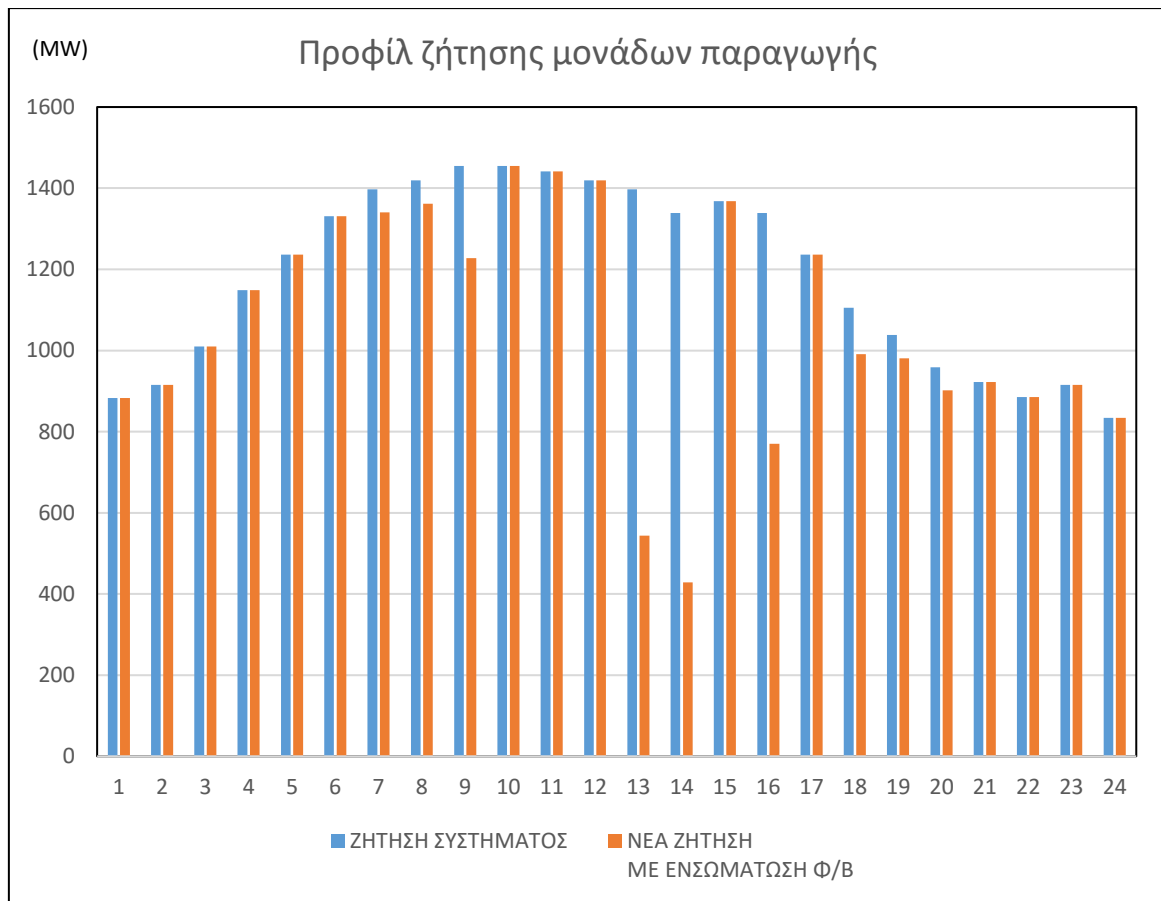
06:00 - 07:00	1
07:00 - 08:00	1
08:00 - 09:00	4
09:00 - 10:00	0
10:00 - 11:00	0
11:00 - 12:00	0
12:00 - 13:00	15
13:00 - 14:00	16
14:00 - 15:00	0
15:00 - 16:00	10
16:00 - 17:00	0
17:00 - 18:00	2
18:00 - 19:00	1
19:00 - 20:00	1
20:00 - 21:00	0
21:00 - 22:00	0
22:00 - 23:00	0
23:00 - 24:00	0

5.6.2 Δεδομένα της μελέτης

Λόγω του χαμηλού κόστους συντήρησης, καυσίμου και λειτουργίας των φωτοβολταϊκών, επιλέγονται πάντα σαν ενεργές μονάδες στο σύστημα, τις ώρες λειτουργίας τους. Συνεπώς, μετά την ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών στο σύστημα, η νέα καμπύλη ζήτησης που καλούνται οι γεννήτριες να καλύψουν διαμορφώνεται όπως φαίνεται στον Πίνακα 5.10. Επιπλέον στο Σχήμα 5.9 παρουσιάζεται η σύγκριση ανάμεσα στο αρχικό και το τελικό προφίλ ζήτησης για τις γεννήτριες [12,15].

