



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ

Βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας θερμικών μονάδων παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση Ευρετικών Αλγορίθμων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



Σέργης Βασίλειος

Επιβλέπων: Κανέλλος Φώτιος

Χανιά, Οκτώβριος 2016

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υπεύθυνο της διπλωματικής μου κ. Κανέλλο Φώτιο, επίκουρο καθηγητή της σχολής Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης για την άψογη συνεργασία που είχαμε και το χρόνο που μου αφιέρωσε με τη συνεχή παρουσία και επικοινωνία του, ώστε να επιτευχθεί αυτή η εργασία. Οι επιστημονικές συμβουλές του καθώς και οι καθοδηγήσεις του ήταν καθοριστικές για την επίλυση των προβλημάτων που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, όπως και η συμβολή του στην εύρεση και υλοποίηση του αλγορίθμου σε Matlab.

Χανιά, Οκτώβριος 2016

Σέργης Βασίλειος

Περίληψη

Η ραγδαία αύξηση του πληθυσμού καθώς και η συνεχής προσπάθεια του ανθρώπου να βελτιώνει το βιοτικό του επίπεδο, έχουν ως φυσικό επακόλουθο την κατανάλωση μεγάλων αποθεμάτων ενέργειας με πολύ ταχύτερους ρυθμούς σε σύγκριση με το χρόνο που χρειάζονται ώστε να δημιουργηθούν. Στις μέρες μας ένα μεγάλο ποσοστό της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας, πάνω από το 80%, καλύπτεται από ορυκτά καύσιμα, τα οποία αναμένεται ότι θα συνεχίσουν να αποτελούν την κύρια ενεργειακή πηγή για αρκετά χρόνια ακόμα. Το ενεργειακό πρόβλημα καθώς και το πρόβλημα της ρύπανσης του περιβάλλοντος, είναι δύο ιδιαίτερα σημαντικά προβλήματα όπου χρήζουν άμεσης επίλυσης. Η εξοικονόμηση ενέργειας όσο και η ορθολογική χρήση της, είναι εφικτή χωρίς να μειωθεί το βιοτικό επίπεδο, αρκεί να γίνει χρήση των νέων συστημάτων υψηλής τεχνολογίας και βελτιωμένων αποδόσεων, των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και ενός καλύτερου σχεδιασμού των συστημάτων.

Μέρος της ορθολογικής χρήσης της ενέργειας είναι και ο προγραμματισμός των διαθέσιμων μονάδων του εκάστοτε ηλεκτρικού συστήματος και πιο συγκεκριμένα η βέλτιστη ένταξη των διαθέσιμων μονάδων στο σύστημα. Η παρούσα διπλωματική εργασία ασχολείται με το πρόβλημα της Βέλτιστης Ένταξης Μονάδων στο σύστημα εντός ενός 24ωρου ενεργειακού σχεδιασμού του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής της Κρήτης και της Κύπρου. Στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα ότι υπάρχει αρκετή παραγωγή για να καλύψει την απαιτούμενη ζήτηση, σεβόμενοι το περιβάλλον και τηρώντας το όριο εκπομπών ρύπων όσο το δυνατόν χαμηλότερα και εντός ορίων. Ο προγραμματισμός αυτός βασίζεται στην πρόβλεψη φορτίου, καθώς η ζήτηση μεταβάλλεται ακολουθώντας τον κύκλο της ανθρώπινης δραστηριότητας.

Το πρόβλημα αυτό επιλύεται με τη χρήση του ευρετικού αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle swarm optimization), που βασίζεται σε έναν αριθμό σωματιδίων και χρησιμοποιεί ένα σύνολο δυνατών λύσεων με στόχο τη βέλτιστη επίλυση του προβλήματος. Το κάθε σωματίδιο ξεχωριστά είναι μια πιθανή λύση του συστήματος και εκφράζει το συνολικό κόστος ενός 24ωρου σχεδιασμού. Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης έχει αναπτυχθεί σε κώδικα Matlab, όπου γίνονται οι απαραίτητοι έλεγχοι, έτσι ώστε ο χώρος αναζήτησης όπου θα κινούνται τα σωματίδια για την εύρεση της βέλτιστης λύσης να καθορίζεται από τους περιορισμούς που έχουν τεθεί στο σύστημα.

Abstract

Population growth combined with the continuous improvement of the standard of living affect significantly energy consumption leading to fast diminishing of energy reserves. Nowadays, a large part of global energy consumption, over 80%, is by fossil fuels. Moreover, fossil fuels are expected to be the main energy source for the next years. Energy consumption increase and environmental pollution are important problems requiring immediate solutions. Recently, attention is paid on reducing the energy production from conventional fuels aiming at reducing the pollutants emitted into the atmosphere, the so-called greenhouse gases, which are considered as the most significant climate change factors. Contemporary technology enables energy saving and rational use of energy without compromising our standard of living. This is achieved by taking advantage of the new high-tech products, renewable energy sources and better design of energy systems.

Part of the rational use of energy relies on the optimal operation of the available power units of each network and in particular the optimal integration of the units in power system operation. This thesis deals with the problem of Unit Commitment within a 24-hour time horizon. The developed method is applied to the power systems of Crete and Cyprus. The aim is to minimize power production cost while ensuring that there is enough production to meet the required demand and respect at the same time environmental constraints.

This problem is solved by using the Particle Swarm Optimization algorithm, which is based on the imitation of a number of a swarm of particles that represents a set of possible solutions of the problem. Each individual particle is a possible solution of the problem, and it reflects the total operation cost of the system in a 24-hour time horizon. The proposed algorithm has been developed in Matlab code and it is fully parametrical so that it can be applied to other systems.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	3
Περίληψη	4
Abstract	5
Κατάλογος Σχημάτων	9
Κατάλογος Πινάκων	12
Ονοματολογία	14
Λέξεις-Κλειδιά	14
Index Terms	14
Εισαγωγή.....	15
1. Ορυκτά Καύσιμα.....	18
1.1 Επιλογή Καυσίμων	19
1.2 Υγρά Καύσιμα	20
1.3 Στερεά Καύσιμα	22
1.4 Αέρια Καύσιμα	24
Βιβλιογραφία	27
2. Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας - Θερμικοί Σταθμοί	28
2.1 Ατμοηλεκτρικοί Σταθμοί Παραγωγής	29
2.2 Θερμικοί Σταθμοί Μηχανών Εσωτερικής Καύσης (MEK)	31
2.2.1 Εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης	31
2.2.2 Αεριοστρόβιλοι	32
2.3 Σταθμοί Παραγωγής Συνδυασμένου Κύκλου	34
2.4 Σταθμοί Συμπαγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Θερμότητας.....	35
2.5 Πυρηνικοί Σταθμοί Παραγωγής	36
Βιβλιογραφία	38
3. Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ).....	39
3.1 Εισαγωγή	39
3.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας	40
3.3 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας	42
3.4 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας	45
3.5 Βασικά Χαρακτηριστικά Λειτουργίας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	46

3.6	Χαρακτηριστικές Καμπύλες Θερμικών Μονάδων	48
3.7	Τεχνικά Χαρακτηριστικά – Κόστος Εκκίνησης και Περιορισμοί Λειτουργίας	54
	Βιβλιογραφία	57
4.	Οικονομική κατανομή φορτίου στους Θερμικούς Σταθμούς	58
4.1	Εισαγωγή	58
4.2	Η απλούστερη μορφή του προβλήματος οικονομικής κατανομής Φορτίου 59	
4.3	Γραφική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας	61
4.4	Οικονομική κατανομή φορτίου και λειτουργικά όρια μονάδων	62
4.5	Αλγόριθμος επαναλήψεων λάμδα	65
	Βιβλιογραφία	67
5.	Βέλτιστη ένταξη θερμικών σταθμών παραγωγής(Unit Commitment)	68
5.1	Περιγραφή του προβλήματος	68
5.2	Περιορισμοί του προβλήματος	68
5.3	Μαθηματική μοντελοποίηση λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς	70
	Βιβλιογραφία	73
6.	Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων	74
6.1	Εισαγωγή	74
6.2	Εξισώσεις ενημέρωσης θέσης και ταχύτητας.....	76
6.3	Διαφορές μεταξύ Γενετικών και Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων.....	79
	Βιβλιογραφία	80
7.	Εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων στην ένταξη θερμικών μονάδων	81
7.1	Περιγραφή του Προβλήματος	81
7.2	Εφαρμογή του αλγορίθμου στο Σύστημα της Κρήτης	97
7.2.1	Χειμερινή Περίοδος	100
7.2.2	Θερινή Περίοδος	105
7.3	Εφαρμογή του αλγορίθμου στο Σύστημα της Κύπρου.....	110
7.3.1	Χειμερινή Περίοδος	113
7.3.2	Θερινή Περίοδος	118

Βιβλιογραφία	123
7.4 Συμπεράσματα και Προοπτικές Συνέχισης της Διπλωματικής Εργασίας	
124	

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα Ε.1 Κατανομή της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος πηγής παραγωγής με βάση το καύσιμο κατά το έτος 2015 [1.ΑΔΜΗΕ (2016)].....	16
Σχήμα Ε.2 Μηνιαία μέγιστα μέσης ωριαίας ζήτησης στο ΕΣΜΗΕ για τα έτη 2012 έως 2015 [1.ΑΔΜΗΕ (2016)].....	17
Σχήμα 1.1 Τα κλάσματα της κλασματικής απόσταξης του αργού πετρελαίου.....	20
Σχήμα 1.2 Λιγνιτικό κέντρο Δυτικής Μακεδονίας - Ορυχείο Νότιου Πεδίου [3.ΔΕΗ (2012)].....	22
Σχήμα 1.3 Μονάδα εξόρυξης φυσικού αερίου.....	24
Σχήμα 1.4 Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας με Βάση τη Πρώτη Ύλη [7.BP (2016)].....	26
Σχήμα 2.1 Ατμοηλεκτρικός σταθμός παραγωγής (ΑΗΣ)	29
Σχήμα 2.2 Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) - Αεριοστρόβιλος.....	32
Σχήμα 2.3 Μονάδας V Συνδυασμένου Κύκλου στο Αλιβέρι [5.ΔΕΗ (2012)]	34
Σχήμα 2.4 Πυρηνικός Σταθμός	36
Σχήμα 3.1 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [4.Κανέλλος, Φ. (2016)].....	39
Σχήμα 3.2 Συγκεντρωμένη Παραγωγή και Διεσπαρμένη Παραγωγή [9.Breaking Energy (2015)]	40
Σχήμα 3.3 Γραμμές Υψηλής Τάσης - Ορχομενός Βοιωτίας [3.ΔΕΗ (2012)].....	42
Σχήμα 3.4 Χάρτης Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργεια [1.ΑΔΜΗΕ (2014)].....	43
Σχήμα 3.5 Υποσταθμός διανομής ΔΕΗ [3.ΔΕΗ (2012)]	45
Σχήμα 3.6 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κατανάλωσης Καυσίμου Θερμικής Μονάδας [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)].....	49
Σχήμα 3.7 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κατανάλωσης Θερμότητας [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)].....	51
Σχήμα 3.8 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κόστους Λειτουργίας [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)].....	53
Σχήμα 3.9 Χρόνοι κύκλου λειτουργίας μονάδας [8. ΡΑΕ (2010)]	55
Σχήμα 4.1 Το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)].....	59
Σχήμα 4.2 Σχηματική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)].....	61

Σχήμα 4.3 Σχηματική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας με λειτουργικούς περιορισμούς [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]	64
Σχήμα 4.4 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου επαναλήψεων λ. [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]	65
Σχήμα 6.1 Σμήνη ζώων κατά την αναζήτηση τροφής	74
Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ροής Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων	75
Σχήμα 6.3 Διαγράμματα τοπολογιών Α) αστέρα Β) δακτυλιδιού Γ) Von Neumann.	78
Σχήμα 7.1.1 ψευδοκώδικας generator_states	83
Σχήμα 7.1.2 Ψευδοκώδικας operations_hours	85
Σχήμα 7.1.3 Ψευδοκώδικας control_hours	86
Σχήμα 7.1.4 Ψευδοκώδικας technical_limits	87
Σχήμα 7.1.5 Ψευδοκώδικας changes_cost	87
Σχήμα 7.1.6 Ψευδοκώδικας total_cost	89
Σχήμα 7.1.7 Ψευδοκώδικας mscr	89
Σχήμα 7.1.8 Διάγραμμα ροής ελαχιστοποίησης Συνολικού Κόστους Παραγωγής	91
Σχήμα II.1 Αναπαράσταση μετατροπής των καταστάσεων λειτουργίας σε σωματίδιο	92
Σχήμα 7.2.1 Ειδικό Κόστος Καυσίμου για κάθε Μονάδα του ΣΗΕ Κρήτης.....	99
Σχήμα 7.2.1.1 Τυπική Καμπύλη Ζήτησης [1. Αντωνίου Α. 2013]	100
Σχήμα 7.2.1.2 Συμμετοχή Μονάδων στην Παραγωγή Ενέργειας.....	102
Σχήμα 7.2.1.3 Κατανομή της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος πηγής παραγωγής με βάση το καύσιμο.....	102
Σχήμα 7.2.1.4 Εκπεμπόμενοι Ρύποι ανά ώρα (Κόκκινη Γραμμή : Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων)	103
Σχήμα 7.2.1.5 Χρονοσειρές Παραγωγής των Μονάδων.....	103
Σχήμα 7.2.1.6 Παραγόμενη Ισχύς ανά μονάδα.....	104
Σχήμα 7.2.2.1 Τυπική Καμπύλη Ζήτησης [1. Αντωνίου Α. 2013]	105
Σχήμα 7.2.2.2 Συμμετοχή Μονάδων στην Παραγωγή Ενέργειας.....	107
Σχήμα 7.2.2.3 Κατανομή της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος πηγής παραγωγής με βάση το καύσιμο	107
Σχήμα 7.2.2.4 Εκπεμπόμενοι Ρύποι ανά ώρα (Κόκκινη Γραμμή : Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων)	108
Σχήμα 7.2.2.5 Χρονοσειρές Παραγωγής των Μονάδων.....	108
Σχήμα 7.2.2.6 Παραγόμενη Ισχύς ανά μονάδα.....	109
Σχήμα 7.3.1 Ειδικό Κόστος Καυσίμου για κάθε Μονάδα του ΣΗΕ Κύπρου	112

Σχήμα 7.3.1.1 Τυπική Καμπύλη Ζήτησης [1. Αντωνίου Α. 2013]	113
Σχήμα 7.3.1.2 Συμμετοχή Μονάδων στην Παραγωγή Ενέργειας.....	115
Σχήμα 7.3.1.3 Κατανομή της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος πηγής παραγωγής με βάση το καύσιμο	115
Σχήμα 7.3.1.4 Εκπεμπόμενοι Ρύποι ανά ώρα (Κόκκινη Γραμμή : Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων)	116
Σχήμα 7.3.1.5 Χρονοσειρές Παραγωγής των Μονάδων.....	116
Σχήμα 7.3.1.6 Παραγόμενη Ισχύς ανά μονάδα.....	117
Σχήμα 7.3.2.1 Τυπική Καμπύλη Ζήτησης [1. Αντωνίου Α. 2013]	118
Σχήμα 7.3.2.2 Συμμετοχή Μονάδων στην Παραγωγή Ενέργειας.....	120
Σχήμα 7.3.2.3 Κατανομή της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος πηγής παραγωγής με βάση το καύσιμο.....	120
Σχήμα 7.3.2.4 Εκπεμπόμενοι Ρύποι ανά ώρα (Κόκκινη Γραμμή : Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων)	121
Σχήμα 7.3.2.5 Χρονοσειρές Παραγωγής των Μονάδων.....	121
Σχήμα 7.3.2.6 Παραγόμενη Ισχύς ανά μονάδα.....	122

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Μήκος Οδεύσεων Γραμμών Μεταφοράς ΕΔΣΜ στις 31/12/2015 [2.ΑΔΜΗΕ (2016)]	44
Πίνακας 3.2 Χαρακτηρισμός προβλέψεων φορτίου ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα [4. Κανέλλος, Φ. (2016)]	47
Πίνακας 3.3 Χρόνοι εκκίνησης λιγνιτικής μονάδας 300 MW ανάλογα με το χρόνο κράτησης της.....	54
Πίνακας 7.1.1 Δομή σωματιδίου - Πίνακας Χρσο	82
Πίνακας 7.1.2 Αρχική Κατάσταση Λειτουργίας ΘΜ - Διάνυσμα X_0	82
Πίνακας 7.1.3 Πίνακας καταστάσεων λειτουργίας των ΘΜ - Πίνακας X	83
Πίνακας 7.1.4 Αρχικές συνεχόμενες ώρες λειτουργίας των ΘΜ - Διάνυσμα $hours_0$	84
Πίνακας 7.1.5 Συνεχόμενες ώρες λειτουργίας της κάθε ΘΜ - Πίνακας $hours$	85
Πίνακας Π.1 Αρχική Κατάσταση Λειτουργίας 5 ΘΜ - Διάνυσμα X_0	92
Πίνακας Π.2 Πίνακας αλλαγών κατάστασης λειτουργίας 5 ΘΜ - πίνακας Χρσο	92
Πίνακας Π.3 Πίνακας καταστάσεων X.....	93
Πίνακας Π.4 Διάνυσμα $hours_0$	93
Πίνακας Π.5 Πίνακας Hours.....	93
Πίνακας Π.6 Έλεγχος Ωρών Λειτουργίας/Κράτησης.....	94
Πίνακας Π.7 Πίνακας καταστάσεων X.....	94
Πίνακας Π.8 Σημεία αλλαγής έναρξης/κράτησης ΘΜ.....	96
Πίνακας 7.2.1 Μονάδες ανά σταθμό παραγωγής στο Σ.Η.Ε Κρήτης.....	97
Πίνακας 7.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά ΘΜ ΣΗΕ Κρήτης [1. Αντωνίου Α. 2013]..	98
Πίνακας 7.2.3 Αρχική Κατάσταση Λειτουργίας Θερμικών Μονάδων ΣΗΕ Κρήτης.	99
Πίνακας 7.2.1.1 Παραγόμενη Ισχύς που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα	101
Πίνακας 7.2.2.1 Παραγόμενη Ισχύς που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα	106
Πίνακας 7.3.1 Μονάδες ανά σταθμό παραγωγής στο Σ.Η.Ε Κύπρου [2.ΑΗΚ 2016]	110
Πίνακας 7.3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά ΘΜ ΣΗΕ Κύπρου [1. Αντωνίου Α. 2013]	111
Πίνακας 7.3.3 Αρχική Κατάσταση Λειτουργίας Θερμικών Μονάδων ΣΗΕ Κύπρου	112
Πίνακας 7.3.1.1 Παραγόμενη Ισχύς που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα	114

Πίνακας 7.3.2.1 Παραγόμενη Ισχύς που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα 119

Πίνακας 7.4 Αποτελέσματα εφαρμογών σε ΣΗΕ Κρήτης και ΣΗΕ Κύπρου 124

Ονοματολογία

ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΗΣ	Ατμοηλεκτρικός Σταθμός
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΒΣΣ	Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων
ΔΕΗ	Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού
ΕΛΣΤΑΤ	Ελληνική Στατιστική Αρχή
ΕΣΜΗΕ	Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΘΜ	Θερμική/ές Μονάδα/ες
ΜΕΚ	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης
ΜΥΗΣ	Μικρός Υδροηλεκτρικός Σταθμός
ΡΑΕ	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΥΘΗΑ	Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης
ΤΙΠ	Τόνος Ισοδύναμου Πετρελαίου
ΦΒ	Φωτοβολταϊκό Σύστημα
BP	Beyond Petroleum – Βιομηχανία Πετρελαίου
DC	Direct Current
HC	Υδρογονάνθρακες
MW	Mega Watt (10^6)
PSO	Particle Swarm Optimization

Λέξεις-Κλειδιά

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας – Θερμικές Μονάδες
Βέλτιστη Κατανομή Φορτίου – Βέλτιστη Ένταξη Μονάδων Παραγωγής –
Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων – Matlab

Index Terms

Electric Power System – Thermal Units – Optimal Power Dispatch – Unit Commitment
– Particle swarm optimization – Matlab

Εισαγωγή

Τέλη του 18^{ου} αιώνα με αρχές του 19^{ου} εμφανίζονται στην Ευρώπη οι πρώτες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε λειτουργία, με πρώτη το 1881 στο Godalming της Αγγλίας, μεταξύ Λονδίνου και Πόρτσμουθ, με ισχύ 746 kW. Στη Στουτγάρδη το 1882 εγκαταστάθηκε η πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Γερμανίας και ήταν σε θέση να τροφοδοτήσει μέχρι 30 λάμπες πυρακτώσεως. Λίγα χρόνια αργότερα, το 1885, εγκαταστάθηκε στο Βερολίνο ο μεγαλύτερος σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έως εκείνη την εποχή, ο οποίος τροφοδοτούσε καταναλωτές σε ακτίνα μέχρι 800 μέτρα από την πόλη. Το έτος 1889 έφτασε ο «ηλεκτρισμός» στην Ελλάδα. Σύμφωνα με τα ιστορικά στοιχεία της ΔΕΗ, η «Γενική Εταιρεία Εργοληψιών» κατασκεύασε στην Αθήνα την πρώτη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Δέκα χρόνια αργότερα οι πολυεθνικές εταιρίες ηλεκτρισμού κάνουν την εμφάνισή τους στην Ελλάδα, έτσι μέχρι το 1929 ηλεκτροδοτήθηκαν 250 πόλεις με πληθυσμό πάνω από 5.000 κατοίκους και έως το 1950 υπήρχαν στην Ελλάδα 400 περίπου εταιρείες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ως πρώτη ύλη χρησιμοποιούνταν το πετρέλαιο και ο γαιάνθρακας που εισάγονταν από το εξωτερικό και σε συνδυασμό με τη κατάρτιση της παραγωγής είχαν ως αποτέλεσμα η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος να αγγίζει τριπλάσιες ή και πενταπλάσιες τιμές απ' αυτές που ίσχυαν στις Ευρωπαϊκές χώρες. Παράλληλα δεν έλειπαν και προβλήματα στη τροφοδοσία με ξαφνικές διακοπές ή περιορισμό της δυνατότητας παροχής μέσα σε συγκεκριμένο ωράριο [2. ΔΕΗ].

