



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας  
συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη  
διείσδυση αιολικής παραγωγής**

Ευάγγελος-Ιάσων Πολύδωρος  
Αριθμός Μητρώου: 2010010090

Επιβλέπων: Φώτης Κανέλλος  
Επίκουρος καθηγητής

Χανιά, Απρίλιος 2017





ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

## ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

### Βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με μεγάλη διείσδυση αιολικής παραγωγής

Ευάγγελος-Ιάσων Πολύδωρος  
Αριθμός Μητρώου: 2010010090

Επιβλέπων: Φώτης Κανέλλος

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 27 Απριλίου 2017.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....

Φώτης Κανέλλος  
Επίκουρος καθηγητής

.....

Βασίλης Κουικόγλου  
Καθηγητής

.....

Γιώργος Τσιναράκης  
Ε.ΔΙ.Π.

Χανιά, Απρίλιος 2017





ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Copyright ©All rights reserved Ευάγγελος-Ιάσων Πολύδωρος, 2017.

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή της εργασίας αυτής για εκπαιδευτικό, ερευνητικό ή εμπορικό σκοπό, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα.

Το περιεχόμενο αυτής της εργασίας δεν απηχεί απαραίτητα τις απόψεις του Τμήματος, του Επιβλέποντα, ή της επιτροπής που την ενέκρινε.

#### Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην διπλωματική εργασία. Επίσης έχω αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η διπλωματική εργασία προετοιμάστηκε από εμένα προσωπικά, ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του Τμήματος Μηχανικών Παραγωγής & Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης.

(Υπογραφή)

.....

Ευάγγελος-Ιάσων Πολύδωρος



# Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μεγάλη αύξηση του ενδιαφέροντος της παγκόσμιας κοινότητας προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η τάση αυτή οφείλεται σε δύο βασικούς λόγους. Ο πρώτος έχει να κάνει με τις καταστροφικές επιπτώσεις που έχει στον πλανήτη η αλόγιστη χρήση ορυκτών πόρων -όπως είναι ο λιγνίτης, ο άνθρακας, το πετρέλαιο, και το φυσικό αέριο-, λόγω των τεράστιων ποσοτήτων CO<sub>2</sub> που απελευθερώνουν στην ατμόσφαιρα κατά την καύση τους. Ο δεύτερος λόγος είναι η ολοένα αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας σε παγκόσμιο επίπεδο, σε συνδυασμό με την μείωση των ενεργειακών ορυκτών αποθεμάτων. Υπάρχει, δηλαδή, μία τεράστια ανάγκη σε όλο τον αναπτυσσόμενο κόσμο για την ένταξη περισσότερων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, και ταυτόχρονα για την βελτιστοποίηση του τρόπου λειτουργίας και διείσδυσής τους στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας.

Με αφορμή την ανάγκη αυτή, στην εργασία μελετώνται μοντέλα βελτιστοποίησης του προβλήματος ένταξης μονάδων, και του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, κάτω από διαφορετικά σενάρια διείσδυσης εναλλακτικών μορφών ενέργειας. Στόχος της μελέτης είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων για την διαδικασία και τον τρόπο υλοποίησής της βελτιστοποίησης, για την συμπεριφορά των συστημάτων στις διακυμάνσεις διείσδυσης, όπως επίσης και για τα οφέλη αλλά και τα τεχνικά προβλήματα λόγω της διείσδυσης. Ακόμη, γίνεται μια σύντομη περιγραφή των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και των πλεονεκτημάτων τους.

## Λέξεις Κλειδιά

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, Σ.Η.Ε., Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, Α.Π.Ε., Βέλτιστος προγραμματισμός, Πρόβλημα ένταξης των μονάδων, Οικονομική κατανομή φορτίου, Διείσδυση αιολικής παραγωγής, Κρήτη, Βελτιστοποίηση με Σμήνος Σωματιδίων, Β.Σ.Σ.





# Abstract

In recent years, renewable energy has been increasingly attracting the interest of the worldwide community. This trend is because of two main reasons. The first has to do with the devastating effects that the use of mineral resources -such as lignite, carbon, oil, and gas- has to our environment, due to the huge amounts of CO<sub>2</sub> released into the atmosphere when such minerals are burned. The second reason is the ever-increasing global demand for electricity, combined with a forecasted shortage of mineral energy reserves. This means that, in the developed world, there is a huge need to integrate more renewable electricity generating units and optimize their mode of operation and penetration into the power systems at the same time.

On the basis of this need, this study examines models of optimization for the unit integration problem, as well as the problem of economic distribution of load amongst the different units of an electrical energy system under different alternative energy penetration scenarios. The aim of this study is to draw conclusions on the process and method of implementing the optimization, on the behavior of systems in penetration fluctuations, as well as on the benefits and technical problems due to penetration. In addition, this study provides a brief description of electricity systems, renewable energy sources, and their advantages.

## Keywords

Electric power system, E.P.S., Renewable energy sources, R.E.S., Optimal scheduling, Unit commitment problem, Economic dispatch, Wind power injection, Crete, Particle swarm optimization, P.S.O., Fmincon



Στους γονείς μου  
για την μακρόχρονη υποστήριξη τους



# Ευχαριστίες

Καταρχήν, ένα μεγάλο ευχαριστώ στους γονείς μου και τον αδελφό μου, που με αμέριστη αγάπη και υπομονή με στηρίζουν και με βοηθούν στις επιλογές και τους στόχους μου όλα αυτά τα χρόνια.

Ευχαριστώ ιδιαίτερα τον καθηγητή και επιβλέποντά μου κ. Φώτη Κανέλλο, Δρ. Ηλεκτρολόγο Μηχανικό & Μηχανικό Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με την παρούσα διπλωματική, όπως επίσης και για τη συνεχή και πολύτιμη βοήθειά του, καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας αυτής.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους συμφοιτητές και φίλους μου για τη βοήθεια, τη συνεργασία, τη φιλοξενία και την ανταλλαγή ιδεών και εμπειριών, σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.



# Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Abstract	iii
Ευχαριστίες	vii
Περιεχόμενα	xi
Κατάλογος σχημάτων	xiv
Κατάλογος πινάκων	xvi
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>1</b>
1.1 Σκοπός εργασίας . . . . .	1
1.2 Δομή εργασίας . . . . .	1
<b>2 Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.)</b>	<b>3</b>
2.1 Τι είναι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας & τα πλεονεκτήματα του . .	3
2.2 Κύρια χαρακτηριστικά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας . . . . .	4
2.3 Στάδια & λειτουργίες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας . . . . .	4
2.4 Η δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας . . . . .	5
2.5 Είδη σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τα χαρακτηριστικά τους . . . . .	6
2.5.1 Θερμικοί σταθμοί . . . . .	6
2.5.2 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί . . . . .	8
2.6 Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τα χαρακτηριστικά του	11
2.6.1 Δίκτυο γραμμών υψηλής τάσης . . . . .	12
2.6.2 Κέντρα υπερυψηλής τάσης & υποσταθμοί . . . . .	15
2.7 Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και τα χαρακτηριστικά του	17
<b>3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.)</b>	<b>19</b>
3.1 Γενικά για τις Α.Π.Ε. . . . .	19
3.2 Η αναγκαιότητα στροφής στις Α.Π.Ε. & τα πλεονεκτήματα . . . . .	19

3.3	Οι μορφές των Α.Π.Ε. . . . .	21
3.3.1	Ηλιακή ενέργεια . . . . .	21
3.3.2	Αιολική ενέργεια . . . . .	22
3.3.3	Υδραυλική ενέργεια . . . . .	24
3.3.4	Γεωθερμική ενέργεια . . . . .	25
3.3.5	Βιομάζα . . . . .	26
3.3.6	Κυματική, παλιρροϊκή και ενέργεια των ωκεανών . . . . .	28
3.4	Διείσδυση Α.Π.Ε. σε Σ.Η.Ε. . . . .	29
<b>4</b>	<b>Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης</b>	<b>33</b>
4.1	Γενική περιγραφή συστήματος . . . . .	33
4.2	Τα χαρακτηριστικά του δικτύου της Κρήτης . . . . .	34
4.3	Αναλυτικά στοιχεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας . . . . .	37
4.3.1	Σταθμός Παραγωγής ενέργειας Ξυλοκαμάρας Χανίων . . . . .	37
4.3.2	Σταθμός Παραγωγής ενέργειας Λινοπεραμάτων Ηρακλείου . . . . .	38
4.3.3	Σταθμός Παραγωγής ενέργειας Αθρινόλακκου Λασιθίου . . . . .	41
4.4	Στοιχεία παραγωγής αιολικής ενέργειας στην Κρήτη . . . . .	43
4.5	Στοιχεία ζήτησης φορτίου στην Κρήτη . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Πρόβλημα βέλτιστης λειτουργίας συστήματος</b>	<b>49</b>
5.1	Ορισμός & περιγραφή προβλήματος . . . . .	49
5.2	Βασικές μέθοδοι επίλυσης . . . . .	52
5.3	Βελτιστοποίηση με Σμήνος Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) . . . . .	54
5.3.1	Η ιδέα για την υλοποίηση της μεθόδου PSO & τα πλεονεκτήματά της . . . . .	54
5.3.2	Μεθοδολογία υλοποίησης του αλγορίθμου PSO . . . . .	56
5.3.3	Αλγοριθμική διαδικασία της μεθόδου PSO . . . . .	57
5.4	Μοντελοποίηση προβλήματος . . . . .	58
5.4.1	Καθορισμός μονάδων προς ένταξη στο σύστημα (unit commitment) . . . . .	58
5.4.2	Οικονομική κατανομή του φορτίου και καθορισμός σημείων λειτουργίας των μονάδων . . . . .	60
5.5	Αβεβαιότητα λόγω αιολικής παραγωγής . . . . .	62
5.6	Τροποποιήσεις λόγω διείσδυσης αιολικής παραγωγής . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Σενάρια &amp; επίλυση προβλήματος</b>	<b>67</b>
6.1	Χαμηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας στο ΣΗΕ της Κρήτης . . . . .	69
6.2	Μέση διείσδυση αιολικής ενέργειας στο ΣΗΕ της Κρήτης . . . . .	71
6.3	Υψηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας στο ΣΗΕ της Κρήτης . . . . .	74
<b>7</b>	<b>Αποτελέσματα προσομοιώσεων</b>	<b>79</b>
7.1	Αποτελέσματα προβλήματος χωρίς διείσδυση αιολικής ενέργειας . . . . .	79
7.2	Αποτελέσματα προβλήματος με χαμηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας . . . . .	82



7.3	Αποτελέσματα προβλήματος με μέση διείσδυση αιολικής ενέργειας . . .	88
7.4	Αποτελέσματα προβλήματος με υψηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας . .	94
<b>8</b>	<b>Συμπεράσματα</b>	<b>101</b>
8.1	Αποτίμηση αποτελεσμάτων . . . . .	101
8.1.1	Επίδραση στο λειτουργικό κόστος . . . . .	101
8.1.2	Επίδραση στην εφεδρεία του συστήματος . . . . .	102
8.1.3	Κόστος παραγωγή ανά MWh . . . . .	103
8.1.4	Απόκριση αλγορίθμου . . . . .	103
8.2	Γενικό συμπέρασμα . . . . .	104
8.3	Μελλοντικές Επεκτάσεις . . . . .	104
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>105</b>



# Κατάλογος σχημάτων

2.1	Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας . . . . .	6
4.1	Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη . . . . .	34
4.2	Υπόμνημα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης . . . . .	34
4.3	Ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος δικτύου ανά σταθμό παραγωγής . . . . .	35
4.4	Ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος δικτύου ανά σταθμό παραγωγής . . . . .	36
4.5	Ποσοστό ονομαστικής ισχύος δικτύου ανά είδος μονάδας . . . . .	36
4.6	Ποσοστό ονομαστικής ισχύος σταθμού Λινοπεραμάτων Ηρακλείου ανά είδος μονάδας . . . . .	37
4.7	Ποσοστό ονομαστικής ισχύος σταθμού Λινοπεραμάτων Ηρακλείου ανά είδος μονάδας . . . . .	39
4.8	Ποσοστό ονομαστικής ισχύος σταθμού Αθρινόλακκου Λασιθίου ανά είδος μονάδας . . . . .	42
4.9	Ποσοστό εναλλακτικών και συμβατικών μονάδων παραγωγής στο ΣΗΕ της Κρήτης . . . . .	44
4.10	Ανεμογεννήτριες στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης . . . . .	45
4.11	Τυπικές καμπύλες ζήτησης φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης ανά ώρα για τέσσερις διαφορετικούς μήνες . . . . .	47
4.12	Τυπικές καμπύλες ζήτησης ελάχιστου & μέγιστου φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης ανά μήνα . . . . .	48
5.1	Διάγραμμα ροής αλγοριθμικής διαδικασίας βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων . . . . .	57
5.2	Διάγραμμα ροής αλγοριθμικής διαδικασίας βελτιστοποίησης με τη συνάρτηση fmincon . . . . .	62
5.3	Καμπύλη αιολικής παραγωγής ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου . . . . .	64
6.1	Διάνυσμα μεταβολής κατάστασης μονάδων DX . . . . .	68
6.2	Καμπύλες πρόβλεψης & πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας για χαμηλή διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	69
6.3	Καμπύλες πρόβλεψης & πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας, για μέση διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	72

6.4	Καμπύλες πρόβλεψης & πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας, για υψηλή διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	75
7.1	Χρονική αναπαράσταση κατάστασης θερμικών μονάδων παραγωγής, χωρίς διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	82
7.2	Ποσοστό συμβατικής παραγωγής έναντι αιολικής παραγωγής, για χαμηλή διείσδυση . . . . .	84
7.3	Ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας έναντι της αιολικής εφεδρείας, για χαμηλή διείσδυση . . . . .	86
7.4	Καμπύλες παραγωγής θερμικών μονάδων, με τη σειρά ικανοποίησης του φορτίου για χαμηλή διείσδυση . . . . .	86
7.5	Χρονική αναπαράσταση κατάστασης θερμικών μονάδων παραγωγής, με χαμηλή διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	88
7.6	Ποσοστό συμβατικής παραγωγής έναντι αιολικής παραγωγής, για μέση διείσδυση . . . . .	90
7.7	Ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας έναντι της αιολικής εφεδρείας, για μέση διείσδυση . . . . .	92
7.8	Καμπύλες παραγωγής θερμικών μονάδων με τη σειρά ικανοποίησης του φορτίου, για μέση διείσδυση . . . . .	92
7.9	Χρονική αναπαράσταση κατάστασης θερμικών μονάδων παραγωγής, με μέση διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	94
7.10	Ποσοστό συμβατικής παραγωγής, έναντι αιολικής παραγωγής, για υψηλή διείσδυση . . . . .	96
7.11	Ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας, έναντι της αιολικής εφεδρείας, για υψηλή διείσδυση . . . . .	98
7.12	Καμπύλες παραγωγής θερμικών μονάδων με τη σειρά ικανοποίησης του φορτίου, για υψηλή διείσδυση . . . . .	98
7.13	Χρονική αναπαράσταση κατάστασης θερμικών μονάδων παραγωγής, με υψηλή διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	100
8.1	Καμπύλες λειτουργικού κόστους σεναρίων, με και χωρίς διείσδυση αιολικής παραγωγής . . . . .	102
8.2	Ισχύς εφεδρείας σεναρίων, με και χωρίς διείσδυση αιολικής παραγωγής . . . . .	103

# Κατάλογος πινάκων

4.1	Συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά σταθμό παραγωγής . . . . .	35
4.2	Είδος θερμικών μονάδων ανά σταθμό παραγωγής . . . . .	35
4.3	Χαρακτηριστικά παραγωγής θερμικών μονάδων Ξυλοκαμάρας Χανίων .	37
4.4	Παράμετροι κόστους θερμικών μονάδων Ξυλοκαμάρας Χανίων . . . . .	38
4.5	Χρονικοί περιορισμοί θερμικών μονάδων Ξυλοκαμάρας Χανίων . . . . .	38
4.6	Χαρακτηριστικά παραγωγής θερμικών μονάδων Λινοπεραμάτων Ηρα- κλείου . . . . .	39
4.7	Παράμετροι κόστους θερμικών μονάδων Λινοπεραμάτων Ηρακλείου . .	40
4.8	Χρονικοί περιορισμοί θερμικών μονάδων Λινοπεραμάτων Ηρακλείου . .	41
4.9	Χαρακτηριστικά παραγωγής θερμικών μονάδων Αθρινόλακκου Λασιθίου	41
4.10	Παράμετροι κόστους θερμικών μονάδων Λινοπεραμάτων Ηρακλείου . .	42
4.11	Χρονικοί περιορισμοί θερμικών μονάδων Λινοπεραμάτων Ηρακλείου . .	42
4.12	Ποσοστά συμμετοχής ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο του ΣΗΕ της Κρήτης	43
4.13	Ισχύς εναλλακτικών μονάδων παραγωγής (ΑΠΕ) & συμμετοχή στην ηλε- κτροπαραγωγή το έτος 2011 . . . . .	43
4.14	Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων στο ΣΗΕ της Κρήτης το έτος 2010	44
4.15	Ζήτηση ενέργειας και αιχμής φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης . . . . .	45
4.16	Πρόβλεψη ζήτησης ενέργειας και αιχμής φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης .	46
4.17	Ζήτηση φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης ανά ώρα, για τέσσερις διαφορε- τικούς μήνες . . . . .	46
6.1	Ωριαία πρόβλεψη παραγωγής και πραγματική αιολική παραγωγή, για χαμηλή διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	70
6.2	Ωριαία αιολική παραγωγή, φορτίο ζήτησης και ποσοστό διείσδυσης, για χαμηλή διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	71
6.3	Ωριαία πρόβλεψη παραγωγής και πραγματική αιολική παραγωγή, για μέση διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	73
6.4	Ωριαία αιολική παραγωγή, φορτίο ζήτησης και ποσοστό διείσδυσης, για μέση διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	74
6.5	Ωριαία πρόβλεψη παραγωγής και πραγματική αιολική παραγωγή, για υψηλή διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	76

6.6	Ωριαία αιολική παραγωγή, φορτίο ζήτησης και ποσοστό διείσδυσης, για υψηλή διείσδυση στο ΣΗΕ . . . . .	77
7.1	Παραγωγή θερμικών μονάδων & στρεφόμενη εφεδρεία ΣΗΕ, χωρίς διείσδυση . . . . .	80
7.2	Κόστος εκκίνησης θερμικών μονάδων παραγωγής και κόστος λειτουργίας του ΣΗΕ, χωρίς διείσδυση . . . . .	81
7.3	Παραγωγή θερμικών μονάδων & αιολική παραγωγή, για χαμηλή διείσδυση	83
7.4	Στρεφόμενη εφεδρεία & αιολική εφεδρεία, για χαμηλή διείσδυση . . . .	85
7.5	Κόστος εκκίνησης θερμικών μονάδων παραγωγής και κόστος λειτουργίας του ΣΗΕ, για χαμηλή διείσδυση . . . . .	87
7.6	Παραγωγή θερμικών μονάδων & αιολική παραγωγή, για μέση διείσδυση	89
7.7	Στρεφόμενη εφεδρεία & αιολική εφεδρεία, για μέση διείσδυση . . . . .	91
7.8	Κόστος εκκίνησης θερμικών μονάδων παραγωγής και κόστος λειτουργίας του ΣΗΕ, για μέση διείσδυση . . . . .	93
7.9	Παραγωγή θερμικών μονάδων & αιολική παραγωγή, για υψηλή διείσδυση	95
7.10	Στρεφόμενη εφεδρεία & αιολική εφεδρεία, για υψηλή διείσδυση . . . .	97
7.11	Κόστος εκκίνησης θερμικών μονάδων παραγωγής και κόστος λειτουργίας του ΣΗΕ, για υψηλή διείσδυση . . . . .	99

# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

### 1.1 Σκοπός εργασίας

Σκοπός της εργασίας αυτής, είναι η μελέτη της συμπεριφοράς των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας στις διακυμάνσεις διείσδυσης φορτίου από εξωγενή συστήματα, όπως αυτά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, γίνεται παρουσίαση των προβλημάτων ένταξης των μονάδων στο σύστημα και οικονομικής κατανομής του φορτίου. Για την επίλυση των προβλημάτων προτείνονται ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization) και η συνάρτηση `fmincon` της Matlab αντίστοιχα.

### 1.2 Δομή εργασίας

Στο πρώτο μέρος της εργασίας, γίνεται μία εκτενής παρουσίαση των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας αναφορικά με τη δομή τους, τα πλεονεκτήματά τους, τα χαρακτηριστικά τους, τα στάδια και τις λειτουργίες τους ώστε να γίνει κατανοητή η σημαντικότητά του ρόλου τους στις σύγχρονες κοινωνίες. Στην συνέχεια αναλύονται τα είδη των μονάδων που απαρτίζουν τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (Σ.Η.Ε.) και ο ρόλος τους, η διαδικασία παραγωγής ενέργειας της κάθε μονάδας, καθώς και οι δομές και τα χαρακτηριστικά των συστημάτων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο δεύτερο, παρουσιάζονται οι διάφορες μορφές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τα πλεονεκτήματά και τα μειονεκτήματά τους, οι τρόποι και οι δυσκολίες εκμετάλλευσης ορισμένων μορφών, ενώ γίνεται λόγος για την αναγκαιότητα στροφής των σύγχρονων κοινωνιών σε αυτές, για περιβαλλοντικούς αλλά και οικονομικούς λόγους. Ακόμα, γίνεται αναφορά στις επιδράσεις της αυξημένης διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο τρίτο μέρος, περιγράφεται αναλυτικά το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, όπου είναι το ΣΗΕ με το οποίο θα ασχοληθούμε σε αυτή την εργασία, τα χαρακτηριστικά του και οι σταθμοί παραγωγής του. Επίσης παρατίθενται στοιχεία που

αφορούν τη ζήτηση του φορτίου, την δυνατότητα παραγωγής των θερμικών μονάδων, τα κόστη και τις τιμές των καυσίμων που χρησιμοποιούν, τα τεχνικά ελάχιστα των μονάδων, όπως και κάποιες πληροφορίες για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και την αιολική παραγωγή στο νησί.

Στο τέταρτο μέρος, ορίζεται το πρόβλημα το οποίο θα αναλυθεί στην εργασία αυτή. Περιγράφονται οι αλγόριθμοι, που θα χρησιμοποιηθούν για τη βελτιστοποίηση του προβλήματος ένταξης μονάδων στο σύστημα και για την οικονομική κατανομή του φορτίου στις θερμικές μονάδες παραγωγής. Επίσης, περιγράφονται συνοπτικά και αρκετές από τις βασικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την επίλυση των προβλημάτων αυτών, ώστε να παρουσιαστούν τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της κάθε μεθόδου, και να γίνει κατανοητός ο λόγος που επιλέχθηκε ο συγκεκριμένος αλγόριθμος. Στη συνέχεια, μοντελοποιείται μαθηματικά το πρόβλημα και ο τρόπος αντιμετώπισης της αβεβαιότητας της αιολικής παραγωγής, λόγω της αδυναμίας ακριβούς πρόβλεψής της.

Το πέμπτο μέρος, αφορά τα σενάρια που υποθέτονται, προκειμένου να μελετηθεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης και να συγκριθεί η απόκριση του αλγορίθμου σχετικά με την ποιότητα του αποτελέσματος και το χρόνο ολοκλήρωσής του. Για την μελέτη αυτή, διατυπώνονται τρία διαφορετικά σενάρια διείσδυσης αιολικής παραγωγής στο ΣΗΕ της Κρήτης. Στο πρώτο σενάριο, η αιολική παραγωγή είναι αρκετά μικρή, συνεπώς και η διείσδυση της αιολικής ενέργειας στο σύστημα χαμηλή. Αντίστοιχα τα άλλα δύο σενάρια, αφορούν παραγωγές που έχουν αποτέλεσμα μέση και υψηλή διείσδυση αιολικής παραγωγής στο Σ.Η.Ε..

Στο έκτο και προτελευταίο μέρος της εργασίας αυτής, παρατίθενται τα αποτελέσματα των σεναρίων που μελετήθηκαν, καθώς και πληθώρα γραφημάτων και πινάκων με στοιχεία που θα βοηθήσουν στην ευκολότερη εξαγωγή συμπερασμάτων.

Στο τελευταίο μέρος, γίνεται η ανάλυση και η εξαγωγή των συμπερασμάτων από τα αποτελέσματα του προηγούμενου μέρους.



## Κεφάλαιο 2

# Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.)

### 2.1 Τι είναι ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας & τα πλεονεκτήματά του

Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας (Σ.Η.Ε.) είναι το σύνολό των εγκαταστάσεων και των μέσων (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές μεταφοράς, διακόπτες, διατάξεις αντιστάθμισης) που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης.

Ανάλογα με την έκταση του συστήματος μπορούν να διακριθούν σε «Εθνικά Συστήματα», αν καλύπτουν το σύνολο μιας χώρας, σε «Περιφερειακά Συστήματα», αν καλύπτουν το σύνολο μιας γεωγραφικής περιοχής και σε «Ιδιωτικά Συστήματα», αν καλύπτουν τις ανάγκες ενός μεμονωμένου ιδιωτικού συγκροτήματος.

Η δομή του συστήματος έχει πρωτεύουσα σημασία για τη γεωγραφική διαθεσιμότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Η ιδιότητα, η οποία χαρακτηρίζει τη δομή και τη σύνθεση του συστήματος περισσότερο από κάθε άλλη, είναι το μέγεθος του συστήματος. Οποσδήποτε όμως ακόμη και το μικρότερο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι ένα πολύπλοκο ηλεκτρικό δίκτυο.

Τα κύρια πλεονεκτήματα της χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας:

- Είναι καθαρή στη χρήση της.
- Είναι διαθέσιμη όποτε ζητηθεί.
- Μεταφέρεται εύκολα και αποδοτικά.

## 2.2 Κύρια χαρακτηριστικά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να εξασφαλίζονται και να ικανοποιούνται οι ακόλουθες απαιτήσεις:

1. Ανά πάσα στιγμή πρέπει η παραγωγή να ισούται με τη ζήτηση. Αυτό διότι πρέπει να ικανοποιείται πάντα το φορτίο ζήτησης και δεν υπάρχει η δυνατότητα αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες.
2. Πρέπει να παρέχεται στους καταναλωτές αδιάλειπτα και να ικανοποιεί τους παρακάτω ποιοτικούς παράγοντες:
  - Σταθερή τάση.
  - Σταθερή συχνότητα.
  - Υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

## 2.3 Στάδια & λειτουργίες ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Ένα ΣΗΕ προκειμένου να λειτουργήσει, χωρίζεται στα επιμέρους στάδια μέχρι την τελική αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές. Τα στάδια αυτά είναι:

### 1. Παραγωγή

Σε αυτό το στάδιο παράγεται η ηλεκτρική ενέργεια στους σταθμούς παραγωγής (συμβατικούς ή ανανεώσιμους). Επίσης, γίνεται και η ανύψωση της τάσης του δικτύου .

### 2. Μεταφορά

Το στάδιο της μεταφοράς, αφορά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας μέσα από ένα δίκτυο γραμμών υψηλής (150KV) και υπερυψηλής (400KV) τάσης.

### 3. Διανομή

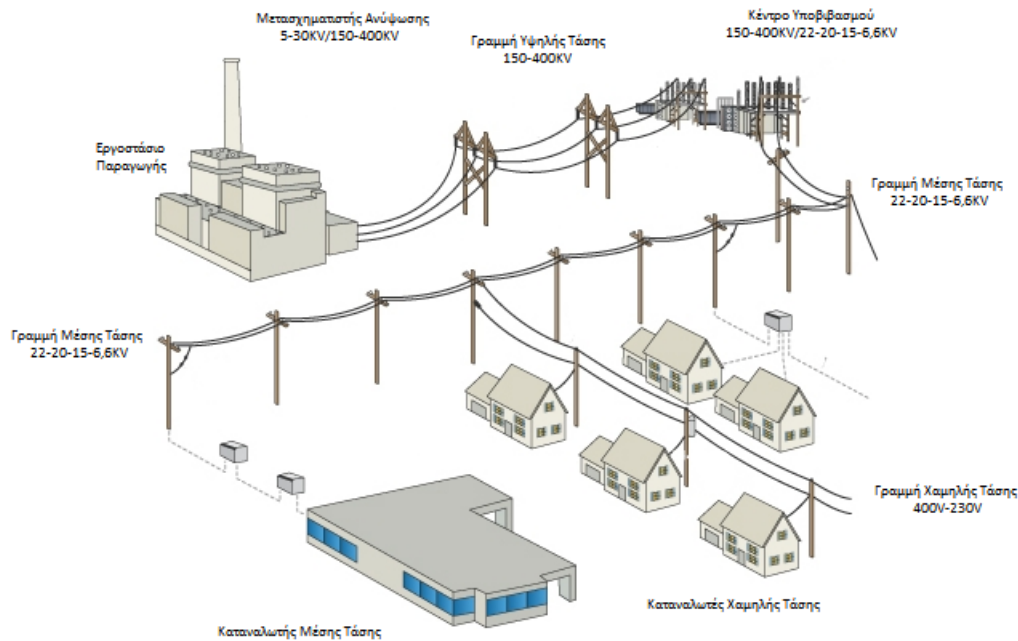
Μέσα από τους υποσταθμούς διανομής και των γραμμών μέσης (20KV) και χαμηλής (400-230V) τάσης, γίνεται η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας προς τους καταναλωτές.

## 2.4 Η δομή ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

Η ηλεκτρική ενέργεια από το σημείο που θα παραχθεί μέχρι το σημείο που θα καταναλωθεί, βρίσκεται σε μία συνεχή ροή. Στους σταθμούς παραγωγής μετατρέπεται η θερμική ενέργεια των ορυκτών καυσίμων (λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο κ.α.) και η μηχανική ενέργεια των υδάτινων ροών και των υδατοπτώσεων σε ηλεκτρική ενέργεια. Έπειτα, στο μετασχηματιστή ανύψωσης η τάση του εναλλασσόμενου ρεύματος από τα 5-30KV ανυψώνεται στα 150-400KV, ώστε να είναι σε θέση να διανύσει μεγάλες αποστάσεις μέσω των γραμμών υψηλής και υπερυψηλής τάσης 150-400KV του δικτύου διανομής. Από τους ζυγούς διανομής υψηλής τάσης, η ενέργεια διοχετεύεται στους καταναλωτές υψηλής τάσης του συστήματος, αν υπάρχουν. Στους μετασχηματιστές υποβιβασμού, η τάση υποβιβάζεται από τα 150-400KV στα 22-20-15-6,6KV. Μέσω των γραμμών μέσης τάσης η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στους καταναλωτές μέσης τάσης και τους μετασχηματιστές υποβιβασμού χαμηλής τάσης. Στους μετασχηματιστές υποβιβασμού χαμηλής τάσης, η τάση υποβιβάζεται από τα 22-20-15-6,6KV στα 400-230V, για να καταλήξει μέσω των γραμμών χαμηλής τάσης στους οικιακούς καταναλωτές.

Συνοπτική περιγραφή δομής:

1. Ζυγός παραγωγής
2. Μετασχηματιστής ανύψωσης (5-30KV / 150-400KV)
3. Ζυγός μεταφοράς
4. Γραμμή υψηλής τάσης
5. Ζυγός διανομής υψηλής τάσης → Καταναλωτές υψηλής τάσης
6. Μετασχηματιστής υποβιβασμού (150 – 400KV/22-20-15-6,6KV)
7. Ζυγός διανομής μέσης τάσης
8. Γραμμή μέσης τάσης → Καταναλωτές μέσης τάσης
9. Μετασχηματιστής υποβιβασμού (22-20-15-6,6KV/400-230V)
10. Ζυγός διανομής χαμηλής τάσης
11. Γραμμή χαμηλής τάσης → Καταναλωτές χαμηλής τάσης



Σχήμα 2.1: Δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

## 2.5 Είδη σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τα χαρακτηριστικά τους

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποτελούνται από πολλές μονάδες που λειτουργούν παράλληλα, στις οποίες γίνεται η μετατροπή της πρωτογενούς μορφής ενέργειας σε ηλεκτρική. Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες:

- **Σταθμοί βάσης**, όπου λειτουργούν για μεγάλα χρονικά διαστήματα και καλύπτουν τις βασικές ανάγκες κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως οι μονάδες τους έχουν μεγάλο κόστος εκκίνησης και πολύπλοκη διαδικασία ρύθμισης ισχύος, αλλά μεγάλο ποσοστό απόδοσης, καθώς έχουν χαμηλό λειτουργικό κόστος.
- **Σταθμοί αιχμής**, όπου λειτουργούν για μικρά χρονικά διαστήματα, κυρίως τις ώρες που το φορτίο ζήτησης είναι αρκετά μεγάλο (ώρες αιχμής). Συνήθως οι μονάδες τους έχουν μικρό ποσοστό απόδοσης, καθώς έχουν αυξημένο κόστος λειτουργίας, αλλά μικρό κόστος εκκίνησης και γρήγορη διαδικασία ρύθμισης ισχύος.

### 2.5.1 Θερμικοί σταθμοί

Οι θερμικοί σταθμοί ανάλογα με τα καύσιμα που χρησιμοποιούν, διακρίνονται σε συμβατικούς και πυρηνικούς. Τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους θερμικούς σταθμούς είναι: λιθάνθρακες, λιγνίτης, τύρφη, πετρέλαιο (ντίζελ ή μαζούτ)

και φυσικό αέριο. Τα καύσιμα τα οποία χρησιμοποιούνται στους πυρηνικούς σταθμούς είναι κυρίως μίγμα σχάσιμου ουρανίου U235 και άλλων ισοτόπων του. Οι θερμικοί σταθμοί, ανάλογα με το μέσο και τις μηχανές που χρησιμοποιούν για το θερμοδυναμικό τους κύκλο, κατατάσσονται σε ατμοηλεκτρικούς που χρησιμοποιούν ατμό και ατμοστρόβιλους, σε αεριοστροβιλικούς που χρησιμοποιούν καυσάερια και αεριοστροβίλους και σε ντίζελοηλεκτρικούς με εμβολοφόρες μηχανές ντίζελ. Επίσης υπάρχουν και οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου, που είναι ένας συνδυασμός αεριοστροβιλικού και ατμοηλεκτρικού σταθμού.

### **Ατμοηλεκτρικοί σταθμοί (Σταθμοί βάσης)**

Ένας ατμοηλεκτρικός σταθμός (ΑΗΣ) αποτελείται από μία ή περισσότερες μονάδες που εργάζονται παράλληλα. Κάθε μονάδα έχει συνήθως το δικό της λέβητα, στρόβιλο, γεννήτρια, πύργο ψύξης, καμινάδα και όλο το ηλεκτρικό σύστημα μέχρι το δίκτυο. Μόνο οι εγκαταστάσεις μεταφοράς καυσίμου είναι κοινές και μερικές φορές η καμινάδα. Ο υπέρθερμος ατμός (π.χ. 170 bar, 540°C) που παράγεται στο λέβητα, εκτονώνεται στις διάφορες (τρεις συνήθως) βαθμίδες του ατμοστρόβιλου, ο οποίος κινεί τη γεννήτρια. Στην έξοδο του στρόβιλου, ο ατμός συμπυκνώνεται σε νερό (35°C) στο ψυγείο, με τη βοήθεια του εναλλάκτη θερμότητας που διαρρέεται από ψυχρό νερό. Στο ψυγείο γίνεται η αποβολή της θερμότητας που δεν χρησιμοποιήθηκε που πηγαίνει τελικά στον πύργο ψύξης, όπου αποβάλλεται στο περιβάλλον. Ο βαθμός απόδοσης των ΑΗΣ είναι 30-45%, σχετικά μεγάλος για θερμικά εργοστάσια. Τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται στους ΑΗΣ είναι λιθάνθρακες, λιγνίτες, τύρφη, μαζούτ και φυσικό αέριο. Στη χώρα μας, οι λιγνιτικοί ΑΗΣ λόγω σχετικά μεγάλου βαθμού απόδοσης και του φθηνού καυσίμου, έχουν μικρό λειτουργικό κόστος ανά παραγόμενη KWh (€/KWh) και χρησιμοποιούνται ως σταθμοί βάσης. Χρειάζονται όμως πολλές ώρες και μία πολύπλοκη διαδικασία για την εκκίνησή τους. Η ρύθμιση της ισχύος των ΑΗΣ είναι σχετικά πολύπλοκη και αργή, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιούν στερεά καύσιμα. Ο ρυθμός μεταβολής της ισχύος είναι της τάξης των 2-3% της ονομαστικής ισχύος του σταθμού ανά λεπτό. Με εντολή του αυτόματου ελέγχου παραγωγής αλλάζει το σημείο ρύθμισης του ρυθμιστή στροφών της μονάδας, ο οποίος δίνει εντολή μεταβολής στη βαλβίδα εισόδου ατμού στον στρόβιλο. Τα αισθητήρια του λέβητα αντιλαμβάνονται κατόπιν την αλλαγή στην πίεση του ατμού και δίνεται εντολή αλλαγής ροής καυσίμου και αέρα.