Πίνακας 5.10: Νέο προφίλ ζήτησης ενέργειας

ΧΡΟΝΙΚΗ ΠΕΡΙΟΔΟΣ	ΖΗΤΗΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ (MWh)	ΝΕΑ ΖΗΤΗΣΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΓΕΝΝΗΤΡΙΕΣ ΜΕ ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ Φ/Β (MWh)
00:00 - 01:00	883	883
01:00 - 02:00	915	915
02:00 - 03:00	1010	1010
03:00 - 04:00	1149	1149
04:00 - 05:00	1236	1236
05:00 - 06:00	1331	1331
06:00 - 07:00	1397	1340
07:00 - 08:00	1419	1362
08:00 - 09:00	1455	1227
09:00 - 10:00	1455	1455
10:00 - 11:00	1441	1441
11:00 - 12:00	1419	1419
12:00 - 13:00	1397	544
13:00 - 14:00	1339	429
14:00 - 15:00	1368	1368
15:00 - 16:00	1339	770
16:00 - 17:00	1236	1236
17:00 - 18:00	1105	991
18:00 - 19:00	1038	981
19:00 - 20:00	959	902
20:00 - 21:00	922	922
21:00 - 22:00	885	885
22:00 - 23:00	915	915
23:00 - 24:00	834	834



Σχήμα 5.9: Σύγκριση των προφίλ ζήτησης για τις γεννητριες μετά την ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών

5.7 Επίλυση του προβλήματος της ένταξη μονάδων στο σύστημα με ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε μη ιδανικές συνθήκες

Χρησιμοποιώντας λοιπόν και πάλι το λογισμικό MatLab, έχοντας εισάγει όλα τα δεδομένα και ενσωματώσει όλους τους περιορισμούς, επιλύεται το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα με βάση το κέρδος. Ο στόχος της συγκεκριμένης ενότητας δεν είναι η παρουσίαση διαφορών ανάμεσα στην μέθοδο επίλυσης με γνώμονα το κόστος και σε αυτή με γνώμονα το κέρδος. Ο στόχος είναι να παρουσιαστεί με όσο το δυνατό καλύτερο τρόπο η επίπτωση των καιρικών συνθηκών στα φωτοβολταϊκά και ως συνέπεια η επιρροή των καιρικών συνθηκών στο πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιείται μόνο η προσέγγιση του κέρδους. Μετά την επίλυση με τη χρήση του λογισμικού, στον Πίνακα 5.11 διαμορφώνεται η παραγωγή κάθε μονάδας ανά ώρα λειτουργίας της. Μελετώντας τον Πίνακα 5.11 είναι φανερό πως οι γεννήτριες καλούνται να καλύψουν όλες τις χρονικές περιόδους όπου τα φωτοβολταϊκά ξαφνικά διακόπτουν παραγωγή.

Πίνακας 5.11: Παραγωγή μονάδων ανά ώρα

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1 (MWh)	G2 (MWh)	G3 (MWh)	G4 (MWh)	G5 (MWh)	G6 (MWh)	G7 (MWh)	G8 (MWh)	Φ/B (MWh)
	00:00 - 01:00	0	0	0	250	80	0	0	0	0
	01:00 - 02:00	110	0	0	250	80	0	0	0	0
	02:00 - 03:00	86	0	0	250	80	0	0	0	0
	03:00 - 04:00	86	0	0	250	0	0	0	0	0
	04:00 - 05:00	120	0	80	250	0	0	0	0	0
	05:00 - 06:00	160	0	110	250	0	0	55	36	0
	06:00 - 07:00	200	130	140	263	130	80	77	48	57
	07:00 - 08:00	200	190	150	367	186	110	99	60	57
	08:00 - 09:00	200	150	150	284	150	135	98	60	228
	09:00 - 10:00	200	150	150	290.5	150	125	89	60	0
	10:00 - 11:00	200	130	150	250	120	95	67	48	0
	11:00 - 12:00	164	120	125	250	80	65	45	36	0
	12:00 - 13:00	124	0	95	250	0	50	0	24	853
	13:00 - 14:00	93	0	65	250	0	0	0	20	910
	14:00 - 15:00	133	120	95	250	100	0	55	32	0
	15:00 - 16:00	160	120	65	250	80	0	57	38	569
	16:00 - 17:00	200	184	150	354	136	80	79	50	0
	17:00 - 18:00	200	120	150	250	90	70	62	40	114
	18:00 - 19:00	200	120	150	250	90	70	62	39	57
	19:00 - 20:00	176	120	150	250	80	50	46	30	57
	20:00 - 21:00	188	120	150	250	80	50	52	32	0
	21:00 - 22:00	170	120	143	250	80	50	46	26	0
	22:00 - 23:00	176	120	145	250	80	60	52	32	0
	23:00 - 24:00	136	0	115	250	0	50	30	20	0