Η αλλαγή θα έρθει μέσω της Δημόσιας Επιχείρησης Ηλεκτρισμού, τον Αύγουστο του 1950, όπου με την ίδρυσή της συγκεντρώθηκαν οι δραστηριότητες παραγωγής, μεταφοράς και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα φορέα. Ταυτόχρονα, ξεκινά η αξιοποίηση των εγχώριων πηγών ενέργειας, τόσο των πλούσιων σε λιγνίτη κοιτασμάτων του ελληνικού υπεδάφους όσο και της δύναμης των υδάτων με την κατασκευή υδροηλεκτρικών σταθμών στα μεγάλα ποτάμια της χώρας.

Σήμερα κατέχει περίπου το 68% της εγκατεστημένης ισχύος των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα συμπεριλαμβάνοντας στο ενεργειακό της μείγμα λιγνιτικούς, υδροηλεκτρικούς και πετρελαϊκούς σταθμούς, καθώς και σταθμούς φυσικού αερίου, αλλά και μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) [4. ΔΕΗ.].

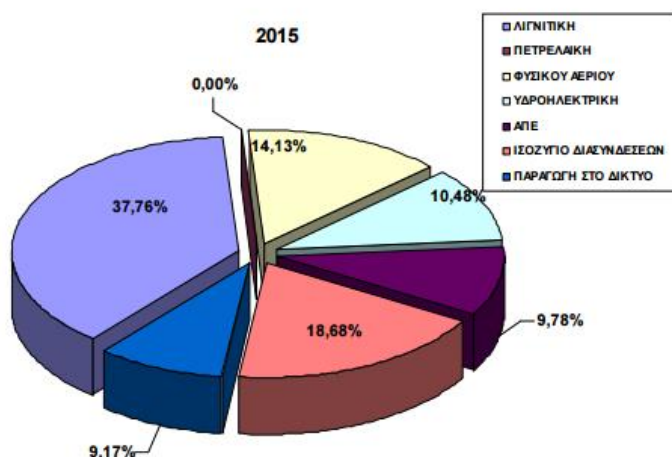
Η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής της ΔΕΗ το 2012 ανήλθε σε 12.5 GW έχοντας στο χαρτοφυλάκιό της αιολικά πάρκα, μικρούς υδροηλεκτρικούς σταθμούς καθώς και φωτοβολταϊκούς, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 116 MW. Για το ίδιο έτος, η κατανομή της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ανά χρήση, σύμφωνα με στοιχεία της Ελληνικής Στατιστικής Αρχής, ήταν [4.ΕΛΣΤΑΤ (2012)]:

- Οικιακή χρήση (36,07%),
- Βιομηχανική χρήση (28,89%),

- Εμπορική χρήση (23,85%),
- Γεωργική χρήση (5,33%),
- Δημόσιες & Δημοτικές Αρχές (4,14%) και
- Φωτισμός οδών (1,73%).

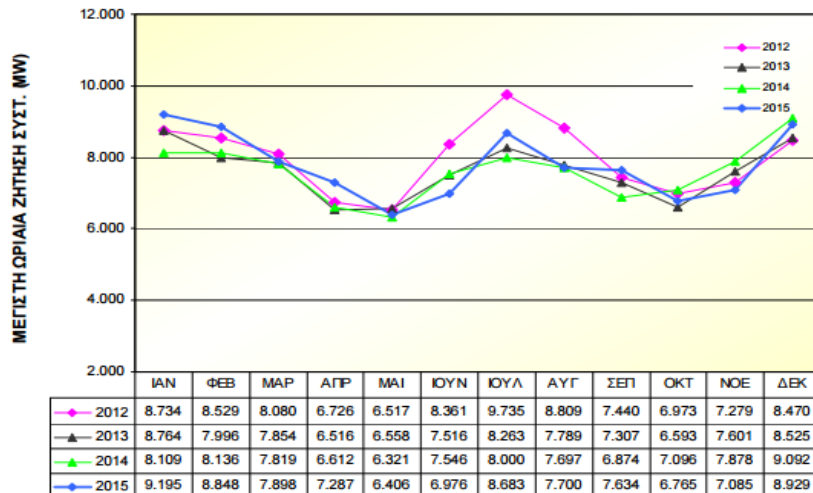
Σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία,[1.ΑΔΜΗΕ (2016)] το σύνολο παραγωγής και ισοζυγίου εισαγωγών-εξαγωγών που διακινήθηκε κατά το έτος 2015 ανέρχεται στις 51430 GWh, εκ των οποίων 46716 GWh μέσω του Συστήματος Μεταφοράς. Οι υπόλοιπες 4714 GWh αφορούν παραγωγή απ' ευθείας στο δίκτυο (Φ/Β, ΜΥΗΣ, Βιοαέριο, ΣΥΘΗΑ).

Παρατηρείται αύξηση του ποσοστού συμμετοχής στο ισοζύγιο των διασυνδέσεων σε 18,68% (+1,19%), του φυσικού αερίου σε 14,13% (+1,56%), της παραγωγής στο Δίκτυο σε 9,17% (+0,32%), της παραγωγής ΑΠΕ στο σύστημα σε 9,78% (+1,49%) και της παραγωγής από υδροηλεκτρικά σε 10,48% (+2,73%). Παράλληλα παρατηρείται σημαντική υποχώρηση της συμμετοχής της λιγνιτικής παραγωγής σε σχέση με το 2014, σε 37,76% (-7,29%).



Σχήμα Ε.1 Κατανομή της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος πηγής παραγωγής με βάση το καύσιμο κατά το έτος 2015 [1.ΑΔΜΗΕ (2016)]

Η μέγιστη μέση ωριαία καθαρή ζήτηση ανέρχεται στις 9195 MWh/h που καταγράφηκε στις 08/01/2015 ώρα 20:00, ενώ η ελάχιστη μέση ωριαία καθαρή ζήτηση διαμορφώθηκε στις 1940 MWh/h και καταγράφηκε τη περίοδο του Πάσχα στις 12/04/2015 ώρα 15:00.



Σχήμα Ε.2 Μηνιαία μέγιστα μέσης ωριαίας ζήτησης στο ΕΣΜΗΕ για τα έτη 2012 έως 2015 [1.ΑΔΜΗΕ (2016)]

Αξίζει να σημειωθεί ότι από το 2013 και για τρίτη συνεχόμενη χρονιά, η μέγιστη τιμή της μέσης ωριαίας καθαρής ζήτησης στα όρια του Συστήματος Μεταφοράς καταγράφηκε τη χειμερινή περίοδο και κατά τις βραδινές ώρες, σε αντίθεση με τα προηγούμενα έτη όπου εμφανιζόταν καλοκαίρι και μεσημβρινές ώρες. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην μεγάλη διείσδυση των ΦΒ τα οποία τροφοδοτούν σημαντικό ποσοστό της πραγματικής κατανάλωσης με αποτέλεσμα να μειώνεται το ποσοστό που θα πρέπει να καλυφθεί από μονάδες συμβατικού καυσίμου. Κατά τη χρονική περίοδο της αυξημένης παραγωγής των φωτοβολταϊκών μονάδων (από 09:00 έως περίπου την 15:00) εμφανίζεται αντίστοιχη μείωση της ζήτησης, ενώ σε επίπεδο έτους, η μεγιστοποίηση της συνολικής παραγωγής των φωτοβολταϊκών προσεγγίζει τη χρονική περίοδο μεγιστοποίησης της κατανάλωσης (καλοκαιρινοί μήνες). Το γεγονός αυτό ερμηνεύει τη σημαντική μείωση της μέγιστης ωριαίας ζήτησης ως προς το Σύστημα τη θερινή περίοδο, σε σχέση με τις τιμές του 2012 η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα Ε.2 ειδικότερα για τους μήνες Ιουνίου, Ιουλίου και Αυγούστου.

Αλλαγή παρατηρείται και στις εκπομπές ρύπων, όπου τα στοιχεία είναι ενθαρρυντικά καθώς το 2015 έφτασαν τους 50.80 εκατ. τόνους σε σύγκριση με το 2014 όπου ήταν 56.16, παρουσιάζοντας μείωση κατά -9.6% [9.Energia.gr (2016)].

1.Ορυκτά Καύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα προέρχονται από φυσικές πηγές στο εσωτερικό της γης. Η δημιουργία τους οφείλεται στην αναερόβια αποσύνθεση νεκρών θαμμένων οργανισμών οι οποίοι εκτίθενται σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις στο εσωτερικό της γης για εκατομμύρια χρόνια [11. Wikipedia].

Υπάρχουν τρεις ομάδες ορυκτών καυσίμων. Ανάλογα με την ομάδα καυσίμου απαιτείται και η χρήση των ανάλογων συστημάτων για την καύση του. Συγκεκριμένα, τα:

- **Υγρά καύσιμα**, καίγονται σε ελεγχόμενους χώρους ώστε να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες. Το καύσιμο ψεκάζεται είτε με τη μορφή πολύ μικρών σταγονιδίων ή σε αέρια κατάσταση αφού πρώτα έχει εξατμιστεί..
- **Στερεά καύσιμα**, καίγονται σε συσκευές οι οποίες εξασφαλίζουν αρχικά τη κατάλληλη θερμοκρασία του καυσίμου έτσι ώστε να εξατμιστούν αρκετά από τα πτητικά συστατικά του, με στόχο την έναρξη και διατήρηση της καύσης. Πρέπει να εξασφαλίζεται ο κατάλληλος χρόνος παραμονής του καυσίμου στη συσκευή έως την ολοκλήρωση της καύσης του, καθώς και η χρήση ενός χώρου για τη συγκέντρωση της στάχτης που απομένει μετά το τέλος της αντίδρασης.
- **Αέρια καύσιμα**, καίγονται σε συσκευές οι οποίες επωφελούνται την αεριώδη κατάστασή τους. Τέτοιες συσκευές είναι οι καυστήρες προ αναμίξεως ή διάχυσης

Σήμερα, τα ορυκτά καύσιμα κυριαρχούν στην παγκόσμια παραγωγή ενέργειας. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες της BP, τα ορυκτά καύσιμα θα συνεχίσουν τα επόμενα χρόνια έως και το 2035 να αποτελούν την κύρια ενεργειακή πηγή [7.BP (2016)].

1.1 Επιλογή Καυσίμων

Η επιλογή του καυσίμου για μία συγκεκριμένη εφαρμογή γίνεται με γνώμονα συγκεκριμένα κριτήρια, που αφορούν τόσο το ίδιο το καύσιμο αλλά και τη συσκευή καύσης του που μπορεί ή πρέπει να χρησιμοποιηθεί. Οι παράγοντες που διαμορφώνουν την επιλογή του αφορούν την [6. Μπαλάρας, Κ. (2006)]:

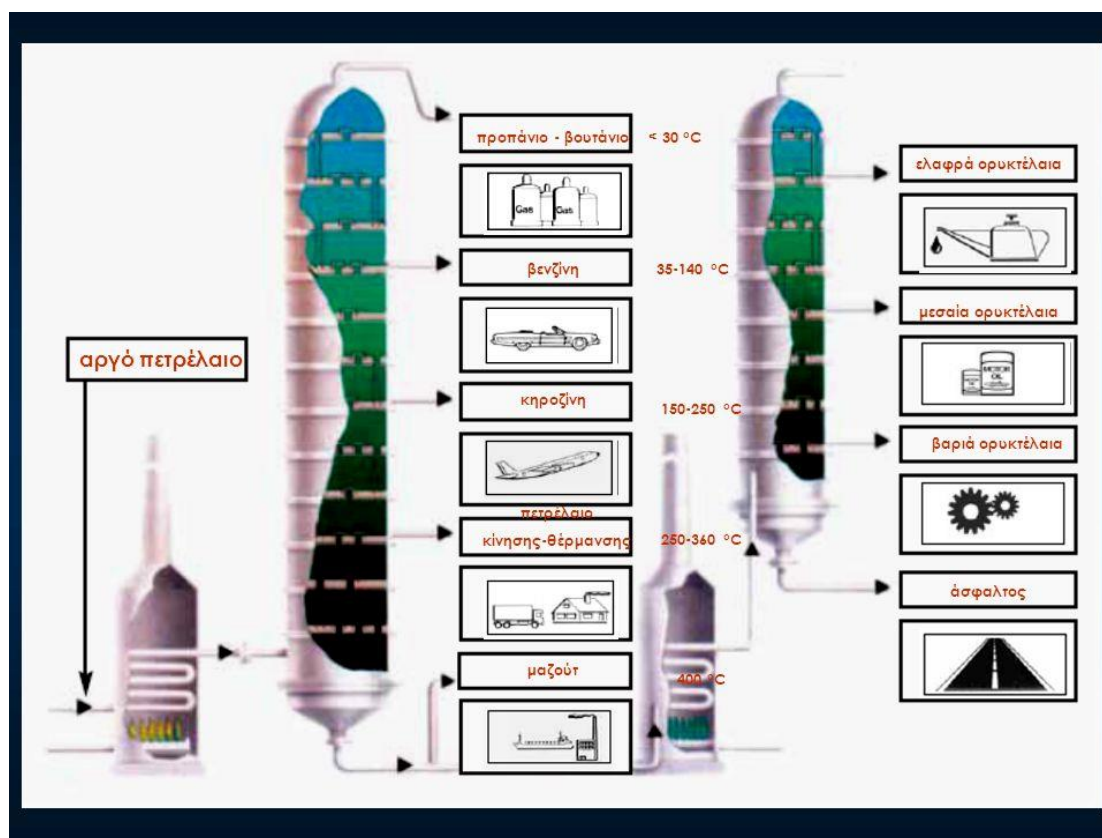
- **Διαθεσιμότητα του καυσίμου.** Είναι απαραίτητη η εξασφάλιση της συνεχούς και αδιάκοπης παροχής του καυσίμου κατά την περίοδο χρήσης του, ενώ παράλληλα πρέπει να είναι δυνατή η σύνδεση με κεντρικό δίκτυο διανομής ή να υπάρχει δυνατότητα κατασκευής κατάλληλου αποθηκευτικού χώρου.
- **Ευκολία χρήσης.** Είναι αναγκαίος ο σωστός σχεδιασμός και η κατάλληλη ενσωμάτωση όλου του συστήματος (καύσης, αποθήκευσης καυσίμου κ.λπ.) στους διαθέσιμους χώρους, όπως και η διαθεσιμότητα της απαραίτητης τεχνολογίας και εξοπλισμού.
- **Οικονομία.** Το κάθε καύσιμο προσφέρει διαφορετικά οφέλη για μία συγκεκριμένη εφαρμογή. Τα κέρδη αυτά είναι ανάλογα με την απόδοση στη χρήση του καυσίμου, το κόστος αγοράς του καυσίμου και του απαιτούμενου εξοπλισμού, όπως και με την επίδραση που έχει το καύσιμο στη συντήρηση του συστήματος.
- **Ρύπανση του περιβάλλοντος.** Υπάρχουν περιπτώσεις όπου η επιλογή του καυσίμου για συγκεκριμένες εφαρμογές επηρεάζεται από την ύπαρξη της σχετικής νομοθεσίας. Η επιλογή αυτή απορρέει από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλούν τα καύσιμα, μέσω των εκπεμπόμενων ρύπων κατά την καύση τους.

Ακόμα, άλλο ένα κριτήριο για τη τελική επιλογή του καυσίμου είναι κατά πόσο η συσκευή καύσης μπορεί ή είναι αναγκαίο να χρησιμοποιηθεί. Όπου, οι παράμετροι που επηρεάζουν την επιλογή του καυσίμου αφορούν το:

- Κόστος της συσκευής και των εξαρτημάτων που είναι απαραίτητα για την εγκατάσταση. Επιπρόσθετο κόστος μπορεί να εμφανιστεί σε περιπτώσεις που η υπάρχουσα διαφορετικού τύπου μονάδα και υποδομή χρειάζεται να παροπλισθεί ή να αφαιρεθεί.
- Κόστος λόγω των απαιτήσεων λειτουργίας και συντήρησης του εξοπλισμού και γενικότερα της όλης εγκατάστασης ως σύνολο, όπως ειδικές συνθήκες, ρυθμίσεις, ελέγχους και αυτοματισμούς, ειδικευμένο προσωπικό, συχνότητα περιοδικών ελέγχων κλπ.

1.2 Υγρά Καύσιμα

Τα υγρά καύσιμα είναι μίγματα υδρογονανθράκων (HC) τα οποία δημιουργούνται από το αργό πετρέλαιο μέσω διαδικασιών διύλισης. Το πρώτο κλάσμα διύλισης αποτελείται από ακατέργαστη νάφθα η οποία περιέχει διαλυμένα αέρια υδρογονανθράκων και έπειτα από επεξεργασία παράγεται η βενζίνη. Στο επόμενο στάδιο, τα μέσα κλάσματα (κηροζίνη, πετρέλαιο θέρμανσης gasoil) επεξεργάζονται για την παραγωγή ντίζελ. Τα υπολείμματα του αργού πετρελαίου τα οποία δεν αποστάζονται, αποτελούν την πρώτη ύλη του μαζούτ. [6. Μπαλάρας, Κ. (2006)]



Σχήμα 1.1 Τα κλάσματα της κλασματικής απόσταξης του αργού πετρελαίου

Τα είδη καυσίμων που προκύπτουν από τους ελαφρούς HC είναι τα:

- υγροποιημένα αέρια ή υγραέρια (προπάνιο, βουτάνιο, μίγματα),
- βενζίνη, κηροζίνη, πετρέλαιο κίνησης ντίζελ (ελαφρύ πετρέλαιο) και
- ελαφρά πετρέλαια θέρμανσης ντίζελ (ΘΙ 42000 kJ/kg) και
- μαζούτ (ελαφρύ πετρέλαιο No 1 (ιξώδες Redwood 1500 δευτ.) και
- βαρύ πετρέλαιο No 3 (ιξώδες Redwood 3500 δευτερόλεπτα).

Η χρήση διαφορετικού τύπου πετρελαίου σε συστήματα θέρμανσης καθορίζεται από τις θερμοφυσικές ιδιότητές του και οικονομικές παραμέτρους. Η καταλληλότητα των ιδιοτήτων του καθορίζεται ανάλογα με

- το ιξώδες
- την περιεκτικότητά του σε νερό και ιζήματα
- τα κατάλοιπα άνθρακα
- την τέφρα
- το σημείο ανάφλεξης
- την πυκνότητα
- την περιεκτικότητα σε θείο
- και την θερμαντική ικανότητα του καυσίμου.

Στις μικρές εγκαταστάσεις όπου υπάρχει χαμηλή ετήσια κατανάλωση καυσίμου, δεν επιλέγεται το βαρύ πετρέλαιο καθώς δεν μπορεί να δικαιολογηθεί το κόστος προθέρμανσης που απαιτείται, ενώ αντίθετα στις πολύ μεγάλες εγκαταστάσεις όπου υπάρχει υψηλή ετήσια κατανάλωση καυσίμου, δεν επιλέγεται το ελαφρύ πετρέλαιο λόγω του υψηλού του κόστους.

Στην Ελλάδα υπάρχει το πετρέλαιο ως πρωτογενή μορφή ενέργειας αλλά σε μικρές ποσότητες. Για πρώτη φορά το 1981 ξεκίνησε η εκμετάλλευση των κοιτασμάτων στην περιοχή της Καβάλας-Θάσου. Σήμερα, σύμφωνα με στοιχεία της Energean Oil & Gas, η ημερήσια παραγωγή ανέρχεται στα 4.000 βαρέλια πετρελαίου μέσης οξύτητας καθώς και φυσικού αερίου στις περιοχές του Πρίνου, Βόρειου Πρίνου και Νότιας Καβάλας [8.Energean Oil & Gas. (2016)]. Ωστόσο, η κάλυψη των αναγκών της χώρας σε πετρέλαιο επιτυγχάνεται κυρίως μέσω εισαγωγών λόγω της μικρής ποσότητας αργού πετρελαίου που βρίσκεται στον ελλαδικό χώρο.

1.3 Στερεά Καύσιμα

Τα στερεά ορυκτά καύσιμα αποτελούνται από τους διάφορους τύπους γαιάνθρακα (λιγνίτη, κωκ, κάρβουνο). Τα κοιτάσματα του λιγνίτη σχηματίζονται στα πρώτα στάδια της ενανθράκωσης αμέσως μετά την τύρφη και για τη δημιουργία ενός κυβικού μέτρου λιγνίτη, απαιτούνται περίπου 1000 έως 4000 χρόνια. Ο λιγνίτης δημιουργείται σε μικρό βάθος από την επιφάνεια της γης, ενώ αντίθετα σε μεγάλο βάθος δημιουργούνται κοιτάσματα από γαιάνθρακες ή λιθάνθρακες. [6. Μπαλάρας, Κ. (2006)]



Σχήμα 1.2 Λιγνιτικό κέντρο Δυτικής Μακεδονίας - Ορυχείο Νότιου Πεδίου [3.ΔΕΗ (2012)]

Οι γαιάνθρακες είναι το πιο σύνηθες στερεό καύσιμο, σε χρήση παραγωγής θερμότητας. Αποτελούνται από:

- άνθρακα
- υδρογόνο
- οξυγόνο
- άζωτο

- θείο
- νερό και
- μεταλλικά κατάλοιπα (τέφρα).

Οι γαιάνθρακες δημιουργούνται από φυτικά υπολείμματα μέσω μίας διαδοχής διεργασιών ενανθράκωσης. Οι διεργασίες αυτές είχαν ως αποτέλεσμα τον εμπλουτισμό των φυτικών υπολειμμάτων σε άνθρακα σε συνθήκες υψηλής πίεσης, θερμοκρασίας και απουσίας αέρα. Η μετατροπή των φυτικών ουσιών σε τύρφη και η μετάβαση από την τύρφη (αρχικό στάδιο ενανθράκωσης) στον ανθρακίτη (τελικό στάδιο ενανθράκωσης) καθορίζεται με τη γεωλογική ηλικία των γαιανθράκων, η οποία επηρεάζει τα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά τους.

Ο λιγνίτης, παρόλο που είναι ένα φτωχής ποιότητας καύσιμο, αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος των εγχώριων πόρων πρωτογενούς ενέργειας και είναι βασική παράμετρος για την επίτευξη της ενεργειακής αυτοδυναμίας της Ελλάδας και τον περιορισμό της εισαγόμενης ενέργειας. Χρησιμοποιείται σχεδόν εξ' ολοκλήρου στην παραγωγή ηλεκτρισμού και είναι καύσιμο στρατηγικής σημασίας, γιατί έχει χαμηλό κόστος εξόρυξης, σταθερή και ελέγξιμη τιμή και παρέχει σταθερότητα και ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού μη εξαρτώμενος από εξωγενείς πηγές.