### **Αεριοστροβιλικοί σταθμοί (Σταθμοί αιχμής)**

Ένας αεριοστροβιλικός σταθμός αποτελείται από μία ή περισσότερες μονάδες. Κάθε αεριοστροβιλική μονάδα αποτελείται από τέσσερα μέρη. Το συμπιεστή, το θάλαμο καύσης, τον αεριοστρόβιλο και τη γεννήτρια. Ο ατμοσφαιρικός αέρας, αφού συμπιεστεί στα 10 bar περίπου, οδηγείται στο θάλαμο καύσης όπου ψεκάζεται με πετρέλαιο (ντίζελ) ή φυσικό αέριο. Τα αέρια προϊόντα της καύσης έχουν θερμοκρα-

σία περίπου 850°C. Τα καυσαέρια οδηγούνται στον αεριοστρόβιλο και εκτονώνονται, μετατρέπεται δε κατά την εκτόνωσή τους μέρος της ενέργειας τους σε μηχανική ενέργεια. Τα καυσαέρια μετά την εκτόνωσή τους στον αεριοστρόβιλο έχουν θερμοκρασία μέχρι περίπου 600°C. Η σημαντική ισχύς που απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή και η υψηλή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων, είναι οι κύριες αιτίες του μικρού βαθμού απόδοσης των αεριοστροβιλικών μονάδων (25-35%). Οι αεριοστροβιλικές μονάδες λόγω του χαμηλού βαθμού απόδοσης και του υψηλού κόστους καυσίμου (όταν χρησιμοποιούν ντίζελ), έχουν πολύ μεγάλο ειδικό κόστος λειτουργίας (€/KWh). Η εκκίνησή τους γίνεται πολύ γρήγορα. Μέσα σε 3-5 λεπτά από την στιγμή εντολής εκκίνησης μπορεί να ξεκινήσουν και η ρύθμισή τους είναι ταχύτατη. Έτσι οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται ως μονάδες αιχμής, για την κάλυψη των αιχμών φορτίου.

### **Σταθμοί συνδυασμένου κύκλου (Σταθμοί κυμαινόμενου φορτίου)**

Στους σταθμούς συνδυασμένου κύκλου, τα καυσαέρια θερμοκρασίας 300-600°C από την έξοδο του αεριοστρόβιλου, διοχετεύονται σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας (Heat Recovery Steam Generator ή λέβητας καυσαερίων). Εκεί παράγεται ατμός που κινεί τον ατμοστρόβιλο. Ένας σταθμός συνδυασμένου κύκλου αποτελείται από μία ή, συνήθως, περισσότερες αεριοστροβιλικές μονάδες με τους αντίστοιχους λέβητες καυσαερίων και από ένα ζεύγος ατμοστρόβιλου - γεννήτριας. Σε ένα σταθμό συνδυασμένου κύκλου, τα καυσαέρια από τους αεριοστρόβιλους, θερμοκρασίας 500-600°C, οδηγούνται στους λέβητες καυσαερίων, όπου παράγεται ατμός και κινεί τον ατμοστρόβιλο. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης φθάνει το 50%. Όπως είναι φυσικό, χρησιμοποιούνται τα καύσιμα των αεριοστρόβιλων, δηλαδή πετρέλαιο ντίζελ και φυσικό αέριο. Η ρύθμιση της εξόδου τους, λόγω του κύκλου ατμού, δεν μπορεί να γίνει τόσο γρήγορα όσο στους αεριοστροβιλικούς σταθμούς. Χρησιμοποιούνται συνήθως, ως σταθμοί κυμαινόμενου φορτίου.

### **Ντηζελοηλεκτρικοί σταθμοί**

Οι ντηζελοηλεκτρικοί σταθμοί, χρησιμοποιούν εμβολοφόρους κινητήρες ντίζελ. Ως καύσιμα χρησιμοποιούν διάφορα αποστάγματα του πετρελαίου (τα βαρύτερα χρησιμοποιούνται για τους μεγαλύτερους κινητήρες). Ο βαθμός απόδοσης σε μεγάλες μονάδες φθάνει το 50%. Η ρύθμιση της ισχύος δεν παρουσιάζει προβλήματα. Στην Ελλάδα, οι ντηζελοηλεκτρικοί σταθμοί δεν χρησιμοποιούνται στο διασυνδεδεμένο δίκτυο. Αντίθετα χρησιμοποιούνται στα συστήματα Κρήτης – Ρόδου και στα μικρά αυτόνομα δίκτυα των νησιών.

### **2.5.2 Υδροηλεκτρικοί σταθμοί**

Ανάλογα με την υψομετρική διαφορά του νερού που διεργάζονται, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί (ΥΗΣ) διακρίνονται σε σταθμούς χαμηλής (<20m), μέσης (20-100m) και

## 2.5 Είδη σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τα χαρακτηριστικά τους

υψηλής πίεσης (>100m). Οι υψομετρικές διαφορές που διεργάζονται οι ΥΗΣ είναι από μερικά μέτρα, π.χ. 3m, μέχρι και 1500m περίπου. Η κινητήρια μηχανή των ΥΗΣ είναι υδροστροβίλος. Ανάλογα με την υψομετρική διαφορά, H, και την παροχή του νερού στον ΥΗΣ, χρησιμοποιούνται διάφοροι τύποι υδροστροβίλων. Οι κυριότεροι είναι:

1. Ελεύθερης δέσμης ή Pelton, για  $H \geq 100\text{m}$
2. Francis, για  $H = 30 \dots 800\text{m}$
3. Kaplan, για  $H = 2 \dots 80\text{m}$

Ανάλογα με το αν το νερό προέρχεται από τη συνεχή ροή ενός ποταμού ή από μια δεξαμενή, οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί χαρακτηρίζονται ως σταθμοί φυσικής ροής ή σταθμοί δεξαμενής. Στους σταθμούς δεξαμενής κατατάσσονται και οι υδροαντλητικοί σταθμοί.

### **Σταθμοί φυσικής ροής (Μονάδες βάσης)**

Σταθμοί φυσικής ροής εγκαθίστανται σε ποτάμια με μεγάλη παροχή σε όλες τις εποχές του έτους. Αποτελούνται από μία ή περισσότερες υδροηλεκτρικές μονάδες. Ο ποταμός προς εκμετάλλευση φράζεται και το νερό διοχετεύεται ελεγχόμενα, με αγωγούς μέσα σε στροβίλους Kaplan ή Francis. Λόγω του φράγματος, υπάρχει υψομετρική διαφορά μεταξύ της στάθμης προσαγωγής και της στάθμης φυγής του νερού. Για να διευκολυνθεί η διέλευση των ψαριών και ενδεχόμενα της ναυσιπλοΐας, υπάρχουν συνήθως ιχθυόσκαλες ή κανάλια παράκαμψης. Δηλαδή δεν καταλαμβάνεται όλος ο ποταμός από τον ΥΗΣ. Αν η διαμόρφωση του ποταμού δεν επιτρέπει την κατασκευή εργοστασίου μέσα στον ποταμό, τότε ανοίγεται ένα παράλληλο κανάλι και τοποθετείται εκεί ο ΥΗΣ. Σε ποτάμια όπου το επιτρέπει η κλίση του εδάφους, μπορεί να κατασκευαστεί μια αλυσίδα από ΥΗΣ φυσικής ροής. Ο βαθμός απόδοσης των ΥΗΣ φυσικής ροής κυμαίνεται από 80-92%. Η εκκίνηση και η ρύθμιση ισχύος δεν παρουσιάζει κανένα πρόβλημα. Πολλοί ΥΗΣ φυσικής ροής μπορούν να αποδώσουν την ονομαστική τους ισχύ μέσα σε ένα λεπτό. Χρησιμοποιούνται κυρίως ως εργοστάσια βάσης.

### **Σταθμοί δεξαμενής**

Οι ΥΗΣ δεξαμενής, εγκαθίστανται σε ποτάμια που δεν έχουν μεγάλη εγγυημένη παροχή σ' όλη τη διάρκεια του έτους. Τότε, εκεί που η μορφολογία του εδάφους το επιτρέπει, δημιουργείται μια τεχνητή λίμνη (ταμιευτήρας) με την κατασκευή ενός φράγματος. Το νερό μεταφέρεται με αγωγούς (καταθλιπτικούς σωλήνες) από το κάτω μέρος της δεξαμενής στον ΥΗΣ. Μετά το σταθμό, το νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αρδεύσεις. Μάλιστα, μπορεί να υπάρχει και στην έξοδο του εργοστασίου μια μικρή δεξαμενή, έτσι ώστε να μπορεί να ρυθμιστεί καλύτερα η ποσότητα του νερού που χρησιμοποιείται για άρδευση. Επίσης πρέπει να προβλεφθεί και ένα τούνελ παράκαμψης, έτσι ώστε όταν χρειαστεί να διακοπεί η παροχή νερού στον ΥΗΣ, να

παρέχεται νερό για αρδεύσεις μέσω του τούνελ παράκαμψης. Ακόμα χρειάζεται πρόβλεψη για ελεγχόμενη υπερχείλιση της δεξαμενής, για την περίπτωση που οι εισροές είναι μεγαλύτερες από τις εκροές. Σε ποτάμια, όπου το επιτρέπει η μορφολογία του εδάφους, μπορεί να κατασκευαστεί μια αλυσίδα από ΥΗΣ δεξαμενής. Τότε, οι εκροές της δεξαμενής του ενός ΥΗΣ θα αποτελούν τις εισροές στη δεξαμενή του κατάντι ΥΗΣ και θα πρέπει να γίνει συντονισμός της λειτουργίας τους. Στους καταθλιπτικούς σωλήνες που οδηγούν το νερό από τη δεξαμενή στον ΥΗΣ, υπάρχουν συνήθως δύο αποφρακτικά όργανα. Το ένα είναι στο φράγμα, στο σημείο εισροής του νερού στους σωλήνες. Αυτό χρησιμεύει, όταν θέλουμε να σταματήσουμε την εκροή νερού και να εκτελέσουμε διάφορες εργασίες στους καταθλιπτικούς σωλήνες. Το άλλο αποφρακτικό όργανο χρησιμοποιείται για να διακοπεί η εισροή νερού στο στρόβιλο και χρειάζεται γιατί, εκτός των άλλων, ένας καταθλιπτικός σωλήνας ίσως τροφοδοτεί δύο ή περισσότερους στρόβιλους. Η ρύθμιση ισχύος στους ΥΗΣ δεξαμενής γίνεται γρήγορα και χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα, όχι όμως τόσο γρήγορα όσο στους ΥΗΣ φυσικής ροής. Αυτό, γιατί σε απότομες αλλαγές ισχύος δημιουργούνται κρουστικά κύματα στις σωληνώσεις (υδραυλικό πλήγμα), που μπορούν να τις καταστρέψουν. Γι' αυτό, όταν το μήκος των καταθλιπτικών σωλήνων είναι μεγάλο, χρησιμοποιείται μια δεξαμενή απόσβεσης. Ο βαθμός απόδοσης των ΥΗΣ δεξαμενής κυμαίνεται συνήθως από 0,75 ως 0,92 και υπολογίζεται από το γινόμενο του βαθμού απόδοσης των αγωγών,  $\eta_a = 0,93 \dots 0,99$ , του στρόβιλου  $\eta_T = 0,85 \dots 0,94$  και της γεννήτριας  $\eta_G = 0,95 \dots 0,99$ . Η σειρά της ένταξης των ΥΗΣ για την κάλυψη του φορτίου, εξαρτάται από την υδραυλικότητα του έτους. Σε περιόδους ξηρασίας χρησιμοποιούνται ως εργοστάσια αιχμής, ενώ σε περιόδους με πολλές βροχές και πολλές εισροές στη δεξαμενή, χρησιμοποιούνται ακόμα κι ως εργοστάσια βάσης.

### Υδροαντλητικοί σταθμοί

Οι υδροαντλητικοί σταθμοί αποτελούνται από δύο δεξαμενές, την δεξαμενή άνω και τη δεξαμενή κάτω στάθμης, μια αντλία, ένα στρόβιλο και μια γεννήτρια. Ο στρόβιλος και η αντλία, πολλές φορές, είναι ενσωματωμένοι σε μια μοναδική υδρομηχανή, τον αντλιοστρόβιλο. Ο αντλιοστρόβιλος, ανάλογα με τη φορά περιστροφής του, αντλεί νερό ή κινείται από το νερό, δηλαδή παίρνει ή δίνει ισχύ στο δίκτυο. Ο βαθμός απόδοσης του κύκλου άντλησης – παραγωγής, που υπολογίζεται ως το γινόμενο των βαθμών απόδοσης της αντλίας και του στρόβιλου, μπορεί να φθάσει το 75%. Η εκκίνηση και η ρύθμιση ισχύος δεν παρουσιάζουν κανένα πρόβλημα. Μπορούν να αποδώσουν την πλήρη ισχύ τους μέσα σε 2 λεπτά. Η αλλαγή, από λειτουργία άντλησης σε λειτουργία παραγωγής, μπορεί να γίνει μέσα σε 3-4 λεπτά. Οι υδροαντλητικοί σταθμοί χρησιμοποιούνται ως αποθήκες ηλεκτρικής ενέργειας. Όταν η ηλεκτρική ζήτηση είναι χαμηλή, ενέργεια που παράγεται σε σταθμούς βάσης, π.χ. ΑΗΣ, με μικρό κόστος, χρησιμοποιείται για την άντληση νερού, από την κάτω στην πάνω δεξαμενή. Σε περιόδους αιχμής, η αποθηκευμένη στις δεξαμενές των υδροαντλητικών σταθμών ενέργεια, χρησιμοποιείται για



ν' αντικαταστήσει την παραγωγή από σταθμούς αιχμής, π.χ. αεριοστρόβιλους, που παράγουν με μεγάλο κόστος. Έτσι, ενώ χάνουμε σε ενέργεια, κερδίζουμε σε κόστος, αφού το κόστος παραγωγής της KWh από τα εργοστάσια βάσης, είναι χαμηλότερο του κόστους παραγωγής των εργοστασίων αιχμής.

## 2.6 Το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τα χαρακτηριστικά του

Το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, από την έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης ή τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, ονομάζεται σύστημα μεταφοράς. Ένα σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελείται από:

- Τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης
- Τους υποσταθμούς ζεύξης, όπου γίνεται η σύνδεση των γραμμών υψηλής τάσης και διοχετεύεται ενέργεια προς το σύστημα διανομής
- Τα κέντρα υπερυψηλής τάσης (ΚΥΤ), όπου γίνεται η προσαρμογή μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσης που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς (150kV και 400kV).

Είναι σημαντικό, η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις, να πραγματοποιείται με όσο το δυνατόν μικρότερες απώλειες και μεγαλύτερη ευστάθεια. Για να επιτευχθεί αυτό, ακριβώς μετά τις μονάδες παραγωγής, η τάση ανυψώνεται στα 150kV και στα 400kV. Η ανύψωση αυτή, μειώνει τις απώλειες που θα υπήρχαν αν η τάση παρέμενε στα 5kV και 30kV, που είναι η τάση εξόδου της ηλεκτρικής ενέργειας από τους σταθμούς παραγωγής. Στη συνέχεια οδηγείται στα κέντρα υψηλής τάσης (ΚΥΤ), για να διανεμηθεί σε γραμμές των 20kV ή 15kV και στο σύστημα διανομής. Σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, μεγαλύτερες των 600km, χρησιμοποιούνται ζεύξεις υψηλής τάσεως συνεχούς ρεύματος (HVDC) για να ελαχιστοποιηθούν οι απώλειες και η πτώση της τάσης. Εκτός αυτού, οι ζεύξεις HVDC έχουν το πλεονέκτημα της απομόνωσης των συζευγμένων μερών του δικτύου σε περιπτώσεις διαταραχών, με στόχο την αποφυγή ολικού black-out. Η αποδοτικότητα του συστήματος πρέπει να πλησιάζει την τιμή που το κόστος μεταφοράς ελαχιστοποιείται. Η μεταφορά ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, για να αποφεύγονται όσο το δυνατόν περισσότερο οι ηλεκτρικές απώλειες και κατ' επέκταση να γίνεται η λειτουργία του συστήματος οικονομικότερα. Το σύστημα μεταφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιεί διάφορες τάσεις μεταφοράς ανάλογα με την απόσταση και την ποσότητα ισχύος που πρέπει να μεταφερθεί. Υπεύθυνος για τη λειτουργία, τη συντήρηση και την ανάπτυξη του ΕΣΜΗΕ (Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας), ώστε να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός

της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια με ασφάλεια, αποδοτικότητα και αξιοπιστία, είναι ο ΑΔΜΗΕ (Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας). Ο διαχειριστής του ελληνικού συστήματος μεταφοράς, έχει ως έργο του τη μέριμνα για την σωστή λειτουργία του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας σε ολόκληρη τη χώρα, καθώς και των διασυνδέσεών του με τα άλλα δίκτυα, ώστε να διασφαλίζεται ο εφοδιασμός της χώρας με ηλεκτρική ενέργεια σε περιπτώσεις που καθίσταται αναγκαία η εισαγωγή της. Το ελληνικό διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς αποτελείται από γραμμές των 400kV και 150kV, οι οποίες μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια από τα κέντρα παραγωγής στα κέντρα κατανάλωσης και συνδέουν τη χώρα με τις γειτονικές χώρες. Υπάρχουν επίσης υποβρύχια καλώδια που συνδέουν την Άνδρο και τα νησιά της Δυτικής Ελλάδας, Κέρκυρα, Λευκάδα, Κεφαλονιά και Ζάκυνθο με το διασυνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς, καθώς και μία υποβρύχια διασύνδεση της Κέρκυρας με την Ηγουμενίτσα στα 66kV.

### 2.6.1 Δίκτυο γραμμών υψηλής τάσης

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η δυνατότητα μεταφοράς της σε μεγάλες αποστάσεις, με μικρές απώλειες. Η μεταφορά αυτή είναι απαραίτητη, λόγω των μεγάλων αποστάσεων των ενεργειακών κέντρων παραγωγής από τα μεγάλα κέντρα ηλεκτρικής κατανάλωσης. Για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, από τα σημεία παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης, χρησιμοποιούνται οι γραμμές μεταφοράς, το μήκος των οποίων μπορεί να φτάσει μέχρι μερικές εκατοντάδες χιλιόμετρα. Οι γραμμές αυτές, εκτός από τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιούνται και για την πολλαπλή σύνδεση των σταθμών παραγωγής με τις καταναλώσεις, ώστε σε περίπτωση που κάποιες μονάδες δεν λειτουργούν, οι άλλες μονάδες του δικτύου να καλύπτουν τη ζήτηση ενέργειας. Χαρακτηριστικό της ηλεκτρικής ενέργειας όμως, πρέπει να είναι η σταθερή τάση και συχνότητα. Έτσι η μεταφορά πραγματοποιείται σε υψηλά επίπεδα τάσης (πάνω από 110kV), ούτως ώστε να διατηρούνται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά της και να ελαχιστοποιούνται ταυτόχρονα και οι απώλειες. Ένας άλλος λόγος, που οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης λειτουργούν σε υψηλή τάση, είναι ο οικονομικός, αφού η ισχύς μεταφέρεται με σχετικά χαμηλή ένταση, οπότε χρειάζονται αγωγοί μικρότερης διατομής, επομένως να γίνεται εξοικονόμηση υλικού. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των γραμμών μεταφοράς που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα Σ.Η.Ε., καθορίζονται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι ο τρόπος κατασκευής των γραμμών (εναέριες γραμμές ή υπόγεια καλώδια), ο τύπος και τα φυσικά χαρακτηριστικά των αγωγών που χρησιμοποιούνται, το επίπεδο της τάσης λειτουργίας (μέση, υψηλή και υπερυψηλή), ο αριθμός των κυκλωμάτων και η διάταξη των τριφασικών γραμμών (γραμμές απλού ή διπλού κυκλώματος, γραμμές τριών ή περισσότερων τερματικών σημείων, γραμμές με ενδιάμεσες λήψεις).

Οι γραμμές μεταφοράς διαχωρίζονται βάση:

1. του επιπέδου τάσης τους (400kV, 150kV, 66kV)
2. του μήκους τους (μικρού, μεσαίου ή μεγάλου)
3. του κυκλώματός τους (απλού ή διπλού)
4. της εγκατάστασής τους (εναέρια ή υπόγεια)

### **Γραμμές υπερυψηλής τάσης 400kV**

Οι γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως, για τη μεταφορά ενέργειας σε πολύ μεγάλες αποστάσεις.

### **Γραμμές υψηλής τάσης 150kV**

Οι γραμμές αυτές χρησιμοποιούνται κυρίως, για τη μεταφορά ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις.

### **Γραμμές τάσης 66kV**

Οι γραμμές τάσης 66kV χρησιμοποιούνται κυρίως, για τη μεταφορά υψηλής τάσης σε κατοικημένες περιοχές.

### **Γραμμές μικρού μήκους**

Στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης μικρού μήκους, ανήκουν οι εγκαταστάσεις των οποίων το μήκος δεν ξεπερνά τα 40km.

### **Γραμμές μεσαίου μήκους**

Στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης μεσαίου μήκους, ανήκουν οι εγκαταστάσεις των οποίων το μήκος τους είναι μεγαλύτερο από τα 40km, αλλά δεν ξεπερνάει το μήκος των 150km.

### **Γραμμές μεγάλου μήκους**

Στις γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης μεγάλου μήκους, ανήκουν οι εγκαταστάσεις των οποίων το μήκος ξεπερνά τα 150km.

### **Γραμμές μεταφοράς απλού κυκλώματος**

Τα απλούστερα μέσα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τα κέντρα παραγωγής στα σημεία κατανάλωσης ενός Σ.Η.Ε., είναι οι εναέριας τριφασικές γραμμές απλού κυκλώματος. Οι εναέριας γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, κατασκευάζονται από γυμνούς αγωγούς που αποτελούνται από κλώνους αλουμινίου με χαλύβδινη ψυχή (κλώνους χάλυβα). Οι αγωγοί αυτοί, αναρτώνται σε πυλώνες μέσω αλυσίδων μονωτήρων, από πορσελάνη ή γυαλί.

### Γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος

Οι γραμμές μεταφοράς διπλού κυκλώματος (ή αλλιώς διπλές γραμμές), έχουν αποτελέσει αντικείμενο εκτενούς έρευνας, λόγω των ιδιαιτεροτήτων που εμφανίζουν τόσο στην προστασία, όσο και στην εύρεση της θέσης του σφάλματος. Οι γραμμές αυτές, κατασκευάζονται κυρίως εξαιτίας των περιορισμών, που επιβάλλονται στη χάραξη καινούριων ζωνών διέλευσης εναέριων γραμμών. Οι γραμμές διπλού κυκλώματος, αποτελούνται από δύο ανεξάρτητα τριφασικά κυκλώματα, παράλληλα μεταξύ τους, που τοποθετούνται στον ίδιο πυλώνα ή σε γειτονικούς πυλώνες που διέρχονται, όμως, από την ίδια ζώνη διέλευσης. Η τάση του κάθε κυκλώματος μπορεί να είναι διαφορετική. Λόγω της γειννίας των παράλληλων κυκλωμάτων της διπλής γραμμής, υπάρχει αμοιβαία μαγνητική σύζευξη μεταξύ τους. Η μαγνητική σύζευξη, σχετίζεται με την επίδραση που έχει το ρεύμα στο ένα κύκλωμα της γραμμής, στη διαμόρφωση της τάσης στο γειτονικό κύκλωμα. Έτσι, η τάση σε κάθε κύκλωμα της γραμμής, δεν εξαρτάται αποκλειστικά από το ρεύμα που το διαρρέει.

### Εναέριες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Η διέλευση των αγωγών πάνω από το έδαφος, γίνεται με τη χρήση εναέριων γραμμών μεταφοράς, τοποθετημένες σε ασφαλές ύψος. Για την εγκατάσταση αυτών των γραμμών, απαιτείται μια κατάλληλη ζώνη εδάφους για τη διέλευση τους, που θα εκτείνεται σε όλο το μήκος διαδρομής της κάθε γραμμής. Παρότι οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης και πολλές γραμμές διανομής μέσης τάσης οδεύουν, συνήθως κατά μήκος των οδών και των λεωφόρων, οι γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης, χρειάζονται ευρύτερους και ξεχωριστούς διαδρόμους εδάφους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι εναέριες γραμμές μεταφοράς, χρειάζονται τις απαραίτητες συσκευές και εγκαταστάσεις για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στις κατάλληλες συνθήκες.

Οι πιο βασικές από αυτές είναι:

- Οι αγωγοί που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια. Στις γραμμές υψηλής τάσης είναι συνήθως τρεις και στις διπλές γραμμές είναι έξι. Για λόγους οικονομίας, δε χρησιμοποιείται ουδέτερος αγωγός
- Οι στύλοι ή πυλώνες, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί
- Οι μονωτήρες, που αφενός συγκρατούν τους αγωγούς στους στύλους και αφ' ετέρου εξασφαλίζουν τη μόνωση τους προς τη γη
- Οι μετασχηματιστές, που μετασχηματίζουν την τάση στους υποσταθμούς μεταφοράς και διανομής
- Τα συστήματα ελέγχου και προστασίας, που ελέγχουν τις τιμές των χαρακτηριστικών μεγεθών κατά μήκος των γραμμών και τις προστατεύουν από ενδε-

χόμενες βλάβες, που προκαλούνται λόγω πιθανών προβλημάτων στη λειτουργία τους

### Υπόγειες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Εκτός από τις περιπτώσεις που για ειδικούς, τεχνικούς, αισθητικούς ή άλλους λόγους, η χρήση τους καθίσταται αναγκαία, δεν επιλέγονται, καθώς η κατασκευή τους είναι αρκετά πιο δαπανηρή από τις εναέριες γραμμές μεταφοράς. Συνήθως χρησιμοποιούνται για σχετικά μικρές αποστάσεις και για χαμηλότερες τάσεις. Κατά τις διαβάσεις των υπόγειων γραμμών κάτω από τις οδούς, τα καλώδια τοποθετούνται μέσα σε σωλήνες από τσιμέντο, ή σίδηρο με διάμετρο λίγο μεγαλύτερη από εκείνη των καλωδίων, ώστε να αποφεύγεται η εκσκαφή του δρόμου σε περίπτωση βλάβης. Επιπλέον, μέσω των σωλήνων παρέχεται ενισχυμένη μηχανική προστασία σε αυτά. Η μόνωση που περιβάλλει τους αγωγούς αυτούς, έχει ορισμένο πάχος μονωτικού υλικού, το οποίο είναι συνήθως μονωτικό χαρτί εμποτισμένο με μονωτικό λάδι, ελαστικό, συνθετική ουσία ή ύφασμα εμποτισμένο με βερνίκι. Η τεχνική της εγκατάστασης καλωδιακών γραμμών κάτω από τα καταστρώματα των οδών, δεν εφαρμόζεται στην Ελλάδα, εκτός από κάποιες ειδικές περιπτώσεις.

### Σύνθετες γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Οι σύνθετες γραμμές μεταφοράς, είναι ένας συνδυασμός εναέριων και υπόγειων γραμμών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα τμήμα της γραμμής μεταφοράς μπορεί να βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια της γης, ενώ το υπόλοιπο τμήμα της να συνεχίζει υπόγεια, μέχρι να φτιάσει στον υποσταθμό.

#### 2.6.2 Κέντρα υπερυψηλής τάσης & υποσταθμοί

Τα Κέντρα Υπερυψηλής Τάσης (ΚΥΤ) αποτελούν τα σημεία σύνδεσης του συστήματος των 400kV με το σύστημα των 150kV. Τα κέντρα υπερυψηλής τάσης, έχουν έναν ή περισσότερους αυτομετασχηματιστές τριών επιπέδων τάσης και κάποιον από αυτούς εξυπηρετούν παράλληλα και ανάγκες ανύψωσης τάσης από τις μονάδες παραγωγής προς το σύστημα 400kV.

Υποσταθμοί, ονομάζονται οι εγκαταστάσεις στις οποίες γίνεται ο μετασχηματισμός της τάσης, η κατανομή ή η διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γεννήτριες των σταθμών παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια με τάση 15kV ή 20kV. Αυτή η τάση είναι αρκετά χαμηλή, ώστε να μην ενδείκνυται να μεταφερθεί η ηλεκτρική ενέργεια σε μεγάλες αποστάσεις. Επομένως, προκειμένου να μεταφερθεί η ενέργεια μέσω του συστήματος μεταφοράς, η τάση ανυψώνεται στους υποσταθμούς στα 150kV ή 400kV, ώστε να μεταφερθεί πιο κοντά στους καταναλωτές. Οι καταναλωτές χωρίζονται σε πελάτες υψηλής τάσης (συνήθως είναι ελάχιστοι), σε πελάτες μέσης τάσης (βιομηχανίες, μεγάλα νοσοκομεία, κ.λπ.) και στους πελάτες χαμηλής τάσης (σπίτια, καταστήματα,

μικρές βιοτεχνίες). Δεδομένου της ποικιλομορφίας των καταναλωτών, υπάρχει ανάγκη και για μετασχηματισμό, κατανομή και διανομή από υποσταθμούς υψηλής (Υ.Τ.) ή υπερυψηλής τάσης (Υ.Υ.Τ) σε υποσταθμούς μέσης τάσης (Μ.Τ) και έπειτα σε υποσταθμούς χαμηλής τάσης (Χ.Τ.).

Οι υποσταθμοί μεταφοράς διαχωρίζονται βάση:

1. της ιδιότητάς τους (ανύψωσης, υποβιβασμού ή ζεύξεως)
2. της εγκατάστασής τους (εναέρια, επίγεια ή υπόγεια)

### **Υποσταθμοί ανύψωσης τάσης**

Οι υποσταθμοί ανύψωσης τάσης, βρίσκονται κοντά στους σταθμούς παραγωγής και έχουν σαν λειτουργία την ανύψωση της τάσης παραγωγής, στην τάση μεταφοράς.

### **Υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης**

Οι υποσταθμοί υποβιβασμού τάσης μεταφοράς, βρίσκονται στη σύνδεση του δικτύου μεταφοράς και του δικτύου διανομής, με σκοπό να υποβιβάσουν την τάση από τα 150kV ή 400kV, στη μέση τάση διανομής που είναι τα 15kV ή 20kV.

### **Υποσταθμοί ζεύξης**

Οι υποσταθμοί ζεύξης, είναι υποσταθμοί στους οποίους πραγματοποιείται απλώς, η σύνδεση μεταξύ των γραμμών υψηλής τάσης.

### **Εναέριοι υποσταθμοί**

Οι εναέριοι υποσταθμοί, κατασκευάζονται πάνω σε στύλους και χρησιμοποιούνται εκεί όπου ο χώρος και το περιβάλλον το επιτρέπουν. Συνήθως, χρησιμοποιούνται εκεί που οι ηλεκτρικές γραμμές είναι εναέριες. Το πλεονέκτημα τους είναι η απλότητα και η φθηνή κατασκευή τους.

### **Επίγειοι υποσταθμοί εσωτερικού τύπου**

Στα μέρη στα οποία το μέγεθος ισχύος ή ο χώρος δεν επιτρέπουν την εγκατάσταση εναέριων υποσταθμών, κατασκευάζονται συνήθως οι υποσταθμοί αυτοί. Τοποθετούνται είτε μέσα σε κτίρια που υπάρχουν, είτε μέσα σε ιδιαίτερα οικοδομήματα, είτε μέσα σε ειδικά μεταλλικά περίπτερα. Πρέπει να λαμβάνονται ειδικά μέτρα στους χώρους αυτούς, ώστε η θερμοκρασία να μη φθάσει σε επικίνδυνα όρια για τη λειτουργία του μετασχηματιστή και των υπόλοιπων ηλεκτρικών συσκευών και καλωδίων.

### Επίγειοι υπαίθριοι υποσταθμοί

Οι επίγειοι υπαίθριοι υποσταθμοί, κατασκευάζονται στα μέρη όπου χρειάζεται ισχύς μεγαλύτερη από αυτή που είναι σε θέση να παρέχουν οι εναέριοι υποσταθμοί. Έτσι, εξοικονομούνται οι δαπάνες που θα χρειαζόταν για την κατασκευή κτιρίου, αν και εφόσον βέβαια οι συνθήκες επιτρέπουν, την υπαίθρια εγκατάσταση των μηχανημάτων του υποσταθμού.

### Υπόγειοι υποσταθμοί

Οι υπόγειοι υποσταθμοί, επιλέγονται στις περιπτώσεις που δεν είναι εύκολη η κατασκευή υπέργειου υποσταθμού, όπως τα κεντρικά σημεία των πόλεων. Για την εγκατάσταση τους χρειάζεται μια υπόγεια οικοδομή, της οποίας οι τοίχοι, το δάπεδο και η οροφή πρέπει να είναι εξαιρετικά ανθεκτικά και στεγανά. Επίσης είναι απαραίτητο να εξασφαλίζεται, κατά την κατασκευή τους, η κυκλοφορία του αέρα.

## 2.7 Το σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και τα χαρακτηριστικά του

Το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου, με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές, ονομάζεται σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι καταναλωτές, για την αξιοποίηση της ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιούν χαμηλές τάσεις 220kV και 380kV. Αυτό, έχει συνέπεια οι γραμμές μεταφοράς υψηλής και υπερυψηλής τάσης, να μην μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές. Για τον λόγο αυτό, υπάρχουν υποσταθμοί, όπου γίνεται ο υποβιβασμός της τάσης του δικτύου. Από τους υποσταθμούς αυτούς, μέχρι και την κατάληξη της ηλεκτρικής ενέργειας στους τελικούς καταναλωτές, οι γραμμές που μεταφέρουν την ηλεκτρική ενέργεια, ονομάζονται γραμμές διανομής, οι οποίες όπως και οι γραμμές μεταφοράς, μπορεί να είναι είτε εναέριες, είτε υπόγειες.

Τα δίκτυα διανομής αποτελούνται από:

- τις γραμμές διανομής
- τους υποσταθμούς υποβιβασμού τάσης
- το σύστημα διανομής χαμηλής τάσης

Από τον μετασχηματιστή υψηλής τάσης (150kV/20kV) του Κέντρου Υψηλής Τάσης (ΚΥΤ), αναχωρούν μέσω αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) διάφορες γραμμές μέσης τάσης (20kV), που ονομάζονται «γραμμές κορμού». Οι γραμμές κορμού, διακλαδίζονται σε μικρότερες, μέσω διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ) ή ασφαλειών,

οι οποίες ονομάζονται κι αυτές γραμμές κορμού. Στη συνέχεια, καταλήγουν σε υποσταθμούς υποβιβασμού της μέσης τάσης σε χαμηλή τάση, δηλαδή από τα 20kV στα 400kV και τα 230kV. Οι υποσταθμοί αυτοί διακρίνονται σε υπαίθριους και σε εσωτερικού χώρου. Στους υπαίθριους υποσταθμούς, η γραμμή μέσης τάσης ηλεκτροδοτεί τον μετασχηματιστή μέσω μονοπολικών ασφαλειοαποξευκτών ή τριπολικών αποξευκτών, ενώ στους υποσταθμούς εσωτερικού χώρου, η ηλεκτροδότηση του μετασχηματιστή γίνεται μέσω συγκροτήματος πινάκων. Για λόγους διασύνδεσης ή απομόνωσης γραμμών μέσης τάσης, υπάρχουν στις γραμμές μέσης τάσης μονοπολικοί ασφαλειοαποξεύκτες και τριπολικοί αποξεύκτες, μη εντασσόμενοι σε υπαίθριους υποσταθμούς.

Οι διακοπές ηλεκτροδότησης των καταναλωτών, οφείλονται σε μεγάλο ποσοστό σε σφάλματα στο δίκτυο διανομής μέσης τάσης. Η χρήση διακοπών αυτόματης επαναφοράς (ΔΑΕ) και αυτόματων διακοπών ελαίου (ΑΔΕ) για την προστασία γραμμών διανομής μέσης τάσης, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τους δείκτες αξιοπιστίας του δικτύου. Η βελτίωση αυτή, οφείλεται στον τρόπο λειτουργίας των ΑΔΕ και ΔΑΕ, οι οποίοι όταν εντοπίσουν σφάλμα προς γη ή φάση, με χρονική διάρκεια μεγαλύτερη από ένα καθορισμένο όριο, διακόπτουν το κύκλωμα και στην συνέχεια ξανακλείνουν για να επαναφέρουν το κύκλωμα. Αν το σφάλμα εξακολουθεί να υπάρχει, ο διακόπτης επαναλαμβάνει τον κύκλο «άνοιγμα- κλείσιμο» για ακόμα δυο φορές και στην συνέχεια διακόπτει οριστικά την τροφοδότηση της γραμμής. Οι διακόπτες πραγματοποιούν είτε δυο γρήγορες και δυο αργές λειτουργίες, είτε μια γρήγορη και τρεις αργές λειτουργίες και η χρονική διάρκεια ανάμεσα στις λειτουργίες είναι 1 – 2 δευτερόλεπτα. Η πλειονότητα των σφαλμάτων σε εναέρια δίκτυα είναι παροδικά και διαρκούν το πολύ λίγα δευτερόλεπτα. Έτσι, τόσο ο αυτόματος διακόπτης ελαίου όσο και ο διακόπτης αυτόματης επαναφοράς, αποτρέπουν την διακοπή ηλεκτροδότησης μιας γραμμής εξαιτίας ενός παροδικού σφάλματος, που μπορεί να συμβεί π.χ. κατά την πτώση ενός κλαδιού δέντρου πάνω στην γραμμή.

Στην παροχή χαμηλής τάσης στους πελάτες, η οποία γίνεται μέσω των γραμμών χαμηλής τάσης που ξεκινούν από τον πίνακα χαμηλής τάσης (ασφαλειοκιβώτιο) του υποσταθμού, η χρήση συνεστραμμένων καλωδίων είναι προτιμότερη, καθώς σε περίπτωση αποκοπής του καλωδίου, η πιθανότητα ηλεκτροπληξίας και η πιθανότητα πυρκαγιάς, έναντι της αποκοπής γυμνών αγωγών είναι μειωμένη.

Οι στύλοι που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο διανομής, είναι συνήθως ξύλινοι και τσιμεντένιοι, ενώ πολύ σπανιότερα γίνεται και χρήση μεταλλικών. Η επιλογή αυτή, οφείλεται κυρίως στο χαμηλό τους κόστος και στην ευκολότερη συγκριτικά μεταφορά τους σε δυσπρόσιτες περιοχές.



## Κεφάλαιο 3

# Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Α.Π.Ε.)