Στον Πίνακα 5.12 φαίνεται η ποσοστιαία φόρτιση των μονάδων ανά ώρα λειτουργίας. Φαίνεται πως υπάρχουν περισσότερες αυξομειώσεις της απόδοσης παραγωγής των γεννητριών διότι καλούνται άμεσα να καλύψουν κενά στην παραγωγή των φωτοβολταϊκών.

Πίνακας 5.12: Ποσοστιαία φόρτιση μονάδων ανά ώρα

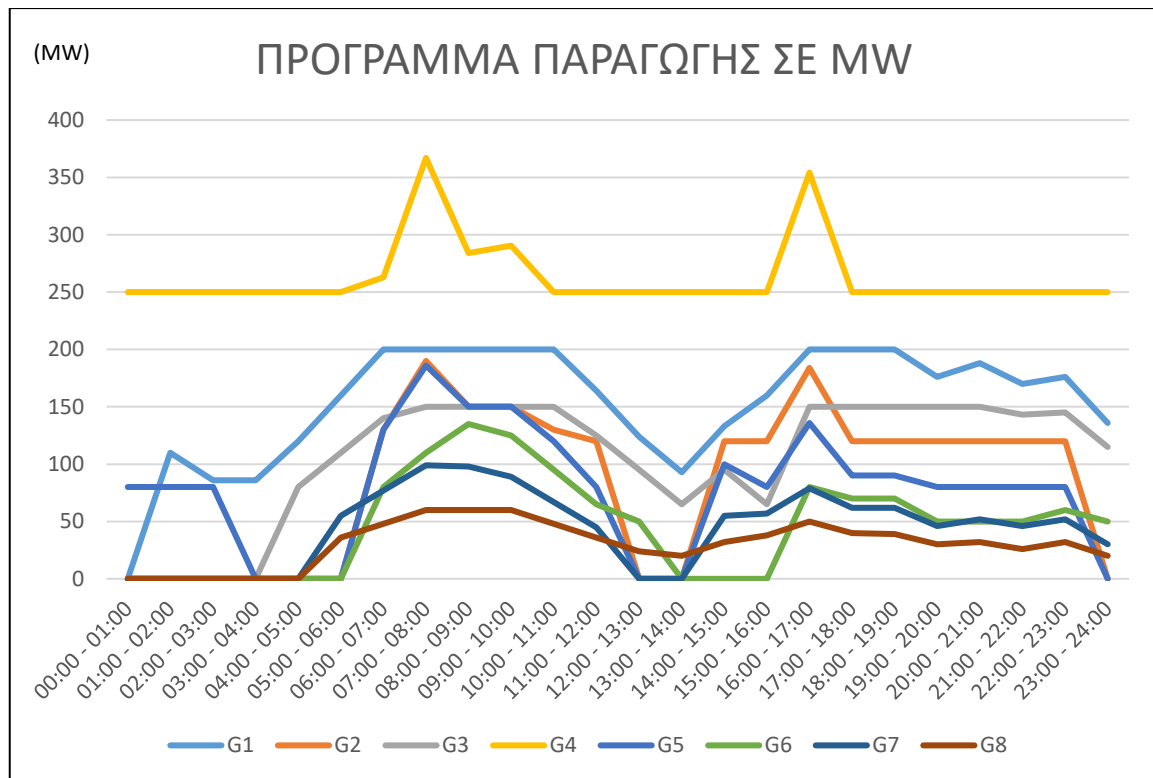
ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1 (%)	G2 (%)	G3 (%)	G4 (%)	G5 (%)	G6 (%)	G7 (%)	G8 (%)	Φ/B (%)
	00:00 - 01:00	0	0	0	48	29	0	0	0	0
	01:00 - 02:00	55	0	0	48	29	0	0	0	0
	02:00 - 03:00	43	0	0	48	29	0	0	0	0
	03:00 - 04:00	43	0	0	48	0	0	0	0	0
	04:00 - 05:00	60	0	53	48	0	0	0	0	0
	05:00 - 06:00	80	0	73	48	0	0	50	60	0
	06:00 - 07:00	100	41	93	51	46	53	70	80	100
	07:00 - 08:00	100	59	100	71	66	73	90	100	100
	08:00 - 09:00	100	47	100	55	54	90	89	100	100
	09:00 - 10:00	100	47	100	56	54	83	81	100	0
	10:00 - 11:00	100	41	100	48	43	63	61	80	0
	11:00 - 12:00	82	38	83	48	29	43	41	60	0
	12:00 - 13:00	62	0	63	48	0	33	0	40	100
	13:00 - 14:00	46	0	43	48	0	0	0	33	100
	14:00 - 15:00	66	38	63	48	36	0	50	53	0
	15:00 - 16:00	80	38	43	48	29	0	52	63	100
	16:00 - 17:00	100	58	100	68	49	53	72	83	0
	17:00 - 18:00	100	38	100	48	32	47	56	67	100
	18:00 - 19:00	100	38	100	48	32	47	56	65	100
	19:00 - 20:00	88	38	100	48	29	33	42	50	100
	20:00 - 21:00	94	38	100	48	29	33	47	53	0
	21:00 - 22:00	85	38	95	48	29	33	42	43	0
	22:00 - 23:00	88	38	97	48	29	40	47	53	0
	23:00 - 24:00	68	0	77	48	0	33	27	33	0