Ωστόσο, σύμφωνα με στοιχεία από το 2013 που δόθηκαν στη δημοσιότητα μέσα στο έτος (2016) από τέσσερις Μη Κυβερνητικές Οργανώσεις: τη Συμμαχία για την Υγεία και το Περιβάλλον, το Ευρωπαϊκό Δίκτυο Δράσης για το Κλίμα, το ευρωπαϊκό γραφείο του WWF και τη Sandbag, προκύπτει ότι οι λιγνιτικοί σταθμοί της Ελλάδας ευθύνονται για πρόωρους θανάτους εντός και εκτός συνόρων [10.Energia.gr (2016)]. Σύμφωνα με την έκθεση ο μεγαλύτερος ελληνικός λιγνιτικός σταθμός, στον Άγιο Δημήτριο του Νομού Κοζάνης, με ισχύ 1.595 MW, κατατάσσεται στη 13η θέση από πλευράς εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και στη 18η όσον αφορά τις επιπτώσεις του στη δημόσια υγεία.

1.4 Αέρια Καύσιμα

Τα αέρια καύσιμα που χρησιμοποιούνται κυρίως στις εφαρμογές θέρμανσης είναι το φυσικό αέριο (Φ.Α.) και το υγροποιημένο αέριο. Τα κυριότερα γνωρίσματα του φυσικού αερίου είναι ότι είναι ένα άοσμο, άχρωμο αέριο, το οποίο συγκεντρώνεται στα ανώτερα τμήματα κοιτασμάτων πετρελαίου και σε κοιτάσματα αερίου. Ακόμη βρίσκεται σε βαθύτερα στρώματα της γης μέσα σε ασβεστολιθικά πετρώματα και εκτείνεται ανάμεσα σε μια πληθώρα άλλων υδρογονανθράκων, όμως για την άντλησή του είναι απαραίτητη ειδική τεχνολογία. [6. Μπαλάρας, Κ. (2006)]



Σχήμα 1.3 Μονάδα εξόρυξης φυσικού αερίου

Πριν τη διαδικασία της διανομής του, γίνεται αφαίρεση των ανεπιθύμητων συστατικών που περιέχει μέσω ξήρανσης είτε απόπλυσης, όπως υδρατμούς, υδρόθειο, ήλιο, υγροποιημένα πετρελαέρια και βενζίνη. Η θερμαντική του ικανότητα κινείται ανάμεσα στα 32000- 44000 kJ/m³. Η μεταφορά του φυσικού αερίου διεξάγεται μέσω αγωγών, κάτω από μεγάλες πιέσεις, ή με δεξαμενόπλοια αφού αρχικά το φέρουν στη μορφή υγραερίου. Το βάρος του υγραερίου ισούται με το μισό βάρος ίσου όγκου νερού.

Συμβαίνει συνήθως, για λόγους ασφαλείας, να προστίθενται και διάφορες ουσίες στο φυσικό αέριο, οι οποίες του δίνουν μία χαρακτηριστική έντονη οσμή. Το φυσικό

αέριο δεν είναι δηλητηριώδες, καθώς δεν περιέχει CO. Είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και σε περίπτωση διαρροής διαχέεται ταχύτατα σε αυτόν.

Ο βαθμός ασφαλείας του είναι αρκετά υψηλός, μολονότι σε ορισμένες περιπτώσεις προκύπτουν έντονες ανησυχίες από το μέγεθος των καταστροφών που μπορούν να δημιουργηθούν λόγω ατυχημάτων στο δίκτυο.

Τα στοιχεία όσον αφορά τη χρήση του φυσικού αερίου στη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ενθαρρυντικά καθώς [5.ΔΕΠΑ. Φυσικό Αέριο] :

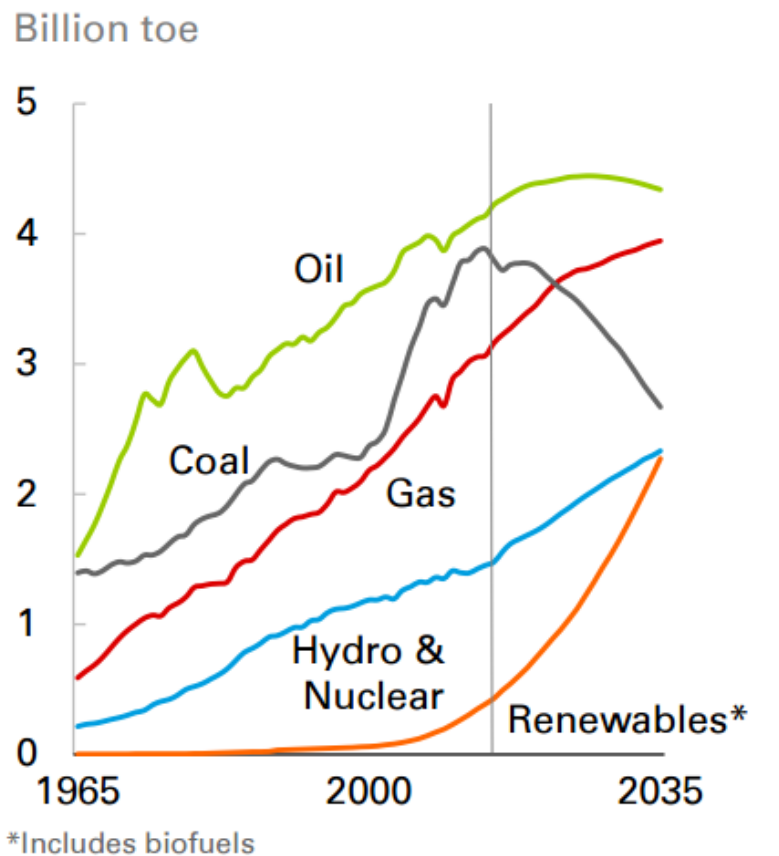
- Η αποδοτικότητα ενός σταθμού μπορεί να αυξηθεί μέχρι και 60%
- Το φυσικό αέριο εκλύει 25-30% λιγότερο CO₂ σε σχέση με το πετρέλαιο και 40-50% λιγότερο από τον άνθρακα ανά παραγόμενη ενεργειακή μονάδα

Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες της BP, τα ορυκτά καύσιμα παραμένουν η κυρίαρχη πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί την παγκόσμια οικονομία. Στο πλαίσιο αυτό, το φυσικό αέριο φαίνεται ότι θα γίνει το ταχύτερο αναπτυσσόμενο καύσιμο, λόγω των άφθονων αποθεμάτων που έχουν βρεθεί καθώς και λόγω των περιβαλλοντικών πολιτικών που το ευνοούν.

Αντίθετα, η παγκόσμια κατανάλωση του άνθρακα είναι πιθανό να εμφανίσει απότομη μείωση, ενώ σημαντική αύξηση αναμένεται από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και μάλιστα με ταχείς ρυθμούς, καθώς το κόστος τους θα συνεχίζει να πέφτει [7.BP (2016)].

Ως επακόλουθο των παραπάνω, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αναμένεται να αλλάξουν σημαντικά. Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμός των εκπομπών CO₂ αναμένεται να εμφανίσει μείωση έως και 50% σε σχέση με τα τελευταία είκοσι χρόνια. Ωστόσο για να συμβεί κάτι τέτοιο, είναι αναγκαίο να συμβάλει σε αυτό η νομοθεσία με περαιτέρω πολιτική δράση, ώστε να επιτευχθεί η επίλυση των οικολογικών προβλημάτων. Κάτι που θα μπορούσε να οδηγήσει προς αυτή την κατεύθυνση, είναι η αναθεώρηση του επιτρεπόμενου ορίου εκπομπών κάνοντάς το πιο αυστηρό, είτε ακόμη η τιμολόγηση του άνθρακα ως καύσιμο.

Consumption by fuel



Σχήμα 1.4 Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας με Βάση τη Πρώτη Ύλη [7.BP (2016)]

Όπως παρατηρείται και στο γράφημα τα ορυκτά καύσιμα εμφανίζουν μια μικρή πτώση στη συνολική κατανάλωση ενέργειας, με το μερίδιο τους να μειώνεται από 86% σήμερα σε περίπου 70% μέχρι το 2035.

Το φυσικό αέριο και το πετρέλαιο εξακολουθούν να αυξάνονται, αντιπροσωπεύοντας πάνω από το ήμισυ του συνολικού ενεργειακού εφοδιασμού για το 2035, αν και ο ρυθμός ζήτησης του πετρελαίου δείχνει να μειώνεται περίπου στα μισά του διαστήματος. Ο μεγάλος νικητής φαίνεται να είναι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ενώ αντίθετα η κατανάλωση του άνθρακα εμφανίζει τη μεγαλύτερη πτώση, η οποία ξεπερνάει το 30%, μειώνοντας σημαντικά το μερίδιο της ζήτησης που καλύπτει. Όπως φαίνεται και στο γράφημα ο αριθμός των TΠΠ του άνθρακα για το 2035, είναι στα ίδια επίπεδα με εκείνα του 2002.

Βιβλιογραφία

- [1] ΑΔΜΗΕ (2016). “Έκθεση για την Απόδοση Λειτουργίας του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Έτος 2015)”. Διαθέσιμο : http://www.admie.gr/fileadmin/groups/EDLES_DLS/PERFORMANCE_REPORT2015-IPTOver1.pdf
- [2] ΔΕΗ. “Η ΔΕΗ σήμερα” και “Ιστορική αναδρομή: ο ηλεκτρισμός στην Ελλάδα” Διαθέσιμο : <https://www.dei.gr/el/i-dei/i-etairia/omilos-dei-ae/dei-ae>
- [3] ΔΕΗ (2012). “Φωτογραφικό Υλικό”. Διαθέσιμο : https://www.flickr.com/photos/dei_gr/with/6505488047/
- [4] ΕΛΣΤΑΤ (2012) “Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, κατά μεγάλη γεωγραφική περιοχή, περιφέρεια, νομό και κατά κατηγορία χρήσης”. Διαθέσιμο : <http://www.statistics.gr/el/statistics/-/publication/SIN03/2012>
- [5] ΔΕΠΑ. “Φυσικό Αέριο”. Διαθέσιμο : <http://www.depa.gr/content/002002007001.html>
- [6] Μπαλάρας, Κ. (2006) “Συμβατικές & Ήπιες Μορφές Ενέργειας”. Αθήνα Έκδοση: ΣΕΛΚΑ-4Μ Τεκδοτική
- [7] BP (2016) “BP Energy Outlook - 2016 edition”. Διαθέσιμο : <https://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/energy-economics/energy-outlook-2016/bp-energy-outlook-2016.pdf>
- [8] Energean Oil & Gas. (2016) “Παραγωγή”. Διαθέσιμο : <http://www.energean.com/>
- [9] Energia.gr (2016) “EU ETS: Μείωση 9,6% στις Εκπομπές Co2 στην Ελλάδα το 2015”. Διαθέσιμο : http://www.energia.gr/article.asp?art_id=103823
- [10] Energia.gr (2016) “Δολοφόνος Χωρίς Σύνορα ο Λιγνίτης”. Διαθέσιμο : http://energia.gr/article.asp?art_id=106774
- [11] Wikipedia. “Ορυκτά καύσιμα”. Διαθέσιμο : <https://el.wikipedia.org/wiki>

2. Σταθμοί Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας - Θερμικοί Σταθμοί

Ως σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρονται τα εργοστάσια όπου οι διάφορες μορφές ενέργειας όπως θερμική, υδροδυναμική, πυρηνική, αιολική, ηλιακή κλπ., έπειτα από διαδοχικές διαδικασίες μετατρέπονται σε ηλεκτρική. Οι σταθμοί παραγωγής διαχωρίζονται ανάλογα με τον τρόπο που παράγουν την ηλεκτρική ενέργεια καθώς και το είδος της πρώτης ύλης που χρησιμοποιούν, πιο συγκεκριμένα σε [4. Οικονόμου, Λ. (2013)] :

1. **Θερμικούς**, οι οποίοι χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη πετρέλαιο, άνθρακα, φυσικό αέριο, πυρηνικά καύσιμα, γεωθερμική ενέργεια και βιομάζα.
2. **Μη Θερμικούς**, οι οποίοι χρησιμοποιούν την υδροδυναμική ενέργεια (υδατοπτώσεις), την αιολική ενέργεια (ανεμογεννήτριες), την ηλιακή ενέργεια (φωτοβολταϊκά-ηλιακούς συλλέκτες) και την ενέργεια των κυμάτων.

Οι σταθμοί παραγωγής, διακρίνονται σύμφωνα με τον τρόπο χρήσης τους στο Εθνικό Διασυνδεδεμένο Δίκτυο σε Σταθμούς Βάσης και σε Σταθμούς Αιχμής. Πιο αναλυτικά:

Οι **Σταθμοί Βάσης**, είναι σταθμοί συνεχούς λειτουργίας όπου καλούνται να καλύψουν το μεγαλύτερο μέρους του ζητούμενου φορτίου. Το κόστος κατασκευής όσο και το κόστος συντήρησης είναι υψηλό, ενώ ακόμα χρειάζονται μεγάλο χρονικό διάστημα προετοιμασίας ώστε να συγχρονιστούν με το υπόλοιπο σύστημα. Τέτοιου είδους σταθμοί είναι συνήθως οι ατμοηλεκτρικοί και οι πυρηνικοί.

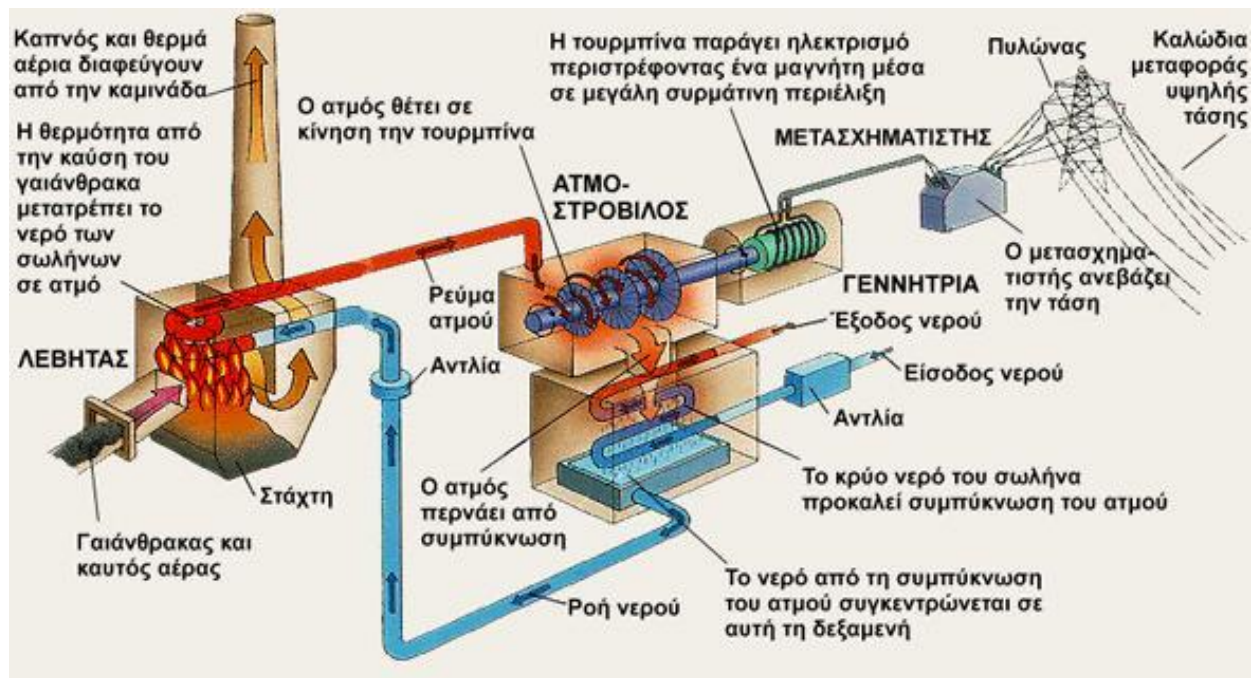
Οι **Σταθμοί Αιχμής**, είναι υποστηρικτικοί των σταθμών βάσης οι οποίοι εντάσσονται στο σύστημα ώστε να καλύψουν το φορτίο αιχμής τις ώρες μέγιστης ζήτησης. Το κόστος κατασκευής είναι χαμηλό, ενώ χρειάζονται μικρό χρονικό διάστημα προετοιμασίας ώστε να συγχρονιστούν με το υπόλοιπο σύστημα. Τέτοιου είδους σταθμοί είναι συνήθως οι αεριοστρόβιλοι.

Ακόμα, κάποιοι σταθμοί ανάλογα με τα ενεργειακά τους αποθέματα μπορούν να λειτουργήσουν και με τους δύο τρόπους, είτε ως σταθμοί βάσης είτε ως σταθμοί αιχμής, όπως οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί.

Στους θερμικούς σταθμούς παραγωγής η θερμότητα που πηγάζει από την καύση ορυκτών καυσίμων, όπως άνθρακας, λιγνίτης, πετρέλαιο, φυσικό αέριο, ή την πυρηνική σχάση μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια μέσα στο χώρο των θερμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής. Η παραπάνω διαδικασία εκτελείται μέσω κινητήριων μηχανών (στροβίλων) και μετέπειτα η μηχανική ενέργεια μεταβάλλεται σε ηλεκτρική μέσω γεννητριών. Οι θερμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής κατατάσσονται σε τρεις διαφορετικές κατηγορίες, στους ατμοηλεκτρικούς, στους θερμικούς με μηχανές εσωτερικής καύσης και τέλος στους πυρηνικούς.

2.1 Ατμοηλεκτρικοί Σταθμοί Παραγωγής

Η πλειονότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται σήμερα προέρχεται κυρίως από ατμοηλεκτρικούς σταθμούς, τόσο για τις μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας που μπορούν να παράξουν όσο και για τα οικονομικά οφέλη που διαθέτουν σε σύγκριση με τις υπόλοιπες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [2. Γιαννακόπουλος Γ. (2008)]



Σχήμα 2.1 Ατμοηλεκτρικός σταθμός παραγωγής (ΑΗΣ)

Στην Ελλάδα, οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής χρησιμοποιούν ως πρώτη ύλη το λιγνίτη και το πετρέλαιο ενώ αποτελούν κυρίως σταθμούς βάσης.

Βασικό πλεονέκτημά τους αποτελεί η αντοχή τους ως προς τη συντήρηση καθώς μπορούν να λειτουργούν για μεγάλο χρονικό διάστημα χωρίς να σταματούν για συντήρηση.

Οι ατμοηλεκτρικοί σταθμοί αποτελούνται από δύο βασικά μέρη :

- το μηχανολογικό και
- το ηλεκτρολογικό

Τα βασικά στοιχεία του μηχανολογικού μέρους είναι [1. Βιδιαδάκης Α (1999)] :

- ο λέβητας (καζάνι), όπου γίνεται η καύση
- ο στρόβιλος και ο συμπυκνωτής (ψυγείο).

Κατά τη διαδικασία της καύσης του καυσίμου στο λέβητα θερμαίνεται ορισμένη ποσότητα νερού έως την στιγμή που θα ατμοποιηθεί. Έπειτα ο ατμός καθώς εκτονώνει την πίεσή του, θέτει σε κίνηση τον ατμοστροβίλο και στη συνέχεια υγροποιείται και πάλι. Το ζεστό νερό το οποίο προκύπτει από την υγροποίηση καταλήγει στο λέβητα ώστε να θερμανθεί εκ νέου και κατόπιν να ατμοποιηθεί ξανά. Σε αυτό το στάδιο η χημική ενέργεια του καυσίμου μεταβάλλεται σε μηχανική.

Τα κυριότερα στοιχεία του ηλεκτρολογικού μέρους είναι :

- η ηλεκτρογεννήτρια και
- ο μετασχηματιστής.

Κατά τη περιστροφή του ατμοστροβίλου τίθεται σε κίνηση η ηλεκτρογεννήτρια, η οποία είναι συνδεδεμένη στον άξονα του στροβίλου. Το ηλεκτρικό ρεύμα το οποίο παράγεται μετασχηματίζεται από τα 15KV στην τάση εκείνη στην οποία θα διεξαχθεί η διαδικασία μεταφοράς του. Σε αυτό το στάδιο, η μηχανική ενέργεια του στροβίλου μετατρέπεται σε ηλεκτρική.

Η πλειοψηφία των ατμοηλεκτρικών σταθμών έχουν παραπάνω από μία μονάδες, οι οποίες λειτουργούν παράλληλα, με τη κάθε μονάδα να έχει το δικό της μετασχηματιστή.

2.2 Θερμικοί Σταθμοί Μηχανών Εσωτερικής Καύσης (MEK)

Στους σταθμούς αυτούς η θερμότητα παράγεται από Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (MEK) που είναι είτε εμβολοφόρες MEK, είτε αεριοστρόβιλοι.

Τα προϊόντα της καύσης του αέρα με το καύσιμο αποτελούν απευθείας το εργαζόμενο μέσο για την παραγωγή της μηχανικής ισχύος. Η καύση του καυσίμου γίνεται εσωτερικά, σε αντίθεση με τους ατμοστροβίλους που η καύση γίνεται έξω από αυτούς, στο λέβητα, και ο αέρας και το καύσιμο χρησιμοποιούνται σε ανοιχτό κύκλωμα. Το χρησιμοποιούμενο καύσιμο είναι κυρίως πετρέλαιο diesel για τις εμβολοφόρες MEK ή φυσικό αέριο για τους αεριοστρόβιλους.