### 3.1 Γενικά για τις Α.Π.Ε.

Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Α.Π.Ε.), ορίζουμε τις ενεργειακές πηγές που υπάρχουν σε αφθονία στο φυσικό περιβάλλον. Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι η πρώτη μορφή ενέργειας που χρησιμοποίησε ο άνθρωπος, πριν στραφεί έντονα στη χρήση των ορυκτών καυσίμων. Πρακτικά είναι ανεξάντλητες, η χρήση τους δεν ρυπαίνει το περιβάλλον, ενώ η αξιοποίησή τους περιορίζεται μόνο από την ανάπτυξη αξιόπιστων και οικονομικά αποδεκτών τεχνολογιών, που θα έχουν σαν σκοπό την δέσμευση του δυναμικού τους. Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των τεχνολογιών αυτών εμφανίσθηκε μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1974 και παγιώθηκε μετά τη συνειδητοποίηση των παγκόσμιων σοβαρών περιβαλλοντικών προβλημάτων, την τελευταία δεκαετία. Για πολλές χώρες, οι ΑΠΕ αποτελούν μια εγχώρια πηγή ενέργειας με ευνοϊκές προοπτικές συνεισφοράς στο ενεργειακό τους ισοζύγιο, συμβάλλοντας στη μείωση της εξάρτησης από το ακριβό εισαγόμενο πετρέλαιο και στην ενίσχυση της ασφάλειας του ενεργειακού τους εφοδιασμού. Παράλληλα, συμβάλλουν στη βελτίωση της ποιότητας του περιβάλλοντος, καθώς έχει πλέον διαπιστωθεί ότι ο ενεργειακός τομέας, είναι ο κλάδος που ευθύνεται κατά κύριο λόγο για τη ρύπανση του περιβάλλοντος.

### 3.2 Η αναγκαιότητα στροφής στις Α.Π.Ε. & τα πλεονεκτήματα

Μετά την πετρελαϊκή κρίση της δεκαετίας του '70, το πυρηνικό ατύχημα του Τσέρνομπιλ τη δεκαετία του '80, αλλά και μετά την εμφάνιση της απειλής για καταστροφή του πλανήτη εξαιτίας της ανόδου της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της τρέχουσας δεκαετίας, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας φαίνεται πως αποτελούν υποχρεωτική εναλλακτική και συγχρόνως ρεαλιστική λύση όχι μόνο για το μακρινό μέλλον αλλά

και για το παρόν. Τα τελευταία 20 χρόνια οι τεχνολογίες χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν ξεπεράσει αρκετά τεχνολογικά προβλήματα και σε αρκετές περιπτώσεις έχουν καταφέρει να γίνουν οικονομικά ανταγωνιστικές και να κερδίσουν την εμπιστοσύνη των επιστημόνων. Για παράδειγμα, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή κοστίζει πλέον μόλις το 1/10 του ποσού που κόστιζε την περασμένη δεκαετία, ενώ μέσα στα επόμενα χρόνια το κόστος αυτό θα μειωθεί ακόμα περισσότερο. Δεν πρέπει επίσης να παραβλέπεται το γεγονός, ότι για κάθε KWh ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, αποτρέπεται η έκλυση κατά μέσο όρο ενός κιλού CO<sub>2</sub>, το οποίο επιβαρύνει πολύ την ατμόσφαιρα.

Τα κύρια πλεονεκτήματά τους, αναφέρονται παρακάτω:

- Είναι πρακτικά ανεξάντλητες πηγές ενέργειας, σε αντίθεση με τους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συνεισφέρουν στην ενίσχυση της ενεργειακής ανεξαρτησίας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε εθνικό επίπεδο.
- Είναι γεωγραφικά διεσπαρμένες και οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος. Έτσι, δίνετε η δυνατότητα να καλύπτονται οι ενεργειακές ανάγκες σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας τα συστήματα υποδομής ενώ παράλληλα μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς ενέργειας.
- Δίνουν τη δυνατότητα επιλογής της κατάλληλης μορφής ενέργειας που είναι προσαρμοσμένη στις ανάγκες του χρήστη (π.χ. ηλιακή ενέργεια για θερμότητα χαμηλών θερμοκρασιών έως αιολική ενέργεια για ηλεκτροπαραγωγή), επιτυγχάνοντας πιο ορθολογική χρησιμοποίηση των ενεργειακών πόρων.
- Έχουν συνήθως χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο επιπλέον δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Οι επενδύσεις των ΑΠΕ είναι εντάσεως εργασίας, δημιουργώντας πολλές θέσεις εργασίας ιδιαίτερα σε τοπικό επίπεδο.
- Μπορούν να αποτελέσουν σε πολλές περιπτώσεις πυρήνα για την αναζωογόνηση υποβαθμισμένων, οικονομικά και κοινωνικά, περιοχών και πόλο για την τοπική ανάπτυξη, με την προώθηση επενδύσεων που στηρίζονται στη συμβολή των ΑΠΕ (π.χ. καλλιέργειες θερμοκηπίου με γεωθερμική ενέργεια).
- Είναι φιλικές προς το περιβάλλον και τον άνθρωπο και η αξιοποίησή τους είναι γενικά αποδεκτή από το κοινό.

Παρά τα εξαιρετικά τους πλεονεκτήματα συγκριτικά με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, παρουσιάζουν και ορισμένα χαρακτηριστικά που δυσχεραίνουν την αξιοποίηση και ταχεία ανάπτυξή τους:

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος, ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευτεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή, απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους που μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας, απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους, συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων, παραμένει ακόμη υψηλό.

### 3.3 Οι μορφές των Α.Π.Ε.

Οι μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι:

- ηλιακή ενέργεια, με υποτομείς τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα, τα παθητικά ηλιακά συστήματα και τη φωτοβολταϊκή μετατροπή.
- αιολική ενέργεια.
- υδραυλική ενέργεια, με περιορισμό στα μικρά υδροηλεκτρικά, ισχύος κάτω των 10MW.
- γεωθερμική ενέργεια, υψηλής και χαμηλής ενθαλπίας.
- ενέργεια από βιομάζα, θερμική ή χημική ενέργεια με την παραγωγή βιοκαυσίμων, τη χρήση υπολειμμάτων δασικών εκμεταλλεύσεων και την αξιοποίηση βιομηχανικών αγροτικών (φυτικών και ζωικών) και αστικών αποβλήτων.
- κυματική, παλιρροϊκή και ενέργεια των ωκεανών από τη διαφορά θερμοκρασίας των νερών στην επιφάνεια και σε μεγάλο βάθος.

#### 3.3.1 Ηλιακή ενέργεια

Η ηλιακή ακτινοβολία αξιοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού με δύο τρόπους: με θερμικές και φωτοβολταϊκές εφαρμογές. Η πρώτη είναι η συλλογή της ηλιακής ενέργειας με στόχο την παραγωγή θερμότητας (χρησιμοποιείται κυρίως για τη

θέρμανση του νερού και τη μετατροπή του σε ατμό για την κίνηση τουρμπίνων), ενώ στη δεύτερη εφαρμογή τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν το φως του ήλιου σε ηλεκτρισμό, με τη χρήση φωτοβολταϊκών κυψελών ή συστοιχιών. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε αγροτικές και απομακρυσμένες περιοχές όπου η σύνδεση με το δίκτυο είναι πολύ ακριβή. Αν και όλη η γη δέχεται την ηλιακή ακτινοβολία, η ποσότητά της εξαρτάται κυρίως από τη γεωγραφική θέση, την ημέρα, την εποχή και τη νεφοκάλυψη. Για παράδειγμα, η έρημος δέχεται περίπου το διπλάσιο ποσό ηλιακής ενέργειας από άλλες περιοχές. Στο μεγαλύτερο τμήμα της χώρα μας η ηλιοφάνεια διαρκεί περισσότερες από 2700 ώρες το χρόνο. Στη Δυτική Μακεδονία και την Ήπειρο εμφανίζει τις μικρότερες τιμές κυμαινόμενη από 2200 ως 2300 ώρες, ενώ στη Ρόδο και τη νότια Κρήτη, ξεπερνά τις 3100 ώρες ετησίως.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης της ηλιακής ενέργειας είναι:

- μηδενική ρύπανση
- αθόρυβη λειτουργία
- αξιοπιστία και μεγάλη διάρκεια ζωής
- απεξάρτηση από τροφοδοσία καυσίμων για την παραγωγή της ενέργειας (μπαταρίες)
- δυνατότητα επέκτασης
- μηδενικό κόστος παραγωγής ενέργειας - ελάχιστη συντήρηση

Ενώ τα μειονεκτήματα είναι:

- υψηλό κόστος κατασκευής
- έλλειψη επιδοτήσεων
- προβλήματα στην αποθήκευση

### 3.3.2 Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια δημιουργείται έμμεσα από την ηλιακή ακτινοβολία, γιατί η ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης προκαλεί τη μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από τη μια περιοχή στην άλλη, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό τους ανέμους. Είναι μια ήπια μορφή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον, πρακτικά ανεξάντλητη. Αν υπήρχε η δυνατότητα, με τη σημερινή τεχνολογία, να καταστεί εκμεταλλεύσιμο το συνολικό αιολικό δυναμικό της γης, εκτιμάται ότι η παραγόμενη σε ένα χρόνο ηλεκτρική ενέργεια θα ήταν υπερδιπλάσια από τις ανάγκες της ανθρωπότητας στο ίδιο διάστημα (Αιολική ενέργεια, ΚΑΠΕ 1998). Υπολογίζεται ότι στο 25 % της επιφάνειας της γης, επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1 m/s, σε

ύψος 10 m πάνω από το έδαφος. Όταν οι άνεμοι πνέουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή την τιμή, τότε το αιολικό δυναμικό του τόπου θεωρείται εκμεταλλεύσιμο και οι απαιτούμενες εγκαταστάσεις μπορούν να καταστούν οικονομικά βιώσιμες, σύμφωνα με τα σημερινά δεδομένα. Άλλωστε το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών έχει μειωθεί σημαντικά και μπορεί να θεωρηθεί ότι η αιολική ενέργεια διανύει την "πρώτη" περίοδο ωριμότητας, καθώς είναι πλέον ανταγωνιστική των συμβατικών μορφών ενέργειας. Η χώρα μας διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό και η αιολική ενέργεια μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός ανάπτυξής της. Από το 1982, οπότε εγκαταστάθηκε από τη ΔΕΗ το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο, μέχρι και σήμερα έχουν κατασκευασθεί στην Άνδρο, στην Εύβοια, στη Λήμνο, Λέσβο, Χίο, Σάμο και στην Κρήτη εγκαταστάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο συνολικής ισχύος πάνω από 30MW. Μεγάλο ενδιαφέρον επίσης εκδηλώνει και ο ιδιωτικός τομέας για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα στην Κρήτη, όπου το Υπουργείο Ανάπτυξης έχει εκδώσει άδειες εγκατάστασης για νέα αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος δεκάδων MW. Σήμερα η εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας γίνεται σχεδόν αποκλειστικά με μηχανές που μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική και ονομάζονται ανεμογεννήτριες. Οι ανεμογεννήτριες κατατάσσονται σε δύο βασικές κατηγορίες:

- **Οριζόντιου άξονα**, όπου ο δρομέας είναι τύπου έλικας και ο άξονας μπορεί να περιστρέφεται συνεχώς παράλληλα προς τον άνεμο.
- **Κατακόρυφου άξονα**, όπου ο άξονας παραμένει σταθερός.

Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα σε ποσοστό που αγγίζει το 90%. Η ισχύς τους μπορεί να ξεπερνά τα 500kW και μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας. Έτσι μια συστοιχία πολλών ανεμογεννητριών, που ονομάζεται αιολικό πάρκο, μπορεί να λειτουργήσει σαν μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στη χώρα μας, η συστηματική εκμετάλλευση του πολύ αξιόλογου αιολικού δυναμικού μας θα συμβάλει:

- στην αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση σημαντικών ποσοτήτων συμβατικών καυσίμων, που συνεπάγεται συναλλαγματικά οφέλη.
- σε σημαντικό περιορισμό της ρύπανσης του περιβάλλοντος, αφού έχει υπολογισθεί ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού μιας μόνο ανεμογεννήτριας ισχύος 550 KW σε ένα χρόνο, υποκαθιστά την ενέργεια που παράγεται από την καύση 2.700 βαρελιών πετρελαίου, δηλαδή αποτροπή της εκπομπής 735 περίπου τόνων CO<sub>2</sub> ετησίως καθώς και 2 τόνων άλλων ρύπων.

- στη δημιουργία πολλών νέων θέσεων εργασίας, αφού εκτιμάται ότι για κάθε νέο Μεγαβάτ αιολικής ενέργειας δημιουργούνται 14 νέες θέσεις εργασίας.

Τα ενδεχόμενα προβλήματα από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι ο θόρυβος από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, οι σπάνιες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο ραδιόφωνο, τηλεόραση, τηλεπικοινωνίες, που επιλύονται όμως με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και επίσης πιθανά προβλήματα αισθητικής. Το συνολικό αιολικό δυναμικό της χώρας μας υπολογίζεται σε 10 εκατ. τόνους πετρελαίου ετησίως. Σήμερα, είναι εγκατεστημένες 135 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 25MW και προγραμματίζεται η εγκατάσταση κι άλλων ανεμογεννητριών για την κάλυψη αναγκών ισχύος περίπου 70MW.

### 3.3.3 Υδραυλική ενέργεια

Το νερό στη φύση, όταν βρίσκεται σε περιοχές με μεγάλο υψόμετρο, έχει δυναμική ενέργεια η οποία μετατρέπεται σε κινητική, όταν το νερό ρέει προς χαμηλότερες περιοχές. Με τα υδροηλεκτρικά έργα (υδροταμιευτήρας, φράγμα, κλειστός αγωγός πτώσεως, υδροστρόβιλος, ηλεκτρογεννήτρια, διώρυγα φυγής) γίνεται δυνατή η εκμετάλλευση της ενέργειας του νερού για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο διοχετεύεται στην κατανάλωση με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η μετατροπή της ενέργειας των υδατοπτώσεων με τη χρήση υδραυλικών τουρμπίνων παράγει την υδροηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή ταξινομείται σε υδροηλεκτρική ενέργεια μεγάλης και μικρής κλίμακας. Η υδροηλεκτρική ενέργεια μικρής κλίμακας, διαφέρει σημαντικά από αυτή της μεγάλης, σε ότι αφορά τις επιπτώσεις της στο περιβάλλον. Οι υδροηλεκτρικές μονάδες μεγάλης κλίμακας απαιτούν τη δημιουργία φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών, με σημαντικές επιπτώσεις στο οικοσύστημα και γενικότερα στο άμεσο περιβάλλον.

Τα συστήματα μικρής κλίμακας τοποθετούνται δίπλα σε ποτάμια και κανάλια, με αποτέλεσμα να έχουν λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Υδροηλεκτρικές μονάδες λιγότερες των 30MW χαρακτηρίζονται μικρής κλίμακας και θεωρούνται ανανεώσιμες πηγές. Το γρήγορα κινούμενο νερό οδηγείται μέσα από τούνελ με σκοπό να θέσει σε λειτουργία τις τουρμπίνες, παράγοντας έτσι μηχανική ενέργεια. Μια γεννήτρια μετατρέπει αυτή την ενέργεια σε ηλεκτρική. Σε αντίθεση με το ότι συμβαίνει με τα ορυκτά καύσιμα, το νερό δεν αχρηστεύεται κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς.

Φυσικά, μόνο σε περιοχές με σημαντικές υδατοπτώσεις, πλούσιες πηγές και κατάλληλη γεωλογική διαμόρφωση είναι δυνατόν να κατασκευασθούν υδατοταμιευτήρες. Συνήθως η ενέργεια που τελικώς παράγεται με τον τρόπο αυτό, χρησιμοποιείται μόνο συμπληρωματικά με άλλες συμβατικές πηγές ενέργειας, σε ώρες αιχμής. Στη χώρα μας η υδροηλεκτρική ενέργεια ικανοποιεί περίπου το 10% των ενεργειακών μας αναγκών.

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση της υδραυλικής ενέργειας είναι :

- Οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί, είναι δυνατό να τεθούν σε λειτουργία αμέσως μόλις ζητηθεί επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια, σε αντίθεση με τους θερμικούς σταθμούς (γαιανθράκων, πετρελαίου), που απαιτούν χρόνο προετοιμασίας
- Είναι μία "καθαρή" και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, με τα γνωστά πλεονεκτήματα (εξοικονόμηση συναλλάγματος, φυσικών πόρων, προστασία περιβάλλοντος)
- Μέσω των υδροταμιευτήρων δίνεται η δυνατότητα να ικανοποιηθούν και άλλες ανάγκες, όπως ύδρευση, άρδευση, ανάσχεση χειμάρρων, δημιουργία υγροτόπων, αναψυχή, αθλητισμός.

Τα μειονεκτήματα που συνήθως εμφανίζονται είναι:

- Το μεγάλο κόστος κατασκευής φραγμάτων και εξοπλισμού των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και η μεγάλη χρονική διάρκεια απαιτείται μέχρι την αποπεράτωση του έργου
- Η έντονη περιβαλλοντική αλλοίωση στην περιοχή του ταμιευτήρα (ενδεχόμενη μετακίνηση πληθυσμών, υποβάθμιση περιοχών, αλλαγή στη χρήση γης, στη χλωρίδα και πανίδα περιοχών αλλά και του τοπικού κλίματος, αύξηση σεισμικής επικινδυνότητας, κ.ά.). Η διεθνής πρακτική σήμερα προσανατολίζεται στην κατασκευή μικρών φραγμάτων.

#### 3.3.4 Γεωθερμική ενέργεια

Γεωθερμία ή Γεωθερμική ενέργεια, ονομάζουμε τη φυσική θερμική ενέργεια της Γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. Είναι μια ήπια και πρακτικά ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή, που μπορεί με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες να καλύψει ανάγκες θέρμανσης και ψύξης, αλλά και σε ορισμένες περιπτώσεις να παράγει ηλεκτρική ενέργεια. Η γεωθερμία προσφέρει ενέργεια χαμηλού κόστους, ενώ δεν επιβαρύνει το περιβάλλον με εκπομπές βλαβερών ρύπων. Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού ή ατμού, ποικίλει από περιοχή σε περιοχή, ενώ συνήθως κυμαίνεται από 25°C μέχρι 360°C. Στις περιπτώσεις που τα γεωθερμικά ρευστά έχουν υψηλή θερμοκρασία (πάνω από 150°C), η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μετάδοση θερμότητας στην γεωθερμία, πραγματοποιείται με δύο τρόπους:

- Με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια με ρυθμό 0,04 - 0,06 W/m<sup>2</sup>.
- Με ρεύματα μεταφοράς, που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων.

Μεγάλη σημασία για τον άνθρωπο, έχει η αξιοποίηση της γεωθερμικής ενέργειας για την κάλυψη αναγκών του, καθώς είναι μια πρακτικά ανεξάντλητη πηγή ενέργειας. Ανάλογα με το θερμοκρασιακό της επίπεδο, μπορεί να έχει διάφορες χρήσεις. Η κυριότερη θερμική χρήση της γεωθερμικής ενέργειας παγκοσμίως, αφορά στη θέρμανση θερμοκηπίων. Χρησιμοποιείται ακόμα στις υδατοκαλλιέργειες, όπου εκτρέφονται υδρόβιοι οργανισμοί αλλά και για τηλεθέρμανση, δηλαδή θέρμανση συνόλου κτιρίων, οικισμών, χωριών ή και πόλεων. Σήμερα στην Ελλάδα, η εκμετάλλευση της γεωθερμίας γίνεται αποκλειστικά για χρήση της σε θερμικές εφαρμογές, οι οποίες είναι εξίσου σημαντικές με την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Ακόμα, λόγω του πλούσιου σε γεωθερμική ενέργεια υπεδάφους της χώρας μας, κυρίως κατά μήκος του ηφαιστειακού τόξου του Νοτίου Αιγαίου (Μήλος, Νίσυρος, Σαντορίνη), μπορεί να έχει ευρεία εφαρμογή για τη θερμική αφαλάτωση του θαλασσινού νερού με στόχο την απόληψη πόσιμου, κυρίως στις άνυδρες νησιωτικές και παραθαλάσσιες περιοχές. Μία τέτοια εφαρμογή έχει χαμηλότερο κόστος από εκείνο που απαιτείται για τον εφοδιασμό των περιοχών αυτών με πόσιμο νερό, μέσω υδροφόρων πλοίων.

### 3.3.5 Βιομάζα

Με τον όρο βιομάζα, χαρακτηρίζουμε οποιοδήποτε υλικό παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς (όπως είναι το ξύλο και άλλα προϊόντα του δάσους, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων κ.λπ.) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Η ενέργεια που είναι δεσμευμένη στις φυτικές ουσίες προέρχεται από τον ήλιο. Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα φυτά μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα. Οι ζωικοί οργανισμοί προσλαμβάνουν αυτή την ενέργεια με την τροφή τους και αποθηκεύουν ένα μέρος της. Αυτή την ενέργεια αποδίδει τελικά η βιομάζα μετά την επεξεργασία και τη χρήση της, ενώ αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γιατί στην πραγματικότητα είναι αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια που δεσμεύτηκε από τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση. Η βιομάζα είναι η πιο παλιά και διαδεδομένη ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Όλα τα παραπάνω υλικά, που άμεσα ή έμμεσα προέρχονται από το φυτικό κόσμο αλλά και τα υγρά απόβλητα και το μεγαλύτερο μέρος από τα αστικά απορρίμματα (υπολείμματα τροφών, χαρτί κ.ά.) των πόλεων και των βιομηχανιών μπορούν να μετατραπούν σε ενέργεια.

Για τις διάφορες τελικές χρήσεις της βιομάζας υιοθετούνται διαφορετικοί όροι, όπως "βιοισχύς" ο οποίος περιγράφει τα συστήματα που χρησιμοποιούν πρώτες ύλες βιομάζας αντί των ορυκτών καυσίμων (φυσικό αέριο, άνθρακα) για ηλεκτροπαραγωγή, ή όπως "βιοκαύσιμα" ο οποίος αναφέρεται κυρίως στα υγρά καύσιμα μεταφορών που υποκαθιστούν πετρελαϊκά προϊόντα όπως βενζίνη ή ντίζελ. Βασικό πλεονέκτημα της βιομάζας είναι ότι είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας και ότι παρέχει ενέργεια αποθηκευμένη με χημική μορφή. Η αξιοποίηση της μπορεί να γίνει με μετατροπή της σε μεγάλη ποικιλία προϊόντων με διάφορες μεθόδους και τη χρήση σχετικά απλής τε-



χνολογίας. Σαν πλεονέκτημά της καταγράφεται και το ότι κατά την παραγωγή και την μετατροπή της, δεν δημιουργούνται οικολογικά και περιβαλλοντολογικά προβλήματα. Από την άλλη, σαν μορφή ενέργειας η βιομάζα χαρακτηρίζεται από πολυμορφία, χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο, σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, λόγω χαμηλής πυκνότητας και/ή υψηλής περιεκτικότητας σε νερό, εποχικότητα, μεγάλη διασπορά, κλπ. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνεπάγονται πρόσθετες, σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, δυσκολίες στη συλλογή, μεταφορά και αποθήκευσή της. Σαν συνέπεια το κόστος μετατροπής της σε πιο εύχρηστες μορφές ενέργειας παραμένει υψηλό.

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση της βιομάζας είναι:

- Η καύση της βιομάζας έχει μηδενικό ισοζύγιο διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) και δεν συνεισφέρει στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, αφού οι ποσότητες του διοξειδίου του άνθρακα ( $\text{CO}_2$ ) που απελευθερώνονται κατά την καύση της βιομάζας, δεσμεύονται πάλι από τα φυτά για τη δημιουργία της βιομάζας.
- Η μηδαμινή ύπαρξη του θείου στη βιομάζα, συμβάλλει σημαντικά στον περιορισμό των εκπομπών του διοξειδίου του θείου ( $\text{SO}_2$ ) που είναι υπεύθυνο για την όξινη βροχή.
- Εφόσον η βιομάζα είναι εγχώρια πηγή ενέργειας, η αξιοποίησή της σε ενέργεια συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της εξάρτησης από εισαγόμενα καύσιμα και βελτίωση του εμπορικού ισοζυγίου, στην εξασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού και στην εξοικονόμηση του συναλλάγματος.
- Η ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας σε μια περιοχή, αυξάνει την απασχόληση στις αγροτικές περιοχές με τη χρήση εναλλακτικών καλλιεργειών (διάφορα είδη ελαιοκράμβης, σόργο, καλάμι) τη δημιουργία εναλλακτικών αγορών για τις παραδοσιακές καλλιέργειες (ηλίανθος κ.ά.), και τη συγκράτηση του πληθυσμού στις εστίες τους, συμβάλλοντας έτσι στη κοινωνικοοικονομική ανάπτυξη της περιοχής. Μελέτες έχουν δείξει ότι η παραγωγή υγρών βιοκαυσίμων έχει θετικά αποτελέσματα στον τομέα της απασχόλησης τόσο στον αγροτικό όσο και στο βιομηχανικό χώρο.

Τα μειονεκτήματα από τη χρήση της βιομάζας είναι:

- Ο αυξημένος όγκος και η μεγάλη περιεκτικότητα σε υγρασία, σε σχέση με τα ορυκτά καύσιμα, δυσχεραίνουν την ενεργειακή αξιοποίηση της βιομάζας.
- Η μεγάλη διασπορά και η εποχιακή παραγωγή της βιομάζας, δυσκολεύουν την συνεχή τροφοδοσία με πρώτη ύλη των μονάδων ενεργειακής αξιοποίησης της βιομάζας.
- Βάση των παραπάνω παρουσιάζονται δυσκολίες κατά τη συλλογή, μεταφορά, και αποθήκευση της βιομάζας που αυξάνουν το κόστος της ενεργειακής αξιοποίησης.

- Οι σύγχρονες και βελτιωμένες τεχνολογίες μετατροπής της βιομάζας απαιτούν υψηλό κόστος εξοπλισμού, συγκρινόμενες με αυτό των συμβατικών καυσίμων.

### 3.3.6 Κυματική, παλιρροϊκή και ενέργεια των ωκεανών

Η θάλασσα από τον Μεσαίωνα (1200-1500 μ.Χ.), έχει θεωρηθεί ως πηγή ενέργειας αφού οι αγρότες παγίδευαν το θαλάσσιο νερό στις λίμνες μύλων, για να το χρησιμοποιήσουν στους υδρόμυλους δύναμης. Κατά τη διάρκεια των τελευταίων πενήντα ετών, οι μηχανικοί έχουν αρχίσει να εξετάζουν την παλιρροϊκή δύναμη και τη δύναμη των κυμάτων σε μια μεγαλύτερη, βιομηχανική κλίμακα. Εντούτοις, μέχρι τα τελευταία έτη, ιδιαίτερα στην Ευρώπη, η δύναμη των κυμάτων και η παλιρροϊκή δύναμη, θεωρήθηκαν αντισυμβατικές. Αν και μερικά πιλοτικά έργα έδειξαν ότι η ενέργεια θα μπορούσε να παραχθεί, κάποια άλλα επίσης έδειξαν ότι, ακόμα κι αν το κόστος για την παράγωγή της ενέργειας δεν εξεταστεί, υπάρχει ένα πραγματικό πρόβλημα, που αφορά την ικανότητα του εξοπλισμού να αντέξει το εξαιρετικά σκληρό θαλάσσιο περιβάλλον.

Πριν από είκοσι χρόνια, η αντίστοιχη βιομηχανία παραγωγής ενέργειας από αέρα αντιμετώπιζε παρόμοια προβλήματα, αλλά με την υποστήριξη των εκάστοτε κυβερνήσεων στους κατασκευαστές κατάφεραν να ανταγωνιστούν τη πράσινη δύναμη. Η ενεργειακή βιομηχανία κυμάτων είναι τώρα σε παρόμοιο στάδιο ανάπτυξης, αλλά με τη δημόσια υποστήριξη και κάποια δημόσια χρήματα, θα ξεπεραστούν οι όποιες αποτυχίες στον τρόπο παραγωγής, όπως γίνεται σε κάθε παρόμοια αναπτυξιακή τεχνική. Με την εισαγωγή νέων πηγών ενέργειας στην αγορά, υπάρχει η προσδοκία ότι οι συνθήκες για τηνσιμοποίηση της δύναμης κυμάτων θα ωριμάσει, έτσι ώστε να έχει σημαντική συμβολή στην κάλυψη των ενεργειακών μας αναγκών.

Προς το τέλος της δεκαετίας του '90, έχει γίνει σαφές ότι η τεχνολογία έχει προωθηθεί σε σημείο όπου η αξιόπιστη και φτηνή ηλεκτρική ενέργεια από τους ωκεανούς γίνεται μια πραγματικότητα. Το Ηνωμένο Βασίλειο, παρήγαγε την πρώτη ηλεκτρική ενέργεια από θαλάσσια και παλιρροϊκά κύματα με την οποία εφοδίασε τον εθνικό του δίκτυο το έτος 2000, αναγκάζοντας και άλλες χώρες να σκεφτούν σοβαρά να πράξουν κάτι ανάλογο.

Οι ωκεανοί μπορούν να μας προσφέρουν τεράστια ποσά ενέργειας. Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι για να εκμεταλλευτούμε την ενέργεια της θάλασσας:

- από τα κύματα
- από τις παλίρροιες (μικρές και μεγάλες)
- από τις θερμοκρασιακές διαφορές του νερού

Η κινητική ενέργεια των κυμάτων μπορεί να περιστρέφει την τουρμπίνα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Η ανυψωτική κίνηση του κύματος πιέζει τον αέρα προς τα πάνω,

μέσα στο θάλαμο και θέτει σε περιστροφική κίνηση την τουρμπίνα, έτσι ώστε η γεννήτρια να παράγει ρεύμα. Αυτός είναι ένας μόνο τύπος εκμετάλλευσης της ενέργειας των κυμάτων. Η παραγόμενη ενέργεια είναι σε θέση να καλύψει τις ανάγκες μιας οικίας, ενός φάρου, κ.λπ.

Η αξιοποίηση της παλιρροϊκής ενέργειας χρονολογείται από εκατοντάδες χρόνια πριν, αφού με τα νερά που δεσμεύονταν στις εκβολές ποταμών από την παλίρροια, κινούνταν νερόμυλοι. Ο τρόπος είναι απλός: Τα εισερχόμενα νερά της παλίρροιας στην ακτή κατά την πλημμυρίδα μπορούν να παγιδευτούν σε φράγματα, οπότε κατά την άμπωτη τα αποθηκευμένα νερά ελευθερώνονται και κινούν υδροστρόβιλο, όπως στα υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Τα πλέον κατάλληλα μέρη για την κατασκευή σταθμών ηλεκτροπαραγωγής, είναι οι στενές εκβολές ποταμών. Η διαφορά μεταξύ της στάθμης του νερού κατά την άμπωτη και την πλημμυρίδα, πρέπει να είναι τουλάχιστον 10 μέτρα. Σήμερα οι μικροί σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το θαλασσινό νερό, βρίσκονται σε πειραματικό στάδιο. Η ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να παραχθεί, είναι ικανή να καλύψει τις ανάγκες μιας πόλης μέχρι και 240 χιλιάδων κατοίκων. Ο πρώτος παλιρροϊκός σταθμός κατασκευάστηκε στον ποταμό La Rance στις ακτές της Βορειοδυτικής Γαλλίας το 1962 και οι υδροστρόβιλοί του μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καθώς το νερό κινείται κατά τη μια ή την άλλη κατεύθυνση. Άλλοι τέτοιοι σταθμοί λειτουργούν στη Ρωσία, στη θάλασσα Barents και στον κόλπο Fuhdy της Νέας Σκωτίας.

Η θερμική ενέργεια των ωκεανών, μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί με την εκμετάλλευση της διαφοράς θερμοκρασίας μεταξύ του θερμότερου επιφανειακού νερού και του ψυχρότερου νερού του πυθμένα. Η διαφορά αυτή, πρέπει να είναι τουλάχιστον 3,5°C.

Τα πλεονεκτήματα από τη χρήση της ενέργειας των ωκεανών είναι:

- καθαρή και ανεξάντλητη, εφόσον είναι ανανεώσιμη πηγή ενέργειας
- σχετικά μικρό κόστος κατασκευής των απαιτούμενων εγκαταστάσεων
- μεγάλη απόδοση (40-70kW ανά μέτρο μετώπων κύματος)
- δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση από το άφθονο θαλασσινό νερό, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο.

Στα μειονεκτήματα της ενέργειας των ωκεανών, αναφέρεται το κόστος μεταφοράς της ενέργειας στη στεριά.

### 3.4 Διείσδυση Α.Π.Ε. σε Σ.Η.Ε.

Η μεγάλη ανάπτυξη του τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, έχει συντελέσει αρκετά στη μείωση όχι μόνο του κόστους παραγωγής ενέργειας, αλλά και των

ρύπων που εκλύονται από τις καύσεις που διεξάγονται στις θερμικές μονάδες κατά τη διαδικασία της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίοι είναι αρκετά επιβλαβείς για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Η αύξηση της χρήσης των ΑΠΕ, έχει σημαντική επίδραση όμως τόσο στο δίκτυο διανομής, στο σύστημα μεταφοράς, όσο και στο σύστημα παραγωγής ενέργειας, καθώς μπορεί να προκύψουν προβλήματα λόγω μεγάλης διείσδυσης των ΑΠΕ στο δίκτυο.

Τα προβλήματα αυτά αφορούν κυρίως:

1. Την πρόβλεψη της παραγωγής
2. Το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα
3. Το σχεδιασμό του δικτύου μεταφοράς και διανομής

#### **Προβλήματα στη διαδικασία της πρόβλεψης**

Ένα βασικό πρόβλημα το οποίο ανακύπτει από τη μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο, σχετίζεται με την πρόβλεψη της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Όσο περισσότερο ένα σύστημα βασίζεται στην ικανοποίηση της ζήτησης του φορτίου από πηγές με μη σταθερή απόδοση παραγωγής, τόσο πιο δύσκολη γίνεται η ρύθμισή τους. Οι μέθοδοι πρόβλεψης φυσικά ολοένα και βελτιώνονται, έχουν όμως ακόμα σημαντικά ποσοστά σφάλματος. Για παράδειγμα, για την αιολική παραγωγή η πρόβλεψη σε χρονικό ορίζοντα 24 έως 26 ώρες, έχει σήμερα ένα σφάλμα που μπορεί να φτάσει και να ξεπεράσει το 30% της πραγματικής παραγωγής. Αντίθετα, η ακρίβεια της πρόβλεψης αυξάνει σε μικρότερους χρονικούς ορίζοντες πρόβλεψης. Συνεπώς επιβάλλεται η χρήση αξιόπιστων μετεωρολογικών δεδομένων και η γεωγραφική διασπορά των ΑΠΕ ώστε να μειωθεί το πρόβλημα στην ακρίβεια της πρόβλεψης.

#### **Προβλήματα στη διαδικασία ένταξης των μονάδων**

Σημαντική επίδραση επίσης, έχει η μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο, στην διαδικασία ένταξης των μονάδων στο σύστημα.

Οι κυριότεροι περιορισμοί που προκύπτουν σε σχέση με την οικονομική λειτουργία σε συνθήκες μεγάλης διείσδυσης ΑΠΕ είναι οι εξής:

- **Στρεφόμενη εφεδρεία:** απαιτείται η συνολική διαθέσιμη ισχύς των συγχρονισμένων στο δίκτυο μονάδων, να είναι μεγαλύτερη του φορτίου, ώστε να είναι δυνατή η αναπλήρωση της απώλειας λόγω μειωμένης παραγωγής από τις ΑΠΕ.
- **Υποχρεωτική λειτουργία μονάδων:** λειτουργικοί λόγοι, όπως είναι η στήριξη της τάσης του δικτύου, η ευστάθεια του συστήματος, η περιορισμένη μεταφορική ικανότητα του συστήματος μεταφοράς, επιβάλλουν την υποχρεωτική λειτουργία

κάποιων μονάδων, ιδίως όταν η επίδραση των ΑΠΕ στη λειτουργία του ΣΗΕ είναι αυξημένη.

#### Προβλήματα στη διαδικασία της μεταφοράς

Τέλος, η αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ επιδρά και στο δίκτυο μεταφοράς. Ο λόγος που οφείλεται αυτό, είναι το γεγονός ότι τα ηλεκτρικά δίκτυα σχεδιάστηκαν για να μεταφέρουν την ενέργεια με μονοκατευθυντική ροή. Από το σύστημα παραγωγής προς τους καταναλωτές. Με τη διείσδυση όμως των ΑΠΕ στο δίκτυο, οι μικροί καταναλωτές μπορούν να παράγουν ενέργεια είτε από ανεμογεννήτριες, είτε από φωτοβολταϊκά, άρα να τροφοδοτούν πλέον το σύστημα με αντίθετη φορά από ότι είχε αρχικά σχεδιαστεί το δίκτυο.

Κάποιες από τις επιπτώσεις αυτού του προβλήματος είναι οι ακόλουθες:

- Επιπτώσεις στην ευστάθεια του συστήματος
- Τροποποίηση της προστασίας του δικτύου
- Αύξηση των παραγόμενων αρμονικών στο δίκτυο, από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος των μονάδων ΑΠΕ
- Μεταβολή των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου και αλλαγή του επιπέδου βραχυκύκλωσης
- Αλλαγές στο επίπεδο και την ποιότητα των δικτύων

Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι επιπτώσεις τις αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ στο δίκτυο μεταφοράς, πρέπει να γίνεται ρύθμιση της τάσης και της παροχής έργου ισχύος. Ακόμα πρέπει να παρακολουθείται το φορτίο και να γίνεται ρύθμιση του φορτίου και της συχνότητας. Γενικότερα, για την ομαλότερη ενσωμάτωση της υψηλής διείσδυσης των ΑΠΕ, απαιτούνται έργα ενίσχυσης του συστήματος μεταφοράς με την εφαρμογή σύγχρονων τεχνολογιών. Αντίθετα, ένα θετικό της υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ στο δίκτυο μεταφοράς, είναι ότι επειδή πολλές εγκαταστάσεις ΑΠΕ βρίσκονται κοντά στους χρήστες, μειώνονται οι απώλειες μεταφοράς.