Στον Πίνακα 5.13 παρουσιάζεται η κατάσταση των γεννητριών ανά ώρα. Ουσιαστικά με 1 συμβολίζεται η εκκίνηση λειτουργίας της γεννήτριας και με 0 συμβολίζεται η απενεργοποίηση της. Μελετώντας το Πίνακα 5.5, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι υπάρχουν αρκετές αλλαγές στις καταστάσεις λειτουργίας των γεννητριών, διότι καλούνται να ανταποκριθούν στο νέο πλάνο λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μονάδων.

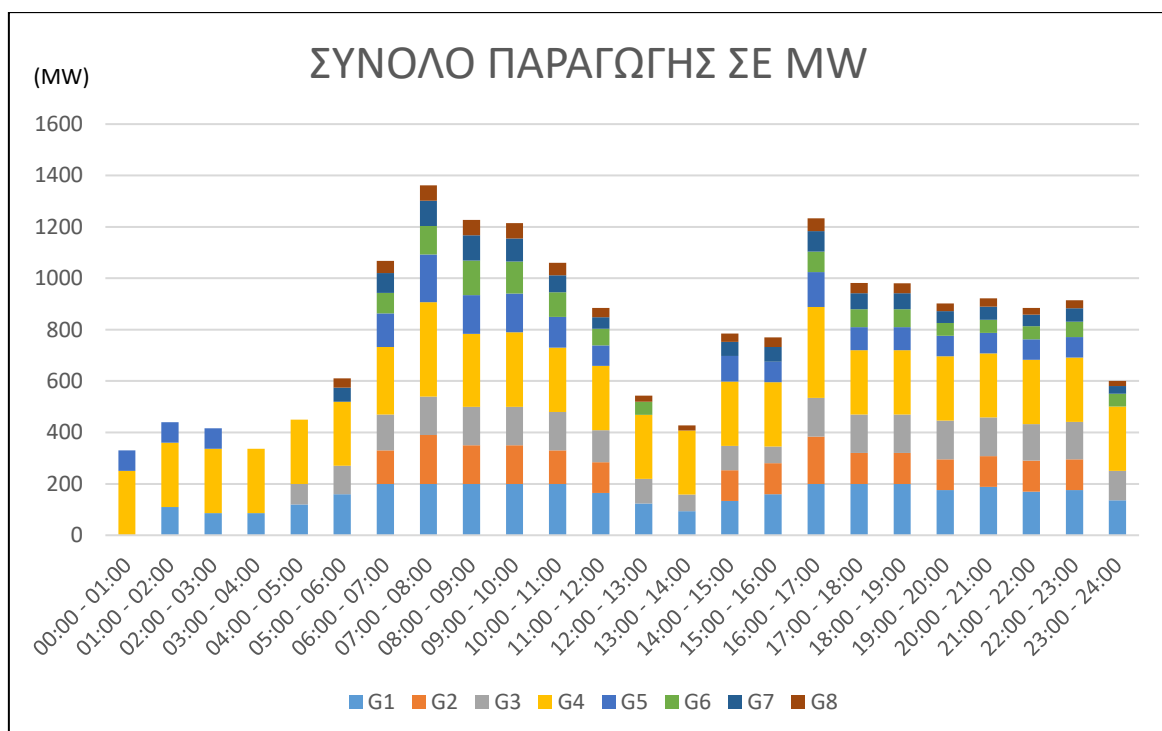
Πίνακας 5.13: Κατάσταση μονάδων ανά ώρα

ΕΠΙΛΥΣΗ ΜΕ ΓΝΩΜΟΝΑ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	TIME ZONE	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8	Φ/B
	00:00 - 01:00	0	0	0	1	1	0	0	0	0
	01:00 - 02:00	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	02:00 - 03:00	1	0	0	1	1	0	0	0	0
	03:00 - 04:00	1	0	0	1	0	0	0	0	0
	04:00 - 05:00	1	0	1	1	0	0	0	0	0
	05:00 - 06:00	1	0	1	1	0	0	1	1	0
	06:00 - 07:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	07:00 - 08:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	08:00 - 09:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	09:00 - 10:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	10:00 - 11:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	11:00 - 12:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	12:00 - 13:00	1	0	1	1	0	1	0	1	1
	13:00 - 14:00	1	0	1	1	0	0	0	1	1
	14:00 - 15:00	1	1	1	1	1	0	1	1	0
	15:00 - 16:00	1	1	1	1	1	0	1	1	1
	16:00 - 17:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	17:00 - 18:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	18:00 - 19:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	19:00 - 20:00	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	20:00 - 21:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	21:00 - 22:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	22:00 - 23:00	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	23:00 - 24:00	1	0	1	1	0	1	1	1	0

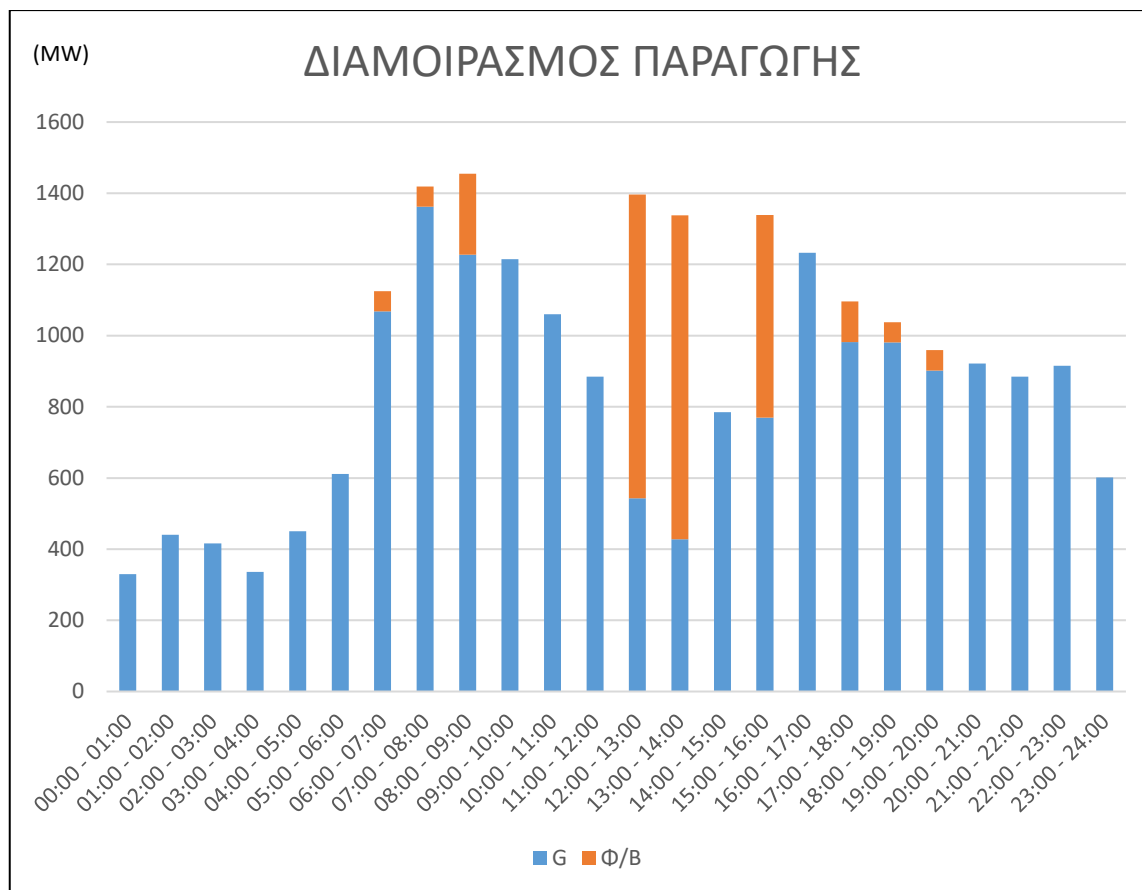
Στο Σχήμα 5.10 βρίσκεται η γραφική απεικόνιση των προγραμμάτων παραγωγής για κάθε μονάδα σύμφωνα με τις νέες συνθήκες, στο Σχήμα 5.11 φαίνεται το συνολικό πρόγραμμα παραγωγής των γεννητριών, και τέλος στο Σχήμα 5.12 ο διαμοιρασμός της παραγωγής ανάμεσα στα φωτοβολταϊκά και τις γεννήτριες.