2.2.1 Εμβολοφόρες Μηχανές Εσωτερικής Καύσης

Η εμβολοφόρος MEK αποτελεί τη συνηθέστερη μορφή κινητηρίου μηχανής. Εξαιτίας της απλής της κατασκευής ως μηχανή εσωτερικής καύσης, και της ικανότητας της να χρησιμοποιεί εργαζόμενο μέσο (αέρα ή αέρα και καύσιμο) σε υψηλές θερμοκρασίες συνδυάζει ικανοποιητικό ολικό βαθμό απόδοσης και μεγάλη συγκέντρωση ισχύος. Το εργαζόμενο μέσο σε όλες τις MEK, αναρροφάται από τη μηχανή και συμπιέζεται αρχικά μέχρι μια συγκεκριμένη πίεση, με αποτέλεσμα την αύξηση της θερμοκρασίας του. Έπειτα παρέχεται σε αυτό η θερμική ενέργεια που προέρχεται από την καύση του καυσίμου, έχοντας ως επακόλουθο την αύξηση της θερμοκρασίας του, της πίεσης και του όγκου του. Στην διαδικασία της αποτόνωσης που ακολουθεί στο επόμενο στάδιο, δίδεται κυρίως το κινητήριο έργο. Ένα τμήμα του κινητήριου έργου ικανοποιεί τις ανάγκες της συμπίεσεως που έχει προηγηθεί, ενώ το υπόλοιπο είναι το ωφέλιμο έργο της μηχανής. [4. Οικονόμου, Λ. (2013)]

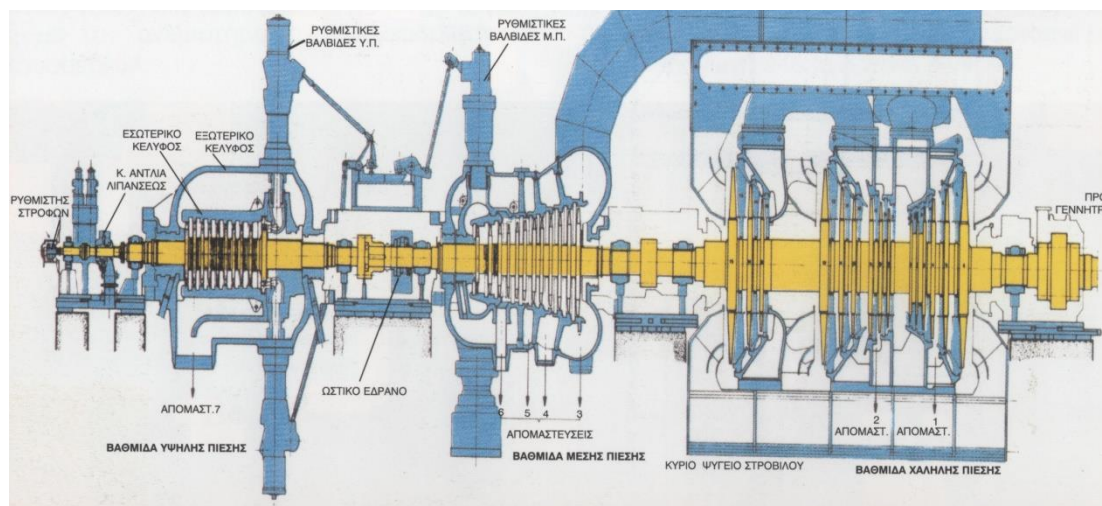
Ένας τρόπος μεγιστοποίησης της απόδοσης των αεριοστρόβιλων είναι η προσθήκη ενός ακόμη συστήματος, το οποίο θα ανακτά τη θερμότητα που χάνεται από τον στρόβιλο. Ακολουθούν τα πλεονεκτήματα των εμβολοφόρων MEK σε σχέση με τους ατμοστροβίλους [1. Βιδιαδάκης Α (1999)] :

- είναι ελαφρύτεροι και καλύπτουν μικρότερη έκταση στο χώρο που βρίσκονται για την ίδια αποδιδόμενη ισχύ,
- τίθενται σε λειτουργία άμεσα,
- δεν είναι απαραίτητη η χρήση πολύπλοκων εγκαταστάσεων,
- έχουν μεγαλύτερο βαθμό απόδοσης για μικρή και μέση ισχύ και
- λειτουργούν με μικρότερο αριθμό προσωπικού.

Ωστόσο, βασικό μειονέκτημα τους αποτελεί η συχνή συντήρηση τους από ειδικευμένο προσωπικό καθώς και η εμφάνιση βλαβών ανά τακτά χρονικά διαστήματα.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο υψηλός βαθμός απόδοσης είναι δυνατόν να επιτευχθεί όταν οι μηχανές λειτουργούν στο 75-80 % της ονομαστικής τους ισχύος, ενώ αντίθετα μειώνεται αρκετά όταν λειτουργούν κάτω από το 50 % της ονομαστικής τους ισχύος.

2.2.2 Αεριοστρόβιλοι



Σχήμα 2.2 Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) - Αεριοστρόβιλος

Στους αεριοστρόβιλους, σε αντίθεση με τις εμβολοφόρους ΜΕΚ, τα τρία κύρια στάδια λειτουργίας εκτελούνται στο συμπιεστή, το θάλαμο καύσεως, το στρόβιλο και το ακροφύσιο αντίστοιχα. Ο αεριοστρόβιλος αποτελείται από έναν κύριο άξονα που στη μία άκρη του υπάρχει ο κυρίως αεριοστρόβιλος και στην άλλη ο περιστροφικός συμπιεστής. Ο αεριοστρόβιλος στρέφει τον άξονα ωθώντας το συμπιεστή σε περιστροφή, παράλληλα με το φορτίο (ηλεκτρογεννήτρια). Στο χώρο του συμπιεστή εισάγεται ο ατμοσφαιρικός αέρας, ο οποίος λόγω της περιστροφής των πτερυγίων του συμπιεστή, του ασκείται πίεση, με αποτέλεσμα να ελαττώνεται ο όγκος του και να αυξάνεται η θερμοκρασία του. Αφού εξέλθει από το συμπιεστή, ο αέρας εισέρχεται στο θάλαμο καύσης, όπου κατά ένα μέρος του αναμιγνύεται με τα καυσάγια μειώνοντας τη θερμοκρασία τους και στη συνέχεια το μείγμα αυτό εκτονώνεται στις διαδοχικές βαθμίδες του στρόβιλου επιφέροντας την περιστροφή τους. Κατά την εκκίνηση, στο όλο σύστημα είναι απαραίτητη η εξωτερική επέμβαση η οποία πραγματοποιείται μέσω ηλεκτροκινητήρα. Ο ηλεκτροκινητήρας παραμένει συνδεδεμένος με το σύστημα μέχρι τη χρονική στιγμή που ο αεριοστρόβιλος θα αποκτήσει συγκεκριμένο αριθμό στροφών ώστε να αυτοσυντηρείται. [4. Οικονόμου, Λ. (2013)]

Ακολουθούν τα βασικότερα πλεονεκτήματα των αεριοστροβίλων σε σχέση με τους ατμοστροβίλους :

- αποτελούν απλούστερες μηχανές όπου θέλουν λιγότερο ειδικευμένο προσωπικό και πιο απλή συντήρηση,
- δεν είναι απαραίτητο το νερό τροφοδοσίας,
- η εκκίνησή τους είναι μία αρκετά εύκολη διαδικασία και γρήγορα έρχονται σε πλήρη φόρτιση έτσι ώστε να είναι ικανοί να εξυπηρετήσουν αιχμές φορτίου και
- έχουν χαμηλή πίεση λειτουργίας.

Ωστόσο, δυο σημαντικά μειονεκτήματά που έχουν έναντι των ατμοστροβίλων είναι ότι τα καύσιμά τους είναι ακριβά και παρουσιάζουν μικρότερο βαθμό απόδοσης.

Ακόμα, συγκριτικά με τις μηχανές diesel, ο αεριοστροβίλος έχει τα παρακάτω πλεονεκτήματα :

- δεν υπάρχουν τμήματα τα οποία εκτελούν παλινδρομικές κινήσεις, έχοντας πιο απλή κατασκευή με ελάχιστες μηχανικές απώλειες
- δεν εμφανίζει προβλήματα ζυγοστάθμισης,
- η συντήρηση είναι πιο απλή και οικονομικότερη,
- δεν είναι αναγκαίο το νερό ψύξης,
- δεν παρουσιάζονται υψηλές πιέσεις λειτουργίας και
- η λειτουργία είναι πιο ομαλή και αθόρυβη.

Παρουσιάζει παρόλα αυτά και ένα σημαντικό μειονέκτημα που είναι ο μικρός βαθμός απόδοσης, κοντά στο 20%, ο οποίος μπορεί να αυξηθεί έως και 15% ακόμα, αλλά θα έχει σαν αποτέλεσμα τη μεγάλη αύξηση της πολυπλοκότητας του συστήματος.

2.3 Σταθμοί Παραγωγής Συνδυασμένου Κύκλου

Η σταδιακή αύξηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας παράλληλα με την ανάγκη για μείωση των παραγόμενων ρύπων, έχουν ως αποτέλεσμα την αναζήτηση μεθόδων οι οποίοι θα αυξήσουν τον βαθμό απόδοσης των σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό μπορεί να υλοποιηθεί με την αύξηση της θερμοκρασίας και πίεσης του κύκλου. Αν και το κόστος είναι υψηλό για την εφαρμογή του σε συμβατικούς σταθμούς, δεν ισχύει το ίδιο για τους συνδυασμένους σταθμούς ατμοστρόβιλων και αεριοστρόβιλων. [2. Γιαννακόπουλος Γ. (2008)]



Σχήμα 2.3 Μονάδας V Συνδυασμένου Κύκλου στο Αλιβέρι [3.ΔΕΗ (2012)]

Τα καυσάερια που δημιουργούνται από τον αεριοστρόβιλο περνούν αρχικά μέσα από το σύστημα ανάκτησης θερμότητας, το οποίο χορηγεί ατμό σε υψηλή πίεση και θερμοκρασία στον ατμοστρόβιλο, και στη συνέχεια πηγαίνουν στην ατμόσφαιρα. Έπειτα η διαδικασία του ατμοστρόβιλου παραμένει ίδια, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα.

Οι σταθμοί παραγωγής συνδυασμένου κύκλου με δυνατότητα υψηλής παραγωγής ισχύος, οι οποίοι αποτελούνται από αεριοστρόβιλους και ατμοστρόβιλους, εμφανίζουν τα τελευταία χρόνια έντονο ενδιαφέρον λόγω της

- αύξησης που παρουσιάζει η θερμοκρασία εισόδου στον αεριοστρόβιλο
- αύξησης της συνεχούς λειτουργίας του αεριοστρόβιλου χωρίς να χρειαστεί συντήρηση ενδιάμεσα και
- της χρήσης του φυσικού αερίου ως καύσιμη ύλη, όπου είναι διαθέσιμο σε μεγάλες ποσότητες και δημιουργεί λιγότερους ρύπους συγκριτικά με τα στερεά καύσιμα.

Τα συνδυασμένα συστήματα αν και είναι πιο πολύπλοκα σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες, παρουσιάζουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης και εν μέρει χαμηλά έξοδα λειτουργίας και περεταίρω επενδύσεων.

Είναι κατανοητό πως η αλλαγή της τιμής του καυσίμου όσο και η αύξηση των παραμέτρων του ατμού καθώς και του κόστους των υλικών, έχουν ως αποτέλεσμα οι συμβατικές μονάδες ατμού να μην μπορούν να βελτιώσουν περεταίρω τη συνολική οικονομικότητα της μονάδας.

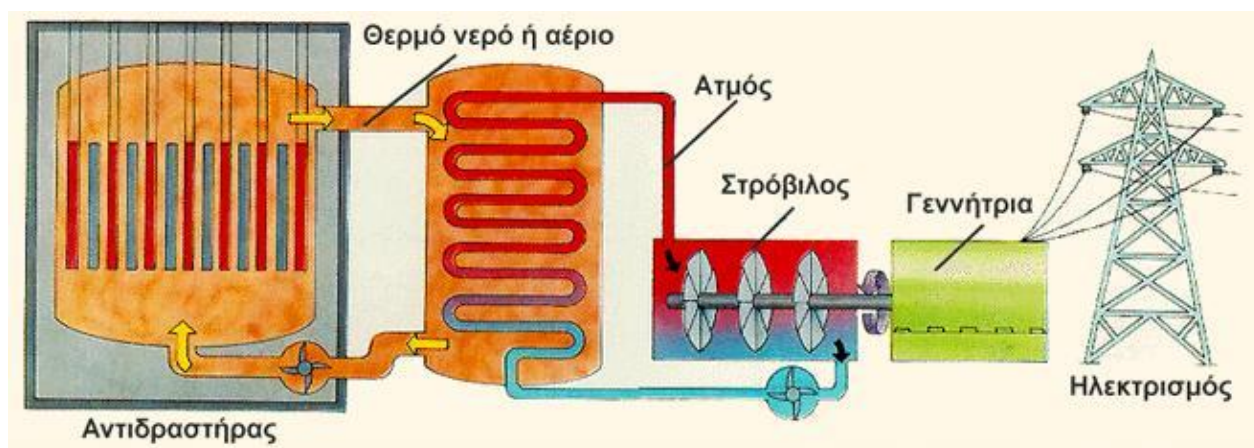
2.4 Σταθμοί Συμπαγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας και Θερμότητας

Μια ακόμη μέθοδος η οποία αποσκοπεί στη μείωση τόσο της κατανάλωσης των καυσίμων όσο και της μείωσης των εκπομπών είναι η ανάκτηση και εκμετάλλευση της απορριπτόμενης στο περιβάλλον θερμότητας. Στους θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συμπυκνωτή, έχει παρατηρηθεί ότι ένα μεγάλο ποσοστό της προσφερόμενης ενέργειας, κοντά στα 2/3, απορρίπτεται στο περιβάλλον. Η αξιοποίηση ολόκληρου ή και ενός μέρους της ενέργειας αυτής θα βοηθούσε σημαντικά στην αύξηση του βαθμού απόδοσης αλλά και στη μείωση των παραγόμενων εκπομπών. Η μέθοδος αυτή, είναι εφικτή μέσω κατασκευής συνδυασμένων σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας, ωστόσο, προϋποθέτει πως κοντά στο σημείο εγκατάστασης του σταθμού η τοπική ζήτηση θα είναι έντονη και για τις δυο μορφές ενέργειας, ηλεκτρικής και θερμικής. [4. Οικονόμου, Λ. (2013)]

Συνήθως, σε αυτούς τους σταθμούς συμπαγωγής γίνεται αντικατάσταση του συμπιεστή, διότι δίχως τη χαμηλή πίεση οι στρόβιλοι παράγουν πιο πολύ θερμική ενέργεια έναντι ηλεκτρικής ενέργειας.

2.5 Πυρηνικοί Σταθμοί Παραγωγής

Σε ένα πυρηνικό σταθμό ο ατμός παράγεται μέσω της θερμικής ενέργειας η οποία δημιουργείται από ένα πυρηνικό αντιδραστήρα, ενώ στη συνέχεια λειτουργεί όπως ένας ΑΗΣ.



Σχήμα 2.4 Πυρηνικός Σταθμός

Ο πυρηνικός αντιδραστήρας περιλαμβάνει ως καύσιμο σχάσιμους πυρήνες, οι οποίοι βρίσκονται σε ειδική γεωμετρική διάταξη καθώς και σε συγκέντρωση. Η σχάση των πυρήνων δημιουργείται τη στιγμή που το ραδιενεργό ισότοπο του στοιχείου Ουρανίου ^{235}U βομβαρδίζεται με νετρόνια, όπου ως συνέπεια έχει την έκλυση θερμότητας αλλά και νετρονίων, τα οποία στη συνέχεια συμμετέχουν σε αλυσιδωτές αντιδράσεις με ακόμη περισσότερα άτομα Ουρανίου ^{235}U . Έπειτα, η θερμότητα που έχει παραχθεί, κινείται προς τον μετατροπέα θερμότητας, στον χώρο του οποίου παράγεται ατμός έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με τη βοήθεια ενός ατμοστρόβιλου όπως ακριβώς συμβαίνει σε έναν ατμοηλεκτρικό σταθμό. Ο ρυθμός της αντίδρασης είναι αρκετά δύσκολο να ελεγχθεί, ωστόσο γίνεται μέσα σε μικρά περιθώρια. Το πιο σημαντικό είναι ο έλεγχος του συνολικού αριθμού και της ταχύτητας των νετρονίων. [2. Γιαννακόπουλος Γ. (2008)]

Τα πλεονεκτήματα που εμφανίζουν τα πυρηνικά εργοστάσια έναντι των συμβατικών θερμοηλεκτρικών εργοστασίων είναι ότι [4. Οικονόμου, Λ. (2013)] :

- το πυρηνικό εργοστάσιο δεν εκπέμπει ατμοσφαιρικούς ρύπους
- ο όγκος και το βάρος του καυσίμου που χρησιμοποιεί είναι μικρός και δεν δημιουργεί προβλήματα στη μεταφορά και στην αποθήκευση του

Όμως, τα μειονεκτήματα των πυρηνικών εργοστασίων έναντι των συμβατικών θερμοηλεκτρικών εργοστασίων είναι:

- Η παραγωγή ραδιενεργών απόβλητων μέσω του πυρηνικού αντιδραστήρα, τα οποία κρύβουν πολλούς κινδύνους για το περιβάλλον και απαιτούν ιδιαίτερο χειρισμό
- Τίθενται θέματα αξιοπιστίας καθώς ο ρυθμός της πυρηνικής αντίδρασης είναι μη ελέγξιμος κατά το μεγαλύτερο μέρος του
- Έχει υψηλό κόστος παραγωγής και επομένως μπορεί να λειτουργεί μόνο ως σταθμός βάσης,
- Εάν υπάρξει απώλεια της λειτουργίας ψύξης του αντιδραστήρα, ακόμα και στη περίπτωση όπου οι ράβδοι ελέγχου βρίσκονται σε θέση πλήρους λειτουργίας, η πυρηνική σχάση δε σταματά και η συνεχής θερμότητα που εκλύεται ενδέχεται να επιφέρει εξάτμιση και διασπορά ραδιενεργών υλικών.

Τα γνωστά αποθέματα του Ουρανίου ^{235}U είναι περιορισμένα και σε συνδυασμό με το σημερινό ρυθμό εκμετάλλευσής τους παράλληλα με τη συνεχή αυξανόμενη ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας, αναμένεται πως θα εξαντληθούν τις επόμενες δεκαετίες. Ωστόσο η ύπαρξη και άλλων ραδιενεργών στοιχείων όπως το πλουτόνιο, το οποίο υπάρχει πιθανότητα να διαδεχθεί το ουράνιο στην επερχόμενη γενιά πυρηνικών εργοστασίων, θα έχει ως αποτέλεσμα την επέκταση τόσο της λειτουργίας των πυρηνικών εργοστασίων όσο και της ύπαρξης πυρηνικών καυσίμων.

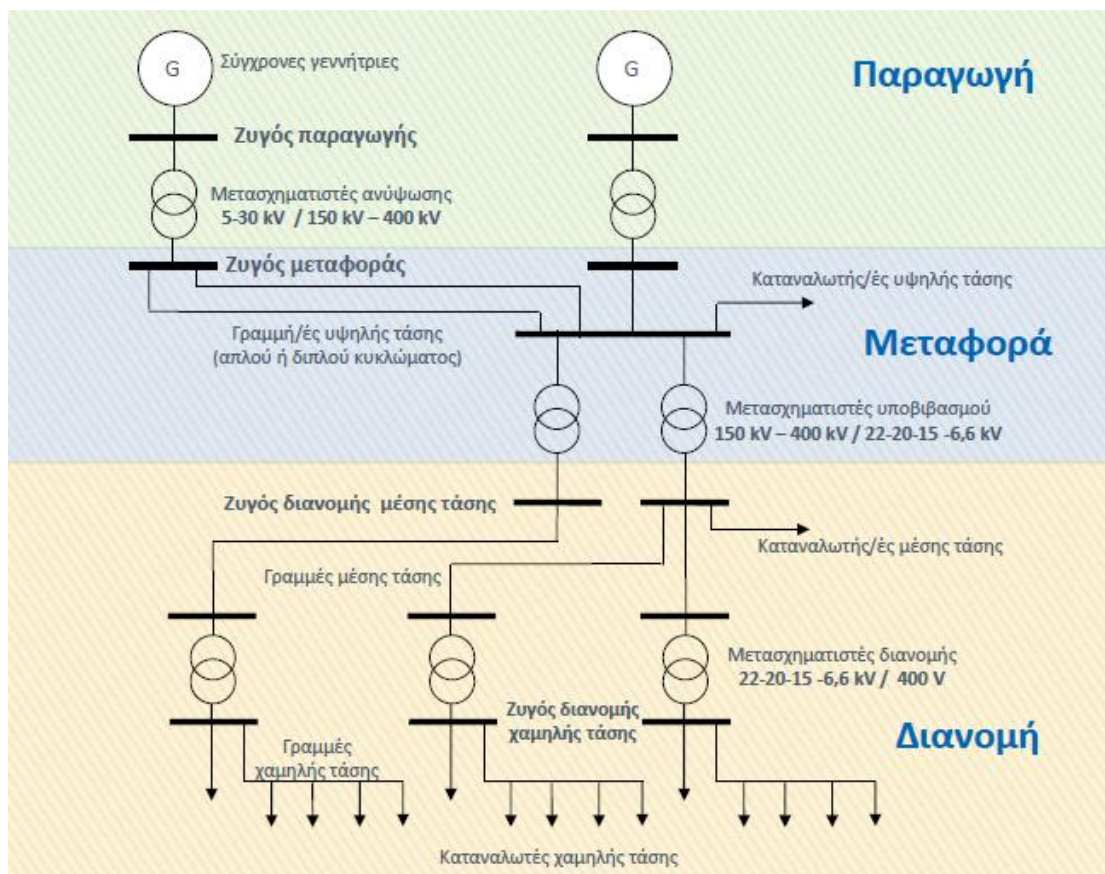
Βιβλιογραφία

- [1] Βιδιαδάκης Α. , Μπινιάρης Α. , Κανελλόπουλος Χ., Χατζαράκης Γ. (1999). “Ηλεκτρολογία - Κύκλος Τεχνολογίας και Παραγωγής”. Διαθέσιμο :
<http://ebooks.edu.gr/modules/ebook/show.php/DSGL-C123/487/3182,12857/>
- [2] Γιαννακόπουλος Γ. ,Βοβός, Ν. (2008). “Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”. Εκδότης: Ζήτη
- [3] ΔΕΗ (2012). “Φωτογραφικό Υλικό”. Διαθέσιμο :
https://www.flickr.com/photos/dei_gr/with/6505488047/
- [4] Οικονόμου Α. ,Καρβουνιάρη Δ. ,Μαλάμου, Α. (2013). “Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας Συνοπτική Θεωρία και Εργαστηριακές Ασκήσεις 2η έκδοση”. Έκδοσης: Α. Τζιολα & Υιοι Α.Ε.

3. Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ)

3.1 Εισαγωγή

Σύστημα Ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, μεταφορά και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας σε περιοχές εξυπηρέτησης.