Να σημειώσουμε ότι η αβεβαιότητα έχει σημαντικά μεγαλύτερη επίδραση σε αυτόνομα συστήματα, όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε περίπτωση υποεκτίμησης του φορτίου ή υπερεκτίμησης της παραγωγής από ΑΠΕ, μπορεί να οδηγηθούμε σε προσωρινή διακοπή τροφοδοσίας κάποιων καταναλωτών, ενώ σε αντίθετη περίπτωση, μπορεί να οδηγηθούμε ακόμα και σε απόρριψη παραγόμενης ενέργειας από ΑΠΕ, ειδικά σε συστήματα με υψηλή διείσδυση. Και στις δύο περιπτώσεις, λόγω της άμεσης ανάγκης για λήψη μέτρων με σκοπό τον περιορισμό του προβλήματος, θα οδηγηθούμε σε αντιοικονομική λειτουργία του συστήματος.



## Κεφάλαιο 4

# Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης

### 4.1 Γενική περιγραφή συστήματος

Το Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης, αποτελείται από 3 σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

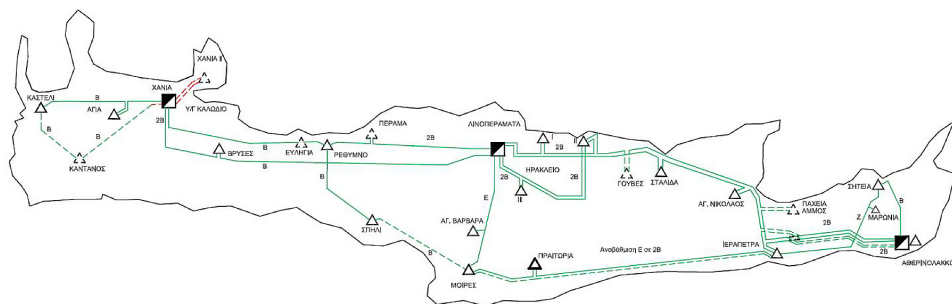
Οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται:

1. Στο νομό Χανίων στην περιοχή Ξυλοκαμάρα
2. Στο νομό Ηρακλείου στην περιοχή Λινοπεράματα
3. Στο νομό Λασιθίου στην περιοχή Αθρινόλακκος

Οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας του δικτύου της Κρήτης, περιλαμβάνουν συνολικά τα παρακάτω είδη συμβατικών μονάδων:

- Αεριοστροβιλικές Μονάδες (Μονάδες φορτίου αιχμής)
- Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (Μονάδες βάσης, κυμαινόμενου φορτίου)
- Ατμοστροβιλικές Μονάδες (Μονάδες βάσης)
- Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου (Μονάδες βάσης, κυμαινόμενου φορτίου)

Σε κάθε σταθμό παραγωγής ανάλογα τα είδη συμβατικών μονάδων που χρησιμοποιούνται, παρατηρούνται διαφορές στην ονομαστική και καθαρή ισχύ των μονάδων, στα τεχνικά ελάχιστα τους, στον τύπο καύσιμης ύλης που χρησιμοποιούν, καθώς και στους χρόνους εκκίνησης και ρύθμισης τους. Ακόμα σημαντικές είναι και οι διαφοροποιήσεις των μονάδων όσον αφορά το λειτουργικό κόστος και το κόστος εκκίνησής τους.



Σχήμα 4.1: Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη

ΥΠΟΜΝΗΜΑ		
ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΟΙ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
		ΘΕΡΜΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΙ ΣΤΑΘΜΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
		ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150KV ή 66KV
		ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150KV ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ
		ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150KV ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ
		ΥΠΟΓΕΙΟ ΚΑΛΩΔΙΟ 150 kV
Ε : ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150KV ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΕΛΑΦΡΟΥ ΤΥΠΟΥ Β : ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150KV ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΒΑΡΕΩΣ ΤΥΠΟΥ 2Β : ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150KV ΔΙΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΒΑΡΕΩΣ ΤΥΠΟΥ Ζ : ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ 150KV ΑΠΛΟΥ ΚΥΚΛΩΜΑΤΟΣ ΜΕ ΑΓΩΓΟΥΣ ΤΥΠΟΥ ACSS		
ΣΥΣΤΗΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ - ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΝΗΣΟΥ ΚΡΗΤΗΣ		
ΔΕΔΔΗΕ Α.Ε. ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΝΗΣΙΩΝ		

Σχήμα 4.2: Υπόμνημα συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης

## 4.2 Τα χαρακτηριστικά του δικτύου της Κρήτης

Το δίκτυο της Κρήτης αποτελείται συνολικά από 11 αεριοστροβιλικές μονάδες, 8 ατμοστροβιλικές μονάδες, 6 μηχανές εσωτερικής καύσης (ντίζελ) και 1 μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του ΣΗΕ ανέρχεται στα 803MW, ενώ το μεγαλύτερο μέρος αυτής, σχεδόν το μισό (43%), προέρχεται από το σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκεται στο Νομό Χανίων και συγκεκριμένα στην περιοχή Ξυλοκαμάρια. Ο σταθμός αυτός έχει δυνατότητα παραγωγής 348MW και περιλαμβάνει τις περισσότερες αεριοστροβιλικές μονάδες του συστήματος από τις οποίες, οι έξι λειτουργούν αυτόνομα, ενώ άλλες δύο λειτουργούν συνδυασμένα με μια ατμοηλεκτρική μονάδα (λειτουργία Συνδυασμένου Κύκλου).

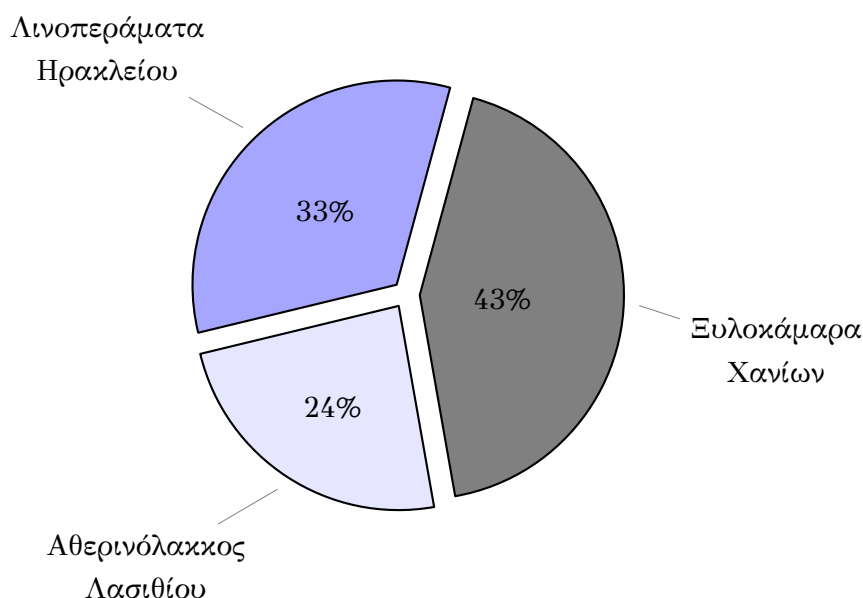
Οι αεριοστροβιλικές μονάδες είναι μονάδες μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος και χρησιμοποιούνται ως μονάδες αιχμής. Πιο συγκεκριμένα οι αεριοστροβιλικές μονάδες του σταθμού στην Ξυλοκαμάρια έχουν συνολική ονομαστική ισχύ της τάξης των 216 MW, ενώ η μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου είναι η μεγαλύτερη θερμική μονάδα παραγωγής της Κρήτης και με τη συνεχή λειτουργία της, καλύπτει το μεγαλύτερο ποσοστό ζήτησης φορτίου του συστήματος.



Τοποθεσία Σταθμού	Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Ευλοκαμάρα Χανίων	348
Λινοπεράματα Ηρακλείου	265
Αθερινόλακκος Λασιθίου	190

Πίνακας 4.1: Συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανά σταθμό παραγωγής

Οι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκονται στους Νομούς Ηρακλείου και Λασιθίου, έχουν δυνατότητα παραγωγής 265 MW και 190 MW αντίστοιχα, καλύπτοντας το υπόλοιπο 57% της παραγωγής του ΣΗΕ της Κρήτης.



Σχήμα 4.3: Ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος δικτύου ανά σταθμό παραγωγής

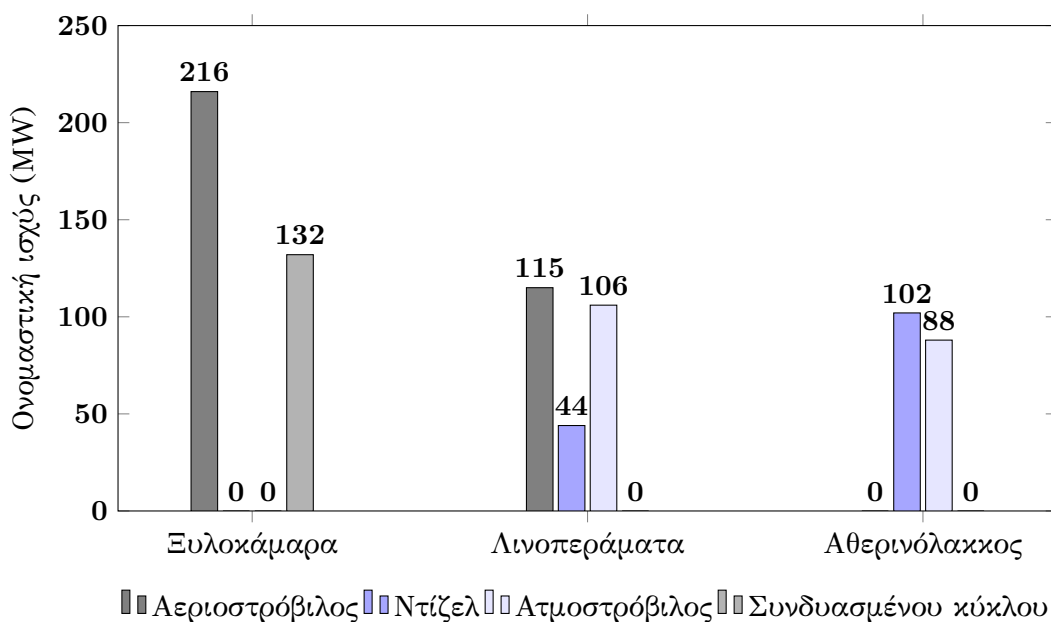
Αναλυτικά οι θερμικές μονάδες που περιλαμβάνει κάθε σταθμός παραγωγής του ΣΗΕ της Κρήτης, φαίνονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Τοποθεσία Σταθμού	Αεριοστρόβιλοι	Ατμοστρόβιλοι	Ντίζελ	Συνδυασμένου Κύκλου
Ευλοκαμάρα Χανίων	6	0	0	1
Λινοπεράματα Ηρακλείου	5	6	4	0
Αθερινόλακκος Λασιθίου	0	2	2	0

Πίνακας 4.2: Είδος θερμικών μονάδων ανά σταθμό παραγωγής

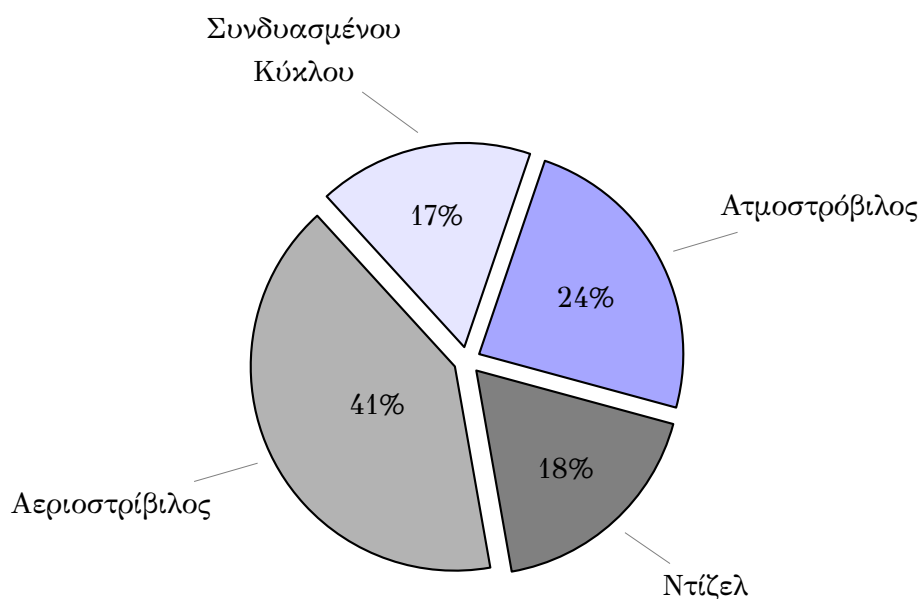
Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζεται η συνολική ονομαστική ισχύς σε κάθε

σταθμό παραγωγής του ΣΗΕ της Κρήτης, ανάλογα με το είδος της θερμικής μονάδας.



Σχήμα 4.4: Ποσοστό εγκατεστημένης ισχύος δικτύου ανά σταθμό παραγωγής

Όπως παρατηρούμε στο γράφημα που ακολουθεί, το μεγαλύτερο ποσοστό της εγκατεστημένης ισχύος του ΣΗΕ της Κρήτης αποτελείται από τις αεριοστροβιλικές μονάδες. Έπειτα σημαντικό ποσοστό καταλαμβάνουν και οι ατμοστροβιλικές μονάδες, ενώ ακολουθούν η μονάδα συνδυασμένου κύκλου και οι μηχανές εσωτερικής καύσης (ντίζελ).



Σχήμα 4.5: Ποσοστό ονομαστικής ισχύος δικτύου ανά είδος μονάδας

### 4.3 Αναλυτικά στοιχεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

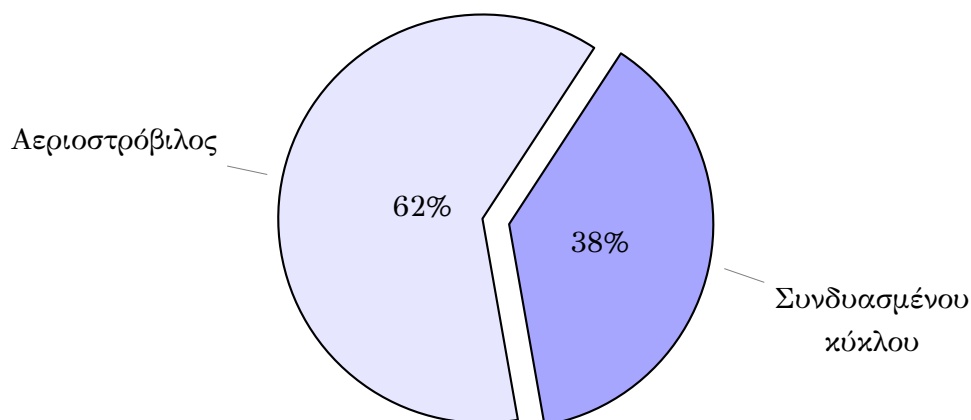
#### 4.3.1 Σταθμός Παραγωγής ενέργειας Ξυλοκαμάρας Χανίων

Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Νομού Χανίων, βρίσκεται 6 χιλιόμετρα ανατολικά της πόλης των Χανίων στην περιοχή Ξυλοκαμάρα. Διαθέτει μια μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου η οποία αποτελείται από δύο αεριοστροβιλικές μονάδες και μία ατμοηλεκτρική μονάδα και ακόμα 6 αεριοστροβιλικές μονάδες συνολικής ονομαστικής ισχύος 216MW.

A	Τύπος Μονάδας	Ονομαστική Ισχύς (MW)	Καθαρή Ισχύς (MW)	Τεχνικό Ελάχιστο (MW)	Καύσιμο
1	Συνδ. κύκλου	132	126	35	Ντίζελ
2	Αεριοστρόβιλος	16	14	3	Ντίζελ
3	Αεριοστρόβιλος	24	20	3	Ντίζελ
4	Αεριοστρόβιλος	30	28	5	Ντίζελ
5	Αεριοστρόβιλος	59	58	10	Ντίζελ
6	Αεριοστρόβιλος	59	58	10	Ντίζελ
7	Αεριοστρόβιλος	28	28	5	Ντίζελ

Πίνακας 4.3: Χαρακτηριστικά παραγωγής θερμικών μονάδων Ξυλοκαμάρας Χανίων

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στον σταθμό παραγωγής της Ξυλοκαμάρας είναι 348MW με καθαρή ισχύ που φτάνει τα 314MW. Το καύσιμο που χρησιμοποιείται σε όλες της μονάδες του σταθμού είναι το ντίζελ.



Σχήμα 4.6: Ποσοστό ονομαστικής ισχύος σταθμού Λινοπεραμάτων Ηρακλείου ανά είδος μονάδας

Έχει σχετικά υψηλό λειτουργικό κόστος, γι' αυτό και οι μονάδες του, εκτός της

μονάδας συνδυασμένου κύκλου, χρησιμοποιούνται ως μονάδες κυμαινόμενου φορτίου ή αιχμής. Οι παράμετροι, λειτουργικού κόστους, κόστους καυσίμου και εκκίνησης των μονάδων, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

A	Constcoeffi (Kg-lt/h)	Lincoeffi (Kg/MWh)	Sqcoeffi (Kg/MWh <sup>2</sup> )	Cubcoeffi (Kg/MWh <sup>3</sup> )	Fuel Price (€/Kg-lt)	Startup Cost (€)
1	5120,00	145,64	0,0100	0,0010	0,6962	440,01
2	2170,00	267,00	0,0100	0,0000	0,6962	99,00
3	2865,00	219,00	0,0100	0,0000	0,6962	1300,00
4	3757,00	275,00	0,0100	0,0000	0,6962	400,00
5	5000,00	227,00	0,0100	0,0010	0,6962	0,10
6	5000,00	227,00	0,0100	0,0010	0,6962	0,10
7	1675,80	196,29	0,3605	0,0010	0,6962	858,00

Πίνακας 4.4: Παράμετροι κόστους θερμικών μονάδων Ξυλοκαμάρας Χανίων

Στον πίνακα που ακολουθεί περιλαμβάνονται οι χρονικοί περιορισμοί εκκίνησης και τερματισμού λειτουργίας των θερμικών μονάδων του σταθμού.

A	Minimum Up - Time (MUT)	Minimum Down - Time (MDT)
1	2	2
2	2	2
3	2	2
4	2	2
5	2	2
6	2	2
7	2	2

Πίνακας 4.5: Χρονικοί περιορισμοί θερμικών μονάδων Ξυλοκαμάρας Χανίων

#### 4.3.2 Σταθμός Παραγωγής ενέργειας Λινοπεραμάτων Ηρακλείου

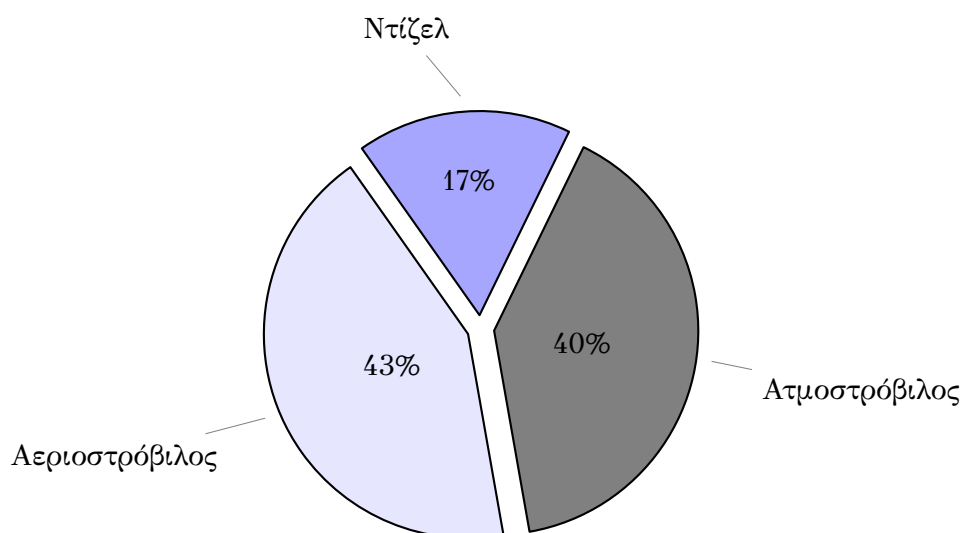
Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Νομού Ηρακλείου, βρίσκεται 6 χιλιόμετρα δυτικά της πόλης του Ηρακλείου στην περιοχή Λινοπεράματα. Διαθέτει 5 αεριοστροβιλικές μονάδες συνολικής ονομαστικής ισχύος 115MW, 4 μηχανές εσωτερικής καύσης (ντίζελ) συνολικής ονομαστικής ισχύος 44MW και 6 ατμοστροβιλικές μονάδες συνολικής ονομαστικής ισχύος 106MW.

### 4.3 Αναλυτικά στοιχεία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

A	Τύπος Μονάδας	Ονομαστική Ισχύς (MW)	Καθαρή Ισχύς (MW)	Τεχνικό Ελάχιστο (MW)	Καύσιμο
8	Ατμοστρόβιλος	6	6	4	Μαζούτ
9	Ατμοστρόβιλος	14	14	8	Μαζούτ
10	Ατμοστρόβιλος	14	14	8	Μαζούτ
11	Ατμοστρόβιλος	24	24	18	Μαζούτ
12	Ατμοστρόβιλος	24	24	18	Μαζούτ
13	Ατμοστρόβιλος	24	24	18	Μαζούτ
14	Ντίζελ	11	11	3	Μαζούτ
15	Ντίζελ	11	11	3	Μαζούτ
16	Ντίζελ	11	11	6	Μαζούτ
17	Ντίζελ	11	11	3	Μαζούτ
18	Αεριοστρόβιλος	15	15	3	Ντίζελ
19	Αεριοστρόβιλος	15	15	3	Ντίζελ
20	Αεριοστρόβιλος	43	43	5	Ντίζελ
21	Αεριοστρόβιλος	14	14	3	Ντίζελ
22	Αεριοστρόβιλος	28	28	5	Ντίζελ

Πίνακας 4.6: Χαρακτηριστικά παραγωγής θερμικών μονάδων Λινοπεραμάτων Ηρακλείου

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στον σταθμό παραγωγής των Λινοπεραμάτων είναι 265MW. Σαν καύσιμη ύλη χρησιμοποιείται, μαζούτ για τις μηχανές εσωτερικής καύσης (ντίζελ) και τις ατμοστροβιλικές μονάδες, ντίζελ για τις αεριοστροβιλικές μονάδες.



Σχήμα 4.7: Ποσοστό ονομαστικής ισχύος σταθμού Λινοπεραμάτων Ηρακλείου ανά είδος μονάδας

Η χρήση των μονάδων του σταθμού ποικίλει, αφού ο συγκεκριμένος σταθμός περιλαμβάνει πολλούς τύπους θερμικών μονάδων. Κατά κύριο λόγο όμως στο σύνολό του αντιμετωπίζεται ως σταθμός βάσης. Οι παράμετροι, λειτουργικού κόστους, κόστους καυσίμου και εκκίνησης των μονάδων του σταθμού, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

A	Constcoeffi (Kg-lt/h)	Lincoeffi (Kg/MWh)	Sqcoeffi (Kg/MWh <sup>2</sup> )	Cubcoeffi (Kg/MWh <sup>3</sup> )	Fuel Price (€/Kg-lt)	Startup Cost (€)
8	0,0010	727,6000	-167,2000	17,3770	0,4149	2,50
9	0,0010	378,9370	-11,8240	0,4760	0,4149	2,50
10	0,0010	378,9370	-11,8240	0,4760	0,4149	2,50
11	0,0000	355,0880	-8,0530	0,1800	0,4149	4,00
12	0,0000	300,5800	-4,1660	0,0920	0,4149	4,00
13	0,0000	300,5800	-4,1660	0,0920	0,4149	4,00
14	0,0000	230,3680	-8,3780	0,4210	0,4149	220,00
15	0,0000	230,3690	-8,3780	0,4210	0,4148	220,00
16	0,0000	230,3680	-8,3780	0,4210	0,4149	219,00
17	0,0100	230,3690	-8,3780	0,4210	0,4148	220,00
18	1,2000	881,5000	-5,8700	2,4800	0,6982	179,10
19	1622,8000	280,4900	-6,7770	0,3195	0,6982	500,00
20	2418,0000	197,6500	0,2533	0,0001	0,6982	1413,00
21	1093,8000	234,9500	0,7913	0,0001	0,6982	858,00
22	1675,8000	196,2900	0,3605	0,0010	0,6982	350,00

Πίνακας 4.7: Παράμετροι κόστους θερμικών μονάδων Λινοπεραμάτων Ηρακλείου

Στον πίνακα που ακολουθεί περιλαμβάνονται οι χρονικοί περιορισμοί εκκίνησης και τερματισμού λειτουργίας των θερμικών μονάδων του σταθμού.

A	Minimum Up - Time (MUT)	Minimum Down – Time (MDT)
8	2	2
9	2	2
10	2	2
11	2	2
12	2	2
13	2	2
14	2	2
15	2	2
16	2	2
17	2	2
18	2	2
19	2	2
20	2	2
21	2	2
22	2	2

Πίνακας 4.8: Χρονικοί περιορισμοί θερμικών μονάδων Λινοπεραμάτων Ηρακλείου

#### 4.3.3 Σταθμός Παραγωγής ενέργειας Αθερινόλακκου Λασιθίου

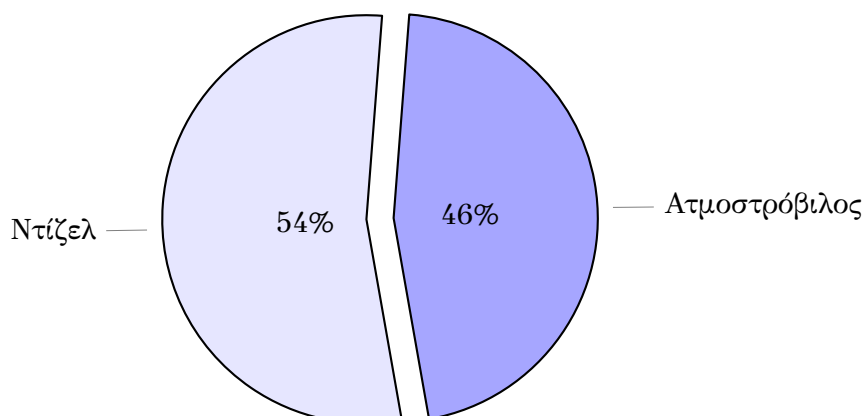
Ο σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του Νομού Λασιθίου, βρίσκεται 25 χιλιόμετρα νότια της πόλης της Σητείας στην περιοχή Αθερινόλακκος. Διαθέτει 2 μηχανές εσωτερικής καύσης (ντίζελ) συνολικής ονομαστικής ισχύος 102MW και 2 ατμοστροβιλικές μονάδες συνολικής ονομαστικής ισχύος 88MW.

A	Τύπος Μονάδας	Ονομαστική Ισχύς (MW)	Καθαρή Ισχύς (MW)	Τεχνικό Ελάχιστο (MW)	Καύσιμο
23	Ντίζελ	51	50	35	Μαζούτ
24	Ντίζελ	51	50	25	Μαζούτ
25	Ατμοστρόβιλος	44	43	22	Μαζούτ
26	Ατμοστρόβιλος	44	43	22	Μαζούτ

Πίνακας 4.9: Χαρακτηριστικά παραγωγής θερμικών μονάδων Αθερινόλακκου Λασιθίου

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στο σταθμό παραγωγής του Αθερινόλακκου, είναι 190MW με καθαρή ισχύ που φτάνει τα 186MW. Σαν καύσιμη ύλη χρησιμοποιείται

μαζούτ και για τους δύο τύπους μονάδων.



Σχήμα 4.8: Ποσοστό ονομαστικής ισχύος σταθμού Αθρινόλακκου Λασιθίου ανά είδος μονάδας

Ο συγκεκριμένος σταθμός αντιμετωπίζεται ως σταθμός βάσης, αφού περιλαμβάνει μονάδες βάσης και κυμαινόμενου φορτίου. Οι παράμετροι, λειτουργικού κόστους, κόστους καυσίμου και εκκίνησης των μονάδων του σταθμού, παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

A	Constcoeffi (Kg-lt/h)	Lincoeffi (Kg/MWh)	Sqcoeffi (Kg/MWh <sup>2</sup> )	Cubcoeffi (Kg/MWh <sup>3</sup> )	Fuel Price (€/Kg-lt)	Startup Cost (€)
23	0,2700	222,6000	-1,3000	0,0170	0,3919	270,00
24	0,2700	222,6000	-1,3000	0,0170	0,3919	270,00
25	0,8000	282,9100	-0,9580	-0,0030	0,3919	350,00
26	0,8000	282,9100	-0,9580	-0,0030	0,3919	350,00

Πίνακας 4.10: Παράμετροι κόστους θερμικών μονάδων Λινοπεραμάτων Ηρακλείου

Στον πίνακα που ακολουθεί περιλαμβάνονται οι χρονικοί περιορισμοί εκκίνησης και τερματισμού λειτουργίας των θερμικών μονάδων του σταθμού.

A	Minimum Up - Time (MUT)	Minimum Down - Time (MDT)
23	2	2
24	2	2
25	2	2
26	2	2

Πίνακας 4.11: Χρονικοί περιορισμοί θερμικών μονάδων Λινοπεραμάτων Ηρακλείου



#### 4.4 Στοιχεία παραγωγής αιολικής ενέργειας στην Κρήτη

Σημαντική, στην κάλυψη των ολοένα αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών, είναι η συμμετοχή και η ανάπτυξη των ΑΠΕ στην περιοχή. Το έντονο ενδιαφέρον για επενδύσεις και οι κατάλληλες γεωγραφικά αλλά και καιρικά συνθήκες, ευνοούν αρκετά την ανάπτυξη του κλάδου στο νησί, με αποτέλεσμα την αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ στο ΣΗΕ της Κρήτης. Το ενεργειακό ισοζύγιο του νησιού παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα.

##### Έτος Ποσοστιαία συμμετοχή ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο

<b>2008</b>	14,08%
<b>2009</b>	15,48%
<b>2010</b>	15,90%
<b>2011</b>	19,46%
<b>2012</b>	20,60%

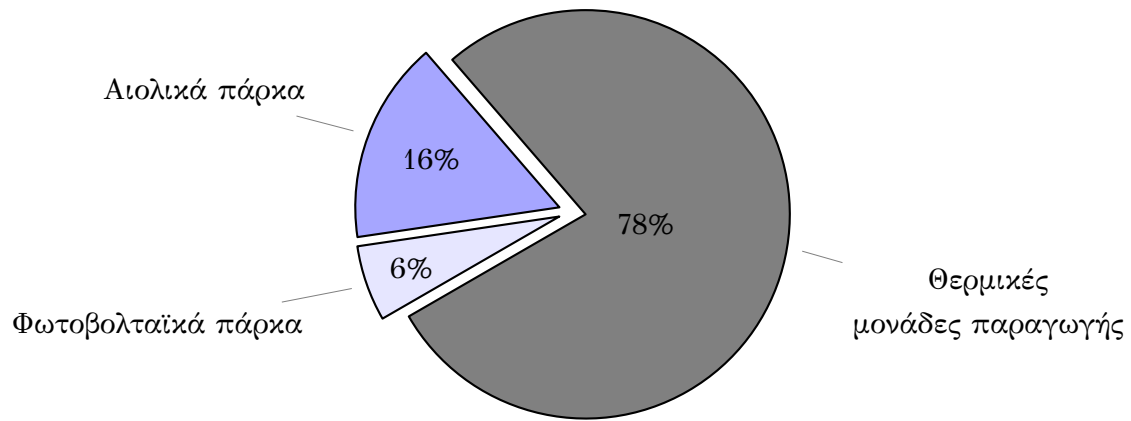
Πίνακας 4.12: Ποσοστά συμμετοχής ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο του ΣΗΕ της Κρήτης

Η εγκατεστημένη ισχύς των εναλλακτικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΑΠΕ) και η συμβολή τους στην ηλεκτροπαραγωγή για το 2011:

ΑΠΕ	Ονομαστική Ισχύς (MW)	Ποσοστό	Παραγωγή (GWh)	Ποσοστό Ηλεκτροπαραγωγής
<b>Αιολικά</b>	174,20	16,5%	486,5	16,6%
<b>Φωτοβολταϊκά</b>	57,80	5,5%	83,8	2,9%

Πίνακας 4.13: Ισχύς εναλλακτικών μονάδων παραγωγής (ΑΠΕ) & συμμετοχή στην ηλεκτροπαραγωγή το έτος 2011

Σύμφωνα με το παρακάτω γράφημα, οι ΑΠΕ στο ΣΗΕ της Κρήτης καλύπτουν ένα ποσοστό μεγαλύτερο του 20% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, με το 75% αυτού να αποτελείται από αιολικά πάρκα. Παρατηρείται δηλαδή εμφανής προτίμηση των αιολικών πάρκων σαν εναλλακτικές μονάδες παραγωγής, σε σχέση με τα φωτοβολταϊκά.



Σχήμα 4.9: Ποσοστό εναλλακτικών και συμβατικών μονάδων παραγωγής στο ΣΗΕ της Κρήτης

Στο Νομό Λασιθίου βρίσκονται εγκατεστημένα τα περισσότερα αιολικά πάρκα του νησιού, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 98,90MW. Ακολουθεί ο Νομός Ηρακλείου με συνολική ισχύ 41,40MW και ο Νομός Χανίων 26,45MW. Αναλυτικά η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων της Κρήτης ανά Νομό, φαίνεται στον παρακάτω πίνακα.

Τοποθεσία Αιολικών Πάρκων	Συνολική εγκατεστημένη Ισχύς (MW)
Χανιά	26,45
Ρέθυμνο	7,20
Ηράκλειο	41,40
Λασιθί	98,90

Πίνακας 4.14: Εγκατεστημένη ισχύς αιολικών πάρκων στο ΣΗΕ της Κρήτης το έτος 2010

Στην εικόνα που ακολουθεί, συμβολίζονται με κουκίδα οι ανεμογεννήτριες που είναι εγκατεστημένες στο νησί.



Σχήμα 4.10: Ανεμογεννήτριες στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης

#### 4.5 Στοιχεία ζήτησης φορτίου στην Κρήτη

Τα τελευταία 20 χρόνια, το ενεργειακό ισοζύγιο της Κρήτης εξελίχθηκε σύμφωνα με τα μεγέθη της οικονομικής ανάπτυξης και τις καταναλωτικές συνήθειες που υιοθετήθηκαν. Έτσι παρατηρήθηκαν υψηλοί ρυθμοί αύξησης της καταναλισκόμενης ενέργειας και της καθαρής αιχμής φορτίου. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι το 1992 τα μεγέθη αυτά είχαν τιμές: 1.230GWh & 248MW, ενώ το 2011 τα αντίστοιχα μεγέθη ήταν: 2.931GWh & 597MW. Τα τρία τελευταία χρόνια τα μεγέθη αυτά εμφανίζονται σταθερά (λόγω της οικονομικής ύφεσης).

Έτος	Ζήτηση Ενέργειας (GWh)	Μέση Ωριαία Αιχμή Φορτίου (MW)
2009	2.981	628
2010	3.012	672
2011	2.931	630
2015	2.898	634

Πίνακας 4.15: Ζήτηση ενέργειας και αιχμής φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης

Παρά την προσωρινή μείωση της ζήτησης, μακροπρόθεσμα αναμένεται η σημαντική αύξησή της, κυρίως λόγω της ηλεκτροκίνησης στις μεταφορές και της μεγάλης διείσδυσης των αντλιών θερμότητας στον κτιριακό τομέα.

Έτος	Ζήτηση Ενέργειας (GWh)	Μέση Ωριαία Αιχμή Φορτίου (MW)
2020	4.000	840
2030	4.900	1.000
2040	5.700	1.150

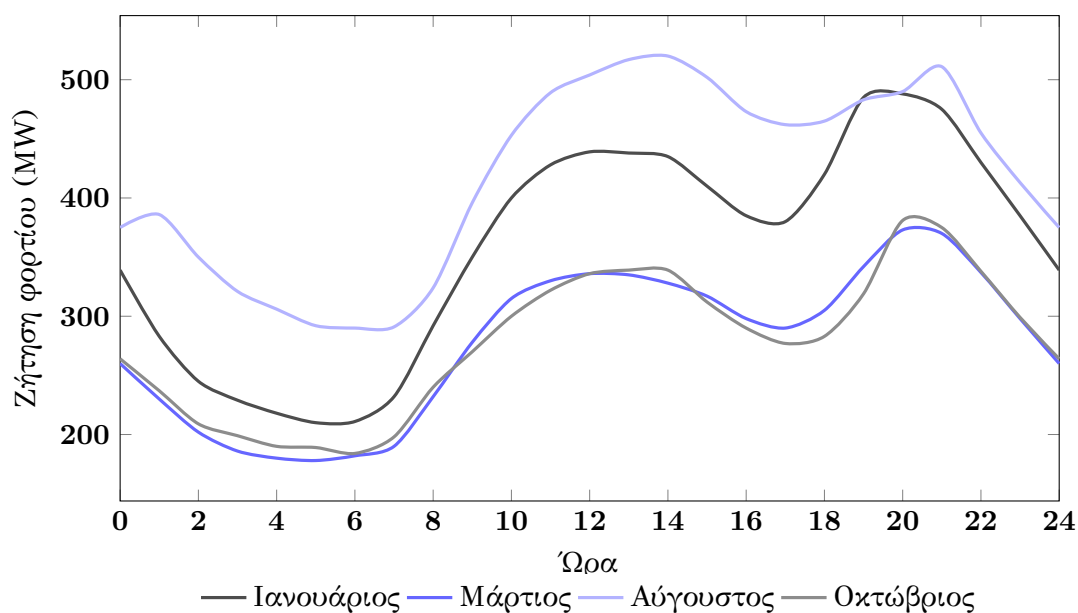
Πίνακας 4.16: Πρόβλεψη ζήτησης ενέργειας και αιχμής φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης

Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζεται η ωριαία μέση ζήτηση του φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης κατά τους μήνες Ιανουαρίου, Μαρτίου, Αυγούστου και Οκτωβρίου για το έτος 2010.