Σχήμα 5.10: Πρόγραμμα παραγωγής ανά μονάδα



Σχήμα 5.11: Συνολικό πρόγραμμα παραγωγής



Σχήμα 5.12: Διαμοιρασμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάμεσα σε φωτοβολταϊκά και γεννήτριες

5.8 Σύγκριση αποτελεσμάτων με ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών με και χωρίς ιδανικές συνθήκες

Στην λύση του προβλήματος με βάση το κέρδος και ενσωμάτωση φωτοβολταϊκών σε μη ιδανικές συνθήκες, βρέθηκαν τα εξής αποτελέσματα:

- Κόστος εκκίνησης γεννητριών: 797,1 €
- Κόστος απενεργοποίησης γεννητριών: 512,2 €
- Κόστος καυσίμου: 323.900 €

- Συνολικό κόστος: 325. 209,3 €
- Συνολική παραγωγή: 22.248 MWh
- Τιμή ενέργειας: 402.769,3 €
- Κέρδος από γεννήτριες: 51.450,7 €
- Κέρδος από Φ/Β: 26,109,3 €
- Συνολικό κέρδος: 77.560 €

Σύμφωνα με όλα τα αποτελέσματα του λογισμικού, προκύπτουν και τα εξής συμπεράσματα:

1. Η συνολική παραγωγή των μονάδων αυξήθηκε ώστε να καλύψει την απώλεια από τα φωτοβολταϊκά σε σύγκριση με το ιδανικό σενάριο.
2. Τα κόστη εκκίνησης και τα κόστη απενεργοποίησης όλων των μονάδων του προβλήματος, αυξάνονται, γεγονός που μαρτυρά ότι υπάρχουν συχνότερες και περισσότερες αλλαγές στην κατάσταση των μονάδων, λόγω της επίδρασης της περιορισμένης χρονικά λειτουργίας των φωτοβολταϊκών μονάδων.
3. Το συνολικό κέρδος έχει μειωθεί παρά το γεγονός ότι το κέρδος των γεννητριών είναι ελάχιστα υψηλότερο, όμως σε συνδυασμό με το κέρδος των φωτοβολταϊκών, είναι εσθήτα χαμηλότερο, σε σύγκριση με τις ιδανικές συνθήκες.
4. Η συνολική παραγωγή όλων των μονάδων μειώθηκε σε μικρό βαθμό λόγω της προσπάθειας απόκρισης των γεννητριών να καλύψουν την ξαφνική απώλεια των φωτοβολταϊκών. Ουσιαστικά όταν ξαφνικά προκύπτει συννεφιά και μειώνεται ή

ακόμη σταματά ολοκληρωτικά η παραγωγή των φωτοβολταϊκών, οι γεννήτριες που καλούνται να ανταποκριθούν για την κάλυψη τη ζήτησης δεν ενεργοποιούνται σε δευτερόλεπτά αλλά σύμφωνα με τα δεδομένα τους απαιτείται χρόνος ενεργοποίησης. Στο χρόνο αυτό δεν καλύπτεται επαρκώς το προφίλ ζήτησης, πράγμα που σημαίνει ότι υπάρχει ελάχιστα χειρότερη κάλυψη της αρχικής ζήτησης.