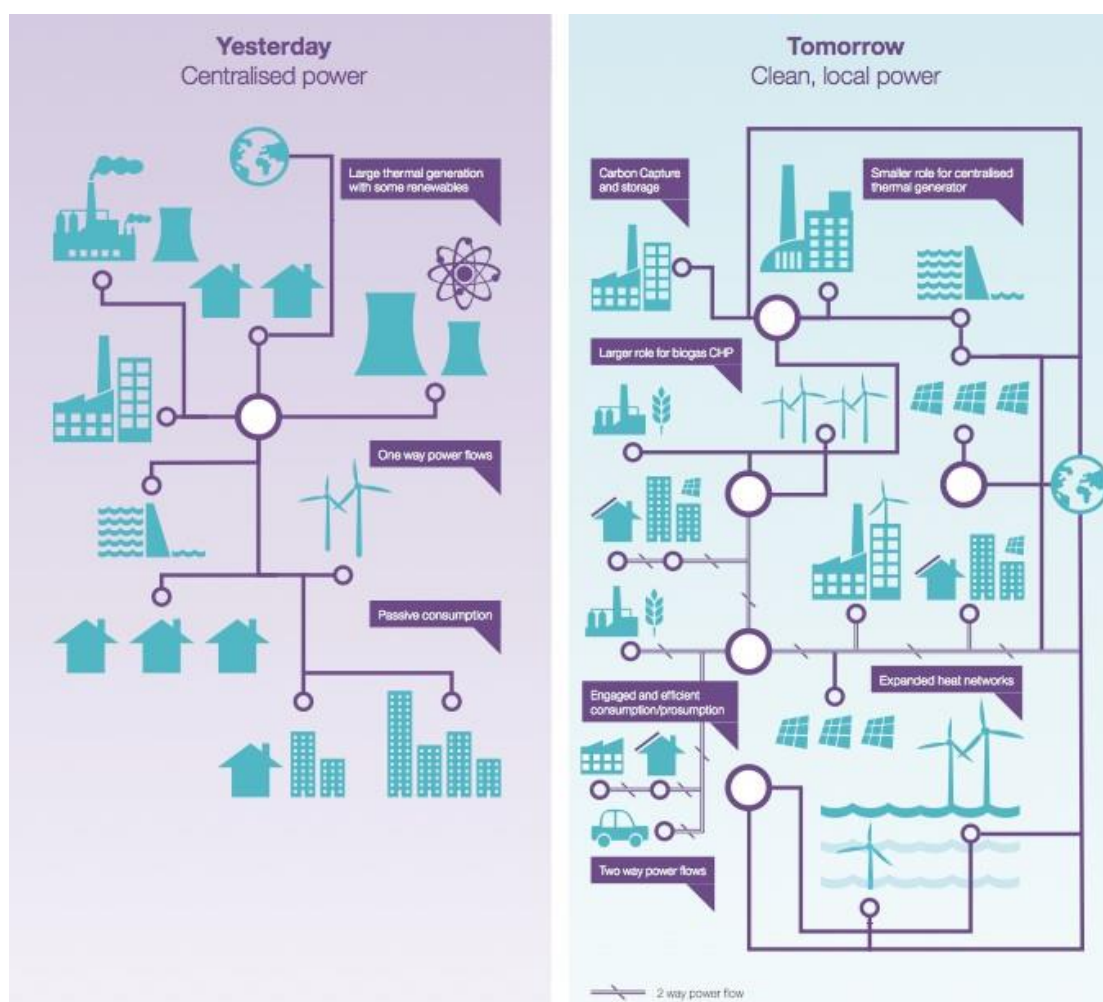
Σχήμα 3.1 Δομή Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας [4.Κανέλλος, Φ. (2016)]

Για τη σωστή λειτουργία, το ΣΗΕ πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες δυνατές οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας ταυτόχρονα σταθερή τάση, σταθερή συχνότητα και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

3.2 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Τα δυο μοντέλα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι :

- **Η Συγκεντρωμένη παραγωγή (Centralized Generation)**, όπου καλείται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όπου οι εγκαταστάσεις συνήθως βρίσκονται μακριά από τους τελικούς καταναλωτές, με την ενέργεια να διανέμεται συγκεντρωτικά μέσω του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.
- **Η Διεσπαρμένη παραγωγή (Distributed Generation)**, όπου αποτελείται κυρίως από μονάδες παραγωγής μικρότερης κλίμακας, όπου παρέχουν ηλεκτρική και θερμική ενέργεια έχοντας τις εγκαταστάσεις τους σε περιοχές κοντά στους καταναλωτές.



Σχήμα 3.2 Συγκεντρωμένη Παραγωγή και Διεσπαρμένη Παραγωγή [9.Breaking Energy (2015)]

Ιστορικά, η Συγκεντρωμένη παραγωγή είναι ένα αναπόσπαστο τμήμα του ηλεκτρικού δικτύου, στην οποία ανήκουν μεγάλες εγκαταστάσεις παραγωγής. Οι εγκαταστάσεις αυτές είναι κυρίως μονάδες ορυκτών καυσίμων, πυρηνικής ενέργειας ή υδροηλεκτρικές μονάδες όπου επιλέχθηκαν να κατασκευαστούν κοντά σε περιοχές με μεγάλα αποθέματα κοιτασμάτων με στόχο την μείωση του κόστους που θα χρειαζόταν για την προμήθεια τους και παράλληλα μακριά από κατοικημένες περιοχές για την προστασία των πολιτών από τους ατμοσφαιρικούς ρύπους.

Ωστόσο, η ραγδαία ανάπτυξη των τεχνολογιών της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε μικρή κλίμακα σε συνδυασμό με την ανάγκη για μείωση των απωλειών μεταφοράς και αποφυγή προβλημάτων τροφοδοσίας όπως blackout, πτώση τάσης κλπ., δίνει την δυνατότητα σε περεταίρω ανάπτυξη και εδραίωση της Διεσπαρμένης Παραγωγής ως κύριο μοντέλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο άμεσο μέλλον. Σε αυτό το μοντέλο υπάγονται οι θερμικές μονάδες και μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως

- Φωτοβολταϊκά πάρκα,
- Ανεμογεννήτριες
- Υδροηλεκτρικά
- Μικροστρόβιλοι (microturbines)
- Παλινδρομικοί κινητήρες (reciprocating engines)
- Κυψέλες καυσίμου (fuel cells)

αλλά και συσκευές αποθήκευσης ενέργειας, όπως

- Μπαταρίες
- Σφόνδυλοι
- Υπερπυκνωτές

Ακόμα, συνδυάζει τη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού για εκμετάλλευση σε τοπικό επίπεδο, με αποτέλεσμα την αύξηση της απόδοσης και τη μείωση των απωλειών άρα και του κόστους.

Βέβαια, ένα από τα κυρίαρχα προβλήματα στην εφαρμογή αυτού του μοντέλου είναι το κόστος εγκατάστασης ανά kW που πρέπει να δαπανηθεί για κάθε μια μονάδα, όπου ενδεικτικά το κόστος για αεριοστρόβιλους αγγίζει 1000 €/kW ενώ κυψέλες καυσίμων (υδρογόνου) είναι πάνω από 20.000 €/kW.

3.3 Μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας

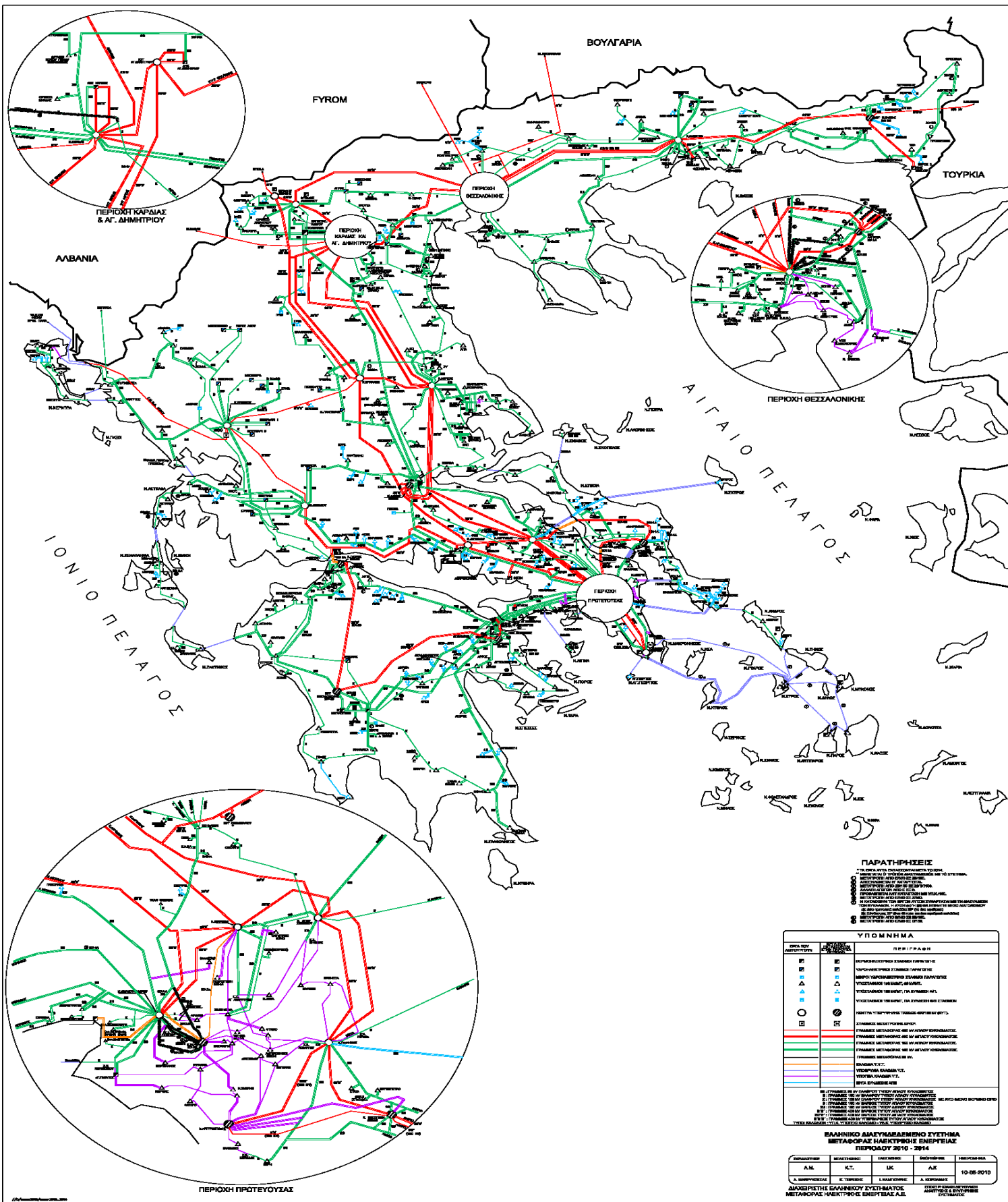
Το δίκτυο Μεταφοράς, είναι αρμόδιο για τη μεταφορά της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος από τους σταθμούς παραγωγής προς τους υποσταθμούς μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται μέσω του δικτύου υψηλής τάσης (150kV) και υπερυψηλής (400kV) όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες, με στόχο τη μείωση των απωλειών, όπου καταλήγει στους υποσταθμούς μεταφοράς με υποβιβασμό της τάσης στη μέση τάση (20 kV).



Σχήμα 3.3 Γραμμές Υψηλής Τάσης - Ορχομενός Βοιωτίας [3.ΔΕΗ (2012)]

Τα συστατικά στοιχεία των γραμμών μεταφοράς είναι:

- Πυλώνες ή πύργοι, στους οποίους στηρίζονται οι αγωγοί των εναέριων γραμμών
- Μονωτήρες, μέσω των οποίων αναρτώνται στους πυλώνες οι αγωγοί γραμμών
- Αγωγοί, κυρίως από χαλκό και αλουμίνιο.



Σχήμα 3.4 Χάρτης Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργεια [1.ΑΔΜΗΕ (2014)]

Το Ελληνικό Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας αποτελείται από το Διασυνδεδεμένο Σύστημα του ηπειρωτικού τμήματος της χώρας το οποίο λειτουργεί σε δύο επίπεδα τάσεων 400kV (υπερυψηλή τάση) και 150kV (υψηλή τάση) και των Διασυνδεδεμένων με αυτό νησιών στα επίπεδα κυρίως 150kV (υψηλή τάση) κι εν μέρει μέσω 66kV, ενώ το συνολικό του μήκος των γραμμών ανέρχεται στα 11.364,93 χιλιόμετρα. Πιο αναλυτικά:

ΓΡΑΜΜΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ (km)					
ΤΥΠΟΣ	400 kV	Σ.Ρ. 400 kV	150 kV	66 kV	ΣΥΝΟΛΟ
ΕΝΑΕΡΙΕΣ	2.647	107	8.157	39	10.950
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ			191,35	15	206,35
ΥΠΟΒΡΥΧΙΕΣ (Υ/Γ τμήμα)			16,17		16,17
ΥΠΟΓΕΙΕΣ	31,35		161,06		192,41
ΣΥΝΟΛΟ	2.678,35	107	8.525,58	54	11.364,93

Πίνακας 3.1 Μήκος Οδεύσεων Γραμμών Μεταφοράς ΕΔΣΜ στις 31/12/2015
[2.ΑΔΜΗΕ (2016)]

Επίσης, είναι συνδεδεμένο με τα συστήματα Μεταφοράς της Αλβανίας, της Βουλγαρίας, της Π.Γ.Δ.Μ. όπου η διασύνδεση με :

- τη Βουλγαρία αποτελείται από μία γραμμή των 400 kV.
- την Αλβανία αποτελείται από μία γραμμή των 150 kV και μία 400 kV.
- την Π.Γ.Δ.Μ γίνεται με δύο γραμμές των 400 kV.

Με συνολική ονομαστική δυναμικότητα περίπου 4.400 MW, καθώς και με τα συστήματα της Ιταλίας και της Τουρκίας, όπου η διασύνδεση με :

- την Ιταλία αποτελείται από υποβρύχιο καλώδιο και γραμμή μεταφοράς συνεχούς ρεύματος (HVDC) ισχύος 500 MW.
- την Τουρκία ολοκληρώθηκε τον Ιούνιο του 2008 με γραμμή 400 kV (2000 MVA).

Η Ελλάδα είναι μέλος της UCTE (Union for Coordination of Transmission of Electricity), και το διασυνδεδεμένο σύστημα λειτουργεί σύγχρονα και παράλληλα με το υπόλοιπο διευρωπαϊκό σύστημα μεταφοράς.

3.4 Διανομή ηλεκτρικής ενέργειας

Το δίκτυο διανομής, είναι αρμόδιο για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους τελικούς καταναλωτές μέσω των γραμμών διανομής, αφού γίνει ο υποβιβασμός της μέσης τάσης σε χαμηλή τάση στους υποσταθμούς διανομής.

Το δίκτυο Διανομής, περιλαμβάνει:

- το δίκτυο διανομής μέσης τάσης (20kV) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς μεταφοράς στους υποσταθμούς διανομής.
- το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης (220/380V) που μεταφέρει την ηλεκτρική ενέργεια από τους υποσταθμούς διανομής στους καταναλωτές.



Σχήμα 3.5 Υποσταθμός διανομής ΔΕΗ [3.ΔΕΗ (2012)]

Ο υποσταθμός διανομής, όπου γίνεται ο απαραίτητος υποβιβασμός από μέση σε χαμηλή τάση, αποτελείται από :

- Μετασχηματιστές, οι οποίοι μεταβάλλουν την τάση και την ένταση
- Μετασχηματιστές τάσης και έντασης, για σκοπούς μετρήσεων
- Προστατευτικές συσκευές υπέρτασης, για προστασία από κεραυνούς και από υπέρταση στο κύκλωμα
- Ασφαλειοδιακόπτες, οι οποίοι ανοίγουν το κύκλωμα σε περίπτωση σφάλματος
- Διακόπτες αποσύνδεσης

3.5 Βασικά Χαρακτηριστικά Λειτουργίας Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

Από όλες τις μορφές ενέργειας, αυτή που επηρέασε περισσότερο το σύγχρονο πολιτισμό είναι η ηλεκτρική ενέργεια. Αποτελεί τη βάση της οικονομίας και της σύγχρονης ζωής, καθώς είναι παρούσα σχεδόν σε όλες τις ανθρώπινες δραστηριότητες ανεβάζοντας το βιοτικό επίπεδο και τα πρότυπα ζωής σε υψηλά επίπεδα.

Τα σπουδαιότερα χαρακτηριστικά που την κάνουν να ξεχωρίζει είναι :

- η εύκολη και αποδοτική μεταφορά της σε μεγάλες αποστάσεις
- η μετατροπή της σε άλλες μορφές ενέργειας
- η άμεση διάθεσή της
- ότι είναι «καθαρή» στη χρήση της.

Ωστόσο, το μεγάλο μειονέκτημα της ηλεκτρικής ενέργειας είναι η δύσκολη, σχεδόν αδύνατη μακροχρόνια αποθήκευσή της. Σαν αποτέλεσμα θα πρέπει να καταναλώνεται ταυτόχρονα με την παραγωγή της, κάτι το οποίο δημιουργεί κάποιους περιορισμούς που πρέπει να τηρεί το ΣΗΕ ώστε να εξασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του.

Ο σημαντικότερος παράγοντας είναι ότι η παραγωγή πρέπει να ισούται πάντα με τη ζήτηση και πρέπει να εξασφαλίζεται η :

- αδιάλειπτη παροχή
- υψηλή αξιοπιστία
- ασφάλεια τροφοδοσίας
- σταθερή και ποιοτική τάση
- σταθερή συχνότητα και
- παροχή οικονομικής και ‘καθαρής’ ηλεκτρικής ενέργειας.

Είναι κατανοητό πως εφόσον το μοντέλο της παραγωγής που ακολουθείται είναι αυτό της Συγκεντρωμένης παραγωγής, όπως αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η ηλεκτρική ισχύς διοχετεύεται μέσω του κοινού δικτύου μεταφοράς και διανομής προς όλους τους καταναλωτές, μη έχοντας τη δυνατότητα συσχέτισης παραγωγού – καταναλωτή. Ως αποτέλεσμα, εάν δε τηρηθεί η ισότητα μεταξύ παραγωγής και ζήτησης μια πιθανή κατάρρευση ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζει όλους ανεξαιρέτως τους συμμετέχοντες στην αγορά.

Για την αποφυγή ενός τέτοιου ενδεχομένου απαιτείται σωστός προγραμματισμός των μονάδων παραγωγής με σκοπό την ικανοποίηση του φορτίου, όπως η ένταξή τους στο σύστημα (Unit Commitment) και ο οικονομικά βέλτιστος τρόπος λειτουργίας τους, όπου θα το αναλυθεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Καθοριστικό ρόλο για να γίνει σωστός προγραμματισμός έχει η πρόβλεψη του φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μέθοδοι πρόβλεψης φορτίου μπορούν να χωριστούν σε πολύ

βραχυπρόθεσμα, μεσοπρόθεσμα και μακροπρόθεσμα μοντέλα ανάλογα με το χρονικό διάστημα. Σε πολύ βραχυπρόθεσμες προβλέψεις φορτίου ο προβλεπόμενος χρόνος μπορεί να είναι ακόμη και μερικά λεπτά, ενώ σε μακροπρόθεσμες προβλέψεις μπορεί να είναι από μερικά χρόνια έως και μερικές δεκαετίες.

Είδος Πρόβλεψης	Λειτουργίες ΣΗΕ που επηρεάζει
Πολύ βραχυπρόθεσμη (sec-μερικά min)	- Αυτόματος έλεγχος παραγωγής
	- Οικονομική κατανομή φορτίου
Βραχυπρόθεσμη (ώρες – βδομάδες)	- Ένταξη μονάδων
	- Υδροθερμική συνεργασία
	- Ανταλλαγές ισχύος
Μεσοπρόθεσμη (μήνες-έτη)	- Προγραμματισμός καυσίμων
	- Χρήση των υδάτινων πόρων
	- Προγραμματισμός Συντήρησης Μονάδων
Μακροπρόθεσμη (10-25 έτη)	- Προγραμματισμός ένταξης νέων μονάδων

Πίνακας 3.2 Χαρακτηρισμός προβλέψεων φορτίου ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα
[4. Κανέλλος, Φ. (2016)]

Τα κριτήρια τα οποία επηρεάζουν τη πρόβλεψη είναι :

- Οικονομικοί λόγοι, όπως ανάπτυξη ή και κορεσμός της αγοράς, επίπεδα βιομηχανικής, αγροτικής δραστηριότητας κλπ.
- Χρονικοί λόγοι, όπως εποχιακές μεταβολές, εβδομαδιαίος/ημερήσιος κύκλος και εθνικές και θρησκευτικές εορτές/αργίες
- Καιρικοί λόγοι, όπως θερμοκρασία, υγρασία, βροχόπτωση, άνεμος, νεφώσεις, ηλιοφάνεια
- Τυχαίοι λόγοι, όπως μεγάλα πολιτιστικά, κοινωνικά γεγονότα (εκλογές, απεργίες κλπ.)

Ωστόσο χρειάζεται προσοχή, διότι σφάλματα στην πρόβλεψη φορτίου μπορεί να οδηγήσουν σ' ένα μη οικονομικά βέλτιστο πρόγραμμα.