Ωρα	Ιανουάριος (MW)	Μάρτιος (MW)	Αύγουστος (MW)	Οκτώβριος (MW)
01:00	283	230	386	237
02:00	245	202	350	209
03:00	229	186	321	199
04:00	218	180	306	190
05:00	210	178	292	189
06:00	211	182	290	184
07:00	232	190	291	198
08:00	292	232	324	240
09:00	350	278	396	270
10:00	400	315	453	300
11:00	428	330	489	322
12:00	439	336	504	336
13:00	438	335	517	339
14:00	435	328	520	339
15:00	410	317	502	312
16:00	385	298	473	290
17:00	380	290	462	277
18:00	420	305	465	283
19:00	485	342	483	319
20:00	488	373	490	381
21:00	475	370	511	375
22:00	430	337	455	338
23:00	385	298	413	299
24:00	339	260	375	264

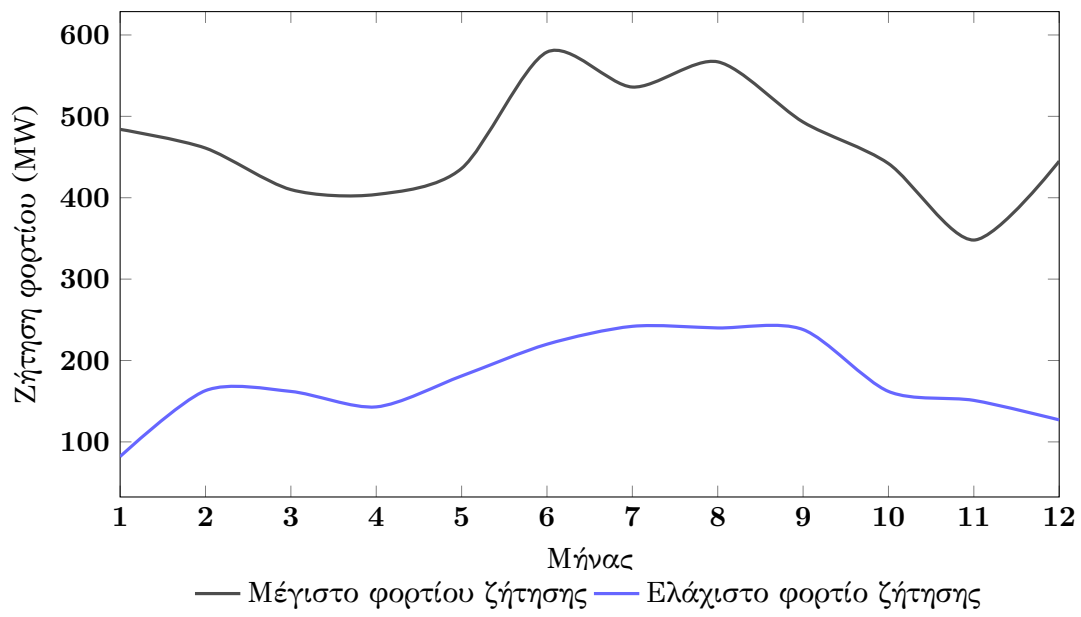
Πίνακας 4.17: Ζήτηση φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης ανά ώρα, για τέσσερις διαφορετικούς μήνες

Αξίζει να σημειωθεί, πως οι μήνες Μάρτιος και Οκτώβριος παρουσιάζουν πολλά στοιχεία ομοιομορφίας ως προς τη ζήτηση φορτίου, αλλά και τις ώρες αιχμής. Επιπλέον, είναι εμφανής η αυξημένη ζήτηση φορτίου τον μήνα Αύγουστο, περίοδο με υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και το μήνα Ιανουάριο, όπου κι εκεί λόγω ψύχους, οι ζήτηση φορτίου κυμαίνεται σε υψηλά επίπεδα.



Σχήμα 4.11: Τυπικές καμπύλες ζήτησης φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης ανά ώρα για τέσσερις διαφορετικούς μήνες

Αντίστοιχες πληροφορίες, μπορούμε να εξαγάγουμε κι από το γράφημα με τις τυπικές καμπύλες ζήτησης μέγιστου κι ελάχιστου φορτίου του ΣΗΕ, για το έτος 2010. Οι θερινοί μήνες εμφανίζουν τη μεγαλύτερη ζήτηση φορτίου. Ακολουθούν οι χειμερινοί μήνες, ενώ σε κοινά σημεία κινείται η ζήτηση κατά την περίοδο της άνοιξης και του φθινοπώρου.



Σχήμα 4.12: Τυπικές καμπύλες ζήτησης ελάχιστου & μέγιστου φορτίου στο ΣΗΕ της Κρήτης ανά μήνα

## Κεφάλαιο 5

# Πρόβλημα βέλτιστης λειτουργίας συστήματος

### 5.1 Ορισμός & περιγραφή προβλήματος

Σκοπός ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η κάλυψη του φορτίου ζήτησης του δικτύου, ικανοποιώντας όλες τις απαιτήσεις που περιεγράφηκαν στην ενότητα 2.2. Πέρα όμως από την ικανοποίηση αυτών των απαιτήσεων ως προς τον καταναλωτή, είναι εξίσου σημαντικό να υλοποιείται η κάλυψη του φορτίου με όσο το δυνατόν πιο οικονομικό τρόπο.

Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, το πρόβλημα θα πρέπει να χωριστεί σε δύο επιμέρους προβλήματα:

- **Της ένταξης των μονάδων στο σύστημα (Unit Commitment)**, που ορίζεται ως το πρόβλημα προσδιορισμού της βέλτιστης ένταξης των εφικτών θερμικών μονάδων στο σύστημα, έτσι ώστε να λειτουργούν μόνο όσες μονάδες είναι απαραίτητες, σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (συνήθως ημερήσιο ή εβδομαδιαίο).
- **Της οικονομικής κατανομής φορτίου (Economic Dispatch)**, που ορίζεται ως το πρόβλημα προσδιορισμού της βέλτιστης ισχύος εξόδου των θερμικών μονάδων που είναι σε λειτουργία, έτσι ώστε να καλυφθεί το φορτίο ζήτησης μιας συγκεκριμένης χρονικής στιγμής, με το ελάχιστο δυνατό συνολικό κόστος.

Κατά την επίλυση των παραπάνω προβλημάτων πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένοι περιορισμοί, οι οποίοι θα μας οδηγήσουν στη βέλτιστη εφικτή λύση του συνολικού προβλήματος και αναλύονται παρακάτω.

#### Στρεφόμενη εφεδρεία (Spinning Reserve)

Στρεφόμενη εφεδρεία ενός συστήματος σε μια χρονική στιγμή, ορίζουμε την επιπλέον παραγόμενη ισχύ του συστήματος που χρησιμοποιείται για την κάλυψη του φορ-

τίου ζήτησης σε περιπτώσεις που υπάρχει ανάγκη. Πρέπει πάντα να υπάρχει αρκετή στρεφόμενη εφεδρεία στο σύστημα, ώστε η απώλεια μιας μονάδας να μην προκαλέσει μεγάλη πτώση στη συχνότητα, δηλαδή αν υποστεί βλάβη μια μονάδα, θα πρέπει να υπάρχει αρκετή εφεδρεία στις υπόλοιπες μονάδες που λειτουργούν, ώστε να μπορέσουν αυτές να αναπληρώσουν το έλλειμμα παραγωγής σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η κατανομή της στρεφόμενης εφεδρείας, γίνεται σύμφωνα με ορισμένους κανόνες που διαφέρουν από περιοχή σε περιοχή. Συνήθως απαιτείται η στρεφόμενη εφεδρεία να είναι μεγαλύτερη από κάποιο ποσοστό (π.χ. 10%) της προβλεπόμενης αιχμής φορτίου ή να είναι αρκετή για να καλύψει την απώλεια της μεγαλύτερης μονάδας του δικτύου. Οι εφεδρείες πρέπει να είναι κατανεμημένες στο ηλεκτρικό δίκτυο, έτσι ώστε να αποφεύγονται πιθανές υπερφορτίσεις των γραμμών μεταφοράς του δικτύου, όταν παραστεί ανάγκη χρησιμοποίησής τους.

### **Εφεδρεία Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (RES Reserve)**

Αντίστοιχα με τη στρεφόμενη εφεδρεία, στις περιπτώσεις όπου υπάρχει διείσδυση ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας από εναλλακτικές μονάδες παραγωγής, πρέπει για λόγους ασφαλείας να προβλέπεται παραγωγή για την κάλυψη φορτίου σε περιπτώσεις ανάγκης (αποκοπή, χαμηλή παραγωγή). Συνήθως κι εδώ η εφεδρεία υπολογίζεται με βάση ένα ποσοστό, το οποίο βασίζεται στην πρόβλεψη του παραγόμενου φορτίου από τα αιολικά πάρκα, τα φωτοβολταϊκά ή την εναλλακτική μονάδα παραγωγής.

### **Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας (Minimum Up Time)**

Κάθε μονάδα από την στιγμή που θα ξεκινήσει να λειτουργεί, χρειάζεται συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μέχρι να τεθεί ξανά εκτός λειτουργίας. Αυτός ο χρόνος ονομάζεται ελάχιστος χρόνος λειτουργίας και διαφέρει ανάλογα με το είδος και τα χαρακτηριστικά της κάθε μονάδας.

### **Ελάχιστος χρόνος κράτησης (Minimum Down Time)**

Εκτός από περιορισμό στον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας των θερμικών μονάδων, υπάρχει περιορισμός και στο χρόνο που μία θερμική μονάδα βρίσκεται σε καταστολή. Δηλαδή μία μονάδα για να τεθεί πάλι σε λειτουργία, θα πρέπει να βρίσκεται απενεργοποιημένη για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το διάστημα αυτό ονομάζεται ελάχιστον χρόνος κράτησης και διαφέρει κι αυτός από μονάδα σε μονάδα.

### **Τεχνικό Ελάχιστο Παραγωγής (Minimum Production)**

Όταν μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας λειτουργεί, λόγω τεχνικής φύσεως δεν μπορεί, ακόμα και με την κατώτατη ρύθμιση ισχύος, να προσεγγίσει τη



μηδενική παραγωγή. Αντίθετα στη χαμηλότερη ισχύ της, θα παράγει μία ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ποσότητα ονομάζεται τεχνικό ελάχιστο παραγωγής.

### Μέγιστη Ικανότητα Παραγωγής (Maximum Production)

Όπως υπάρχει ελάχιστη παραγωγή για μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έτσι υπάρχει και ένα ανώτατο όριο. Το όριο αυτό είναι η ηλεκτρική ενέργεια που προσδίδει στο ΣΗΕ η μονάδα για μέγιστη ρύθμιση ισχύος και ονομάζεται μέγιστη ικανότητα παραγωγής.

Με βάση τους παραπάνω περιορισμούς μπορούν πλέον να περιγραφούν τα βήματα επίλυσης των προβλημάτων που παρουσιάστηκαν παραπάνω.

Η διαδικασία της ένταξης μονάδων στο ΣΗΕ απαρτίζεται από τα παρακάτω βήματα:

1. Υπολογίζεται η μέγιστη και ελάχιστη ικανότητα παραγωγής των μονάδων, σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά τους αν πρόκειται για συμβατικές μονάδες παραγωγής είτε από το μοντέλο πρόβλεψης παραγωγής αν πρόκειται για μονάδες ΑΠΕ.
2. Γίνεται έλεγχος των χρονικών περιορισμών (ελάχιστος χρόνος κράτησης, ελάχιστος χρόνος λειτουργίας) ώστε να μην παραβιάζονται.
3. Σε κάθε χρονική στιγμή ενεργοποιούνται τόσες μονάδες, όσες χρειάζονται για την κάλυψη του φορτίου ζήτησης και εφεδρείας (στρεφόμενης, ΑΠΕ).
4. Υπολογίζεται το συνολικό κόστος (λειτουργίας μονάδων, εκκίνησης μονάδων)
5. Ελέγχεται αν κάποια μεταβολή της κατάστασης λειτουργίας των μονάδων του βήματος 3 μπορεί να επιφέρει καλύτερο αποτέλεσμα στο βήμα 4.

Η διαδικασία της οικονομικής κατανομής, που έχει ως στόχο τον καθορισμό των σημείων λειτουργίας των μονάδων που αποφασίστηκε να ενταχθούν στο σύστημα, συνοψίζεται παρακάτω:

1. Λαμβάνονται οι τεχνικοί περιορισμοί (παραγωγής, χρόνου) των μονάδων, που έχουν γίνει αποδεκτές από τη διαδικασία ένταξης μονάδων. Σημειώνεται ότι όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, οι ενταγμένες μονάδες λειτουργούν τουλάχιστον στο τεχνικό τους ελάχιστο.
2. Αφαιρούνται από το σύνολο της ζήτησης οι αναμενόμενες παραγωγές των μονάδων των οποίων η έξοδος δεν μπορεί να ρυθμιστεί, όπως για παράδειγμα οι παραγωγές των εναλλακτικών μονάδων (ΑΠΕ).

3. Στη συνέχεια επιλέγονται τα σημεία λειτουργίας των ενταγμένων μονάδων παραγωγής, των οποίων η έξοδος μπορεί να ρυθμιστεί. Για τον καθορισμό αυτών των σημείων λειτουργίας, μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος της οικονομικής κατανομής.

## 5.2 Βασικές μέθοδοι επίλυσης

Από την πρωτοεμφάνιση του προβλήματος, πολλές μέθοδοι αναπτύχθηκαν. Ωστόσο διαφέρουν στην ποιότητα του αποτελέσματος, στο χρόνο υπολογισμού και στο μέγεθος του προβλήματος που μπορούν να ανταποκριθούν. Αυτές οι μέθοδοι ή προσεγγίσεις κυμαίνονται από εξαιρετικά πολύπλοκες πρακτικά και θεωρητικά μεθόδους μέχρι απλοποιημένες μεθόδους. Στο παρελθόν, διάφορες προσεγγίσεις όπως ο δυναμικός προγραμματισμός και η μέθοδος LaGrange, είχαν προταθεί για τη λύση του προβλήματος ένταξης μονάδων, όμως δεν θεωρούνται ασφαλείς όσο το μέγεθος του προβλήματος μεγαλώνει. Για μεσαίου μεγέθους συστήματα παραγωγής, οι ακριβείς μέθοδοι, όπως ο δυναμικός προγραμματισμός (DP), μπορεί να χρησιμοποιηθούν για να λύσουν το πρόβλημα ένταξης μονάδων, με επιτυχία. Για μεγαλύτερα συστήματα όμως, οι ακριβείς μέθοδοι αποτυγχάνουν, καθώς ο χρόνος επίλυσης και το πλήθος των μονάδων αυξάνουν εκθετικά. Σε αυτές τις περιπτώσεις, αποτελεσματικές μέθοδοι είναι οι ευρετικοί αλγόριθμοι όπως ο εξελικτικός προγραμματισμός (EP), ο αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτησης (SA) και οι γενετικοί αλγόριθμοι (GA). Οι ευρετικοί αλγόριθμοι, έχουν ως πρώτη προτεραιότητα το χρόνο, κι όχι τόσο την επίτευξη βέλτιστης λύσης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα, οι μέθοδοι αυτοί να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή σχεδόν βέλτιστων λύσεων, σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα υπολογισμού.

### Λίστες προτεραιότητας (Priority Lists)

Η μέθοδος προτεραιότητας, είναι μία από τους απλούστερους και εύκολους τρόπους επίλυσης ενός προβλήματος ένταξης μονάδων. Με τη μέθοδο αυτή, βαθμολογούνται οι σταθμοί παραγωγής, σύμφωνα με το οριακό τους κόστος λειτουργίας. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται η ικανοποίηση του φορτίου ζήτησης με βάση τη βαθμολογία αυτή. Κατά την πάροδο των χρόνων, έχουν γίνει διάφορες προσαρμογές σε αυτή τη μέθοδο, προκειμένου να βελτιωθεί ακόμα περισσότερο. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα που δίνει αυτή η μέθοδος δεν είναι πάντα βέλιστα.

### Δυναμικός Προγραμματισμός (Dynamic programming)

Η μέθοδος του Δυναμικού Προγραμματισμού, βασίζεται στο θεώρημα της βελτιστοποίησης, το οποίο ισχυρίζεται ότι μία βέλτιστη λύση, αποτελείται από βέλτιστες επιμέρους λύσεις. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης ενός αλγορίθμου δυναμικού προγραμματισμού, με σκοπό την εύρεση βέλτιστης λύσης στο πρόβλημα ένταξης

μονάδων. Η εφαρμογή της μεθόδου αυτής όμως δυσκολεύει, όταν τα συστήματα παραγωγής ενέργειας είναι μεγάλα.

### **Μέθοδος Χαλάρωσης Lagrange (Lagrange relaxation)**

Η μέθοδος Lagrange, είναι η πιο γνωστή και πιο συνηθισμένη μέθοδος επίλυσης διακριτών προβλημάτων, όπως είναι το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα. Οι περιορισμοί του προβλήματος ενσωματώνονται στη συνάρτηση κόστους ως ποινές πολλαπλασιαζόμενοι με κατάλληλους όρους, τους πολλαπλασιαστές Lagrange. Στη συνέχεια, με κάποια μέθοδο ελαχιστοποίησης, ελαχιστοποιείται η συνάρτηση κόστους. Σε περίπτωση που κάποιος από τους περιορισμούς παραβιάζεται, οι πολλαπλασιαστές Lagrange λαμβάνουν μία διαφορετική τιμή και επαναλαμβάνεται η ίδια διαδικασία, διαφορετικά ο αλγόριθμος τερματίζει. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι σε θέση να διαχειριστεί προβλήματα πολλών μονάδων, παρόλα αυτά, δεν εγγυάται πάντα την επίτευξη λύσης ή την επίτευξη εφικτής λύσης στο πρόβλημα.

### **Αποδέσμευσης Μονάδων (Unit Decommittment)**

Η μέθοδος αποδέσμευσης μονάδων, είναι μία μέθοδος στην οποία όλες οι μονάδες παραγωγής, θεωρούνται αρχικά σε λειτουργία. Στην συνέχεια, απενεργοποιούνται με τη σειρά, εξετάζοντας βήμα βήμα εάν συνεχίζει να ικανοποιείται η ζήτηση και το συνολικό κόστος παραγωγής μειώνεται. Όταν κάτι από τα δύο συμβεί, η διαδικασία ολοκληρώνεται και ως λύση του προβλήματος θεωρείται η τελευταία εφικτή.

### **Μη Ακέραιος Προγραμματισμός (Mixed Integer Programming)**

Αυτή η μέθοδος επιχειρησιακής έρευνας, αποτελείται από μία αντικειμενική συνάρτηση (συνάρτηση ελαχιστοποίησης) ως συνάρτηση των μεταβλητών (on/off, ποσότητα παραγωγής κ.λπ.) και αρκετούς περιορισμούς σε αυτές τις μεταβλητές. Ορισμένες από τις μεταβλητές μπορεί να παίρνουν μόνο δύο τιμές (δυαδικό σύστημα). Η συγκεκριμένη μέθοδος κέρδισε το ενδιαφέρον πρόσφατα, εξαιτίας της σημαντικής βελτίωσης της στο χρόνο επίλυσης των προβλημάτων.

### **Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing)**

Η μέθοδος προσομοιωμένης ανόπτησης, είναι μια πρόσφατα ανεπτυγμένη τεχνική βελτιστοποίησης που προτάθηκε από τους Kirkpatrick, Gelatt και Vecchi το 1983, η οποία εκμεταλλεύεται την αναλογία μεταξύ της ελαχιστοποίησης της συνάρτησης κόστους ενός προβλήματος βελτιστοποίησης και την αργή διαδικασία της σταδιακής ψύξης ενός μετάλλου, μέχρι το σημείο τήξης του, όπου η ενέργεια του συστήματος έχει αποκτήσει την ολική (ή καθολικά) ελάχιστη τιμή. Ο αλγόριθμος βασίζεται στην επαναληπτική μέθοδο, που προσομοιώνει τη μετάβαση των ατόμων σε ισορροπία σε μια

δοσμένη θερμοκρασία. Η προσομοιωμένη ανόπτηση, εξυπηρετεί στην επίλυση δύσκολων συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης χωρίς συγκεκριμένη δομή. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου, είναι ότι απαιτεί μεγάλο χρόνο υπολογισμού, λόγω του μεγάλου αριθμού επαναλήψεων που χρειάζεται για τη σύγκλιση του αλγορίθμου.

### Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm)

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος, αποτελείται από ένα αρχικό μέλος του πληθυσμού. Είναι ένας πίνακας που περιλαμβάνει τους αριθμούς των γεννητριών και τους χρόνους προγραμματισμένης λειτουργίας τους. Στις γεννήτριες δίνεται η κατάσταση 0 ή 1. Τα ικανότερα μέλη ενός πληθυσμού, επιλέγονται για να περάσουν την πληροφορία στην επόμενη γενιά των μελών. Κατόπιν, ένα σημείο διασταύρωσης επιλέγεται τυχαία και η πληροφορία από ένα γονέα, μέχρι το σημείο αυτό, ανταλλάσσεται με ένα άλλο μέλος, δημιουργώντας έτσι δύο μέλη για την επόμενη γενιά. Τα μέλη με την καλύτερη επίδοση επιβραβεύονται. Σαν αλγόριθμος έχει αρκετά προτερήματα, όπως ότι είναι συμπαγής τεχνική βελτιστοποίησης, εύκολος στην υλοποίηση και παραγωγή πολλών προγραμμάτων λειτουργίας ενός προβλήματος ένταξης μονάδων. Λειτουργεί σε ένα πλήθος πιθανών λύσεων, εφαρμόζοντας την αρχή της επιβίωσης του ικανότερου για την παραγωγή διαδοχικά καλύτερων προσεγγίσεων σε μια λύση. Ο γενετικός αλγόριθμος έχει επίσης εφαρμοστεί, για την επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων σε υδροθερμικά συστήματα.

## 5.3 Βελτιστοποίηση με Σμήνος Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization)

### 5.3.1 Η ιδέα για την υλοποίηση της μεθόδου PSO & τα πλεονεκτήματά της

Με τον όρο Νοημοσύνη Σμηνών (Swarm Intelligence), χαρακτηρίζουμε τους αλγόριθμους και τις κατανεμημένες μεθόδους επίλυσης προβλημάτων, που έχουν σαν πηγή έμπνευσης την συλλογική συμπεριφορά (collective behavior) και την εκδηλούμενη νοημοσύνη (Emergent Intelligence) που εμφανίζεται σε πληθυσμούς. Ο όρος χρησιμοποιήθηκε αρχικά σε τεχνολογικές εφαρμογές, για να χαρακτηρίσει τη συμπεριφορά ομάδων αυτόματων μηχανισμών (robots) τα οποία, υπακούοντας το καθένα σε κάποιους απλούς κανόνες, εμφάνιζαν με την πάροδο του χρόνου κάποιου είδους συλλογική συμπεριφορά. Τέτοιες συμπεριφορές είχαν παρατηρηθεί νωρίτερα και στη φύση, σε κοινωνικές ομάδες εντόμων και ζώων αλλά και σε ομάδες ανθρώπων. Έτσι, κοινωνιολογικά ο όρος χρησιμοποιούνταν για να καταδείξει το αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων μεταξύ οντοτήτων, από την πλευρά της ομάδας ή του σμήνους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν τα σμήνη μυρμηγκιών, όπου ενώ κάθε μυρμήγκι σαν μονάδα έχει πολύ περιορισμένο αριθμό δυνατοτήτων και αντιδράσεων στο περιβάλλον του, οι

ομάδες μυρμηγκιών παρουσιάζουν μια αξιοθαύμαστη οργάνωση και δομή.

Η μέθοδος βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων, αποτέλεσε την πρώτη μέθοδο Νοημοσύνης Σμηνών για προβλήματα αριθμητικής βελτιστοποίησης και βασίζεται στην κεντρική ιδέα, ότι «η κοινωνική ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των μελών ενός πληθυσμού, δύναται να προσδώσει ένα εξελικτικό πλεονέκτημα στον πληθυσμό». Σε αυτή την ιδέα βασίστηκαν και οι Eberhart και Kennedy, οι οποίοι ανέπτυξαν τον πρόδρομο της βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων, που ήταν ένας εξομοιωτής κοινωνικής συμπεριφοράς. Στην πορεία αναπτύχθηκαν πολλές παραλλαγές του εξομοιωτή, οι οποίες ενσωμάτωναν ιδέες όπως η επιτάχυνση από απόσταση και ο συντονισμός ταχυτήτων μεταξύ άμεσα γειτνιαζόντων μελών του σμήνους. Σκοπός των προσομοιώσεων, ήταν η μελέτη της κίνησης του σμήνους προς συγκεκριμένες θέσεις – στόχους. Όταν έγινε αντιληπτό ότι το μοντέλο κίνησης που είχε αναπτυχθεί θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως τεχνική βελτιστοποίησης, ξεκίνησε μια μεγάλη διαδικασία προσθαφαιρέσεως ιδεών και παραμέτρων, ώσπου παρουσιάστηκε η πρώτη έκδοση της μεθόδου βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων για προβλήματα αριθμητικής βελτιστοποίησης.

Παρότι η μέθοδος παρουσιάζει αρκετά κοινά με τους Εξελικτικούς Αλγόριθμους, όπως ότι είναι μία στοχαστική μέθοδος που χρησιμοποιεί πληθυσμούς για την αναζήτηση λύσεων εντός του χώρου αναζήτησης, έχει μία σημαντική διαφορά με αυτούς. Η διαφορά αυτή, είναι η κίνηση κάθε μέλους του πληθυσμού με μία προσαρμόσιμη ταχύτητα (adaptable velocity) στον χώρο αναζήτησης. Μία επιπλέον διαφορά, είναι ότι κάθε μέλος του πληθυσμού έχει μία μνήμη, στην οποία διατηρεί την καλύτερη θέση που επισκέφθηκε ποτέ. Σε προβλήματα ελαχιστοποίησης, αυτή η θέση είναι το σημείο του χώρου με την μικρότερη συναρτησιακή τιμή, που έχει επισκεφτεί ποτέ το μέλος του πληθυσμού. Επιπλέον, τα μέλη του πληθυσμού, ανταλλάσσουν μεταξύ τους πληροφορία σχετικά με την καλύτερη θέση (μνήμη) που έχει το καθένα. Επομένως, ορίζοντας γειτονιές μεταξύ των μελών, υπάρχει ροή πληροφορίας μεταξύ των μελών που τις απαρτίζουν και η κίνηση του σμήνους είναι απόρροια της στοχαστικής επιτάχυνσης των μελών του προς τις προσωπικές καλύτερες θέσεις τους και προς τις καλύτερες θέσεις των γειτονιών τους.

Τα πλεονεκτήματα της βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων, συγκριτικά με τις υπόλοιπες μεθόδους που αναφέραμε, είναι:

- Εύκολη στην εφαρμογή
- Δύναται να επιτύχει ποιοτικά πολύ καλά αποτελέσματα, με σταθερά χαρακτηριστικά σύγκλισης
- Χρειάζεται ελάχιστη παραμετροποίηση ώστε να προσαρμοστεί στα προβλήματα
- Είναι σε θέση να διατηρεί την ποικιλομορφία των Σμηνών
- Μπορεί να ανταπεξέλθει σε αρκετά μεγάλου μεγέθους προβλήματα

- Κάθε σωματίδιο ενημερώνει την θέση του και την ταχύτητά του, όχι σύμφωνα μόνο με τη δική του εμπειρία, αλλά και σύμφωνα με τις εμπειρίες του υπόλοιπου σμήνους
- Συγκριτικά με το μέγεθος των προβλημάτων που επιλύει, χρειάζεται σημαντικά λίγο χρόνο για την ολοκλήρωσή του

### 5.3.2 Μεθοδολογία υλοποίησης του αλγορίθμου PSO

Έστω ότι έχουμε ένα σύστημα αποτελούμενο από  $N$  σωματίδια, τα οποία κινούνται σε ένα χώρο  $D$  διαστάσεων. Ας θεωρήσουμε ότι η θέση ενός σωματιδίου  $i$  είναι  $x_i$  και η ταχύτητά του  $v_i$ . Όταν το σωματίδιο κινείται από μία θέση σε μία καινούρια, η ταχύτητά του θα ενημερωθεί σύμφωνα με τον τύπο:

$$V_i^{k+1} = WV_i^k + C_p * rand_1(P_{BESTi}^k - X_i^k) + C_g * rand_2(G_{BEST}^k - X_i^k)$$

Όπου,

$W$ , συντελεστής αδράνειας.

$C_p$  και  $C_g$ , σταθερές επιτάχυνσης που επιταχύνουν το σωματίδιο προς την κατεύθυνση  $P_{BEST}$  και  $G_{BEST}$  αντίστοιχα.

$k$ , ο αριθμός των επαναλήψεων

$rand_1$  και  $rand_2$ , είναι τυχαίοι αριθμοί στο διάστημα από 0 έως 1.

Η εξίσωση για το βάρος αδράνειας  $W$ , δίνεται από τον τύπο:

$$W = W_{final} + \frac{k_{max} - k}{k_{max}}(W_{initial} - W_{final})$$

Όπου,

$W_{initial}$ , ο αρχικός συντελεστής αδράνειας.

$W_{final}$ , ο τελικός συντελεστής αδράνειας.

$k_{max}$ , ο μέγιστος αριθμός των επαναλήψεων.

$k$ , ο αύξων αριθμός της τρέχουσας επανάληψης.

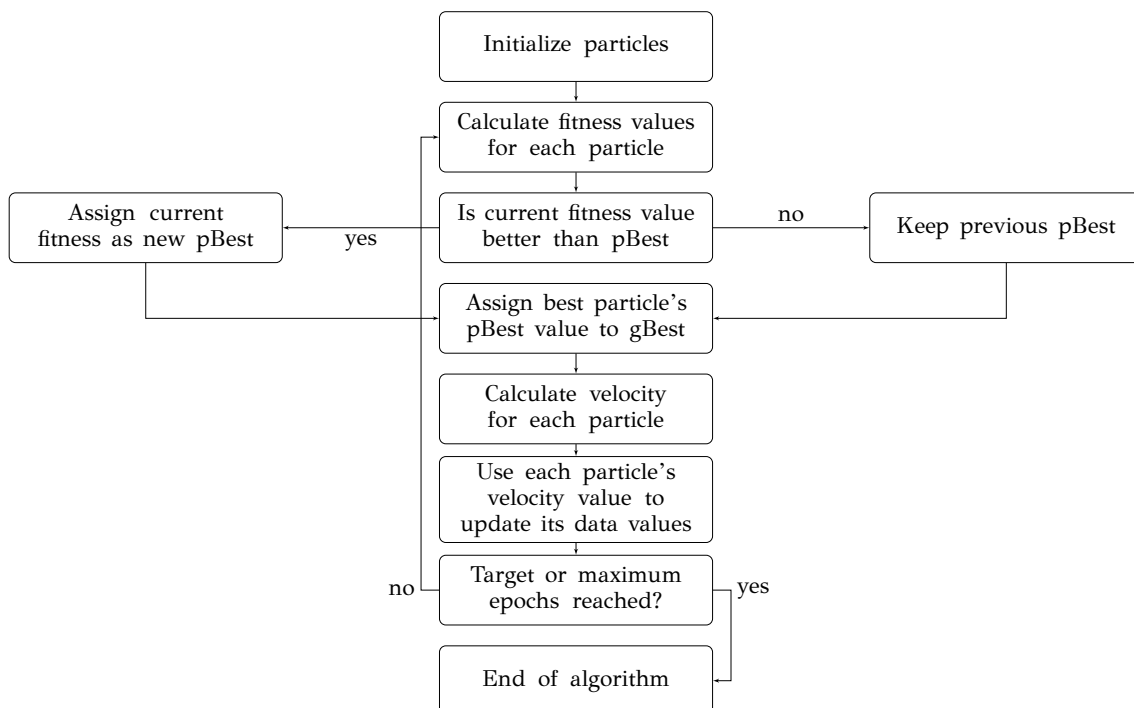
Η τιμή του  $W$ , παίρνει τιμές μεταξύ του διαστήματος 0.9 και 0.4 για να βρεθεί βέλτιστη λύση. Εν συνεχεία, η θέση του σωματιδίου ενημερώνεται σύμφωνα με τον τύπο που ακολουθεί:

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1}$$

### 5.3.3 Αλγοριθμική διαδικασία της μεθόδου PSO

Η διαδικασία επίλυσης προβλημάτων με τη χρήση της μεθόδου βελτιστοποίησης Σμηνών Σωματιδίων (PSO), συνοψίζεται στα παρακάτω βήματα:

1. Αρχικοποιείται το σμήνος με την καταχώρηση μιας τυχαίας θέσης, στον πολυδιάστατο χώρο του προβλήματος, σε κάθε σωματίδιο.
2. Αξιολογείται η συνάρτηση καταλληλότητας για κάθε σωματίδιο.
3. Για κάθε σωματίδιο, συγκρίνει την τιμή της συνάρτησης με το τοπικό βέλτιστο. Αν η τιμή αυτή είναι καλύτερη από το τοπικό βέλτιστο, την ορίζει ως το νέο τοπικό βέλτιστο και ορίζει τη θέση του σωματιδίου ως τη θέση του νέου τοπικού βέλτιστου.
4. Εντοπίζει το σωματίδιο που έχει την καλύτερη τιμή στην συνάρτηση καταλληλότητας και την ορίζει ως ολικό βέλτιστο, ενώ ορίζεται και η θέση του ως η θέση του νέου ολικού βέλτιστου.
5. Ενημερώνει τις καινούριες ταχύτητες και τις θέσεις όλων των σωματιδίων.
6. Επαναλαμβάνει τα βήματα 2-5 μέχρι να φτάσει σε ένα αρκετά καλό αποτέλεσμα ή να συμπληρωθεί ο αριθμός των επαναλήψεων που έχουν οριστεί.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα ροής αλγοριθμικής διαδικασίας βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων

## 5.4 Μοντελοποίηση προβλήματος

### 5.4.1 Καθορισμός μονάδων προς ένταξη στο σύστημα (unit commitment)

Δεδομένου της απλότητας και της ευκολίας στη ρύθμιση των παραμέτρων, για την επίλυση του προβλήματος ένταξης μονάδων στο σύστημα (unit commitment) που παρουσιάζεται σε αυτή την εργασία, χρησιμοποιήσαμε τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization).

Στόχος όπως προαναφέραμε, είναι η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης του συνολικού κόστους λειτουργίας του συστήματος, κάτω από συγκεκριμένους περιορισμούς που παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Θεωρούμε ένα πρόβλημα με  $T$  περίοδο χρονικών διαστημάτων και αποτελούμενο από NGEN (Number of Generators) θερμικές μονάδες. Τότε, σε κάθε χρονική στιγμή  $j$ , η συνάρτηση που μας δίνει το κόστος παραγωγής FC (Fuel Cost) δίνεται από τον τύπο:

$$FC_j(P_{ij}) = (A_i + B_i P_{ij} + C_i P_{ij}^2 + D_i P_{ij}^3) * FP_i$$

Οπότε, η αντικειμενική συνάρτηση συνολικού κόστους λειτουργίας του συστήματος προς ελαχιστοποίηση που προκύπτει, είναι η ακόλουθη:

$$\min TFC = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^{NGEN} [FC_j(P_{ij})] XGEN_{ij} + \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^{NGEN} [SU_{ij} XGEN_{ij} (1 - XGEN_{i(j-1)})]$$

Η παραπάνω εξίσωση υποβάλλεται και στους παρακάτω περιορισμούς:

Η συνολική παραγωγή του συστήματος, θα πρέπει σε κάθε χρονική στιγμή  $j$ , να ισούται με την ζήτηση του φορτίου.

$$\sum_{i=1}^{NGEN} P_{ij} XGEN_{ij} - LD_j = 0$$

Η κάθε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όταν βρίσκεται σε λειτουργία, έχει μία ελάχιστη παραγωγή και μία μέγιστη παραγωγική ικανότητα.

$$P_i^{MIN} \leq P_{ij} \leq P_i^{MAX}$$



Για να είναι σε θέση μια θερμική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας να τεθεί εκτός λειτουργίας, θα πρέπει να βρίσκεται σε λειτουργία για χρονικό διάστημα μεγαλύτερο ή ίσο από τον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας της κάθε μονάδας.

$$TS_{ij}^{ON} \geq MUT_i$$

Αντίστοιχα με τον αναγκαστικό ελάχιστο χρόνο λειτουργίας μιας θερμικής μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, έχουμε και ένα τεχνικό ελάχιστο στο χρόνο, που μια μονάδα θα χρειαστεί να βρίσκεται σε κράτηση μέχρι να επαναλειτουργήσει. Ο χρόνος αυτός πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος από τον ελάχιστο χρόνο κράτησης.

$$TS_{ij}^{OFF} \geq MDT_i$$

Για να ικανοποιείται ο περιορισμός της στρεφόμενης εφεδρείας που έχει επιλεχθεί για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, πρέπει η μέγιστη παραγωγική ικανότητα των θερμικών μονάδων που βρίσκονται σε λειτουργία κάθε χρονική στιγμή, να είναι μεγαλύτερη ή ίση από το άθροισμα του φορτίου ζήτησης με την επιθυμητή στρεφόμενη εφεδρεία.

$$\sum_{i=1}^{NGEN} P_i^{MAX} XGEN_{ij} \geq LD_j + SR_j$$

Όπου,

**NGEN (Number of Generators)**, ο αριθμός των μονάδων παραγωγής στο ΣΗΕ.

**T (Time)**, το χρονικό διάστημα μελέτης του ΣΗΕ.

**P<sub>ij</sub> (Production)**, η παραγωγή της μονάδας i τη χρονική στιγμή j.

**A<sub>i</sub>**, συντελεστής σταθερού όρου εξίσωσης κόστους μονάδας.

**B<sub>i</sub>**, συντελεστής γραμμικού όρου εξίσωσης κόστους μονάδας.

**C<sub>i</sub>**, συντελεστής τετραγωνικού όρου εξίσωσης κόστους μονάδας.

**D<sub>i</sub>**, συντελεστής κυβικού όρου εξίσωσης κόστους μονάδας.

**XGEN<sub>ij</sub>**, κατάσταση λειτουργίας on (1) / off (2) της μονάδας i τη στιγμή j.

**SU<sub>ij</sub>**, το κόστος εκκίνησης μιας μονάδας.

**LD<sub>j</sub>**, το φορτίο ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος τη στιγμή j.

**FC<sub>i</sub>(P<sub>ij</sub>)**, το κόστος παραγωγής της θερμικής μονάδας i τη στιγμή j.

**FP<sub>i</sub>**, η τιμή καυσίμου της μονάδας i, ανά kg-lt.

**TFC**, το συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος προς ελαχιστοποίηση.

**P<sub>i</sub><sup>max</sup>**, η μέγιστη ικανότητα παραγωγής μίας θερμικής μονάδας παραγωγής.

$P_i^{\min}$ , η ελάχιστη ικανότητα παραγωγής μίας θερμικής μονάδας παραγωγής.  
 $TS_{ij}^{ON}$ , ο χρόνος που η μηχανή  $i$  είναι σε λειτουργία.  
 $TS_{ij}^{OFF}$ , ο χρόνος που η μηχανή  $i$  είναι σε κράτηση.  
 $MUT_i$ , ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της μηχανής  $i$ .  
 $MDT_i$ , ο ελάχιστος χρόνος κράτησης της μηχανής  $i$ .  
 $SR_j$ , η στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος τη χρονική στιγμή  $j$ .