Κεφάλαιο 6 Συμπεράσματα

Η ένταξη νέων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, και ιδιαίτερα των φωτοβολταϊκών συστημάτων, στο ηλεκτρικό σύστημα, αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την ενεργειακή μετάβαση και την επίτευξη των στόχων βιώσιμης ανάπτυξης. Από την ανάλυση που προηγήθηκε στο Κεφάλαιο 4, τόσο η ένταξη μονάδων στο σύστημα με γνώμονα το κόστος όσο και με γνώμονα το κέρδος, παρουσίασε σημαντικά οφέλη, είτε στην ελαχιστοποίηση του κόστους, είτε στην μεγιστοποίηση του κέρδους. Η σωστή ένταξη λοιπόν των μονάδων μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση, την ευελιξία και την επεκτασιμότητα του συστήματος. Αντίθετα, η κακή ένταξη μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα αστάθειας, καθυστερήσεων και αυξημένου κόστους συντήρησης.

Με την ενσωμάτωση των φωτοβολταϊκών στο πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα, που αναλύθηκε στο Κεφάλαιο 5, προέκυψαν αρκετά πλεονεκτήματα. Αρχικά το προφίλ ζήτησης φορτίου καλύφθηκε πιο αποτελεσματικά, ενώ ταυτόχρονα μεγιστοποιήθηκαν τα κέρδη του συνολικού συστήματος. Επιπλέον μειώθηκε αρκετά το κόστος καυσίμου και κυρίως μειώθηκαν οι εκπομπές ρύπων στο περιβάλλον. Η φύση όμως των φωτοβολταϊκών προκάλεσε και ορισμένα μειονεκτήματα. Σε περιπτώσεις άστατων καιρικών φαινομένων οι γεννήτριες αναγκάστηκαν να καλύψουν την απώλεια παραγωγής των φωτοβολταϊκών στις περιόδους κακοκαιρίας, αυξάνοντας τα κόστη εκκίνησης και απενεργοποίησης τους. Επιπλέον η απότομη απενεργοποίηση φωτοβολταϊκών και η ενεργοποίηση γεννητριών προκαλεί προβλήματα ανύψωσης τάσης προσωρινά, πράμα που συνεπάγεται αστάθεια δικτύου.

Συνεπώς από την ανάλυση της εργασίας προκύπτουν σημαντικές δυσκολίες αλλά και δυνατότητες για βελτίωση. Αρχικά, η εισαγωγή νέων μονάδων στο δίκτυο παρουσιάζει πολυδιάστατα προβλήματα που επηρεάζουν τη συνολική απόδοση και σταθερότητα, όπως για παράδειγμα το γεγονός ότι υπάρχουν περιορισμοί στη χωρητικότητα του δικτύου. Οι υφιστάμενες υποδομές δεν είναι πάντα σχεδιασμένες να υποστηρίξουν την αυξημένη παραγωγή, γεγονός που δημιουργεί τεχνικούς περιορισμούς και επιβραδύνσεις στη διαδικασία ένταξης. Ακόμη, υπάρχουν οικονομικές και ρυθμιστικές δυσκολίες. Η αργή και πολύπλοκη διαδικασία αδειοδότησης, σε συνδυασμό με την αβεβαιότητα στο ρυθμιστικό πλαίσιο, περιορίζουν την ανάπτυξη και ένταξη νέων μονάδων. Επιπρόσθετα,

δημιουργείται η ανάγκη για πιο σύγχρονα συστήματα διαχείρισης. Η ανεπαρκής τεχνολογική υποδομή δυσχεραίνει την παρακολούθηση και διαχείριση των ροών ενέργειας, προκαλώντας αδυναμίες στην ανταπόκριση σε αλλαγές ζήτησης και προσφοράς. Η αυξημένη διείσδυση των φωτοβολταϊκών στο δίκτυο προκαλεί επιπλέον προβλήματα, που σχετίζονται με τη φύση της παραγωγής τους, η οποία, είναι μη σταθερή και εξαρτώμενη από περιβαλλοντικές συνθήκες. Συγκεκριμένα, η δυναμική αστάθεια του δικτύου αποτελεί το πιο σημαντικό πρόβλημα. Η διακοπτόμενη παραγωγή δημιουργεί διακυμάνσεις, οι οποίες επηρεάζουν την ποιότητα ισχύος και τη σταθερότητα του συστήματος [16].