3.6 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Θερμικών Μονάδων

Για την ανάλυση της οικονομικής λειτουργίας των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ορισμένες χαρακτηριστικές καμπύλες εισόδου – εξόδου των θερμικών μονάδων. Χωρίζονται σε τρεις ομάδες ανάλογα με το αν η είσοδος στη μονάδα εκφράζεται [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)] :

- ως παροχή καυσίμου, $\dot{m}B$ σε τόνους ανά ώρα T/h
- ως ωριαία κατανάλωση θερμότητας, H σε Gcal/h
- ως ωριαίο κόστος λειτουργίας, €/h

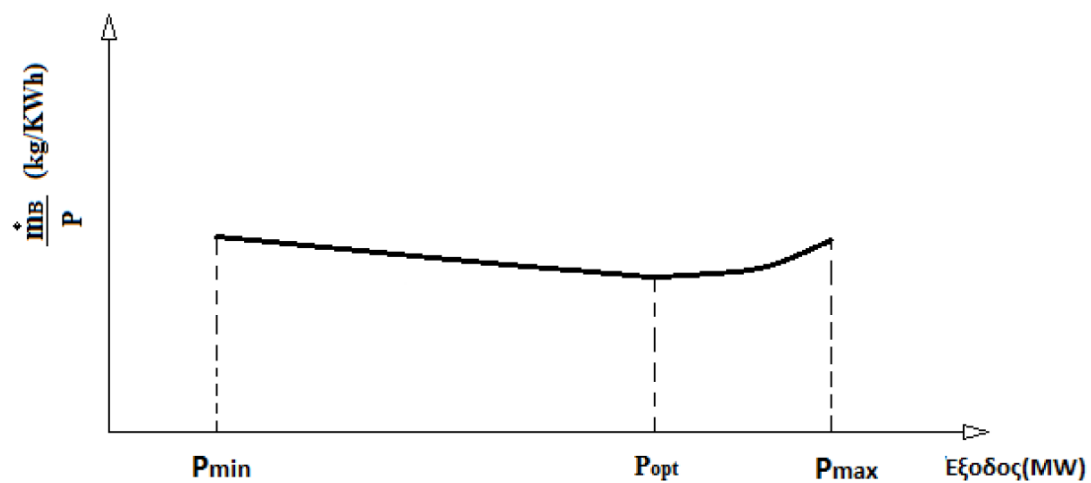
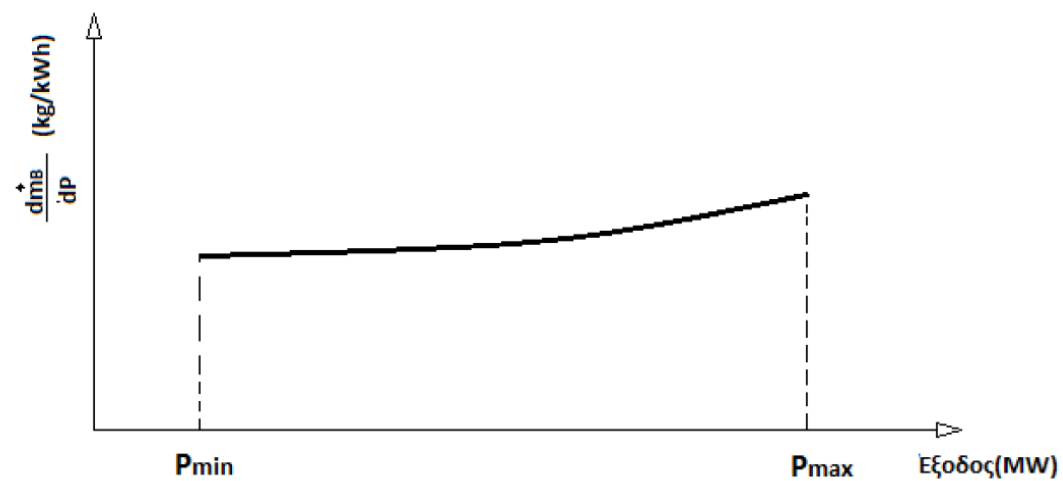
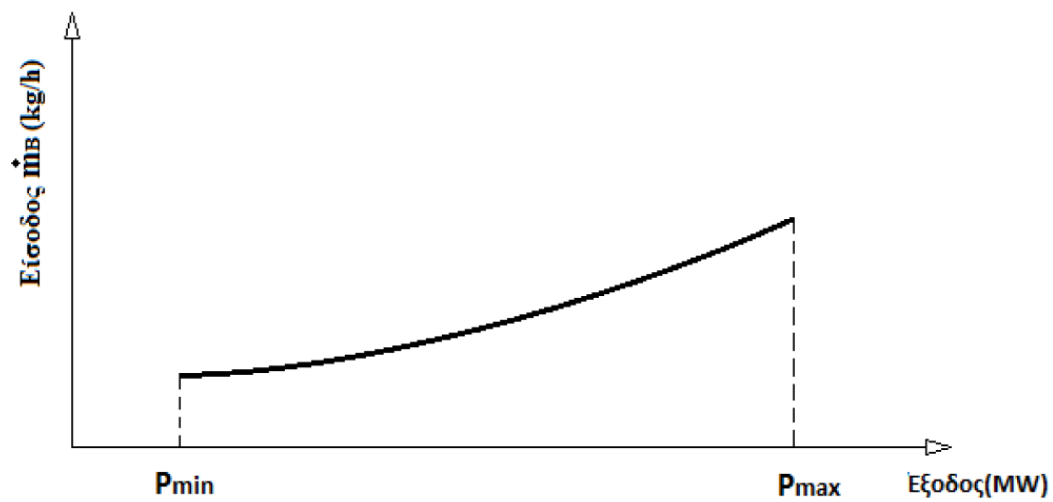
Ως έξοδο δίδεται την ηλεκτρική ισχύ, P σε MW, που παρέχει η μονάδα στο δίκτυο όπου δεν συνυπολογίζεται η ιδιοκατανάλωση της μονάδας (2% έως 8% της συνολικής ισχύος εξόδου).

Ακόμα, η ελάχιστη τιμή της ισχύος εξόδου, P_{min} , καθορίζεται από την ευστάθεια της καύσης στον καυστήρα και είναι περίπου το 30% της ονομαστικής ισχύος της μονάδας, ενώ η μέγιστη ισχύς εξόδου P_{max} είναι ίση ή έως 5% μεγαλύτερη από την ονομαστική ισχύ της μονάδας.

Η καμπύλη ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου εκφράζει την παροχή καυσίμου, $\dot{m}B$, (TonFuel/h ή kgFuel/h κτλ), ως συνάρτηση της καθαρής ισχύος εξόδου P της μονάδας σε MW.

Η καμπύλη διαφορικής κατανάλωσης καυσίμου είναι η παράγωγος της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου ως προς την έξοδο $dP/d\dot{m}B$ και είναι συνήθως αύξουσα συνάρτηση. Εκφράζει την αύξηση στην παροχή του καυσίμου, $\Delta\dot{m}B$ σε kg/h, που απαιτείται για την αύξηση της ισχύος εξόδου της μονάδας κατά $\Delta P=1$ kW.

Η καμπύλη ειδικής κατανάλωσης καυσίμου (kgFuel/kWh) εκφράζει το λόγο της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου προς την ισχύ εξόδου, $\dot{m}B/P$, σε kgFuel/kWh συναρτήσει της ισχύος εξόδου P της μονάδας σε MW. Εμφανίζει ένα συνολικό ελάχιστο λίγο πριν την ονομαστική ισχύ π.χ. 80% της ονομαστικής ισχύος όπου είναι και το οικονομικότερο σημείο λειτουργίας του σταθμού.



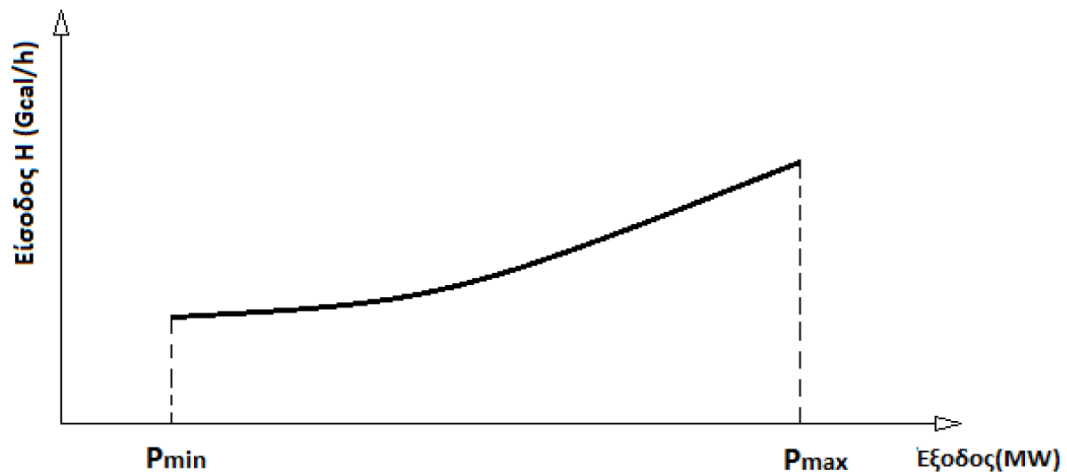
Σχήμα 3.6 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κατανάλωσης Καυσίμου Θερμικής Μονάδας
[5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]

Η καμπύλη ωριαίας κατανάλωσης θερμότητας εκφράζει το ρυθμό παροχής θερμότητας H (Heat rate), στο λέβητα, σε Gcal/h, ως συνάρτηση της ισχύος εξόδου P σε MW.

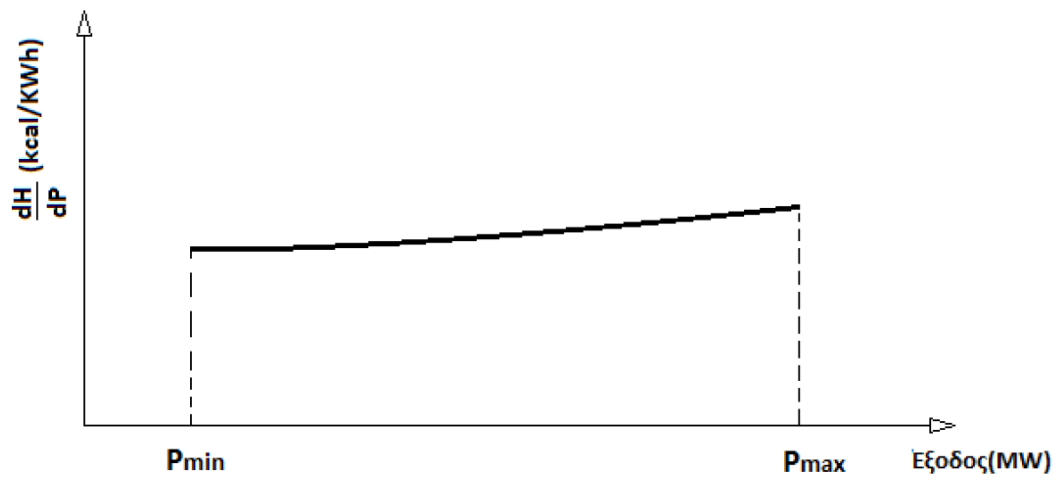
Η διαφορική κατανάλωση θερμότητας είναι η παράγωγος της ωριαίας κατανάλωσης θερμότητας ως προς την ισχύ εξόδου της μονάδας dP/dH σε (Gcal/MWh ή kcal/kWh). Εκφράζει την αύξηση στην κατανάλωση θερμότητας ΔH , σε Gcal/h ή kcal/h, που απαιτείται για την αύξηση της ισχύος εξόδου κατά $\Delta P = 1$ MW ή 1 kW αντίστοιχα. Είναι συνήθως αύξουσα συνάρτηση της ισχύος εξόδου. Η καμπύλη της διαφορικής κατανάλωσης θερμότητας δείχνει τη σχέση της διαφορικής κατανάλωσης θερμότητας dP/dH σε kcal/kWh, συναρτήσει της ισχύος εξόδου P της μονάδας σε MW.

Η ειδική κατανάλωση θερμότητας εκφράζει το λόγο της ωριαίας κατανάλωσης θερμότητας προς την ισχύ εξόδου της μονάδας, P/H σε (kcal/kWh ή Gcal/MWh) ως συνάρτηση της ισχύος εξόδου P της μονάδας σε MW. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ειδική κατανάλωση θερμότητας είναι το αντίστροφο του βαθμού απόδοσης της μονάδας ενώ σε αντίθεση με τη διαφορική, είναι φθίνουσα συνάρτηση της ισχύος εξόδου και με ελάχιστο την ονομαστική ισχύ ή λίγο πιο κάτω.

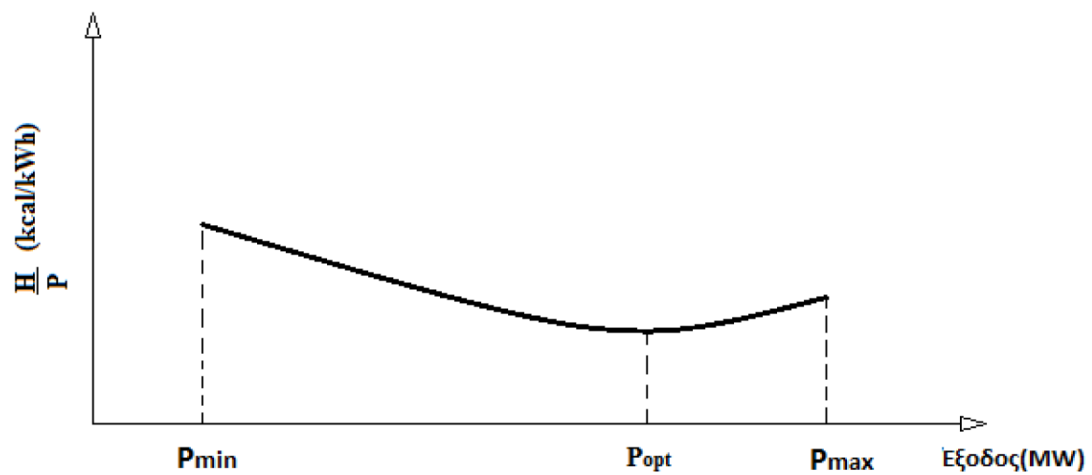
Ο βαθμός απόδοσης των ατμοηλεκτρικών μονάδων εξαρτάται από τη θερμοκρασία του νερού ψύξης η οποία εξαρτάται από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Έτσι, το καλοκαίρι ο βαθμός απόδοσης μειώνεται σε σχέση με το χειμώνα. Ο βαθμός απόδοσης εξαρτάται επίσης από το χρόνο που πέρασε από τη τελευταία συντήρηση. Αποθέσεις στο λέβητα, διαρροές ατμού, απώλειες διάβρωσης και άλλες θερμικές απώλειες συσσωρεύονται μεταξύ συντηρήσεων και συμβάλλουν στη μείωση του βαθμού απόδοσης.



1. Ωριαία Κατανάλωση Θερμότητας



2. Διαφορική Κατανάλωση Θερμότητας



3. Ειδική Κατανάλωση Θερμότητας

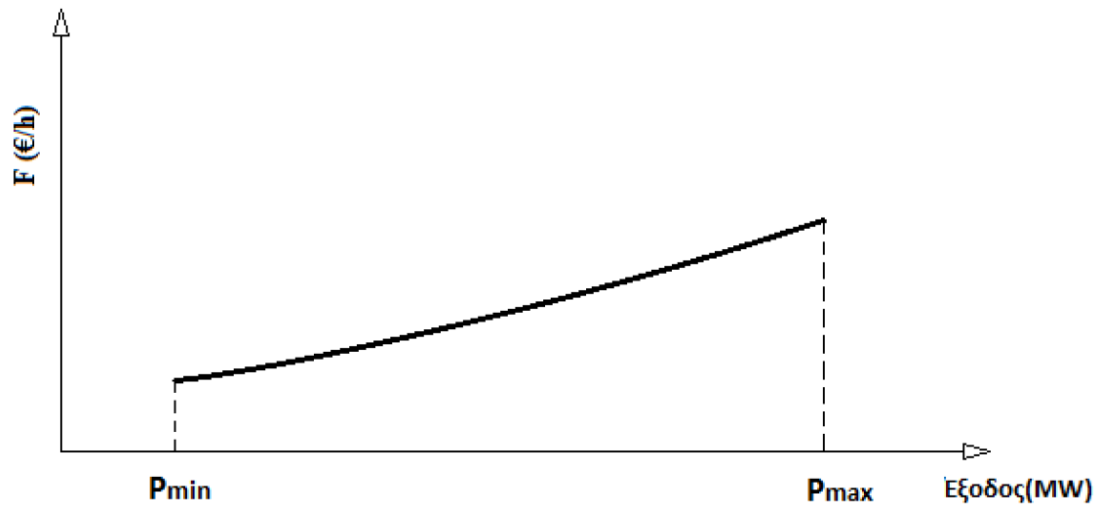
Σχήμα 3.7 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κατανάλωσης Θερμότητας [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]

Η καμπύλη ωριαίου κόστους λειτουργίας εκφράζει το ωριαίο κόστος λειτουργίας F σε €/h, ως συνάρτηση της ισχύος εξόδου της μονάδας σε MW.

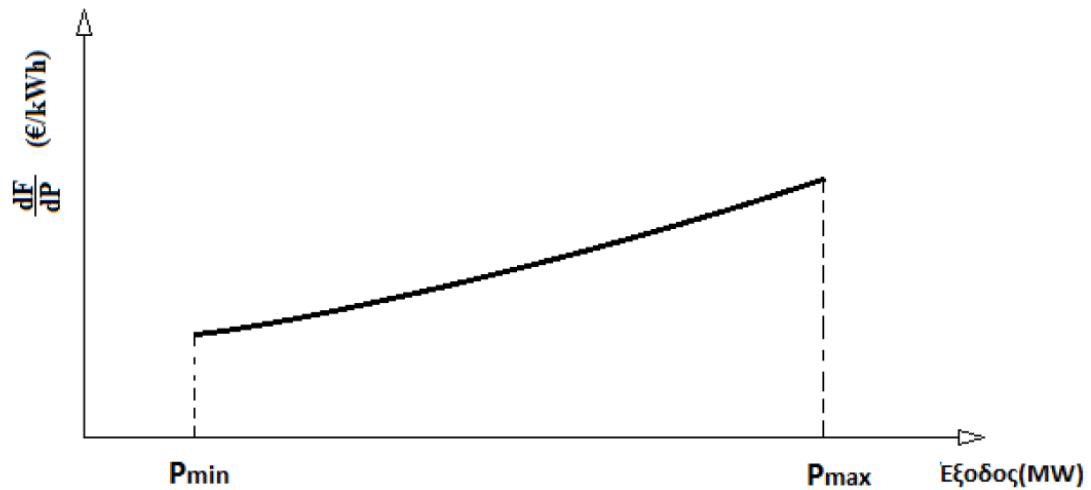
Η καμπύλη διαφορικού κόστους λειτουργίας είναι η παράγωγος του ωριαίου κόστους λειτουργίας ως προς την ισχύ εξόδου της μονάδας dP/dF σε (€/MWh) συναρτήσει της ισχύος εξόδου P σε MW. Εκφράζει την αύξηση του ωριαίου κόστους παραγωγής ΔF σε €/h, που απαιτείται για την αύξηση της ισχύος εξόδου κατά $\Delta P = 1$ MW.

Η καμπύλη του ειδικού κόστους λειτουργίας δείχνει το λόγο του ωριαίου κόστους λειτουργίας προς την ισχύ εξόδου, P/F (€/MWh), ως συνάρτηση της ισχύος εξόδου της μονάδας σε MW. Εκφράζει την τιμή παραγωγής μιας MWh σε €/MWh από τη μονάδα.

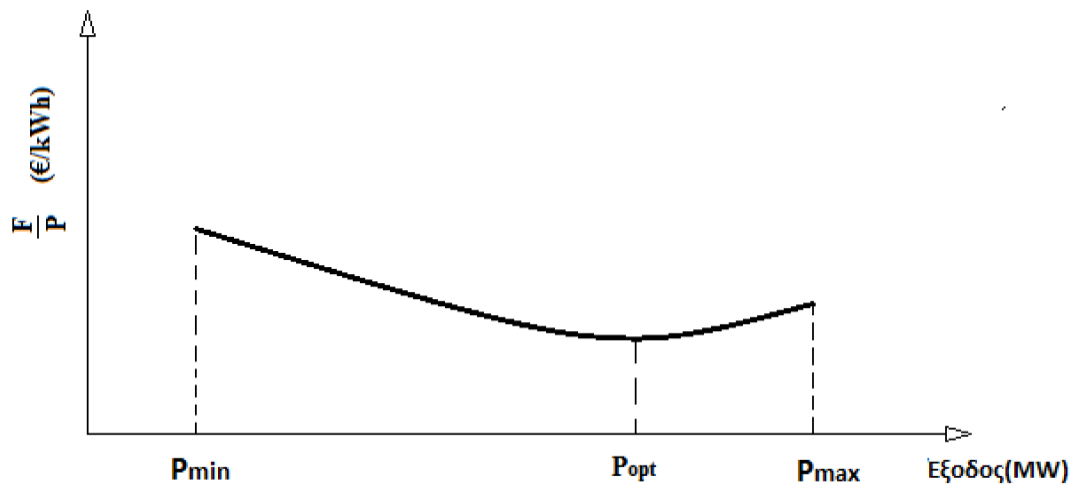
Το ειδικό κόστος λειτουργίας ονομάζεται και μέσο κόστος λειτουργίας και το διαφορικό κόστος λειτουργίας καλείται οριακό κόστος. Θεωρητικά στο σημείο της βέλτιστης λειτουργίας της μονάδας, δηλαδή στο σημείο ελαχιστοποίησης του μέσου κόστους (στη περίπτωση αυτή του ειδικού κόστους, το οποίο ελαχιστοποιείται κοντά στην ονομαστική ισχύ εξόδου P_{opt}), το οριακό (διαφορικό) κόστος ισούται με το μέσο κόστος λειτουργίας. Για τιμές της ισχύος εξόδου μικρότερες της βέλτιστης, το οριακό κόστος είναι μικρότερο από το μέσο κόστος, ενώ για τιμές της ισχύος μεγαλύτερες από τη βέλτιστη το οριακό κόστος είναι μεγαλύτερο από το μέσο.



1. Ωριαίο Κόστος Λειτουργίας



2. Διαφορικό Κόστος Λειτουργίας



3. Ειδικό Κόστος Λειτουργίας

Σχήμα 3.8 Χαρακτηριστικές Καμπύλες Κόστους Λειτουργίας [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]

3.7 Τεχνικά Χαρακτηριστικά – Κόστος Εκκίνησης και Περιορισμοί Λειτουργίας

Ο τυπικός κύκλος λειτουργίας μιας μονάδας περιλαμβάνει τις παρακάτω καταστάσεις [8. ΡΑΕ (2010)]:

- Κατάσταση λειτουργίας, όπου ορίζεται από τη χρονική στιγμή έναρξης της μονάδας έως τη χρονική στιγμή του αποσυγχρονισμού της μονάδας από το ηλεκτρικό δίκτυο.
- Κατάσταση κράτησης ή αναμονής, όπου ορίζεται από τη χρονική στιγμή του αποσυγχρονισμού της μονάδας από το ηλεκτρικό δίκτυο έως τη χρονική στιγμή της επόμενης έναρξης της μονάδας.