#### 5.4.2 Οικονομική κατανομή του φορτίου και καθορισμός σημείων λειτουργίας των μονάδων

Η σημασία της οικονομικής κατανομής φορτίου στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγάλη, καθώς είναι αυτή που καθορίζει τα σημεία λειτουργίας των ενεργών θερμικών μονάδων παραγωγής. Συνεπώς βελτιστοποιεί το συνολικό κόστος λειτουργίας των θερμικών μονάδων παραγωγής που επιλέχθηκαν να είναι ενεργές, για κάθε χρονική στιγμή από το πρόβλημα ένταξης μονάδων.

Αντίστοιχα με το προηγούμενο μοντέλο, υπακούει και αυτή σε συγκεκριμένους περιορισμούς βελτιστοποίησης. Το ανώτερο και το κατώτερο όριο παραγωγής κάθε θερμικής μονάδας, όπως επίσης πρέπει το άθροισμα της παραγωγής των ενεργών μονάδων να είναι ίσο με το φορτίο ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος.

Το συνολικό κόστος παραγωγής όλου του συστήματος, ελαχιστοποιείται όταν όλες οι μονάδες παραγωγής λειτουργούν με το ίδιο οριακό κόστος. Για λόγους απλούστευσης, στην εργασία αυτή, οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας παραλείπονται.

Θεωρούμε ένα πρόβλημα με  $T$  περίοδο χρονικών διαστημάτων και αποτελούμενο από  $NGEN$  (Number of Generators) θερμικές μονάδες. Τότε, σε κάθε χρονική στιγμή  $j$ , η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση στο πρόβλημα οικονομικής κατανομής είναι:

$$\min FC_j(P_{ij}) = \sum_{i=1}^{NGEN} (A_i + B_i P_{ij} + C_i P_{ij}^2 + D_i P_{ij}^3) * FP_i$$

Η συνολική παραγωγή του συστήματος, θα πρέπει σε κάθε χρονική στιγμή  $j$ , να ισούται με την ζήτηση του φορτίου.

$$\sum_{i=1}^{NGEN} P_{ij} = LD_j$$

Η κάθε μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, όταν βρίσκεται σε λειτουργία, έχει μία ελάχιστη παραγωγή και μία μέγιστη παραγωγική ικανότητα.

$$P_i^{MIN} \leq P_{ij} \leq P_i^{MAX}$$

Όπου,

**NGEN (Number of Generators)**, ο αριθμός των μονάδων παραγωγής στο ΣΗΕ.

**T (Time)**, το χρονικό διάστημα μελέτης του ΣΗΕ.

**P<sub>ij</sub> (Production)**, η παραγωγή της μονάδας *i* τη χρονική στιγμή *j*.

**A<sub>i</sub>**, συντελεστής σταθερού όρου εξίσωσης κόστους μονάδας.

**B<sub>i</sub>**, συντελεστής γραμμικού όρου εξίσωσης κόστους μονάδας.

**C<sub>i</sub>**, συντελεστής τετραγωνικού όρου εξίσωσης κόστους μονάδας.

**D<sub>i</sub>**, συντελεστής κυβικού όρου εξίσωσης κόστους μονάδας.

**LD<sub>j</sub>**, το φορτίο ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος τη στιγμή *j*.

**FC<sub>i</sub>(P<sub>ij</sub>)**, το κόστος παραγωγής της θερμικής μονάδας *i* τη χρονική στιγμή *j*.

**FP<sub>i</sub>**, η τιμή του καυσίμου της μονάδας *i*, ανά kg-lt.

**P<sub>i</sub><sup>max</sup>**, η μέγιστη ικανότητα παραγωγής μίας θερμικής μονάδας παραγωγής.

**P<sub>i</sub><sup>min</sup>**, η ελάχιστη ικανότητα παραγωγής μίας θερμικής μονάδας παραγωγής.

Για την επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής στη εργασία αυτή, προτείνεται η συνάρτηση *fmincon*, η οποία περιλαμβάνεται στα βασικά εργαλεία βελτιστοποίησης της Matlab, αγνοώντας όπως αναφέραμε προηγουμένως τις απώλειες μεταφοράς του συστήματος.

Η μοντελοποίηση της συνάρτησης *fmincon*, για την βελτιστοποίηση μίας μη γραμμικής συνάρτησης πολλών μεταβλητών ορίζεται ως:

$$\min F(x)$$

Υπό τους περιορισμούς:

$$g(x) = 0$$

$$h(x) \leq 0$$

$$A_1 * x - b_1 = 0$$

$$A_2 * x - b_2 \leq 0$$

$$lb \leq x \leq ub$$

Όπου,

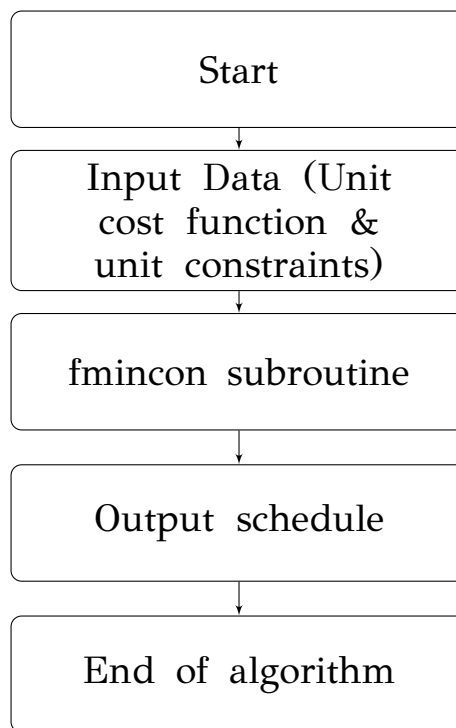
**x**, **b<sub>1</sub>**, **b<sub>2</sub>**, **lb** και **ub** είναι διανύσματα.

$g(x)$  και  $h(x)$  είναι συναρτήσεις που επιστρέφουν διανύσματα.

Οι συναρτήσεις  $F(x)$ ,  $g(x)$  και  $h(x)$ , μπορούν να είναι μη γραμμικές.

Η συνάρτηση `fmincon` αποτελεί μία από τις πιο αποτελεσματικές μεθόδους επίλυσης αριθμητικών μη γραμμικών προβλημάτων βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Στηρίζεται σε μια βαθιά θεωρητική θεμελίωση και παρέχει ισχυρά αλγοριθμικά εργαλεία για την επίλυση μεγάλης κλίμακας προβλημάτων. Είναι μία επαναληπτική διαδικασία, όπου σε κάθε επανάληψη εκτελείται μία αλληλουχία βημάτων. Κάθε μία από αυτές τις επαναλήψεις, αφορά και από ένα υποπρόβλημα. Η λύση κάθε υποπροβλήματος, χρησιμοποιείται για να κατασκευαστεί η επόμενη επανάληψη. Η κατασκευή γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε η ακολουθία που δημιουργείται, να συγκλίνει σε ένα τοπικό ελάχιστο.

Ένα διάγραμμα ροής της λειτουργίας της συνάρτησης `fmincon` παραλείποντας τις απώλειες μεταφοράς του συστήματος, παρουσιάζεται παρακάτω.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ροής αλγοριθμικής διαδικασίας βελτιστοποίησης με τη συνάρτηση `fmincon`

## 5.5 Αβεβαιότητα λόγω αιολικής παραγωγής

Μία αρκετά απλή και συνηθισμένη μέθοδος καθορισμού της αναγκαίας στρεφόμενης εφεδρείας, είναι η διατήρηση ενός συγκεκριμένου ποσοστού στρεφόμενης εφε-

δρεΐας συναρτήσσει του προβλεπόμενου φορτίου παραγωγής. Οι μονάδες που θα ενταχθούν, θα πρέπει να μπορούν να ικανοποιήσουν όχι μόνο το καθορισμένο φορτίου του συστήματος, αλλά και το επιπλέον αυτό ποσοστό. Συχνά οι χειριστές σε ορισμένα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, εφαρμόζουν την πολιτική της διατήρησης στρεφόμενης εφεδρείας τουλάχιστον ίσης με την ισχύ της μεγαλύτερης μονάδας παραγωγής που είναι ενταγμένη, ώστε σε περίπτωση βλάβης ακόμη και αυτής της μονάδας, το σύστημα να μπορεί να ικανοποιήσει τη ζήτηση. Σε διασυνδεδεμένα συστήματα, η ποσότητα της στρεφόμενης εφεδρείας, μπορεί να είναι ίση με την απώλεια ισχύος σε περίπτωση απώλειας διασυνδετικής γραμμής.

Αντίστοιχα με τον τρόπο αντιμετώπισης της εφεδρείας στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικές μονάδες παραγωγής, μπορούμε να διαχειριστούμε την αβεβαιότητα από την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η αιολική εφεδρεία, ορίζεται ως ένα σταθερό ποσοστό επί της αιολικής παραγωγικής δυνατότητας των μονάδων και δίνεται από τη σχέση:

$$WR(t) = \lambda(t) * WP(t)$$

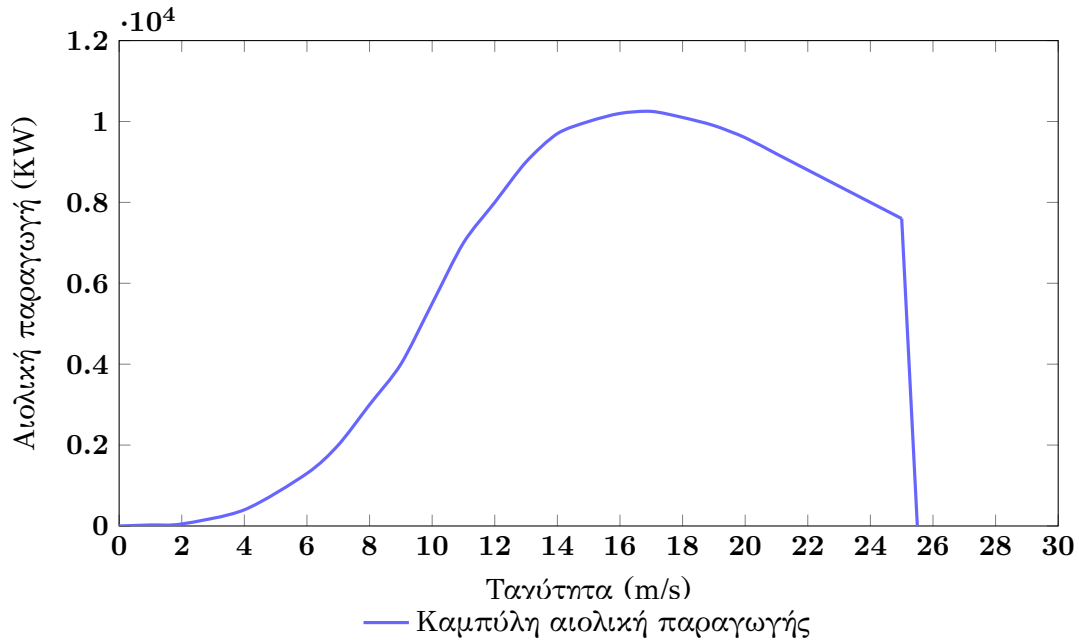
Όπου,

**WR (Wind Reserve)**, η εφεδρεία για την αιολική παραγωγή.

**WP (Wind Production)**, η πρόβλεψη αιολικής παραγωγής.

$\lambda$ , ο συντελεστής αιολικής εφεδρείας εξαρτώμενος από το ύψος της αιολικής παραγωγής με  $0,2 \leq \lambda \leq 1$ . Ο συντελεστής  $\lambda$  αντικατοπτρίζει τη μεταβολή της παραγωγής ενός αιολικού πάρκου, καθώς μεταβάλλεται η ταχύτητα του ανέμου.

Η διακύμανση της ταχύτητας του ανέμου, έχει σημαντική επίπτωση στη διακύμανση της αιολικής παραγωγής. Εάν η ταχύτητα του ανέμου είναι μικρή, είναι και η αιολική παραγωγή μικρή. Αντίθετα, όσο η ταχύτητα του ανέμου αυξάνει, τόσο η εξάρτηση της αιολικής παραγωγής από τη μεταβολή του ανέμου μειώνεται. Επομένως, το ποσοστό της εφεδρείας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των αιολικών πάρκων που πρέπει να διατηρηθεί, είναι φθίνουσα συνάρτηση της εκτιμώμενης αιολικής παραγωγής.



Σχήμα 5.3: Καμπύλη αιολικής παραγωγής ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου

Η αύξηση της αιολικής παραγωγής με την ταχύτητα του ανέμου, μπορεί να προσεγγισθεί από μία γραμμική συνάρτηση μέχρι την ταχύτητα ονομαστικής λειτουργίας των πάρκων. Αντίστοιχα ο συντελεστής εφεδρείας, ο οποίος μειώνεται με την αύξηση της αιολικής παραγωγής, θα πρέπει να μειώνεται γραμμικά. Είναι επίσης χαρακτηριστικό, ότι με την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, γίνεται μικρότερη η μείωση του συντελεστή  $\lambda$  όταν αυξάνεται το φορτίο. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η ίδια αιολική παραγωγή, επιτυγχάνεται σε μικρότερες ταχύτητες ανέμου, επομένως είναι πιο ευαίσθητη στη μείωση του ανέμου από ότι όταν η εγκατεστημένη ισχύς είναι μικρή. Ο συντελεστής αιολικής εφεδρείας  $\lambda$  δίνεται από τη σχέση:

$$\lambda(t) = \left( 1 - \frac{(1 - 0.2)}{INSCAP} * WP(t) \right)$$

Όπου,

**INSCAP (Installed Capacity)**, η μέγιστη ικανότητα παραγωγής των αιολικών πάρκων του υπό εξέταση δικτύου.

Ο συντελεστής  $\lambda$  γίνεται ίσος με 1, όταν η αιολική παραγωγή είναι πάρα πολύ μικρή, που σημαίνει ότι η ταχύτητα ανέμου είναι πολύ χαμηλή και μία μικρή μείωση της ταχύτητας του ανέμου επιφέρει σημαντική μείωση της παραγόμενης ισχύος, επομένως για αυτήν την αβεβαιότητα οι χειριστές του συστήματος πρέπει να διατηρούν μεγαλύτερο ποσοστό εφεδρείας επί της παραγωγής του αιολικού πάρκου. Δηλαδή θεωρείται ότι ακόμη και στη μέγιστη ικανότητα παραγωγής των αιολικών πάρκων,

λαμβάνουμε ως εφεδρεία το 20% της αιολικής παραγωγής, διότι δεν μπορούμε να γνωρίζουμε ακριβώς την ταχύτητα του ανέμου, ενδεχομένως να είμαστε πολύ κοντά στο όριο αποκοπής του πάρκου (cut-off speed) λόγω μεγάλης ταχύτητας του ανέμου. Αν όμως η ταχύτητα είναι γνωστή, τότε ο συντελεστής λ μπορεί να λάβει τιμή ίση ακόμη και με 1, αν υπάρχει ο κίνδυνος μείωσης της αιολικής παραγωγής με μικρή αύξηση της ταχύτητας.

## 5.6 Τροποποιήσεις λόγω διείσδυσης αιολικής παραγωγής

Δεδομένου ότι η ικανοποίηση ενός τμήματος του φορτίου ζήτησης θα πραγματοποιείται πλέον από την αιολική παραγωγή, είναι απαραίτητο να γίνουν ορισμένες τροποποιήσεις στο μοντέλο που παρουσιάστηκε παραπάνω. Οι τροποποιήσεις αυτές, αφορούν:

1. τον καθορισμό του φορτίου προς κατανομή
2. τον καθορισμό της εφεδρείας του συστήματος

### Καθορισμός του φορτίου προς κατανομή

Η εξυπηρέτηση του φορτίου ζήτησης των καταναλωτών, θα γίνεται όχι μόνο με την παραγόμενη ενέργεια από τις θερμικές μονάδες παραγωγής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και από τα εγκατεστημένα αιολικά πάρκα που είναι συνδεδεμένα με αυτό. Συνεπώς, ο τύπος που μας δίνει την συνολική παραγωγή του συστήματος για κάθε χρονική στιγμή, είναι:

$$\sum_{i=1}^{NGEN} P_{ij} XGEN_{ij} = LD_j - WP_j$$

Όπου,

**NGEN (Number of Generators)**, ο αριθμός των μονάδων παραγωγής στο ΣΗΕ.

**P<sub>ij</sub> (Production)**, η παραγωγή της μονάδας i τη χρονική στιγμή j.

**XGEN<sub>ij</sub>**, κατάσταση λειτουργίας on (1) / off (2) της μονάδας i τη στιγμή j.

**LD<sub>j</sub>**, το φορτίο ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος τη στιγμή j.

**WP<sub>j</sub>**, η παραγωγή αιολικής ενέργειας από τα Α/Π τη στιγμή j.

### Καθορισμός της εφεδρείας του συστήματος

Σύμφωνα με την μέθοδο αντιμετώπισης της αβεβαιότητας της αιολικής παραγωγής που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, διαπιστώνουμε ότι το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με διείσδυση αιολικής παραγωγής περιλαμβάνει δύο διαφορετικές

εφεδρείες. Την στρεφόμενη εφεδρεία για τις θερμικές μονάδες παραγωγής, με στόχο την κάλυψη πιθανής βλάβης ή της μη σωστής πρόβλεψης του φορτίου ζήτησης και την αιολική εφεδρεία, με στόχο την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας. Συνεπώς, ο τύπος που μας δίνει την συνολική εφεδρεία του συστήματος για κάθε χρονική στιγμή, είναι:

$$\sum_{i=1}^{NGEN} P_i^{MAX} XGEN_{ij} \geq LD_j + SR_j + WR_j$$

Όπου,

**NGEN (Number of Generators)**, ο αριθμός των μονάδων παραγωγής στο ΣΗΕ.

**XGEN<sub>ij</sub>**, κατάσταση λειτουργίας on (1) / off (2) της μονάδας i τη στιγμή j.

**WR<sub>i</sub>**, η αιολική εφεδρεία τη χρονική στιγμή j.

**LD<sub>j</sub>**, το φορτίο ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος τη στιγμή j.

**P<sub>i</sub><sup>max</sup>**, η μέγιστη ικανότητα παραγωγής μίας θερμικής μονάδας παραγωγής.

**SR<sub>j</sub>**, η στρεφόμενη εφεδρεία του συστήματος τη χρονική στιγμή j.



## Κεφάλαιο 6

# Σενάρια & επίλυση προβλήματος

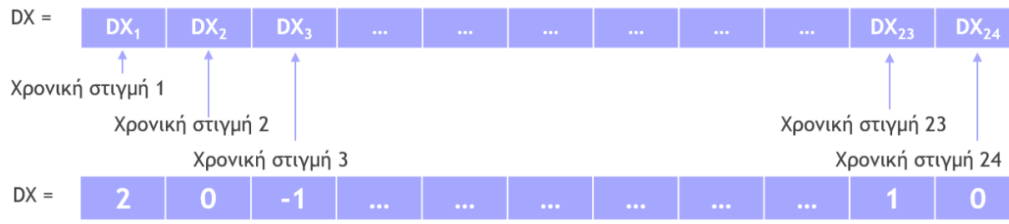
Για την ανάλυση και τη μελέτη του προβλήματός μας, θα υποθέσουμε τρία διαφορετικά σενάρια αιολικής παραγωγής. Η διαφορά στις τρεις υποθετικές περιπτώσεις, είναι το ποσό της παραγόμενης ισχύος από τα αιολικά πάρκα που είναι εγκατεστημένα στο νησί, συνεπώς η ενέργεια που διεισδύει εν τέλει στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης. Η ανάλυση θα γίνει σε χρονικό ορίζοντα 24 ωρών.

Όλα τα σενάρια θα συγκριθούν με την περίπτωση που στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δεν υπάρχει καθόλου διείσδυση αιολική παραγωγής, αλλά και μεταξύ τους, ώστε να βγουν συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της αυξημένης διείσδυσης στο ΣΗΕ, τα οικονομικά οφέλη από την αύξηση των αιολικών πάρκων στο νησί της Κρήτης και των αλλαγών και των ρυθμίσεων που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ώστε το σύστημα να παραμένει ευσταθές και ποιοτικό.

Η εφαρμογή των αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων και της οικονομικής κατανομής φορτίου αντιστοιχα, θα υλοποιηθεί στο πρόγραμμα της MATLAB. Τα εργαλεία που θα χρησιμοποιηθούν είναι το PSO toolbox και η προεγκατεστημένη συνάρτηση της MATLAB `fmincon`.

Για την επίλυση του προβλήματος, παράγονται τυχαία διανύσματα μεταβολής κατάστασης των θερμικών μονάδων (DX), τα οποία βαθμολογούνται από τον αλγόριθμο PSO με βάση το συνολικό κόστος παραγωγής που προκύπτει. Το διάνυσμα με το μικρότερο συνολικό κόστος λειτουργίας, δίνει και τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Το κάθε διάνυσμα μεταβολής DX αποτελείται από 24 κελιά. Κάθε κελί του διανύσματος, μπορεί να πάρει μία τιμή στο διάστημα  $[-3,3]$  και συμβολίζει τον αριθμό των θερμικών μονάδων παραγωγής που θα μεταβληθεί η κατάστασή τους, σε κάθε χρονική στιγμή που μελετάτε το σύστημα.

Για παράδειγμα, αν ένα κελί του διανύσματος έχει την τιμή 2, σημαίνει ότι εκείνη τη χρονική στιγμή θα ενταχθούν στο σύστημα επιπλέον 2 μονάδες, αν η τιμή είναι 0 θα παραμείνουν σε λειτουργία οι ίδιες μονάδες, ενώ αν είναι -1, θα μπει σε κράτηση μία μονάδα.



Σχήμα 6.1: Διάνυσμα μεταβολής κατάστασης μονάδων DX

Η επιλογή των μονάδων που θα ενταχθούν στο σύστημα ή των μονάδων που θα μπου σε κράτηση, γίνεται με σειρά προτεραιότητας (List Priority).

Οι θερμικές μονάδες παραγωγής του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, έχουν ταξινομηθεί με βάση το κόστος παραγωγής ανά MW. Για κάθε μονάδα η τιμή αυτή, υπολογίστηκε με τον τύπο:

$$EFF_i = \frac{MAXOC_i}{P_i^{MAX}}$$

Όπου,

$MAXOC_i$ , το κόστος λειτουργίας μίας μονάδας για τη μέγιστη παραγωγή της.

Στις περιπτώσεις όπου συμπίπτει η τιμή κόστους ανά MW των μονάδων, γίνεται ταξινόμηση σύμφωνα με το εύρος παραγωγής τους (προτιμάται εκείνη με το μεγαλύτερο εύρος παραγωγής), ενώ για τις περιπτώσεις που πάλι οι τιμές συμπίπτουν, η ταξινόμηση γίνεται σύμφωνα με το κόστος εκκίνησής τους (προτιμάται η μονάδα με το μικρότερο κόστος εκκίνησης).

Για όλα τα σενάρια που ακολουθούν, οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για την αρχικοποίηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων είναι:

<b>PS = 200</b>	Ο αριθμός των σωματιδίων του αλγορίθμου
<b>Epochs = 45</b>	Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου
<b>varrange(1:24,1) = -3</b>	Η ελάχιστη τιμή που μπορεί να πάρει σε κάθε κελί του το διάνυσμα DX
<b>varrange(1:24,2) = 3</b>	Η μέγιστη τιμή που μπορεί να πάρει σε κάθε κελί του το διάνυσμα DX

Ακόμα, ένα τυχαίο αρχικό διάνυσμα DX για την εκπαίδευση του αλγορίθμου, το οποίο πληροί όλους τους περιορισμούς, είναι:

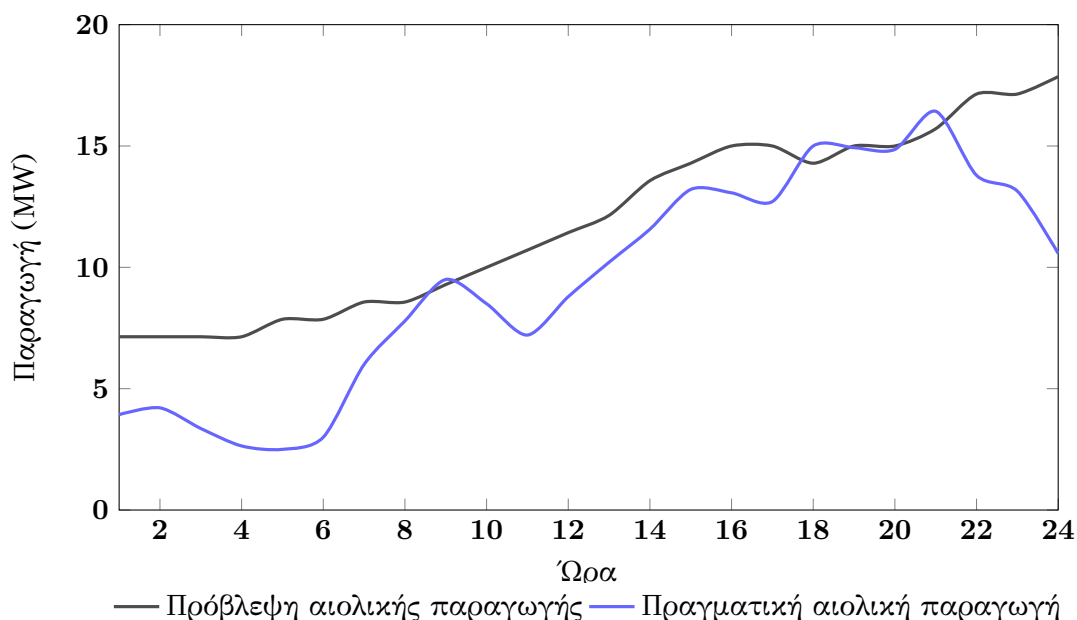
$$PSOseedvalue = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 3 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1]$$

Αντίστοιχα, οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν για την αρχικοποίηση του ΣΗΕ της Κρήτης, είναι:

$X_0 = 15$	Ο αριθμός των μονάδων παραγωγής, που είναι σε λειτουργία τη χρονική στιγμή $T=0$ .
$TS(1,1;X_0) = 3$	Ο χρόνος, που οι ενταγμένες μονάδες παραγωγής, βρίσκονται ήδη σε λειτουργία.
$TS(1,X_0;26) = -2$	Ο χρόνος, που οι μη ενταγμένες μονάδες παραγωγής, βρίσκονται ήδη σε κράτηση.
$SRP = 0.15$	Το ποσοστό της στρεφόμενης εφεδρείας, που έχει επιλεγεί για το ΣΗΕ της Κρήτης.

## 6.1 Χαμηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας στο ΣΗΕ της Κρήτης

Στο πρώτο σενάριο, η υπόθεση που γίνεται, είναι η παραγόμενη ισχύς από τα αιολικά πάρκα που είναι εγκατεστημένα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, να είναι χαμηλή. Στο γράφημα που ακολουθεί, φαίνονται οι καμπύλες που αφορούν την πρόβλεψη αιολικής παραγωγής, όπως επίσης και την πραγματική αιολική παραγωγή στο νησί της Κρήτης, μία τυχαία ημέρα του μήνα Οκτωβρίου του έτους 2016, με χαμηλή παραγωγή.



Σχήμα 6.2: Καμπύλες πρόβλεψης & πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας για χαμηλή διείσδυση στο ΣΗΕ

Στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται αναλυτικότερα τα δεδομένα πραγματικής αιολικής παραγωγής και πρόβλεψης αιολικής παραγωγής, της αντίστοιχης ημέρας.

Ώρα	Πραγματική Αιολική Παραγωγή (MW)	Πρόβλεψη Αιολικής Παραγωγής (MW)
01:00	3,93	7,14
02:00	4,21	7,14
03:00	3,36	7,14
04:00	2,64	7,14
05:00	2,50	7,86
06:00	3,00	7,86
07:00	6,00	8,57
08:00	7,79	8,57
09:00	9,50	9,29
10:00	8,50	10,00
11:00	7,21	10,71
12:00	8,79	11,43
13:00	10,21	12,14
14:00	11,57	13,57
15:00	13,21	14,29
16:00	13,07	15,00
17:00	12,71	15,00
18:00	15,00	14,29
19:00	14,93	15,00
20:00	14,86	15,00
21:00	16,43	15,71
22:00	13,79	17,14
23:00	13,14	17,14
24:00	10,57	17,86

Πίνακας 6.1: Ωριαία πρόβλεψη παραγωγής και πραγματική αιολική παραγωγή, για χαμηλή διείσδυση στο ΣΗΕ

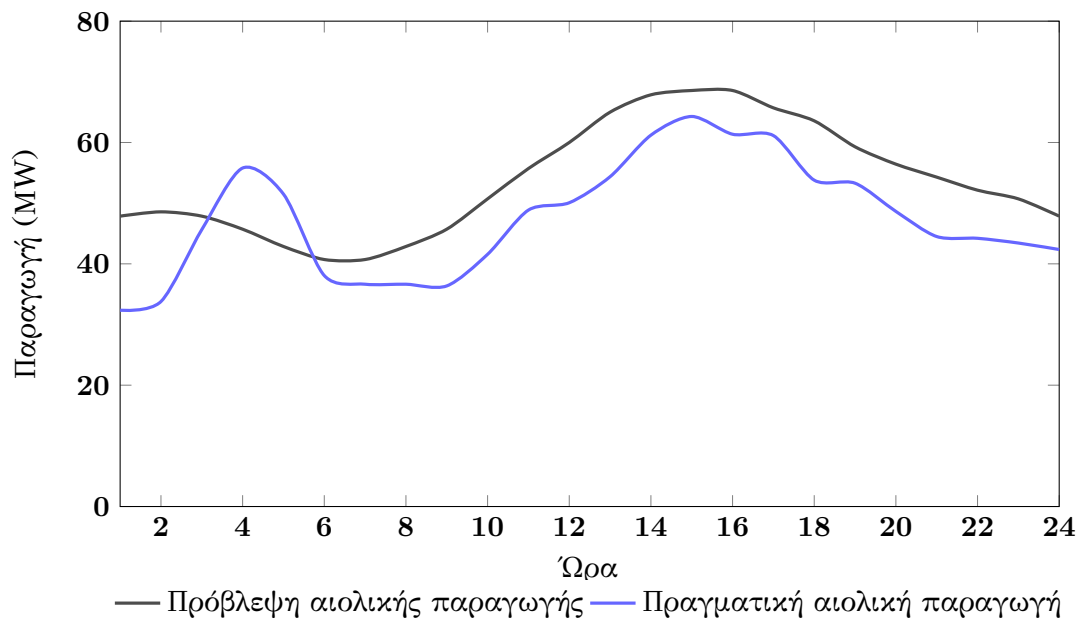
Για τη δοσμένη ζήτηση φορτίου που φαίνεται παρακάτω, έχει υπολογιστεί για κάθε ώρα που μελετάτε το σύστημα, το ποσοστό αιολικής διείσδυσης στο ΣΗΕ. Ο μέσος όρος διείσδυσης του σεναρίου αυτού, δεν ξεπερνά το 2% της συνολικής παραγωγής.

Ώρα	Αιολική Παραγωγή (MW)	Φορτίο Ζήτησης (MW)	Ποσοστό Διείσδυσης
01:00	3,93	283	1%
02:00	4,21	245	2%
03:00	3,36	229	1%
04:00	2,64	218	1%
05:00	2,50	245	1%
06:00	3,00	220	1%
07:00	6,00	218	3%
08:00	7,79	292	3%
09:00	9,50	350	3%
10:00	8,50	400	2%
11:00	7,21	428	2%
12:00	8,79	439	2%
13:00	10,21	438	2%
14:00	11,57	435	3%
15:00	13,21	410	3%
16:00	13,07	385	3%
17:00	12,71	380	3%
18:00	15,00	420	4%
19:00	14,93	485	3%
20:00	14,86	485	3%
21:00	16,43	485	3%
22:00	13,79	430	3%
23:00	13,14	385	3%
24:00	10,57	339	3%

Πίνακας 6.2: Ωριαία αιολική παραγωγή, φορτίο ζήτησης και ποσοστό διείσδυσης, για χαμηλή διείσδυση στο ΣΗΕ

## 6.2 Μέση διείσδυση αιολικής ενέργειας στο ΣΗΕ της Κρήτης

Το δεύτερο σενάριο προς μελέτη, είναι το σενάριο όπου η παραγόμενη ισχύς από τα αιολικά πάρκα που είναι εγκατεστημένα στο νησί της Κρήτης, είναι μέτρια. Περίπου δηλαδή στο μισό από τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ αυτών. Στο γράφημα που ακολουθεί, φαίνονται οι καμπύλες που αφορούν την πρόβλεψη αιολικής παραγωγής, όπως επίσης και την πραγματική αιολική παραγωγή στο νησί της Κρήτης, μία τυχαία ημέρα του μήνα Μαρτίου του έτους 2016, με μέτρια παραγωγή.



Σχήμα 6.3: Καμπύλες πρόβλεψης & πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας, για μέση διείσδυση στο ΣΗΕ

Ακολουθούν τα αναλυτικά στοιχεία πραγματικής αιολικής παραγωγής και πρόβλεψης αιολικής παραγωγής, της αντίστοιχης ημέρας.

## 6.2 Μέση διείσδυση αιολικής ενέργειας στο ΣΗΕ της Κρήτης

Ώρα	Πραγματική Αιολική Παραγωγή (MW)	Πρόβλεψη Αιολικής Παραγωγής (MW)
01:00	32,36	47,86
02:00	33,79	48,57
03:00	45,64	47,86
04:00	55,79	45,71
05:00	51,50	42,86
06:00	38,07	40,71
07:00	36,64	40,71
08:00	36,64	42,86
09:00	36,36	45,71
10:00	41,57	50,71
11:00	48,86	55,71
12:00	50,07	60,00
13:00	54,36	65,00
14:00	61,21	67,86
15:00	64,29	68,57
16:00	61,36	68,57
17:00	61,14	65,71
18:00	53,79	63,57
19:00	53,29	59,29
20:00	48,64	56,43
21:00	44,50	54,29
22:00	44,21	52,14
23:00	43,43	50,71
24:00	42,36	47,86

Πίνακας 6.3: Ωριαία πρόβλεψη παραγωγής και πραγματική αιολική παραγωγή, για μέση διείσδυση στο ΣΗΕ

Για τη δοσμένη ζήτηση φορτίου που φαίνεται παρακάτω, έχει υπολογιστεί για κάθε ώρα που μελετάται το σύστημα, το ποσοστό αιολικής διείσδυσης στο ΣΗΕ. Ο μέσος όρος διείσδυσης του σεναρίου αυτού, είναι κοντά στο 14% της συνολικής παραγωγής.