Για την αποτελεσματική επίλυση των παραπάνω προβλημάτων προτείνονται οι ακόλουθες δράσεις:

- Ενίσχυση και εκσυγχρονισμός των δικτύων: Η υιοθέτηση τεχνολογιών έξυπνων δικτύων (Smart Grids) και η αναβάθμιση των υποδομών, θα επιτρέψουν την καλύτερη παρακολούθηση και διαχείριση των ενεργειακών ροών.
- Ενσωμάτωση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας: Η χρήση μπαταριών και άλλων λύσεων αποθήκευσης, θα εξομαλύνει τις διακυμάνσεις της παραγωγής, αυξάνοντας την ευελιξία του συστήματος και επιτρέποντας την βέλτιστη χρήση και αξιοποίηση των μονάδων ΑΠΕ [15].
- Ανάπτυξη και εφαρμογή προηγμένων αλγορίθμων διαχείρισης: Η τεχνητή νοημοσύνη και τα αυτόματα συστήματα ελέγχου, μπορούν να βελτιστοποιήσουν τη λειτουργία των μονάδων και την κατανομή φορτίου, επιλύοντας το πρόβλημα της ένταξης μονάδων στο σύστημα με έναν ακόμη πιο αποτελεσματικό τρόπο.

Βιβλιογραφία

- [1] C. Papanicolaou et al. "The prospect of using Greek lignite in an energy portfolio related to power generation," Bulletin of the Geological Society of Greece, Chania, Greece, 2013.
- [2] V. Vita et al., "Evaluating the flexibility benefits of smart grid innovations in transmission networks" *Applied Sciences*, vol. 11, p.p. 2-11, 2021.
- [3] D. Kolokotsa et al., "On the integration of the energy storage in smart grids: Technologies and applications," *Energy Store*, vol. 11, p.p. 1-25, 2019.
- [4] J. K. Kaldellis et al., "Green Transition and electricity sector decarbonization: The case of West Macedonia," *Energies*, vol. 16, p.p. 1-22, 2023.
- [5] W. van Ackooij et al., "Large-scale unit commitment under uncertainty: an updated literature survey" *Annals of Operations Research*, vol. 271, p.p. 1-56, 2018.
- [6] L. Montero, A. Bello and J. Reneses, "A Review on the unit commitment problem: Approaches, techniques, and resolution methods," *Energies*, vol. 15, p.p. 1-40, 2022.
- [7] H. Y. Yamin, "Review on methods of generation scheduling in electric power systems," *Electric Power Systems Research*, vol. 69, no. 2, p.p. 227-248, 2004.
- [8] M.J. Kochenderfer and T.A. Wheeler, *Algorithms for Optimization*, Cambridge, MA, USA: MIT Press, 2019, ch.1.
- [9] U.B. Filik and M. Kurban, "Solving unit commitment problem using modified subgradient method combined with simulated annealing algorithm," *Mathematical Problems*, vol. 2010, p.p. 1-15, Jul. 2010. doi: 10.1155/2010/295645. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/45693178>
- [10] J. Efberg, "YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in MATLAB," in International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, Zurich, Switzerland, 2004.
- [11] M. Silbernagl, M. Huber, and R. Brandenberg, R. "Improving accuracy and efficiency of start-up cost formulations in MIP unit commitment by modeling power plant

temperatures,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 1, p.p. 1-9, Jun. 2015. doi: 10.1109/TPWRS.2015.2450776. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/264708604>

- [12] A. Soroudi, *Power System Optimization Modeling in GAMS*, Springer International Publishing, 2017, ch.5.
- [13] E. Arriagada et al., “A probabilistic economic dispatch model and methodology considering renewable energy, demand and generator uncertainties,” *Electric Power Systems Research*, vol. 121, p.p. 325-332, 2015.
- [14] I. Rendroyoko et al., “Integration of solar photovoltaic plant in the Eastern Sumba microgrid using unit commitment optimization,” *Sustainability*, vol. 16, p.p. 1-18, 2023.
- [15] E.F. Khairul et al., “A state-of-the-art review on optimization methods and techniques for economic load dispatch with photovoltaic systems: Progress, challenges, and recommendations,” *Sustainability*, vol. 15, p.p. 1-29, 2023.
- [16] T.O. Olowu et al., “Future challenges and mitigation methods for high photovoltaic penetration: A survey,” *Energies*, vol. 11, p.p. 1-32, 2018.
- [17] Y. Hong and G.F. Apolinario, “Uncertainty in unit commitment in power systems: A review of models, methods, and applications,” *Energies*, vol. 11, p.p. 1-47, 2021.
- [18] D.G. Luenberger, D. and Y. Yinyu, *Linear and Nonlinear Programming*, Stanford, CA, USA: Springer, 2008.