Η κατάσταση λειτουργίας περιλαμβάνει τις παρακάτω διακριτές περιόδους:

- Την περίοδο προετοιμασίας συγχρονισμού
- Την περίοδο παραμονής στο ενδιάμεσο φορτίο
- Την περίοδο κανονικής λειτουργίας
- Την περίοδο αποσυγχρονισμού

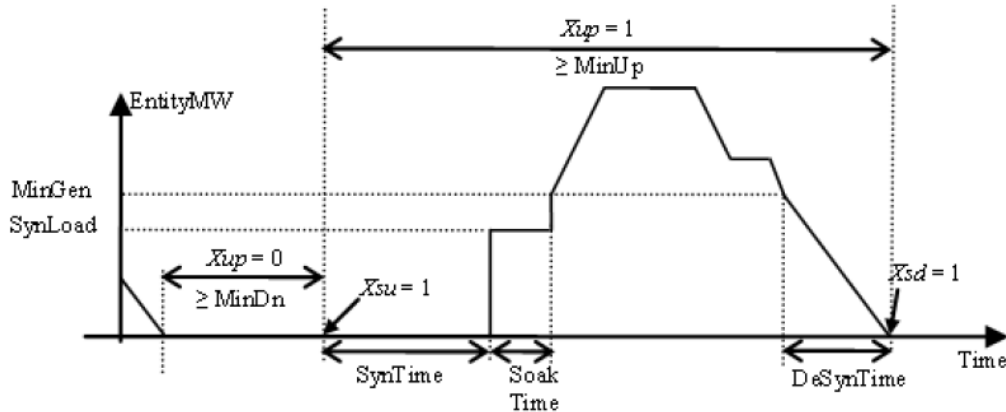
Ο χρόνος της περιόδου προετοιμασίας συγχρονισμού (SynTime) και ο χρόνος της περιόδου παραμονής στο ενδιάμεσο φορτίο (SoakTime), εξαρτώνται από την κατάσταση της μονάδας κατά τη χρονική στιγμή της έναρξης. Συγκεκριμένα, η κατάσταση της μονάδας ορίζεται ανάλογα με το χρονικό διάστημα που η μονάδα βρισκόταν σε κατάσταση κράτησης, δηλαδή σε:

- θερμή, για μικρούς χρόνους κράτησης
- ενδιάμεση και
- ψυχρή, για μεγάλους χρόνους κράτησης

Εκκίνηση	Χρόνος κράτησης μονάδας (h)	Ενδεικτικός χρόνος εκκίνησης (h)
Ψυχρή	> 48 h	10 h
Θερμή	24-40 h	6-8 h
	6-8 h	3,5
	1-2 h	2

Πίνακας 3.3 Χρόνοι εκκίνησης λιγνιτικής μονάδας 300 MW ανάλογα με το χρόνο κράτησής της.

Μία μονάδα πρέπει να παραμείνει σε κατάσταση κράτησης ή αναμονής για έναν Ελάχιστο Χρόνο Κράτησης ή αναμονής (Minimum Down Time, MinDn), και σε κατάσταση λειτουργίας για ένα Ελάχιστο Χρόνο Λειτουργίας (Minimum Up Time, MinUp).



Σχήμα 3.9 Χρόνοι κύκλου λειτουργίας μονάδας [8. PAE (2010)]

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που περιορίζουν την ταχύτητα εκκίνησης και φόρτισης θερμικών μονάδων είναι οι εξής [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]:

- I. **Η θερμική τάση που δημιουργείται σταδιακά στα μέταλλα.** Η ανάπτυξη θερμοκρασιακών μεταβολών είναι αισθητή στις επιφάνειες της θερμικής μονάδας με τις οποίες έρχεται σε επαφή ο ατμός. Αυτό συμβαίνει σε κάθε περίπτωση εκκίνησης μιας θερμικής μονάδας από ψυχρή όπως και από θερμή κατάσταση, καθώς επίσης και σε κάθε μεταβολή του φορτίου της θερμικής μονάδας. Κατά τη διάρκεια της θέρμανσης ενός τοιχώματος, όσο διατηρείται χαμηλή η θερμοκρασία της εξωτερικής επιφάνειας, ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η θερμοκρασία της θερμαινόμενης εσωτερικής επιφάνειας, τόσο το υλικό της θερμαινόμενης επιφάνειας έχει την τάση να αυξάνει τις διαστάσεις του. Η διαδικασία όμως αυτή, της διαστολής, εμποδίζεται από το ενδότερο υλικό του τοιχώματος που είναι ακόμα ψυχρότερο, έχοντας ως επακόλουθο να αναπτύσσεται μια θερμική τάση θλίψεως. Αντίστοιχα με τις συνθήκες εκκίνησης και φόρτισης της μονάδας υπάρχει πιθανότητα να παρουσιαστούν μεγάλες διαφορές στις θερμοκρασίες των κελυφών. Αυτό έχει ως άμεση επίπτωση την πρόκληση επικίνδυνων θερμικών τάσεων, οι οποίες είναι μεγαλύτερες του ορίου ελαστικότητας του υλικού, οπότε παράγεται ορισμένη μόνιμη παραμόρφωση, αλλοίωση και γήρανση.
- II. **Η διαφορική διαστολή του στροφείου και του κελύφους.** Με την ορολογία αυτή παρουσιάζεται η διαφορά μεταξύ της διαστολής του στροφείου και του κελύφους του ατμοστροβίλου. Όταν η διαστολή του στροφείου είναι μεγαλύτερη από τη διαστολή του κελύφους, αυτή θεωρείται θετική και αρνητική στην αντίθετη περίπτωση. Το στροφείο

διαστέλλεται με ταχύτερους ρυθμούς σε σχέση με το κέλυφος, κατά το χρονικό διάστημα των εκκινήσεων ενός ατμοστροβίλου από ψυχρή κατάσταση. Στην αντίθετη περίπτωση, κατά τη διάρκεια μιας εκκίνησης από θερμή κατάσταση, το στροφέιο συστέλλεται πιο γρήγορα από το κέλυφος όταν ο ατμός που εισέρχεται στο στρόβιλο έχει πιο χαμηλή θερμοκρασία από τα μέταλλα του στροβίλου. Όταν εμφανίζονται μεγάλες διαφορικές διαστολές κατά την διάρκεια της αύξησης των στροφών ή της φόρτισης, ο ρυθμός τους είναι απαραίτητο να επιβραδύνεται. Σε αντίθετη περίπτωση θα παρουσιαστούν τριβές μέσα στο στρόβιλο.

- III. Η παραμόρφωση των μετάλλων των οριζοντίων αρμών των κελυφών**
Λόγω των έντονων διαφορών των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται μεταξύ των εξωτερικών και εσωτερικών επιφανειών των μετάλλων των οριζόντιων αρμών των κελυφών, προκύπτει η αλλοίωση της μορφής τους.
- IV. Οι ταλαντώσεις του ατμοστροβίλου κατά την εκκίνησή του.** Η αύξηση της ταχύτητας περιστροφής του στροφείου, πρέπει να γίνεται με ορισμένο ρυθμό, ώστε να αποκλείονται κατά την διάρκεια της εκκίνησης οι ταλαντώσεις. Έτσι παραμένει για μικρό χρονικό διάστημα σε ορισμένες τιμές ταχύτητας (π.χ. 500 και 1000 rpm), έχοντας ως αποτέλεσμα να επιτευχθεί η ομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας στον ατμοστρόβιλο.

Βιβλιογραφία

- [1] ΑΔΜΗΕ (2014). “Χάρτης Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας”. Διαθέσιμο :
http://www.desmie.gr/fileadmin/user_upload/Files/masm/masm_2010-2014_RAE_map.pdf
- [2] ΑΔΜΗΕ (2016). “Έκθεση για την Απόδοση Λειτουργίας του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Έτος 2015) ”. Διαθέσιμο :
http://www.admie.gr/fileadmin/groups/EDLES_DLS/PERFORMANCE_REPORT2015-IPTOver1.pdf
- [3] ΔΕΗ (2012). “Φωτογραφικό Υλικό”. Διαθέσιμο :
https://www.flickr.com/photos/dei_gr/with/6505488047/
- [4] Κανέλλος, Φ. (2016). “Παρουσιάσεις Μαθήματος Ηλεκτρική Οικονομία”. Χανιά: Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης.
- [5] Μπακιρτζής, Α. (1998). “Οικονομική λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας”. Θεσσαλονίκη: Ζήτη.
- [6] Παπαϊωάννου, Γ. (2014) “Βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας θερμικών μονάδων παραγωγής με ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας και παραγόμενων ρύπων”. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- [7] Παπανικολάου, Δ. (2008). “Οικονομική Λειτουργία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας”. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.
- [8] ΡΑΕ (2010). “Εγχειρίδιο Υπολογισμού Κόστους Λειτουργίας Μονάδων”. Διαθέσιμο :
http://www.rae.gr/old/cases/C15/Manual_Cost_V1.0_RAE_2010.03.11.pdf
- [9] Breaking Energy (2015). Διαθέσιμο :
<http://breakingenergy.com/2015/03/25/power-grid-of-the-future-distributed-generation-led-by-a-civic-energy-sector/>

4. Οικονομική κατανομή φορτίου στους Θερμικούς Σταθμούς

4.1 Εισαγωγή

Ως οικονομική κατανομή φορτίου ενός συστήματος, το οποίο είναι μέρος ενός συνόλου από θερμικές μονάδες, ονομάζεται η επίτευξη της καλύτερης δυνατής κατανομής του συνολικού παραγόμενου φορτίου του συστήματος, με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας, υπολογίζοντας την κάλυψη της ζήτησης και προσφέροντας ισχύ με υψηλό επίπεδο ποιότητας και αξιοπιστίας.

Σε προηγούμενη ενότητα, έγινε αναφορά στο κόστος λειτουργίας των θερμικών μονάδων, το οποίο περιγράφεται από τη συνάρτηση ωριαίου κόστους λειτουργίας F (€/h), συναρτήσει της ισχύος εξόδου P (MW) και από τις αντίστοιχες καμπύλες του ωριαίου κόστους λειτουργίας.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας περιέχει και σε μεγάλο ποσοστό υδροηλεκτρικούς σταθμούς, εκτός των θερμικών μονάδων. Σε ένα διασυνδεδεμένο υδροθερμικό σύστημα, το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου ορίζεται ως εξής:

Σε μια δεδομένη χρονική στιγμή της λειτουργίας ενός συστήματος με N θερμικές μονάδες σε λειτουργία, είναι γνωστά [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)] :

- Η συνολική ζήτηση φορτίου, P_D
- Η συνολική παραγωγή των υδροηλεκτρικών σταθμών, P_H , από υδροθερμική συνεργασία
- Οι συνολικές ανταλλαγές ισχύος με τα γειτονικά δίκτυα, P_{INT} ($P_{INT} > 0$, για εξαγωγή ισχύος), από ανάλυση οικονομικών ανταλλαγών

Με ζητούμενο τη βέλτιστη έξοδο των θερμικών μονάδων, P_i , $i=1,2,\dots,N$, με στόχο την επίτευξη του ελάχιστου συνολικού κόστους λειτουργίας.

Καθώς το συνολικό φορτίο αλλάζει κατά τη διάρκεια της μέρας, έτσι και ο αριθμός των θερμικών μονάδων που λειτουργούν, N , μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της μέρας. Έτσι όταν το φορτίο είναι υψηλό, πληθαίνει και ο αριθμός των θερμικών σταθμών που είναι σε λειτουργία, έχοντας ως σκοπό την κάλυψη του. Εντούτοις, το πότε και ποιες θερμικές μονάδες θα λειτουργήσουν το επόμενο 24ωρο καθορίζεται ύστερα από την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων.

4.2 Η απλούστερη μορφή του προβλήματος οικονομικής κατανομής Φορτίου

Στην περίπτωση που αποδοθεί ως ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς, ως στόχο θα είχε την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας, F_T , με περιορισμό η συνολική παραγωγή των θερμικών μονάδων να ισούται με τη ζήτηση του φορτίου από τις θερμικές μονάδες, P_R . Το φορτίο που απαιτείται να καλυφθεί από τους θερμικούς σταθμούς υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο: $P_R = P_D - P_H + P_{INT}$.

Στην περίπτωση της απλούστερης μορφής του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου έχουν αμεληθεί τα όρια λειτουργίας των θερμικών μονάδων και οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς.

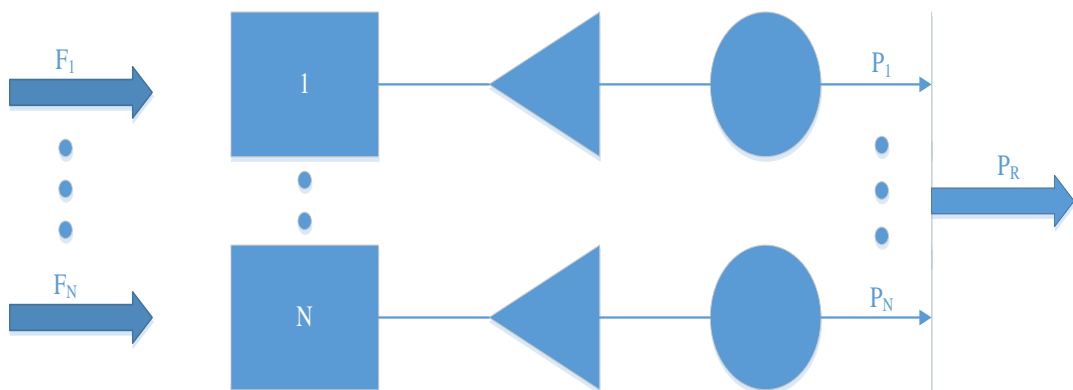
Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)] :

$$\min F_T(P_1, \dots, P_N) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_N(P_N) = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (4.1)$$

$$\text{Μ.Π. } \Phi(P_1, \dots, P_N) = P_R - \sum_{i=1}^N P_i = 0 \quad (4.2)$$

Όπου,

- $F_T(P_1, P_2, \dots, P_N)$ είναι το συνολικό κόστος, συναρτήσει των εξόδων των $i=1, \dots, N$ θερμικών μονάδων και
- $F_i(P_i)$ είναι οι συναρτήσεις ωριαίου κόστους λειτουργίας των $i=1, \dots, N$ μονάδων.



Σχήμα 4.1 Το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]

Σχηματίζεται η συνάρτηση LaGrange:

$$L(P_1, \dots, P_N, \lambda) = F_T(P_1, \dots, P_N) + \lambda \cdot \Phi(P_1, \dots, P_N) \quad (4.3)$$

$$L(P_1, \dots, P_N, \lambda) = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) + \lambda \cdot P_R - \lambda \times \sum_{i=1}^N P_i \quad (4.4)$$

Οι απαραίτητες συνθήκες βέλτιστου για τη συνάρτηση LaGrange είναι ο μηδενισμός των μερικών παραγώγων ως προς τις $N+1$ ανεξάρτητες μεταβλητές P_1, \dots, P_N και λ . Η μερική παράγωγος της $L(P_1, \dots, P_N, \lambda)$ είναι:

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \Phi(P_1, \dots, P_N) = 0 \quad (4.2)$$

Οι μερικές παράγωγοι ως προς τις εξόδους P_i των μονάδων είναι:

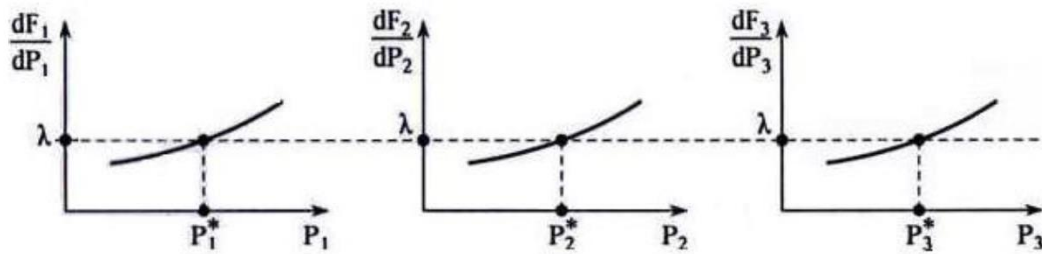
$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda = 0 \Leftrightarrow \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \lambda \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (4.5)$$

Επομένως, είναι απαραίτητο να λειτουργούν όλες οι θερμικές μονάδες του συστήματος με το ίδιο διαφορικό κόστος λειτουργίας (€/MWh), το οποίο ισούται με τον πολλαπλασιαστή LaGrange. Ο πολλαπλασιαστής LaGrange, λ , δίνει την αύξηση του βέλτιστου ωριαίου κόστους λειτουργίας του συστήματος, σε €/h, όταν αυξηθεί το φορτίο του συστήματος κατά 1 MW.

Οι εξισώσεις (4.5) ονομάζονται εξισώσεις συνεργασίας (coordination equations), όπου μαζί με την εξίσωση (4.2) διατήρησης ισχύος (power balance equation) χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου.

4.3 Γραφική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας

Στις καμπύλες του διαφορικού κόστους λειτουργίας, όπου το διαφορικό κόστος δεν είναι γραμμική συνάρτηση της εξόδου, επιλέγεται αρχικά μια τυχαία τιμή για το κοινό διαφορικό κόστος λειτουργίας όλων των μονάδων, λ . Από την τομή των καμπυλών διαφορικού κόστους λειτουργίας με την οριζόντια γραμμή που περνά από την τιμή λ υπολογίζονται οι έξοδοι των μονάδων P_1, P_2, \dots, P_N . [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]



Σχήμα 4.2 Σχηματική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]

Αν οι έξοδοι των μονάδων ικανοποιούν την εξίσωση διατήρησης ισχύος μέσα στα πλαίσια κάποιας ανοχής ε (ε είναι ένας μικρός θετικός αριθμός, π.χ. $\varepsilon=0,1$ MW) δηλαδή αν $|P_R - \sum_{i=1}^N P_i| < \varepsilon$, τότε έχει λυθεί το πρόβλημα οικονομικής κατανομής φορτίου αφού:

- όλες οι μονάδες λειτουργούν με το ίδιο διαφορικό κόστος και
- ικανοποιείται ο περιορισμός διατήρησης ισχύος στο δίκτυο.

Αν $|P_R - \sum_{i=1}^N P_i| > \varepsilon$, υπάρχουν δυο περιπτώσεις:

- $\sum_{i=1}^N P_i > P_R$, δηλαδή η παραγόμενη ισχύς είναι μεγαλύτερη από το φορτίο. Άρα, είναι αναγκαίο να μειωθεί η παραγωγή για να ικανοποιηθεί η εξίσωση διατήρησης ισχύος. Λύση: νέο λ μικρότερο από το αρχικό (πχ κατά 10%).
- $\sum_{i=1}^N P_i < P_R$, δηλαδή η συνολική παραγωγή από τις μονάδες του δικτύου είναι μικρότερη από το ζητούμενο φορτίο, επομένως είναι απαραίτητο να αυξηθεί η παραγωγή από τις μονάδες παραγωγής ώστε να ικανοποιηθεί η εξίσωση διατήρησης ισχύος. Λύση: νέο λ μεγαλύτερο από το αρχικό.

Με τον τρόπο αυτό, μετά από ορισμένες επαναλήψεις, επιτυγχάνεται η γραφική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας.

4.4 Οικονομική κατανομή φορτίου και λειτουργικά όρια μονάδων

Εάν προστεθούν και τα λειτουργικά όρια των μονάδων το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου διατυπώνεται μαθηματικά [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)] :

$$\min F_T(P_1, \dots, P_N) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_N(P_N) = \sum_{i=1}^N F_i(P_i) \quad (4.6)$$

$$\text{Μ.Π. } \Phi(P_1, \dots, P_N) = P_R - \sum_{i=1}^N P_i = 0 \quad (4.7)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (4.8)$$

Για την επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης χρησιμοποιούνται οι συνθήκες KUHN – TUCKER. Εισάγονται τα μεγέθη:

$$\omega_i^+ = P_i - P_{i,\max} \leq 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (4.9)$$

$$\omega_i^- = -P_i + P_{i,\max} \leq 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (4.10)$$

Η συνάρτηση LaGrange γράφεται:

$$\begin{aligned} L(P, \lambda, \mu^+, \mu^-) = & \sum_{i=1}^N F_i(P_i) + \lambda \cdot \Phi(P_1, \dots, P_N) \\ & + \sum_{i=1}^N \mu_i^+ \cdot (P_i - P_{i,\max}) \\ & + \sum_{i=1}^N \mu_i^- \cdot (-P_i + P_{i,\min}) \end{aligned} \quad (4.11)$$

Οι συνθήκες Kuhn – Tucker είναι:

$$\frac{\partial L}{\partial P_i} = 0 \Rightarrow \frac{dF_i(P_i)}{dP_i} - \lambda + \mu_i^+ - \mu_i^- = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (4.12)$$

$$P_R - \sum_{i=1}^N P_i = 0 \quad (4.13)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad i = 1, \dots, N \quad (4.14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \mu_i^+ \cdot (P_i - P_{i,\min}) = 0 \\ \mu_i^- \cdot (-P_i + P_{i,\min}) = 0 \\ \mu_i^+, \mu_i^- \geq 0 \end{array} \right\} \quad i = 1, \dots, N \quad (4.15)$$

Η εξίσωση (4.12) δίνει:

$$\frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \lambda - \mu_i^+ + \mu_i^- \quad i = 1, \dots, N \quad (4.16)$$

Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις:

$$1. \quad P_{i,min} < P_i < P_{i,max}, \text{ από τη 4}^{\eta} \text{ συνθήκη K-T, } \mu_i^+ = \mu_i^- = 0 \text{ και η 1}^{\eta} \text{ συνθήκη K-T δίνει: } \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda \quad (4.17)$$

$$2. \quad P_i = P_{i,max}, \text{ από τη 4}^{\eta} \text{ συνθήκη K-T, } \mu_i^+ \geq 0, \mu_i^- = 0 \text{ και η 1}^{\eta} \text{ συνθήκη K-T δίνει: } \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda - \mu_i^+ \leq \lambda \quad (4.18)$$

$$3. \quad P_i = P_{i,min}, \text{ από τη 4}^{\eta} \text{ συνθήκη K-T, } \mu_i^+ = 0, \mu_i^- \geq 0 \text{ και η 1}^{\eta} \text{ συνθήκη K-T δίνει: } \frac{dF_i}{dP_i} = \lambda + \mu_i^- \geq \lambda \quad (4.19)$$

Παρακολουθώντας τις σχέσεις (4.16)-(4.19) υπάρχει η δυνατότητα να οριστεί ένας μόνο πολλαπλασιαστής LaGrange, $\mu_i = \mu_i^+ - \mu_i^-$, για το διπλό περιορισμό λειτουργικών ορίων της μονάδας i , $P_{i,min} < P_i < P_{i,max}$.