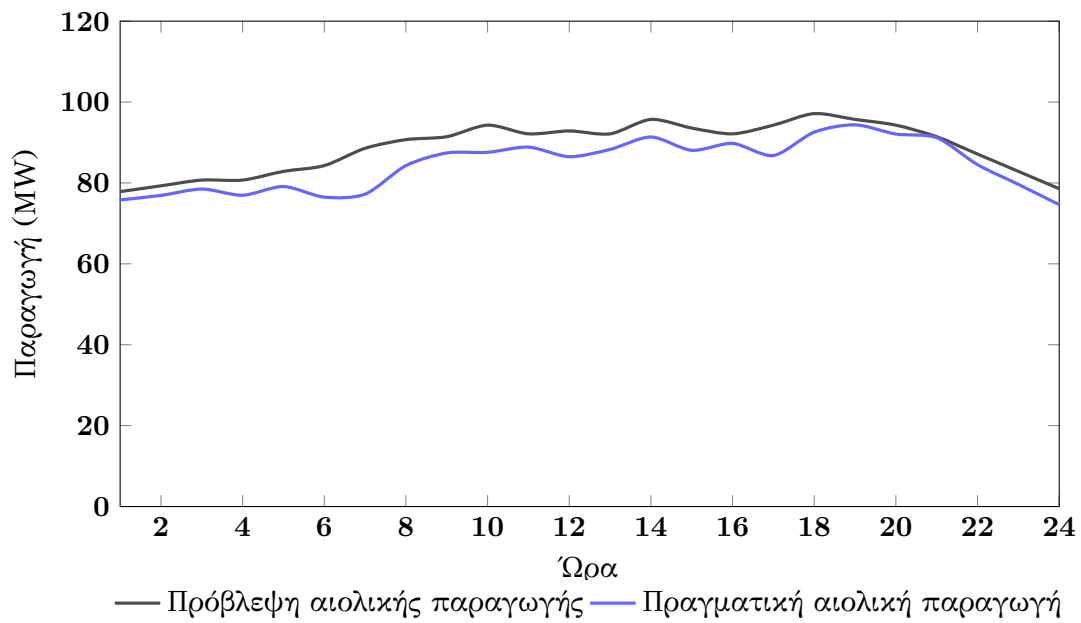
Ώρα	Αιολική Παραγωγή (MW)	Φορτίο Ζήτησης (MW)	Ποσοστό Διείσδυσης
01:00	32,36	283	11%
02:00	33,79	245	14%
03:00	45,64	229	20%
04:00	55,79	218	26%
05:00	51,50	245	21%
06:00	38,07	220	17%
07:00	36,64	218	17%
08:00	36,64	292	13%
09:00	36,36	350	10%
10:00	41,57	400	10%
11:00	48,86	428	11%
12:00	50,07	439	11%
13:00	54,36	438	12%
14:00	61,21	435	14%
15:00	64,29	410	16%
16:00	61,36	385	16%
17:00	61,14	380	16%
18:00	53,79	420	13%
19:00	53,29	485	11%
20:00	48,64	485	10%
21:00	44,50	485	9%
22:00	44,21	430	10%
23:00	43,43	385	11%
24:00	42,36	339	12%

Πίνακας 6.4: Ωριαία αιολική παραγωγή, φορτίο ζήτησης και ποσοστό διείσδυσης, για μέση διείσδυση στο ΣΗΕ

### 6.3 Υψηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας στο ΣΗΕ της Κρήτης

Το τρίτο και τελευταίο σενάριο που θα αναλυθεί, είναι εκείνο, όπου η παραγόμενη ισχύς από τα αιολικά πάρκα που είναι εγκατεστημένα στο νησί της Κρήτης, είναι μεγάλη. Στο παρακάτω γράφημα, φαίνονται οι καμπύλες της πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής και της πραγματικής αιολικής παραγωγής στο νησί της Κρήτης, μία τυχαία ημέρα του μήνα Αύγουστου του έτους 2016, με υψηλή παραγωγή.





Σχήμα 6.4: Καμπύλες πρόβλεψης & πραγματικής παραγωγής αιολικής ενέργειας, για υψηλή διείσδυση στο ΣΗΕ

Στον παρακάτω πίνακα, παρατίθενται αναλυτικότερα τα δεδομένα πραγματικής αιολικής παραγωγής και πρόβλεψης αιολικής παραγωγής, της αντίστοιχης ημέρας.

Ωρα	Πραγματική Αιολική Παραγωγή (MW)	Πρόβλεψη Αιολικής Παραγωγής (MW)
01:00	75,81	77,86
02:00	76,92	79,29
03:00	78,49	80,71
04:00	76,97	80,71
05:00	79,12	82,86
06:00	76,50	84,29
07:00	77,24	88,57
08:00	84,29	90,71
09:00	87,42	91,43
10:00	87,57	94,29
11:00	88,86	92,14
12:00	86,50	92,86
13:00	88,29	92,14
14:00	91,36	95,71
15:00	88,07	93,57
16:00	89,78	92,14
17:00	86,79	94,29
18:00	92,57	97,14
19:00	94,37	95,71
20:00	92,09	94,29
21:00	91,18	91,43
22:00	84,52	87,14
23:00	79,65	82,86
24:00	74,63	78,57

Πίνακας 6.5: Ωριαία πρόβλεψη παραγωγής και πραγματική αιολική παραγωγή, για υψηλή διείσδυση στο ΣΗΕ

Βάσει της ζήτησης φορτίου που φαίνεται παρακάτω, το σενάριο αυτό, επιλέχθηκε με στόχο το ποσοστό διείσδυσης να είναι υψηλό. Γι' αυτό το λόγο, στιγμιαία όπως φαίνεται και στον πίνακα, το ποσοστό διείσδυσης αγγίζει το 35%, που είναι σχεδόν η μέγιστη διείσδυση αιολικής παραγωγής που μπορεί να πραγματοποιηθεί μέχρι και σήμερα στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης. Ο μέσος όρος διείσδυσης του σεναρίου αυτού, είναι στο 25% της συνολικής παραγωγής.

### 6.3 Υψηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας στο ΣΗΕ της Κρήτης

Ώρα	Αιολική Παραγωγή (MW)	Φορτίο Ζήτησης (MW)	Ποσοστό Διείσδυσης
01:00	75,81	283	27%
02:00	76,92	245	31%
03:00	78,49	229	34%
04:00	76,97	218	35%
05:00	79,12	245	32%
06:00	76,50	220	35%
07:00	77,24	218	35%
08:00	84,29	292	29%
09:00	87,42	350	25%
10:00	87,57	400	22%
11:00	88,86	428	21%
12:00	86,50	439	20%
13:00	88,29	438	20%
14:00	91,36	435	21%
15:00	88,07	410	21%
16:00	89,78	385	23%
17:00	86,79	380	23%
18:00	92,57	420	22%
19:00	94,37	485	19%
20:00	92,09	485	19%
21:00	91,18	485	19%
22:00	84,52	430	20%
23:00	79,65	385	21%
24:00	74,63	339	22%

Πίνακας 6.6: Ωριαία αιολική παραγωγή, φορτίο ζήτησης και ποσοστό διείσδυσης, για υψηλή διείσδυση στο ΣΗΕ



## Κεφάλαιο 7

# Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Από τη διαδικασία ταξινόμησης των θερμικών μονάδων παραγωγής, με βάση το κόστος παραγωγής της κάθε μονάδας ανά MW, προέκυψε η παρακάτω σειρά προτεραιότητας.

SHORTU = [24 23 15 17 14 16 25 26 12 13 11 9 10 1 8 20 7 22 5 6 21 19 3 4 2 18]

Οι παραπάνω μεταβολές της σειράς, βασίζονται στην αρχική αρίθμηση, με την οποία παρουσιάστηκαν οι θερμικές μονάδες στο κεφάλαιο 4 της εργασίας αυτής.

### 7.1 Αποτελέσματα προβλήματος χωρίς διείσδυση αιολικής ενέργειας

Το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, για μηδενική διείσδυση αιολικής παραγωγής, με χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων, βελτιστοποιείται με το διάνυσμα μεταβολών που ακολουθεί:

$$DX = [-1 \ -1 \ -1 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ -1 \ 0 \ -2 \ 0 \ 2 \ 2 \ 0 \ 0 \ -2 \ -1 \ -1]$$

Ο χρόνος ολοκλήρωσης του αλγορίθμου ήταν 4434 δευτερόλεπτα, δηλαδή περίπου 1 ώρα και 14 λεπτά, με το συνολικό ημερήσιο κόστος λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να ανέρχεται στις 919.918,48€.

Ώρα	Παραγωγή Θερμικών Μονάδων (MW)	Στρεφόμενη Εφεδρεία (MW)
01:00	283	42,45
02:00	245	36,75
03:00	229	34,35
04:00	218	32,70

Ώρα	Παραγωγή Θερμικών Μονάδων (MW)	Στρεφόμενη Εφεδρεία (MW)
05:00	245	36,75
06:00	220	33,00
07:00	218	32,70
08:00	292	43,80
09:00	350	52,50
10:00	400	60,00
11:00	428	64,20
12:00	439	65,85
13:00	438	65,70
14:00	435	65,25
15:00	410	61,50
16:00	385	57,75
17:00	380	57,00
18:00	420	63,00
19:00	485	72,75
20:00	485	72,75
21:00	485	72,75
22:00	430	64,50
23:00	385	57,75
24:00	339	50,85
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>8644MWh</b>	<b>1296,60MWh</b>

Πίνακας 7.1: Παραγωγή θερμικών μονάδων & στρεφόμενη εφεδρεία ΣΗΕ, χωρίς διείσδυση

Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις θερμικές μονάδες παραγωγής του ΣΗΕ, ανέρχεται σε **8.644,00MWh**, με τη συνολική στρεφόμενη εφεδρεία στα **1.296,60MWh**.

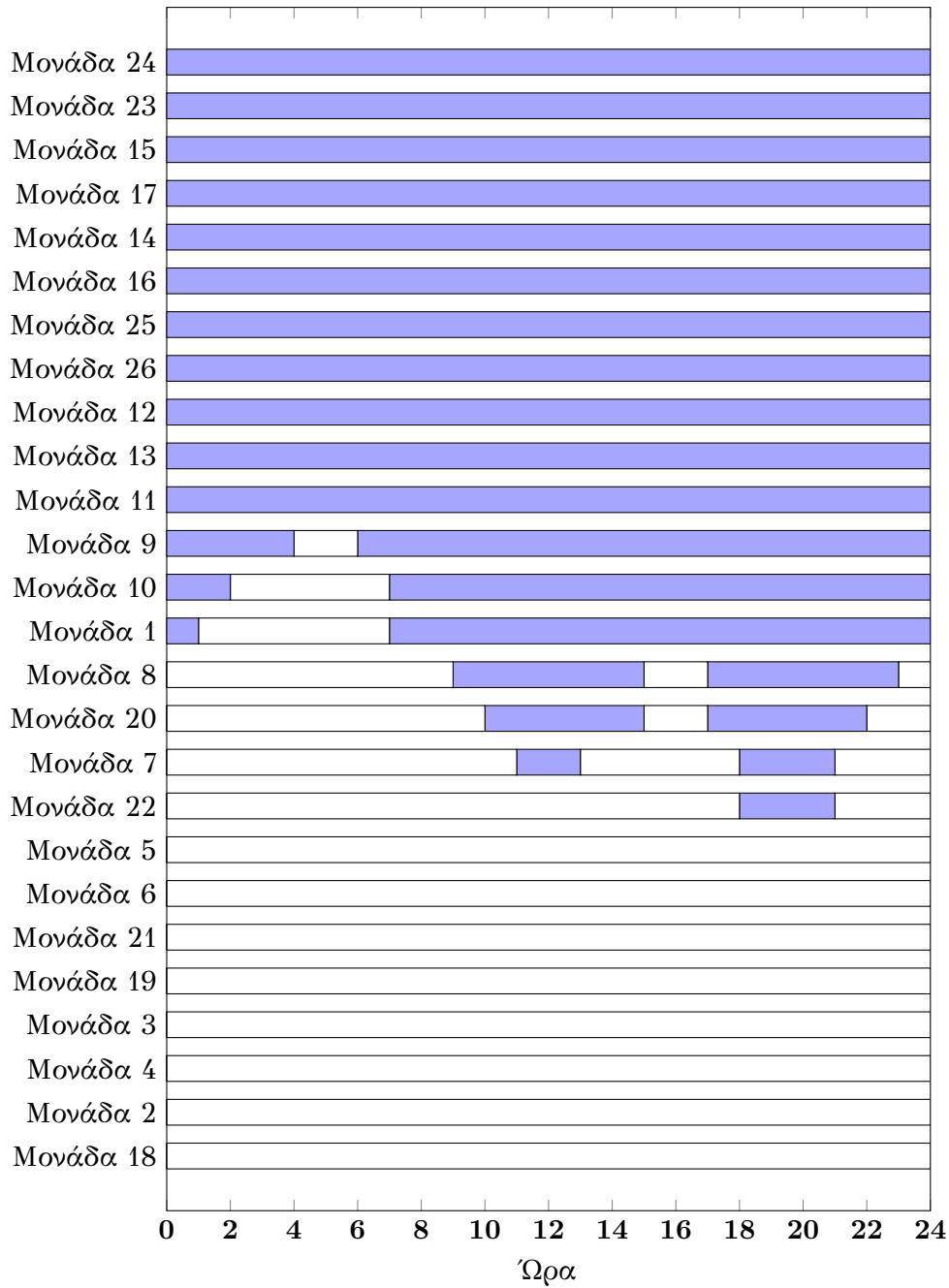
Ακόμα, το συνολικό κόστος εκκίνησης των θερμικών μονάδων κατά τη διάρκεια του 24ώρου που μελετήθηκε ήταν **5.337,01€**. Τα στοιχεία του κόστους εκκίνησης και του κόστους λειτουργίας του ΣΗΕ για κάθε ώρα μελέτης, παρατίθενται στον πίνακα που ακολουθεί.

Ώρα	Κόστος Εκκίνησης Μονάδων (€)	Κόστος Λειτουργίας (€)
01:00	0,00	30006,65
02:00	0,00	22610,13
03:00	0,00	20924,20
04:00	0,00	20066,71
05:00	0,00	21880,86
06:00	0,00	19800,27
07:00	0,00	20069,21
08:00	442,51	31203,02
09:00	0,00	35854,10
10:00	0,00	41440,49
11:00	1413,00	47948,53
12:00	858,00	49983,41
13:00	0,00	49002,30
14:00	0,00	47392,53
15:00	0,00	44400,13
16:00	0,00	39635,34
17:00	0,00	39078,65
18:00	1415,50	46991,02
19:00	1208,00	57602,18
20:00	0,00	56394,18
21:00	0,00	56394,18
22:00	0,00	46778,70
23:00	0,00	39744,51
24:00	0,00	34717,19
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>5337,01</b>	<b>919918,48</b>

Πίνακας 7.2: Κόστος εκκίνησης θερμικών μονάδων παραγωγής και κόστος λειτουργίας του ΣΗΕ, χωρίς διείσδυση

Το κόστος ανά MWh, για το σενάριο χωρίς διείσδυση αιολικής παραγωγής, ανέρχεται στα **106,42€**.

Στο γράφημα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι βέλτιστες μεταβολές κατάστασης των θερμικών μονάδων παραγωγής, κατά τη λειτουργία του συστήματος στο 24ωρο που μελετήσαμε.



Σχήμα 7.1: Χρονική αναπαράσταση κατάστασης θερμικών μονάδων παραγωγής, χωρίς διείσδυση στο ΣΗΕ

## 7.2 Αποτελέσματα προβλήματος με χαμηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας

Το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, για χαμηλή διείσδυση αιολικής παραγωγής, με χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων, βελτιστοποιείται με το διάλυμα μεταβολών που ακολουθεί:



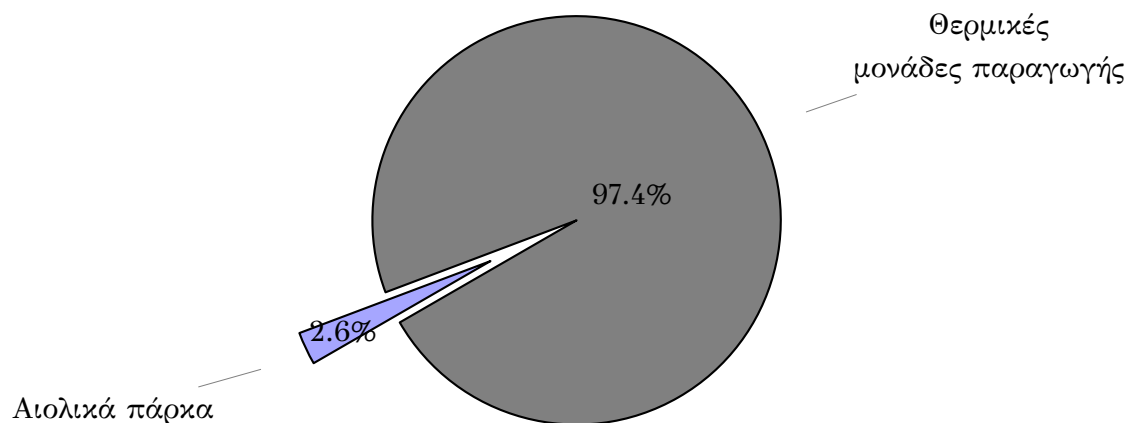
$$DX = [-2 \ -1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 2 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ -1 \ -1 \ 0 \ 2 \ 3 \ 0 \ -1 \ -1 \ -3 \ -1]$$

Ο χρόνος ολοκλήρωσης του αλγορίθμου ήταν **3727** δευτερόλεπτα, δηλαδή περίπου 1 ώρα, με το συνολικό ημερήσιο κόστος λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να ανέρχεται στις **918.000,91€**.

Ώρα	Παραγωγή Θερμικών Μονάδων (MW)	Αιολική Παραγωγή (MW)
01:00	279,07	3,93
02:00	240,79	4,21
03:00	225,64	3,36
04:00	215,36	2,64
05:00	242,50	2,50
06:00	217,00	3,00
07:00	212,00	6,00
08:00	284,21	7,79
09:00	340,50	9,50
10:00	391,50	8,50
11:00	420,79	7,21
12:00	430,21	8,79
13:00	427,79	10,21
14:00	423,43	11,57
15:00	396,79	13,21
16:00	371,93	13,07
17:00	367,29	12,71
18:00	405,00	15,00
19:00	470,07	14,93
20:00	470,14	14,86
21:00	468,57	16,43
22:00	416,21	13,79
23:00	371,86	13,14
24:00	328,43	10,57
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>8417,07MWh</b>	<b>226,93MWh</b>

Πίνακας 7.3: Παραγωγή θερμικών μονάδων & αιολική παραγωγή, για χαμηλή διείσδυση

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις θερμικές μονάδες παραγωγής του ΣΗΕ ανέρχεται σε **8.417,07 MWh**, ενώ η παραγωγή των αιολικών πάρκων σε **226,93MWh**. Τα ποσοστά που καταλαμβάνει η κάθε μορφή ενέργειας από τη συνολική ημερήσια παραγωγή, παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί.



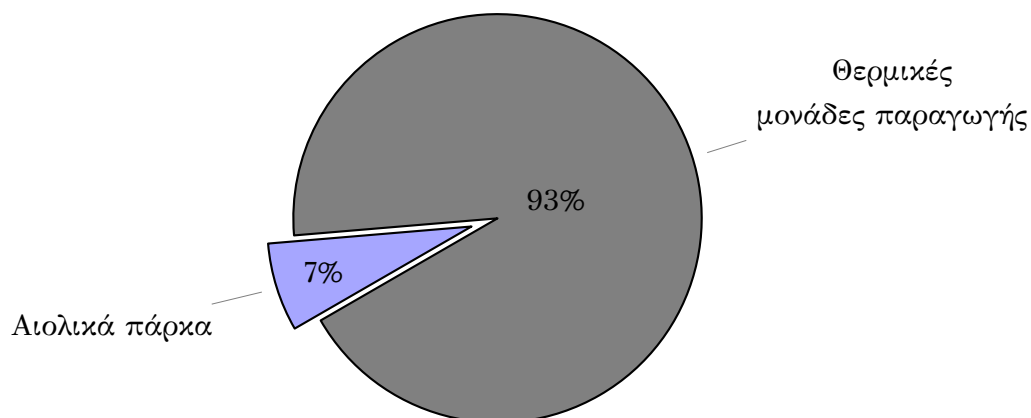
Σχήμα 7.2: Ποσοστό συμβατικής παραγωγής έναντι αιολικής παραγωγής, για χαμηλή διείσδυση

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται η εφεδρεία, στρεφόμενη και αιολική, που απαιτείται να ικανοποιεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, ούτως ώστε να είναι σε θέση να καλύψει το φορτίο ζήτησης, ακόμα και σε περίπτωση βλάβης κάποιας θερμικής μονάδας ή λανθασμένης πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής.

Ώρα	Στρεφόμενη Εφεδρεία (MW)	Αιολική Εφεδρεία (MW)
01:00	42,45	3,86
02:00	36,75	4,13
03:00	34,35	3,31
04:00	32,70	2,61
05:00	36,75	2,47
06:00	33,00	2,96
07:00	32,70	5,83
08:00	43,80	7,51
09:00	52,50	9,09
10:00	60,00	8,17
11:00	64,20	6,98
12:00	65,85	8,43
13:00	65,70	9,74
14:00	65,25	10,96
15:00	61,50	12,41
16:00	57,75	12,29
17:00	57,00	11,97
18:00	63,00	13,97
19:00	72,75	13,91
20:00	72,75	13,84
21:00	72,75	15,19
22:00	64,50	12,91
23:00	57,75	12,35
24:00	50,85	10,06
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>1296,60MWh</b>	<b>214,93MWh</b>

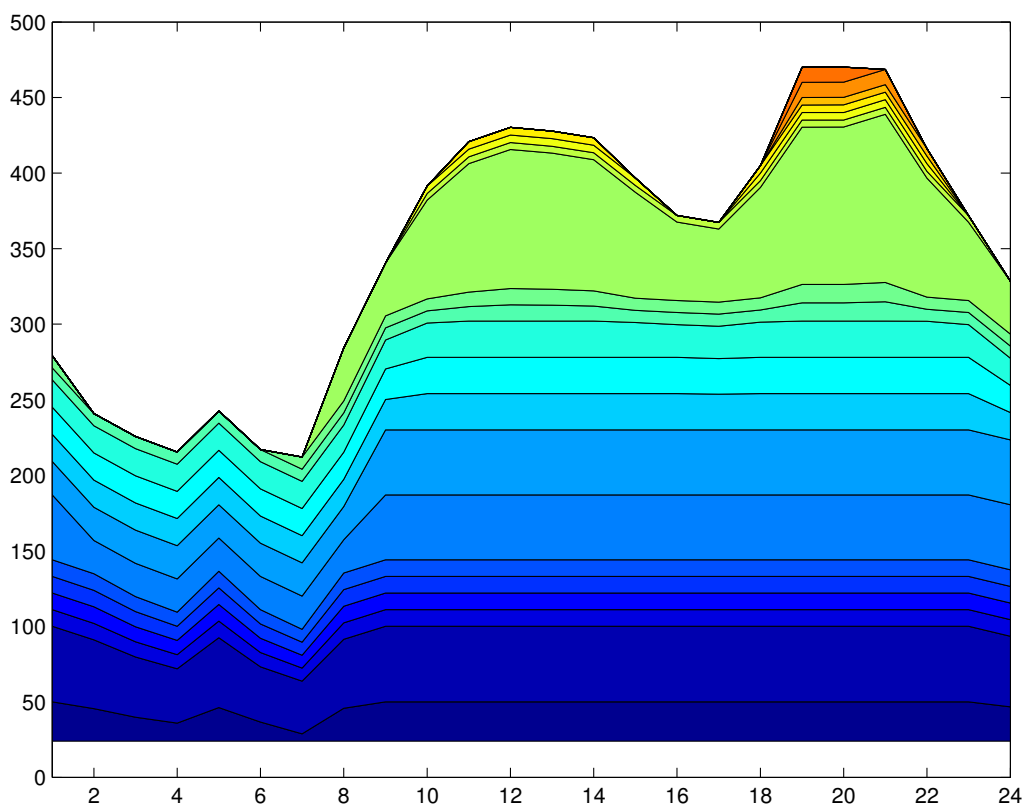
Πίνακας 7.4: Στρεφόμενη εφεδρεία & αιολική εφεδρεία, για χαμηλή διείσδυση

Η στρεφόμενη εφεδρεία, η οποία αφορά την εφεδρεία για την περίπτωση βλάβης κάποιας θερμικής μονάδας παραγωγής του ΣΗΕ, ανέρχεται σε **1.296,60MWh**, ενώ η αιολική εφεδρεία, η οποία αφορά την περίπτωση λανθασμένης πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, σε **268,01MWh**. Τα ποσοστά που καταλαμβάνει η κάθε εφεδρεία, από τη συνολική ημερήσια εφεδρεία, παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί.



Σχήμα 7.3: Ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας έναντι της αιολικής εφεδρείας, για χαμηλή διείσδυση

Στο γράφημα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι καμπύλες παραγωγής των θερμικών μονάδων για το σενάριο χαμηλής διείσδυσης αιολικής παραγωγής, στη διάρκεια του 24ωρου που μελετήσαμε. Διακρίνουμε δηλαδή το ποσό της ενέργειας, που παρήγαγε κάθε μονάδα κάθε χρονική στιγμή, το άθροισμα των οποίων, μας δίνει την ολική παραγωγή του ΣΗΕ από θερμικές μονάδες.



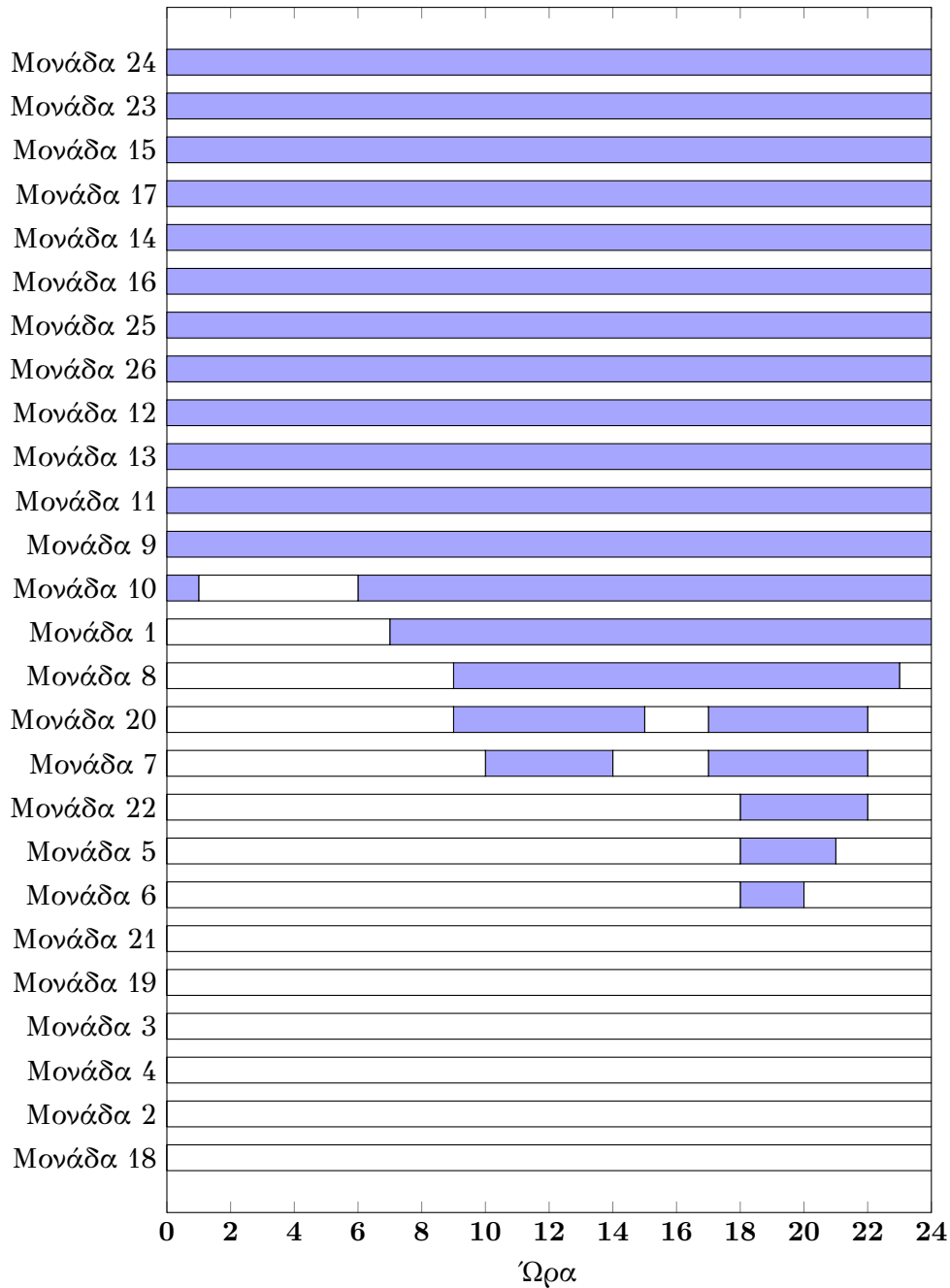
Σχήμα 7.4: Καμπύλες παραγωγής θερμικών μονάδων, με τη σειρά ικανοποίησης του φορτίου για χαμηλή διείσδυση

Ώρα	Κόστος Εκκίνησης Μονάδων (€)	Κόστος Λειτουργίας (€)
01:00	0,00	25436,30
02:00	0,00	21874,54
03:00	0,00	20659,82
04:00	0,00	19864,12
05:00	0,00	22016,03
06:00	0,00	19989,92
07:00	0,00	20055,34
08:00	440,01	30546,48
09:00	0,00	34869,05
10:00	1415,50	43709,22
11:00	858,00	47791,62
12:00	0,00	48055,34
13:00	0,00	47763,93
14:00	0,00	47245,51
15:00	0,00	42885,37
16:00	0,00	38316,62
17:00	0,00	37818,28
18:00	2271,00	47376,32
19:00	350,20	62217,91
20:00	0,00	61876,67
21:00	0,00	57885,36
22:00	0,00	47678,66
23:00	0,00	38308,92
24:00	0,00	33759,58
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>5334,71</b>	<b>918000,91</b>

Πίνακας 7.5: Κόστος εκκίνησης θερμικών μονάδων παραγωγής και κόστος λειτουργίας του ΣΗΕ, για χαμηλή διείσδυση

Το κόστος ανά MWh, για το σενάριο με χαμηλή διείσδυση αιολικής παραγωγής, ανέρχεται στα **109,06€**.

Στο γράφημα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι βέλτιστες μεταβολές κατάστασης των θερμικών μονάδων παραγωγής κατά τη λειτουργία του συστήματος, στο 24ωρο που μελετήσαμε.



Σχήμα 7.5: Χρονική αναπαράσταση κατάστασης θερμικών μονάδων παραγωγής, με χαμηλή διείσδυση στο ΣΗΕ

### 7.3 Αποτελέσματα προβλήματος με μέση διείσδυση αιολικής ενέργειας

Το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, για μέση διείσδυση αιολικής παραγωγής, με χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων, βελτιστοποιείται με το διάνυσμα μεταβολών που ακολουθεί:

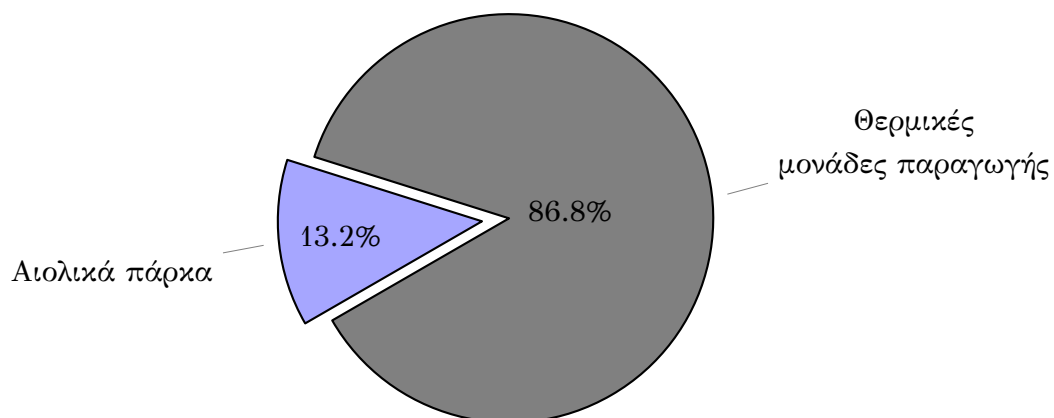
$$DX = [0 \ -1 \ 0 \ 0 \ -1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 2 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ -1 \ 0 \ 2 \ 1 \ 0 \ 0 \ -2 \ -1 \ -2]$$

Ο χρόνος ολοκλήρωσης του αλγορίθμου ήταν **4104** δευτερόλεπτα, δηλαδή περίπου 1 ώρα και 8 λεπτά, με το συνολικό ημερήσιο κόστος λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, να ανέρχεται στις **853.388,56€**.

Ώρα	Παραγωγή Θερμικών Μονάδων (MW)	Αιολική Παραγωγή (MW)
01:00	250,64	32,36
02:00	211,21	33,79
03:00	183,36	45,64
04:00	162,21	55,79
05:00	193,50	51,50
06:00	181,93	38,07
07:00	181,36	36,64
08:00	255,36	36,64
09:00	313,64	36,36
10:00	358,43	41,57
11:00	379,14	48,86
12:00	388,93	50,07
13:00	383,64	54,36
14:00	373,79	61,21
15:00	345,71	64,29
16:00	323,64	61,36
17:00	318,86	61,14
18:00	366,21	53,79
19:00	431,71	53,29
20:00	436,36	48,64
21:00	440,50	44,50
22:00	385,79	44,21
23:00	341,57	43,43
24:00	296,64	42,36
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>7504,14MWh</b>	<b>1139,86MWh</b>

Πίνακας 7.6: Παραγωγή θερμικών μονάδων & αιολική παραγωγή, για μέση διείσδυση

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις θερμικές μονάδες παραγωγής του ΣΗΕ ανέρχεται σε **7.504,14MWh**, ενώ η παραγωγή των αιολικών πάρκων σε **1.139,86MWh**. Τα ποσοστά που καταλαμβάνει η κάθε μορφή ενέργειας, από τη συνολική ημερήσια παραγωγή, παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί.



Σχήμα 7.6: Ποσοστό συμβατικής παραγωγής έναντι αιολικής παραγωγής, για μέση διείσδυση

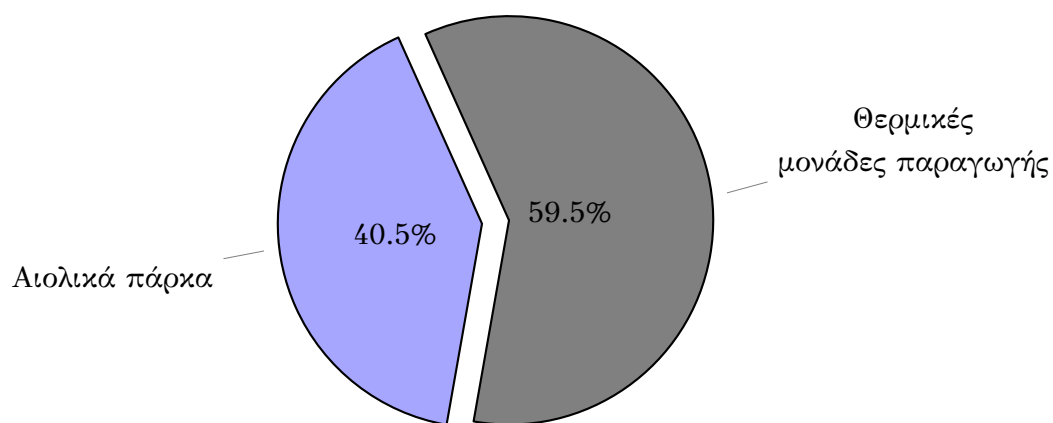
Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται η εφεδρεία, στρεφόμενη και αιολική, που απαιτείται να ικανοποιεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, ούτως ώστε να είναι σε θέση να καλύψει το φορτίο ζήτησης ακόμα και σε περίπτωση βλάβης κάποιας θερμικής μονάδας ή λανθασμένης πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής.



Ώρα	Στρεφόμενη Εφεδρεία (MW)	Αιολική Εφεδρεία (MW)
01:00	42,45	27,55
02:00	36,75	28,54
03:00	34,35	36,08
04:00	32,70	41,49
05:00	36,75	39,32
06:00	33,00	31,42
07:00	32,70	30,48
08:00	43,80	30,48
09:00	52,50	30,29
10:00	60,00	33,63
11:00	64,20	37,89
12:00	65,85	38,56
13:00	65,70	40,79
14:00	65,25	44,01
15:00	61,50	45,31
16:00	57,75	44,07
17:00	57,00	43,97
18:00	63,00	40,50
19:00	72,75	40,25
20:00	72,75	37,78
21:00	72,75	35,41
22:00	64,50	35,24
23:00	57,75	34,77
24:00	50,85	34,12
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>1296,60MWh</b>	<b>881,92MWh</b>

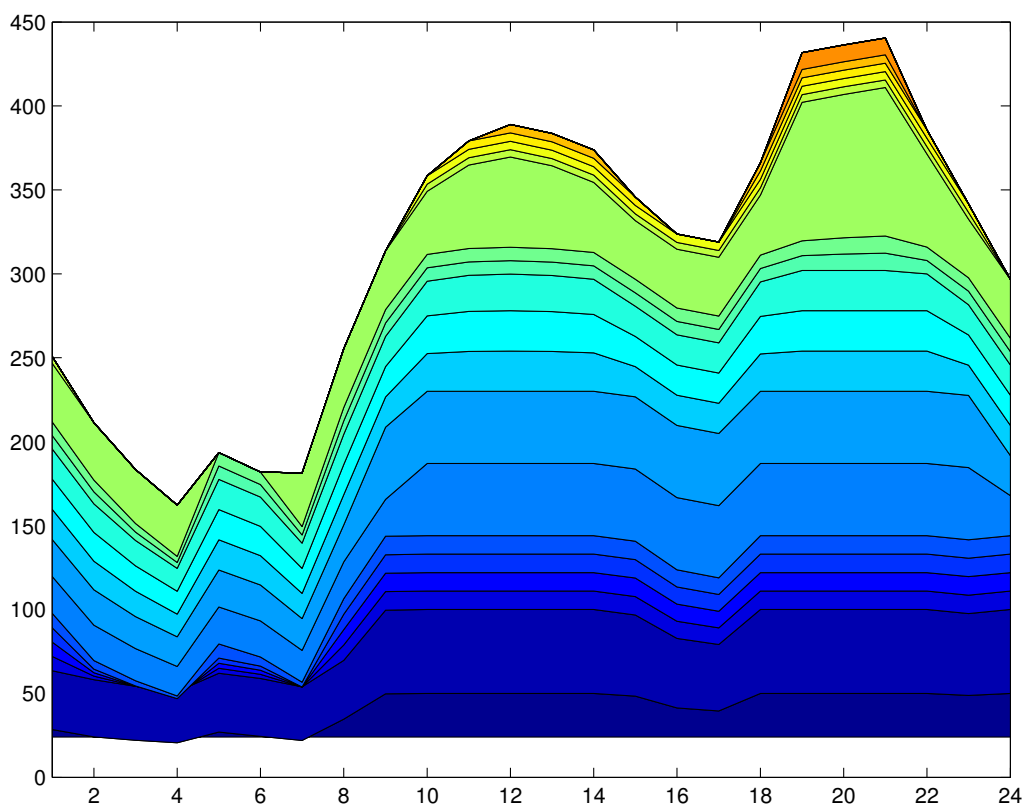
Πίνακας 7.7: Στρεφόμενη εφεδρεία & αιολική εφεδρεία, για μέση διείσδυση

Η στρεφόμενη εφεδρεία, η οποία αφορά την εφεδρεία για την περίπτωση βλάβης κάποιας θερμικής μονάδας παραγωγής του ΣΗΕ, ανέρχεται σε **1.296,60MWh**, ενώ η αιολική εφεδρεία, η οποία αφορά την περίπτωση λανθασμένης πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, σε **881,92MWh**. Τα ποσοστά που καταλαμβάνει η κάθε εφεδρεία από τη συνολική ημερήσια εφεδρεία, παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί.



Σχήμα 7.7: Ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας έναντι της αιολικής εφεδρείας, για μέση διείσδυση

Στο γράφημα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι καμπύλες παραγωγής των θερμικών μονάδων, για το σενάριο μέσης διείσδυσης αιολικής παραγωγής, στη διάρκεια του 24ωρου που μελετήσαμε. Διακρίνουμε δηλαδή το ποσό της ενέργειας που παρήγαγε κάθε μονάδα κάθε χρονική στιγμή, το άθροισμα των οποίων, μας δίνει την ολική παραγωγή του ΣΗΕ, από θερμικές μονάδες.



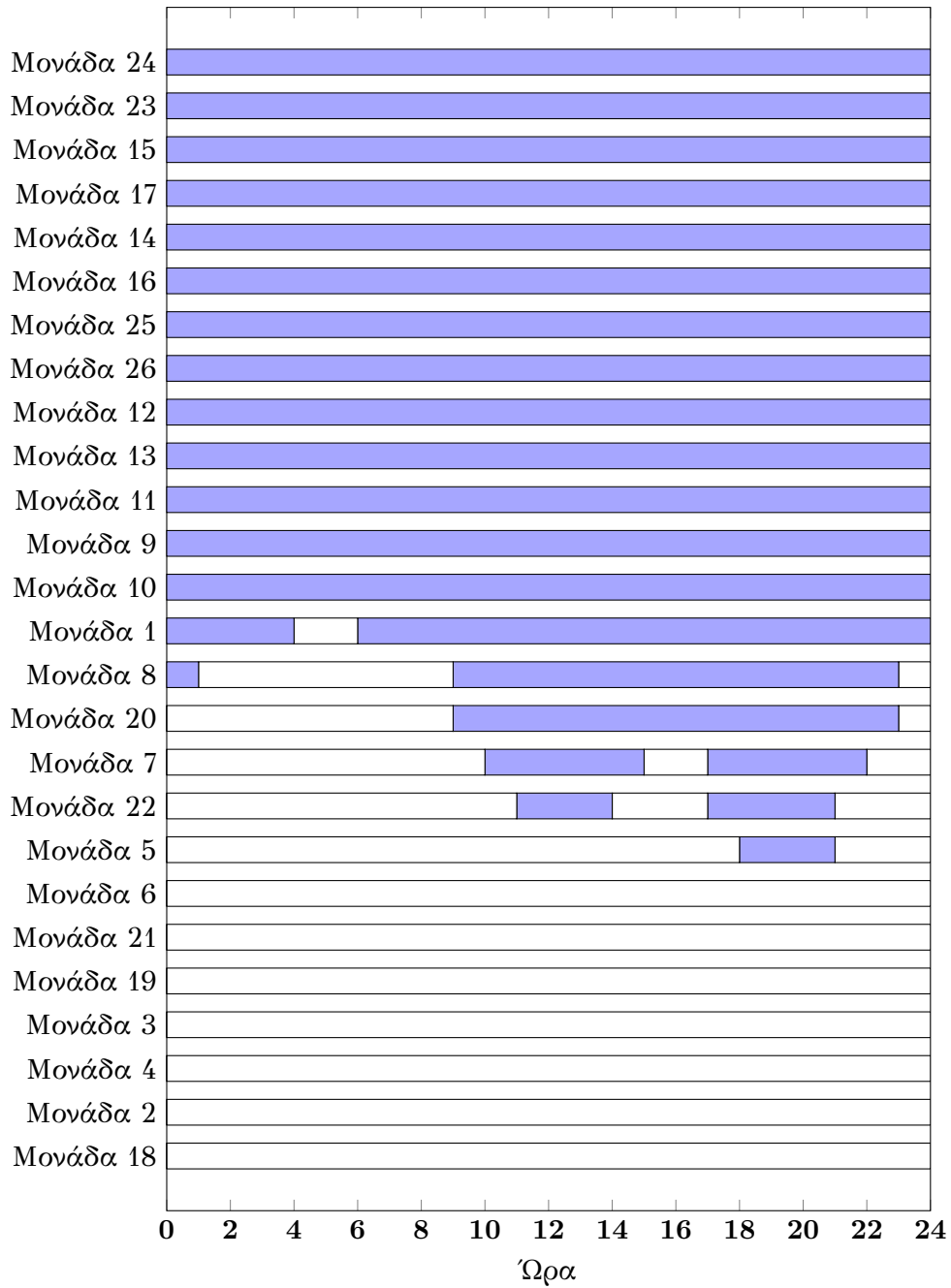
Σχήμα 7.8: Καμπύλες παραγωγής θερμικών μονάδων με τη σειρά ικανοποίησης του φορτίου, για μέση διείσδυση

Ώρα	Κόστος Εκκίνησης Μονάδων (€)	Κόστος Λειτουργίας (€)
01:00	0,00	27736,99
02:00	0,00	24322,30
03:00	0,00	21696,29
04:00	0,00	19618,62
05:00	0,00	18679,13
06:00	0,00	17705,05
07:00	440,01	21943,41
08:00	0,00	27832,19
09:00	0,00	32550,64
10:00	1415,50	40149,48
11:00	858,00	43114,19
12:00	350,00	44983,22
13:00	0,00	44064,25
14:00	0,00	43015,73
15:00	0,00	38833,49
16:00	0,00	35583,23
17:00	0,00	35206,41
18:00	1208,00	43428,12
19:00	0,00	53381,00
20:00	0,00	53925,34
21:00	0,00	54415,73
22:00	0,00	42972,84
23:00	0,00	37049,92
24:00	0,00	31181,00
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>4271,51</b>	<b>853388,56</b>

Πίνακας 7.8: Κόστος εκκίνησης θερμικών μονάδων παραγωγής και κόστος λειτουργίας του ΣΗΕ, για μέση διείσδυση

Το κόστος ανά MWh, για το σενάριο με μέση διείσδυση αιολικής παραγωγής, ανέρχεται στα **113,72€**.

Στο γράφημα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι βέλτιστες μεταβολές κατάστασης των θερμικών μονάδων παραγωγής, κατά τη λειτουργία του συστήματος στο 24ωρο που μελετήσαμε.



Σχήμα 7.9: Χρονική αναπαράσταση κατάστασης θερμικών μονάδων παραγωγής, με μέση διείσδυση στο ΣΗΕ

#### 7.4 Αποτελέσματα προβλήματος με υψηλή διείσδυση αιολικής ενέργειας

Το πρόβλημα ένταξης μονάδων στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, για υψηλή διείσδυση αιολικής παραγωγής, με χρήση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων, βελτιστοποιείται με το διάνυσμα μεταβολών που ακολουθεί:

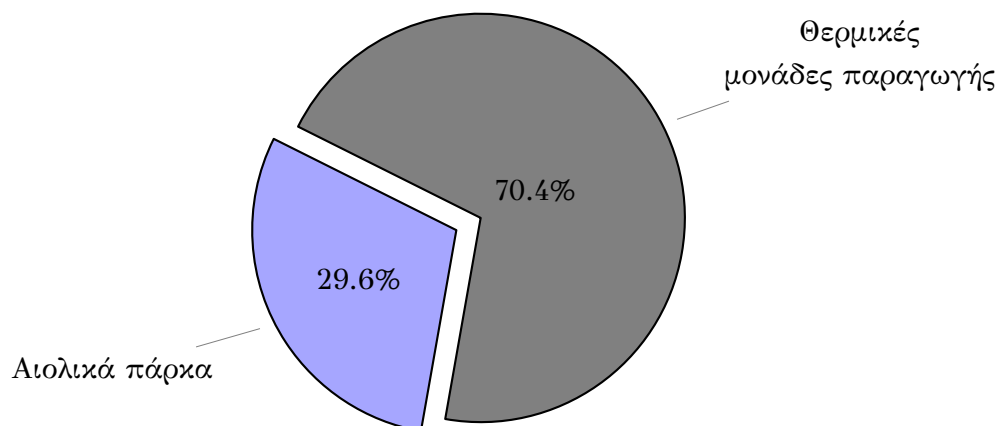
$$DX = [-1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 2 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ -2 \ -1 \ 0 \ 2 \ 1 \ 0 \ 0 \ -1 \ -2 \ -2]$$

Ο χρόνος ολοκλήρωσης του αλγορίθμου ήταν **4101** δευτερόλεπτα, δηλαδή περίπου 1 ώρα και 8 λεπτά, με το συνολικό ημερήσιο κόστος λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας να ανέρχεται στις **791.650,93€**.

Ώρα	Παραγωγή Θερμικών Μονάδων (MW)	Αιολική Παραγωγή (MW)
01:00	207,19	75,81
02:00	168,08	76,92
03:00	150,51	78,49
04:00	141,03	76,97
05:00	165,88	79,12
06:00	143,50	76,50
07:00	140,76	77,24
08:00	207,71	84,29
09:00	262,58	87,42
10:00	312,43	87,57
11:00	339,14	88,86
12:00	352,50	86,50
13:00	349,71	88,29
14:00	343,64	91,36
15:00	321,93	88,07
16:00	295,22	89,78
17:00	293,21	86,79
18:00	327,43	92,57
19:00	390,63	94,37
20:00	392,91	92,09
21:00	393,82	91,18
22:00	345,48	84,52
23:00	305,35	79,65
24:00	264,37	74,63
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>6615,02MWh</b>	<b>2028,98MWh</b>

Πίνακας 7.9: Παραγωγή θερμικών μονάδων & αιολική παραγωγή, για υψηλή διείσδυση

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις θερμικές μονάδες παραγωγής του ΣΗΕ, ανέρχεται σε **6.615,02MWh**, ενώ η παραγωγή των αιολικών πάρκων σε **2.028,98MWh**. Τα ποσοστά που καταλαμβάνει η κάθε μορφή ενέργειας από τη συνολική ημερήσια παραγωγή, παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί.



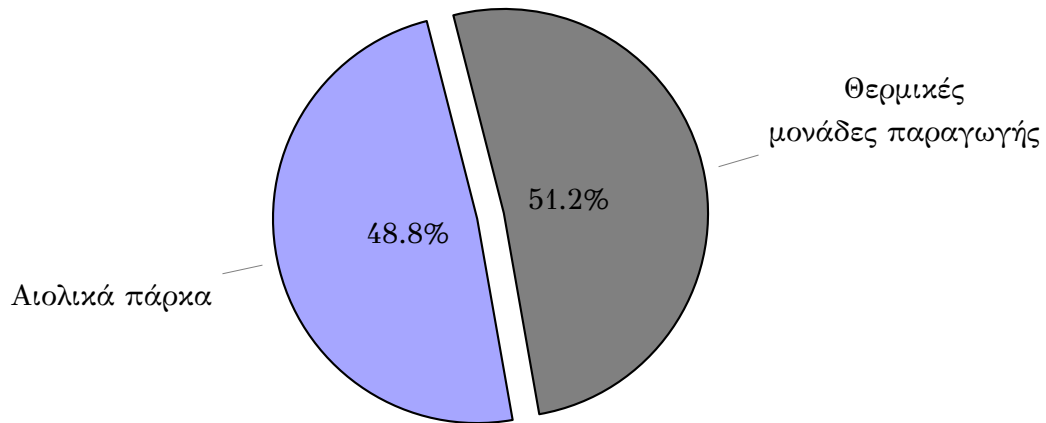
Σχήμα 7.10: Ποσοστό συμβατικής παραγωγής, έναντι αιολικής παραγωγής, για υψηλή διείσδυση

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται η εφεδρεία, στρεφόμενη και αιολική, που απαιτείται να ικανοποιεί το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, ούτως ώστε να είναι σε θέση να καλύψει το φορτίο ζήτησης, ακόμα και σε περίπτωση βλάβης κάποιας θερμικής μονάδας ή λανθασμένης πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής.

Ώρα	Στρεφόμενη Εφεδρεία (MW)	Αιολική Εφεδρεία (MW)
01:00	42,45	49,42
02:00	36,75	49,75
03:00	34,35	50,20
04:00	32,70	49,76
05:00	36,75	50,37
06:00	33,00	49,62
07:00	32,70	49,84
08:00	43,80	51,66
09:00	52,50	52,32
10:00	60,00	52,35
11:00	64,20	52,60
12:00	65,85	52,14
13:00	65,70	52,49
14:00	65,25	53,03
15:00	61,50	52,45
16:00	57,75	52,76
17:00	57,00	52,20
18:00	63,00	53,22
19:00	72,75	53,47
20:00	72,75	53,14
21:00	72,75	53,00
22:00	64,50	51,71
23:00	57,75	50,52
24:00	50,85	49,05
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>1296,60MWh</b>	<b>1237,08MWh</b>

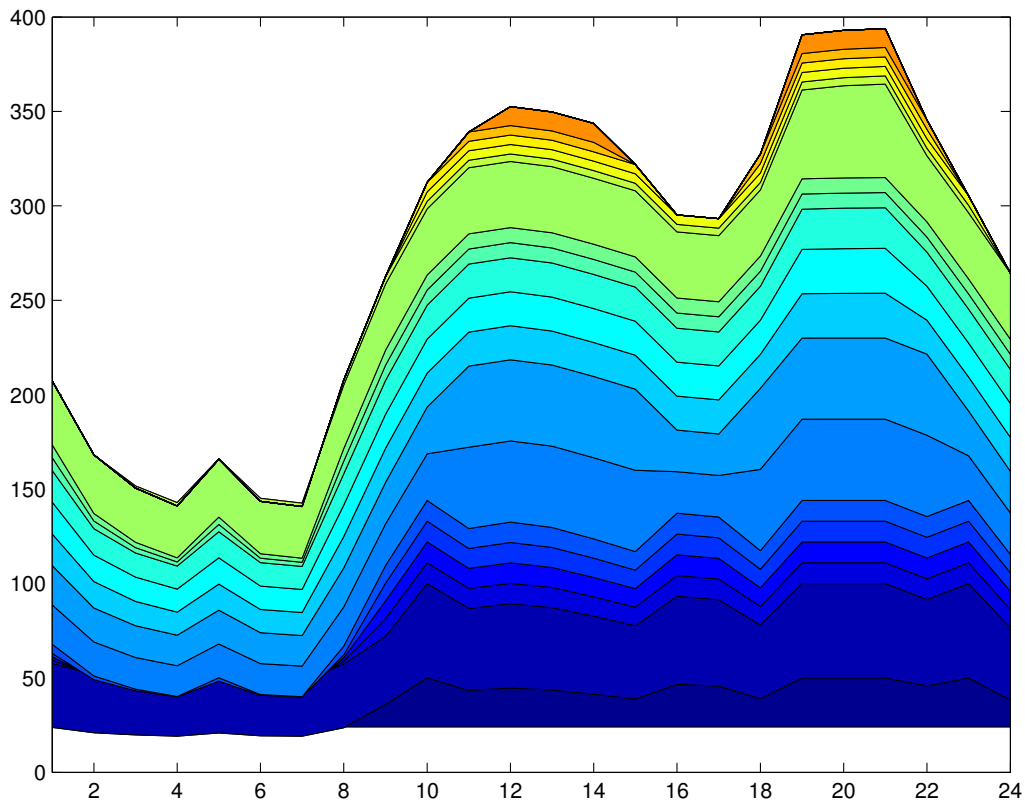
Πίνακας 7.10: Στρεφόμενη εφεδρεία &amp; αιολική εφεδρεία, για υψηλή διείσδυση

Η στρεφόμενη εφεδρεία, η οποία αφορά την εφεδρεία για την περίπτωση βλάβης κάποιας θερμικής μονάδας παραγωγής του ΣΗΕ, ανέρχεται σε **1.296,60MWh**, ενώ η αιολική εφεδρεία, η οποία αφορά την περίπτωση λανθασμένης πρόβλεψης της αιολικής παραγωγής, σε **1.237,08MWh**. Τα ποσοστά που καταλαμβάνει η κάθε εφεδρεία από τη συνολική ημερήσια εφεδρεία, παρουσιάζονται στο γράφημα που ακολουθεί.



Σχήμα 7.11: Ποσοστό στρεφόμενης εφεδρείας, έναντι της αιολικής εφεδρείας, για υψηλή διείσδυση

Στο γράφημα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι καμπύλες παραγωγής των θερμικών μονάδων, για το σενάριο υψηλής διείσδυσης αιολικής παραγωγής, στη διάρκεια του 24ωρου που μελετήσαμε. Διακρίνουμε δηλαδή το ποσό της ενέργειας που παρήγαγε κάθε μονάδα κάθε χρονική στιγμή, το άθροισμα των οποίων, μας δίνει την ολική παραγωγή του ΣΗΕ, από θερμικές μονάδες.



Σχήμα 7.12: Καμπύλες παραγωγής θερμικών μονάδων με τη σειρά ικανοποίησης του φορτίου, για υψηλή διείσδυση

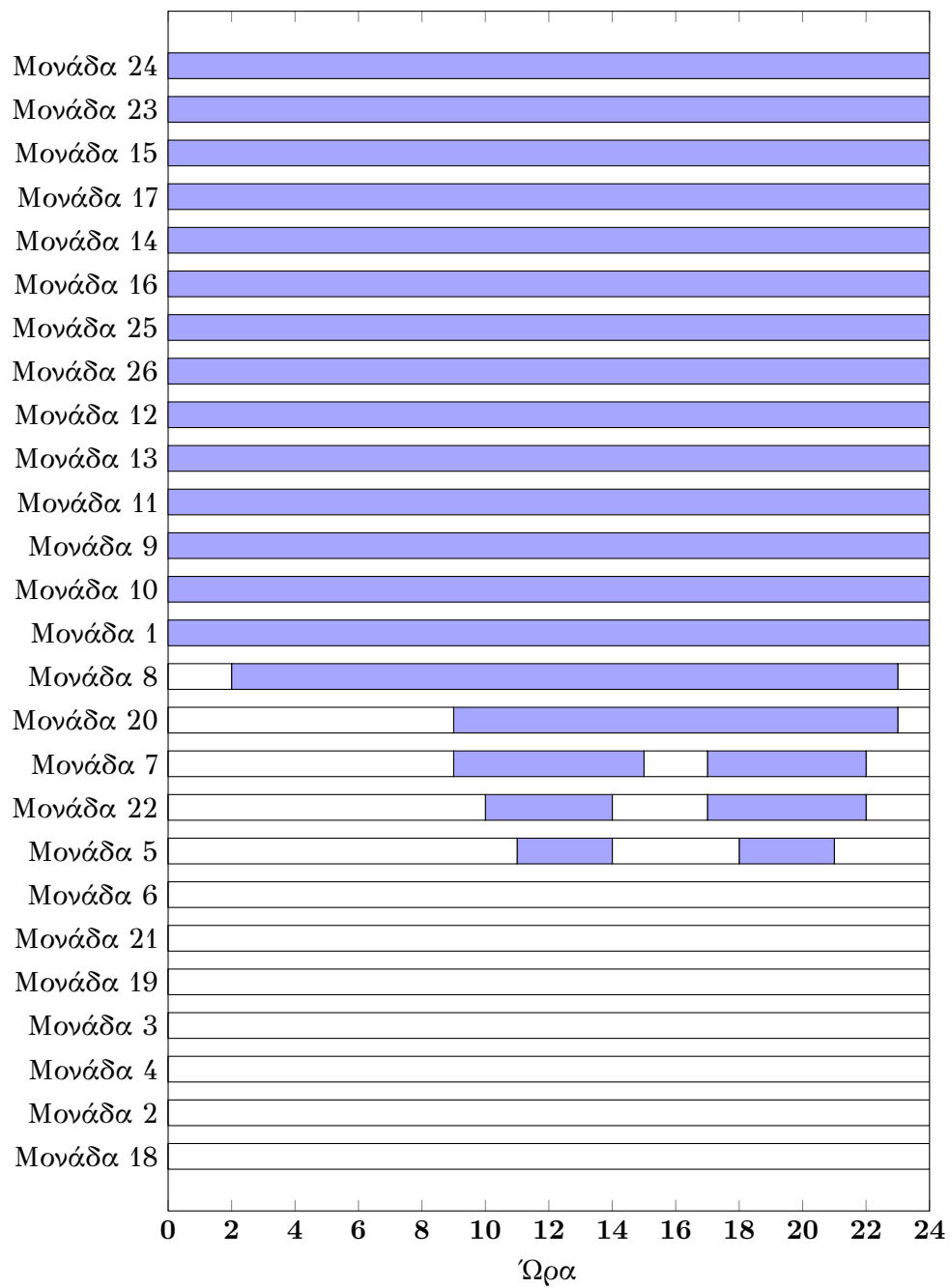


Ώρα	Κόστος Εκκίνησης Μονάδων (€)	Κόστος Λειτουργίας (€)
01:00	0,00	23948,80
02:00	0,00	20204,12
03:00	0,00	18091,45
04:00	0,00	16815,87
05:00	0,00	19955,42
06:00	0,00	17157,50
07:00	0,00	16778,09
08:00	0,00	24197,85
09:00	0,00	28636,81
10:00	2271,00	38411,76
11:00	350,00	40091,05
12:00	0,00	45076,27
13:00	0,00	44849,61
14:00	0,00	44364,00
15:00	0,00	36912,30
16:00	0,00	33214,13
17:00	0,00	33048,15
18:00	1208,00	40020,90
19:00	0,00	48804,99
20:00	0,00	49048,52
21:00	0,00	49146,00
22:00	0,00	40257,83
23:00	0,00	34096,02
24:00	0,00	28523,47
<b>ΣΥΝΟΛΟ</b>	<b>3829,00</b>	<b>791650,93</b>

Πίνακας 7.11: Κόστος εκκίνησης θερμικών μονάδων παραγωγής και κόστος λειτουργίας του ΣΗΕ, για υψηλή διείσδυση

Το κόστος ανά MWh, για το σενάριο με μέση διείσδυση αιολικής παραγωγής, ανέρχεται στα **119,67€**.

Στο γράφημα που ακολουθεί, παρουσιάζονται οι βέλτιστες μεταβολές κατάστασης των θερμικών μονάδων παραγωγής κατά τη λειτουργία του συστήματος, στο 24ωρο που μελετήσαμε.



Σχήμα 7.13: Χρονική αναπαράσταση κατάστασης θερμικών μονάδων παραγωγής, με υψηλή διείσδυση στο ΣΗΕ

## Κεφάλαιο 8

# Συμπεράσματα

### 8.1 Αποτίμηση αποτελεσμάτων

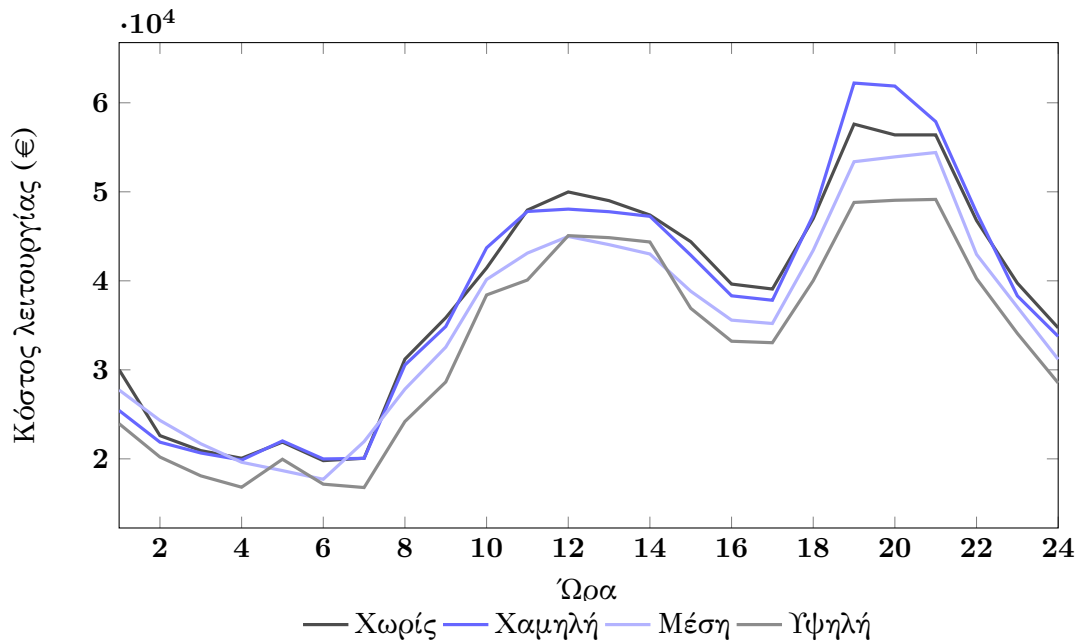
Αναλύοντας τα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, παρατηρούμε ότι η διείσδυση αιολικής παραγωγής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, πέραν των άλλων, επιδρά:

1. στο λειτουργικό κόστος του ΣΗΕ
2. στην ολική εφεδρεία του ΣΗΕ
3. στο κόστος παραγωγής ανά MWh

#### 8.1.1 Επίδραση στο λειτουργικό κόστος

Η πρώτη και σημαντικότερη επίπτωση της διείσδυσης της αιολικής παραγωγής στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι η μείωση του συνολικού ημερήσιου κόστους λειτουργίας. Πιο αναλυτικά, για το σενάριο χαμηλής διείσδυσης, η μείωση είναι **1.917,58€**, για το σενάριο μέσης διείσδυσης είναι **66.529,92€**, ενώ για το σενάριο της υψηλής διείσδυσης, είναι **128.267,55€**. Δεδομένου ότι ο μέσος όρος διείσδυσης αιολικής παραγωγής, των τριών σεναρίων ήταν 2,6%, 13,2% και 29,6% αντίστοιχα, μπορούμε να πούμε, ότι η αύξηση της διείσδυσης, είναι ανάλογη της μείωσης του λειτουργικού κόστους του συστήματος.

Στο γράφημα που ακολουθεί, φαίνονται οι καμπύλες κόστους λειτουργίας των τριών σεναρίων που μελετήθηκαν στην εργασία, σε σχέση με την καμπύλη κόστους λειτουργίας του συστήματος, χωρίς διείσδυση αιολικής παραγωγής

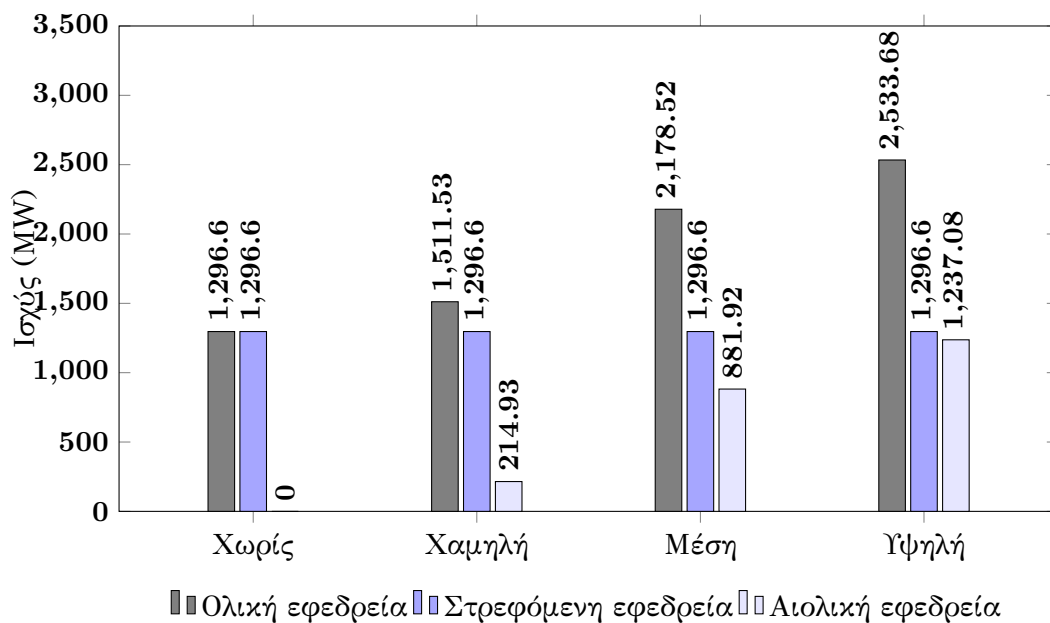


Σχήμα 8.1: Καμπύλες λειτουργικού κόστους σεναρίων, με και χωρίς διείσδυση αιολικής παραγωγής

### 8.1.2 Επίδραση στην εφεδρεία του συστήματος

Σημαντική είναι επίσης και η επίδραση, που έχει η αιολική διείσδυση και στην εφεδρεία του συστήματος, αφού για κάθε χρονική στιγμή, η αιολική εφεδρεία υπολογίζεται σύμφωνα με τον συντελεστή  $\lambda$  που παρουσιάστηκε στην ενότητα 5.5, ο οποίος με τη σειρά του καθορίζεται από την ταχύτητα του ανέμου. Με την αύξηση της διείσδυσης στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, παρατηρούμε ότι αυξάνονται αρκετά οι απαιτήσεις σε αιολική εφεδρεία, σε βαθμό που πλησιάζει όπως είδαμε και το 50% της συνολικής εφεδρείας του συστήματος. Το γεγονός αυτό, οφείλεται στο ότι με την αύξηση της διείσδυσης, αυξάνει το ποσό της ζήτησης που καλύπτεται από την αιολική παραγωγή, με αποτέλεσμα μεγαλύτερο ποσό παραγόμενης ενέργειας του ΣΗΕ να θεωρείται αβέβαιο. Ταυτόχρονα το ποσό της στρεφόμενης εφεδρείας του συστήματος, παραμένει σταθερό.

Οι παραπάνω διαπιστώσεις, γίνονται ξεκάθαρες στο γράφημα που ακολουθεί, στο οποίο φαίνεται πως η αύξηση της αιολικής παραγωγής, επηρεάζει την αιολική εφεδρεία, η οποία με τη σειρά της επηρεάζει την ολική εφεδρεία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 8.2: Ισχύς εφεδρείας σεναρίων, με και χωρίς διείσδυση αιολικής παραγωγής

### 8.1.3 Κόστος παραγωγή ανά MWh

Για κάθε σενάριο, το κόστος παραγωγής ανά MWh διέφερε, ενώ όπως είδαμε κυμάνθηκε σε όλα τα σενάρια μεταξύ 106,42€ και 119,67€. Σε γενικές γραμμές, παρατηρούμε μία αύξηση του κόστους παραγωγής ανά MWh, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι το συνολικό λειτουργικό κόστος του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, μειώθηκε λιγότερο από τη μείωση του φορτίου, που πρέπει να καλυφθεί πλέον από τις θερμικές μονάδες παραγωγής του ΣΗΕ. Παρ' όλα αυτά, δεν μπορούμε να εξάγουμε ένα γενικό συμπέρασμα, καθώς το κόστος παραγωγής ανά MWh, δεν επηρεάζεται μόνο από την διείσδυση της αιολικής παραγωγής στο ΣΗΕ, αλλά εξαρτάται κι από το κόστος εκκίνησης των μηχανών που επιλέχθηκαν από τον αλγόριθμο να ενταχθούν, σε κάθε χρονική στιγμή της μελέτης του προβλήματος.

### 8.1.4 Απόκριση αλγορίθμου

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization), ανταποκρίθηκε πολύ καλά στις απαιτήσεις του προβλήματος. Η παραμετροποίησή του ήταν ελάχιστη, καθώς χρειάστηκε να του ορίσουμε μόνο ένα αρχικό διάνυσμα, τον αριθμό των επαναλήψεων, τον αριθμό των σωματιδίων στο χώρο, το διάστημα των τιμών του διανύσματος εξόδου και την είσοδο του αλγορίθμου. Ο χρόνος ολοκλήρωσής του, ήταν και στις τέσσερις υποθέσεις κοντά στη μία ώρα και δέκα λεπτά περίπου, αρκετά γρήγορα για το μέγεθος του προβλήματος. Η σύγκλιση του στο βέλτιστο διάνυσμα μεταβολών DX, όπως είδαμε και στα αποτελέσματα του προηγούμενου κεφαλαίου, έγινε προτού ξεπεράσει, τις περισσότερες φορές, τις 35 επαναλήψεις, γε-

γονός που δείχνει ότι έφτασε στο τελικό αποτέλεσμα, σε ακόμα πιο μικρό χρόνο από το χρόνο ολοκλήρωσής του, που τον είχαμε ορίσει στις 45 επαναλήψεις.

Σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αλγορίθμου, είναι επίσης, η ικανότητά του να επιλύει και μεγαλύτερου μεγέθους προβλήματα, στον ίδιο χρόνο. Αυτό οφείλεται πρακτικά στο γεγονός, ότι ο αλγόριθμος παράγει τυχαία διανύσματα 24 στοιχείων. Επομένως όσο η μελέτη του ΣΗΕ πραγματοποιείται σε 24ωρη βάση, ο χρόνος υλοποίησης του αλγορίθμου θα παραμένει περίπου ίδιος, ανεξαρτήτως του αριθμού των μονάδων παραγωγής του ΣΗΕ.

## 8.2 Γενικό συμπέρασμα

Καταλήγοντας σ' ένα γενικότερο συμπέρασμα, μπορούμε να πούμε με ασφάλεια, ότι η αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης που μελετήθηκε σε αυτή την εργασία, οδηγεί σε σημαντική μείωση του ημερήσιου κόστους λειτουργίας. Ωστόσο, η ταυτόχρονη απαίτηση για αύξηση της συνολικής εφεδρείας του συστήματος και η αύξηση της αβεβαιότητας της παραγωγής, απαιτεί και τις ανάλογες βελτιώσεις, στο σύνολο των εγκαταστάσεων του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Διαφορετικά, το ποσό της αιολικής ενέργειας που διεισδύει στο σύστημα θα συνεχίσει να περιορίζεται, όπως συμβαίνει αυτή τη στιγμή σε ένα ποσοστό περίπου 35%, με σοβαρές οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις για την κοινότητα της Κρήτης, αλλά και των ιδιοκτητών αιολικών πάρκων στο νησί.

## 8.3 Μελλοντικές Επεκτάσεις

Το μοντέλο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα μπορούσε να βελτιωθεί και να επεκταθεί περαιτέρω. Συγκεκριμένα, αναφέρονται τα ακόλουθα:

- Ενσωμάτωση των απωλειών μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, στο μοντέλο βελτιστοποίησης.
- Ενσωμάτωση των περιορισμών δικτύου μεταφοράς, στο μοντέλο βελτιστοποίησης.
- Μελέτη σεναρίου, στο οποίο θα εντάσσεται στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, καινούρια εγκατάσταση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτό, θα έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος, συνεπώς μεταβολές στο συντελεστή εφεδρείας ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, άρα και στην συνολική εφεδρεία του συστήματος, στην κατανομή του φορτίου και στην γενικότερη λειτουργία του ΣΗΕ.
- Τροποποίηση του αλγορίθμου, με σκοπό την επίτευξη ικανοποιητικών αποτελεσμάτων, σε ακόμα μικρότερο χρονικό διάστημα.

# Βιβλιογραφία

- [ 1 ] Οικονομική λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας – Αναστασίου Γ. Μπακιρτζή. Εκδόσεις ZHTH
- [ 2 ] Αλγόριθμοι υπολογιστικής νοημοσύνης για αριθμητική βελτιστοποίηση – Διδακτορική διατριβή Κωνσταντίνου Ε. Παρσόπουλου
- [ 3 ] Unit Commitment by Binary Particle Swarm Optimization – Liu Yong, Hou Zhi-Jiang, Jiang Chuan-Wen
- [ 4 ] A generic particle swarm optimization Matlab function - Soren Ebbesen, Pascal Kiwitz and Lino Guzzella
- [ 5 ] Επιπτώσεις στην Οικονομική Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας Κρήτης και Κύπρου λόγω της διασύνδεσής τους – Διπλωματική εργασία Αντωνίου Αντώνη
- [ 6 ] Σφάλματα στο δίκτυο μέσης τάσης νήσου Κρήτης – Διπλωματική εργασία Ζήση Π. Βασιλείου
- [ 7 ] Σημειώσεις για την Οικονομική Λειτουργία Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας – Δρ. Τσικαλάκης Αντώνιος
- [ 8 ] Οικονομική λειτουργία συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας – Διπλωματική εργασία Δημήτρη Ν. Παπανικολάου
- [ 9 ] Τεχνικές απαιτήσεις – Λύσεις για την επίτευξη μεγάλης κλίμακας αξιοποίησης των ΑΠΕ – Διπλωματική Εργασία Κωνσταντίνας Χαραλαμπίκη
- [ 10 ] Συμβολή στον προγραμματισμό λειτουργίας Δικτύων Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας με μεγάλη διείσδυση διεσπαρμένης και ανανεώσιμης παραγωγής και συσκευών αποθήκευσης – Διδακτορική διατριβή Αντώνη Γ. Τσικαλάκη
- [ 11 ] Optimization of Unit Commitment Problem and Constrained Emission using Genetic Algorithm - S. Shobana, R. Janani
- [ 12 ] Unit Commitment Solution Using Particle Swarm Optimization (PSO) - Divya Ananthan, Prof. S. Nishanthinivalli
- [ 13 ] A New Solution Method to Economic Dispatch using the MATLAB Function (fmincon) - Farid Benhamida