Για τον πολλαπλασιαστή αυτόν θα ισχύει

$$\mu_i = 0 \quad \text{για} \quad P_{i,min} < P_i < P_{i,max}$$

$$\mu_i \geq 0 \quad \text{για} \quad P_i = P_{i,max} \quad (\mu_i = \mu_i^+)$$

$$\mu_i \leq 0 \quad \text{για} \quad P_i = P_{i,min} \quad (\mu_i = \mu_i^-)$$

Με την εισαγωγή του νέου αυτού πολλαπλασιαστή η (4.16) γίνεται:

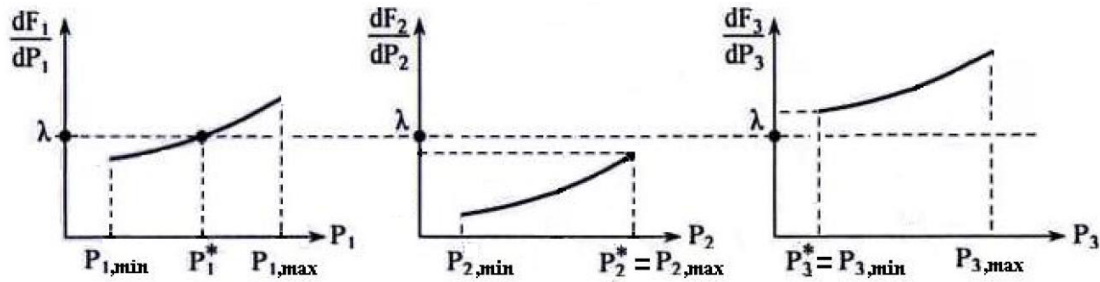
$$\frac{dF_i(P_i)}{dP_i} = \lambda - \mu_i \quad i = 1, \dots, N$$

Και δίνει τη σχέση του διαφορικού κόστους της μονάδας i με το λ του συστήματος που εκφράζεται από τις σχέσεις (4.17)-(4.19).

Στη συνέχεια δίνεται μια γραφική αιτιολόγηση των συνθηκών βέλτιστου, (4.17) – (4.19), με τη βοήθεια του σχήματος 4.3. Στο σχήμα 4.3 έχει υπολογισθεί η βέλτιστη τιμή του λ , λ^* , που ικανοποιεί τις συνθήκες βέλτιστου (4.13), (4.14), (4.17) – (4.19). Ικανοποιείται δηλαδή η εξίσωση διατήρησης ισχύος (4.13):

$$P_1^* + P_2^* + P_3^* = P_1^* + P_{2,max} + P_{3,min}$$

Επίσης ικανοποιούνται τα λειτουργικά όρια των μονάδων (4.14) και οι σχέσεις (4.17) – (4.19).



Σχήμα 4.3 Σχηματική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας με λειτουργικούς περιορισμούς [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]

Η πρώτη μονάδα, της οποίας το σημείο λειτουργίας βρίσκεται ανάμεσα στο κάτω και πάνω όριο λειτουργίας ($P_{1,min} < P_1^* < P_{1,max}$) λειτουργεί με διαφορεικό κόστος ίσο με λ ($\frac{dF_1}{dP_1} = \lambda$).

Η δεύτερη μονάδα είναι οικονομικότερη σε σύγκριση με τις άλλες δύο. Η καμπύλη διαφορικού κόστους λειτουργίας της δεύτερης μονάδας τοποθετείται ολόκληρη κάτω από την οριζόντια γραμμή που περνά από το λ . Γι' αυτό το λόγο είναι πιο ωφέλιμο να λειτουργεί στο ανώτατο όριο λειτουργίας της, $P_2^* = P_{2,max}$. Στο σημείο αυτό το διαφορικό κόστος λειτουργίας της μονάδας είναι μικρότερο του λ , ($\frac{dF_2}{dP_2} < \lambda$).

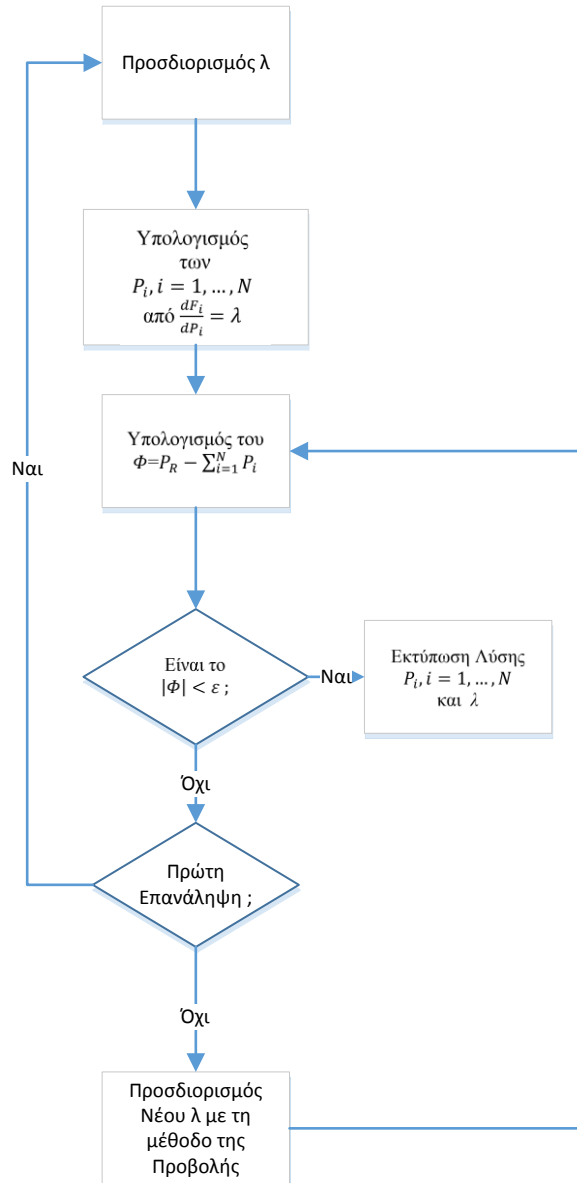
Ενώ αντίθετα, η τρίτη μονάδα είναι πιο δαπανηρή σε σύγκριση με τις άλλες δύο, αφού ολόκληρη η καμπύλη διαφορικού κόστους λειτουργίας βρίσκεται πάνω από την οριζόντια γραμμή που περνά από το λ . Επομένως είναι πιο ωφέλιμο να λειτουργεί στο κατώτατο όριο λειτουργίας της, $P_3^* = P_{3,min}$. Στο σημείο αυτό το διαφορικό κόστος λειτουργίας της μονάδας είναι μεγαλύτερο του λ , ($\frac{dF_3}{dP_3} > \lambda$).

Οπότε, η γραφική επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου με ικανοποίηση των λειτουργικών ορίων των μονάδων ακολουθεί τον τρόπο τον οποίο αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οστόσο :

- Όταν η τιμή του λ που επιλέχθηκε είναι τέτοια ώστε ολόκληρη η καμπύλη διαφορικού κόστους μιας μονάδας (για τιμές ισχύος εξόδου μεταξύ P_{min} και P_{max}) να βρίσκεται κάτω από την οριζόντια γραμμή που περνά από το λ , τότε η μονάδα αυτή θα λειτουργήσει στο μέγιστο της εξόδου της, P_{max} .
- Ενώ εάν η καμπύλη διαφορικού κόστους μιας μονάδας βρίσκεται ολόκληρη πάνω από την οριζόντια γραμμή που περνά από το λ , τότε η μονάδα αυτή θα λειτουργήσει στο ελάχιστο της εξόδου της, P_{min} .

4.5 Αλγόριθμος επαναλήψεων λάμδα

Η επίλυση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου δύναται να επιτευχθεί μέσω του αλγόριθμου επαναλήψεων λάμδα, με τη βοήθεια Η/Υ. [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]



Σχήμα 4.4 Διάγραμμα ροής αλγόριθμου επαναλήψεων λ. [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)]

Με δεδομένο το λ ο υπολογισμός των P_i γίνεται από την επίλυση της εξίσωσης (4.5), $\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda$. Με στόχο την ικανοποίηση των λειτουργικών ορίων των μονάδων, αν από την επίλυση της εξίσωσης (4.5) προκύψει $P_i > P_{i,max}$ ή $P_i < P_{i,min}$, τότε τίθεται $P_i = P_{i,max}$ ή $P_i = P_{i,min}$ αντίστοιχα.

Οι επαναλήψεις σταματούν όταν η εξίσωση διατήρησης ισχύος, $\Phi(P_1, \dots, P_N) = P_R - \sum_{i=1}^N P_i$ ικανοποιείται μέσα στα όρια κάποιας ανοχής ε (π.χ. $\varepsilon = 0,1$ MW). Όπου αν [5. Μπακιρτζής, Α. (1998)] :

- $|\Phi| < \varepsilon$, τότε εμφανίζονται τα αποτελέσματα που είναι οι ισχύς εξόδου όλων των μονάδων όπως επίσης και ο πολλαπλασιαστής LaGrange, λ , το οποίο αποτελεί το κοινό διαφορικό κόστος λειτουργίας (€/MWh) όλων των μονάδων που λειτουργούν εντός των ορίων λειτουργίας τους. Το λ εκφράζει το κόστος παραγωγής μιας πρόσθετης MWh από το σύστημα.
- $|\Phi| \geq \varepsilon$, τότε επιλέγεται νέα τιμή για το λ και οι επαναλήψεις συνεχίζονται έως ότου συγκλίνει ο αλγόριθμος ή έως την εκτέλεση ενός μεγάλου αριθμού επαναλήψεων χωρίς να υπάρξει σύγκλιση. Στην πρώτη επανάληψη, αν $P_R > \sum_{i=1}^N P_i$, αυξάνουμε το λ , πχ κατά 10%, ενώ αν $P_R < \sum_{i=1}^N P_i$, μειώνουμε το λ αντίστοιχα. Έπειτα, στις επόμενες επαναλήψεις, χρησιμοποιείται η μέθοδος των προβολών που προέρχεται με προσέγγιση της παραγώγου από την επαναληπτική μέθοδο επίλυσης μη γραμμικών εξισώσεων Newton – Raphson:

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k - \frac{\Phi(\lambda^k)}{\Phi'(\lambda^k)} = \lambda^k - \frac{\Phi(\lambda^k)}{\frac{\Phi(\lambda^k) - \Phi(\lambda^{k-1})}{\lambda^k - \lambda^{k-1}}}$$

$$\Leftrightarrow \lambda^{k+1} = \lambda^k - \frac{\lambda^k - \lambda^{k-1}}{\Phi(\lambda^k) - \Phi(\lambda^{k-1})} \cdot \Phi(\lambda^k) \quad k = 1, 2, \dots$$

Ακόμα, για τον προσδιορισμό της τιμής του λ το οποίο θα ικανοποιεί τις εξισώσεις συνεργασίας και τις εξισώσεις διατήρησης ισχύος, μπορεί να εφαρμοστεί και η μέθοδος της δυαδικής αναζήτησης αρχίζοντας από τις αρχικές τιμές

$$\lambda_{min} = \min \left\{ \frac{dF_i(P_{i,min})}{dP_i} \right\} \text{ και } \lambda_{max} = \max \left\{ \frac{dF_i(P_{i,max})}{dP_i} \right\}$$

Εφόσον ισχύει $\sum_i P_{i,min} \leq P_R \leq \sum_i P_{i,max}$ προκύπτει

$$\Phi(\lambda_{min}) \geq 0 \text{ και } \Phi(\lambda_{max}) \leq 0$$

Η βέλτιστη τιμή του λ θα βρίσκεται στο διάστημα $(\lambda_{min}, \lambda_{max})$ και μπορεί να υπολογιστεί με διαδοχικές διχοτομήσεις του διαστήματος μέχρι να μηδενιστεί η συνάρτηση $\Phi(\lambda)$.

Βιβλιογραφία

- [1] Μπακιρτζής, Α. (1998). “Οικονομική λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας”. Θεσσαλονίκη: Ζήτη.
- [2] Παπαϊωάννου, Γ. (2014) “Βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας θερμικών μονάδων παραγωγής με ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας και παραγόμενων ρύπων”. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- [3] Παπανικολάου, Δ. (2008). “Οικονομική Λειτουργία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας”. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

5. Βέλτιστη ένταξη θερμικών σταθμών παραγωγής (Unit Commitment)

5.1 Περιγραφή του προβλήματος

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλεται εντός ευρέων ορίων μέσα στον ημερήσιο κύκλο. Για το λόγο αυτό καθίσταται απαραίτητος ένας αλγόριθμος βέλτιστης ένταξης μονάδων που θα προγραμματίζει την σύνδεση ή αποσύνδεση των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο για έναν χρονικό ορίζοντα ώστε να επιτευχθεί ο πιο οικονομικά αποδοτικός συνδυασμός λαμβάνοντας υπ' όψη ταυτόχρονα περιορισμούς στη λειτουργία των μονάδων.

Για την επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης ένταξης μονάδων (Unit Commitment), στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με θερμοηλεκτρικές μονάδες, τα βασικά δεδομένα εισόδου είναι:

- το φορτίο του συστήματος για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, T ωρών,
- τα τεχνικά χαρακτηριστικά των N_g διαθέσιμων μονάδων παραγωγής και
- τυχόν λειτουργικοί περιορισμοί.

Καθοριστικό ρόλο ώστε να γίνει σωστός προγραμματισμός έχει η πρόβλεψη του φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας. Εντούτοις χρειάζεται προσοχή, καθώς σφάλματα στην πρόβλεψη φορτίου είναι δυνατόν να έχουν ως επακόλουθο τη δημιουργία ενός μη οικονομικά βέλτιστου προγράμματος.

5.2 Περιορισμοί του προβλήματος

Κατά την επίλυση του προβλήματος της ένταξης μονάδων είναι απαραίτητο να ικανοποιούνται ορισμένοι σημαντικοί περιορισμοί, όπως [1.Δαμούσης,Ι. (2003)] :

- Ισοζύγιο ισχύος του συστήματος
- Στρεφόμενη και ψυχρή εφεδρεία συστήματος
- Αρχικό κόστος εκκίνησης λειτουργίας των μονάδων (start up cost)
- Κόστος κράτησης της μονάδας (shut – down cost)
- Λειτουργικά όρια ισχύος των μονάδων
- Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της κάθε μονάδας (Minimum Up Time)
- Ελάχιστος χρόνος κράτησης της κάθε μονάδας (Minimum Down Time)
- Περιορισμοί κατάστασης μονάδων (υποχρεωτική ένταξη, σταθερή ισχύς εξόδου, διαθεσιμότητα μονάδων)
- Περιορισμοί απόκρισης μονάδων (unit rare limits, start-up ramps, shut-down ramps)
- Περιβαλλοντικοί περιορισμοί
- Μίξη καυσίμων για σταθεροποίηση καύσης

- Χρήση διπλών καυσίμων
- Διαθεσιμότητα καυσίμου μονάδας ή εργοστασίου
- Περιορισμοί προσωπικού

Πιο αναλυτικά [3. Μπακιρτζής, Α. (1998)],

- *Η στρεφόμενη εφεδρεία* (Spinning Reserve) του συστήματος σε μια χρονική στιγμή υπολογίζεται αν αφαιρεθεί από τη συνολική διαθέσιμη ισχύ των συγχρονισμένων μονάδων στο δίκτυο, το φορτίο που ικανοποιείται τη δεδομένη στιγμή. Απαιτείται πάντα να υπάρχει αρκετή στρεφόμενη εφεδρεία (πχ 10% πάνω από τη προβλεπόμενη αιχμή φορτίου) στο σύστημα, διότι στη περίπτωση όπου υπάρξει απώλεια μιας μονάδας να μην έχει ως αποτέλεσμα την πρόκληση μεγάλης πτώσης στη συχνότητα και οι υπόλοιπες μονάδες να καταφέρουν να αναπληρώσουν το έλλειμμα παραγωγής.

Εκτός της στρεφόμενης εφεδρείας, υπάρχει και η *ψυχρή εφεδρεία*, η οποία περιλαμβάνει τις γρήγορες μονάδες (ντίζελ, αεριοστρόβιλους, υδροηλεκτρικές και αντλητικές) που μπορούν να συγχρονιστούν και να αποδώσουν πλήρη ισχύ σε σύντομο χρονικό διάστημα.

- *Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας* (Minimum Up Time): Ο χρόνος που χρειάζεται να παρέλθει έπειτα από την ένταξη μιας μονάδας στο σύστημα, ώστε να είναι δυνατή η έξοδος της από αυτό.

- *Ελάχιστος χρόνος κράτησης* (Minimum Down Time): Ο χρόνος που χρειάζεται να παρέλθει έπειτα από την αποσύνδεση μιας μονάδας, ώστε να ενταχθεί και πάλι στο σύστημα

- *Κόστος εκκίνησης* (start up cost) καλείται η καύσιμη ύλη που δαπανάται για την εκκίνηση μιας θερμικής μονάδας έως ότου έχει τη δυνατότητα συγχρονισμού με το σύστημα. Η ανώτατη τιμή του ονομάζεται κόστος *ψυχρής εκκίνησης*.

- *Κόστος σβέσης ή κράτησης* της μονάδας (shut – down cost) καλείται η καύσιμη ύλη που δαπανάται κατά τη διαδικασία κράτησης ή σβέσης μιας θερμικής μονάδας για την ομαλή μείωση της εξόδου της και την αποφυγή απότομων θερμοκρασιακών αλλαγών.

- *Περιορισμοί προσωπικού* (Crew Constraints) όταν σε ένα σταθμό υπάρχουν περισσότερες από μια μονάδες και δεν είναι εφικτό να συνδεθούν συγχρόνως στο δίκτυο λόγω περιορισμένου προσωπικού.

- *Υποχρεωτική λειτουργία μονάδων* (Must run) όταν για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα επιβάλλεται η χρήση κάποιων μονάδων χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν το κόστος, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του συστήματος. Δηλαδή όταν υπάρχει περιορισμένη ικανότητα του συστήματος μεταφοράς, ανάγκη στήριξης της τάσης του δικτύου, ανάγκη χρήσης του ατμού της μονάδας για τηλεθέρμανση κτλ.

- *Περιορισμοί καυσίμων*, όταν δημιουργούνται ελλείψεις στον ρυθμό τροφοδοσίας και γενικότερα στη διαθεσιμότητα του απαιτούμενου μεγέθους της καύσιμης ύλης ή όταν υπάρχει συμφωνία ελάχιστης παραλαβής (take or pay), όπου ο σταθμός είναι υποχρεωμένος να καταναλώσει τουλάχιστον μια μικρή ποσότητα καυσίμου, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο περιορισμούς στο προγραμματισμό.

- Περιβαλλοντικοί περιορισμοί, όπου ενδέχεται η παραγωγή μιας θερμικής μονάδας να περιοριστεί ανάλογα με το τύπο καυσίμου που χρησιμοποιεί. Αυτό συμβαίνει λόγω των εκπεμπόμενων ρύπων, οι οποίοι παράγονται κατά τη διάρκεια της καύσης, συναρτήσει της σχετικής νομοθεσίας που υπάρχει.

5.3 Μαθηματική μοντελοποίηση λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς

Έχοντας ως βάση τους ανωτέρω περιορισμούς και στόχους του προβλήματος ακολουθεί η μαθηματική μοντελοποίηση του. Το παρακάτω μαθηματικό μοντέλο βελτιστοποίησης είναι αποτέλεσμα μιας κατάλληλης συμμόρφωσης του αντίστοιχου μοντέλου βέλτιστης ένταξης μονάδων ηλεκτροπαραγωγής σε πλοία με ηλεκτροπρόωση. [2. Κανέλλος,Φ. 2014]

$$\min \quad TC = \sum_{j=1}^T \sum_{i=1}^{N_g} (St_{ij} \cdot Fuel_Cost_i \cdot FC_i(P_{ij}) \cdot \Delta T_j + SC_{ij})$$

$$\text{με} \quad i = 1, \dots, N_g, \quad j = 1, \dots, T$$

μ.π.

Ισοζύγιο ισχύος

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{ij} = L_j, \quad \forall j$$

Τεχνικό μέγιστο και ελάχιστο παραγωγής θερμικών μονάδων

$$P_{i,min} < P_{ij} < P_{i,max}, \quad \forall i, j$$

Ρυθμός ανάληψης φορτίου

$$\frac{|P_{i,j} - P_{j-1}|}{\Delta T_j} \leq Rc_{i,max}, \quad \forall i, j$$

Όριο εκπομπής ρύπων CO₂

$$\sum_{i=1}^{N_g} c_i \cdot P_{ij} \cdot FC_i(P_{ij}) \cdot \Delta T_j \leq GHG_{limit}, \quad \forall j$$

Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας θερμικής μονάδας

$$t_{OFF,i} - t_{ON,i} \geq T_{ON_min,i}, \quad \forall i$$

Ελάχιστος χρόνος κράτησης θερμικής μονάδας

$$t_{ON,i} - t_{OFF,i} \geq T_{OFF_min,i} \quad , \quad \forall i$$

Εφεδρεία για την αποφυγή blackout

$$\sum_{i=1}^{N_g} St_{ij} \cdot P_{i,max} - L_j \geq \max\{P_{i,max}\} \quad , \quad \forall j$$

Όπου,

c συντελεστής μετατροπής καυσίμου σε εκπομπές CO₂ (grCO₂/grFuel)

$FC_i(P_{ij})$ κατανάλωση καυσίμου της μονάδας i στο χρονικό διάστημα j όταν παράγει ισχύ P_{ij} .

$Fuel_Cost_i$ το κόστος καυσίμου της μονάδας i ανά μονάδα μέτρησης του (€/kgFuel).

$i = 1, \dots, N_g$ δείκτης για τις θερμικές μονάδες

$j = 1, \dots, T$ δείκτης για τα χρονικά διαστήματα

L_j ηλεκτρικό φορτίο κατά την j ώρα

min, max δείκτης δήλωσης ελαχίστου και μεγίστου

N αριθμός καταστάσεων στο πλέγμα του ΔΠ

N_g αριθμός θερμικών μονάδων

P_{ij} παραγωγή (MW) της μονάδας i στο χρονικό διάστημα j .

PC_{ij} κόστος παραγωγής της i κατάστασης κατά τη j ώρα παραγωγής

$Rc_{i,max}$ Μέγιστος ρυθμός αλλαγής φορτίου μονάδας i

$SC_{i \rightarrow on}$ κόστος εκκίνησης(€) της μονάδας i

$SC_{ij} = \{SC_{i \rightarrow on}, 0\}$ κόστος εκκίνησης(€) της μονάδας i στο χρονικό διάστημα j (0 αν η μονάδα δεν εκκινεί).

SFC Ειδική κατανάλωση καυσίμου (kgFuel/MWh) $SFC_i(P_{ij}) = \frac{FC_i(P_{ij})}{P_{ij}}$

St_{ij} δείκτης λειτουργίας i ΘΜ κατά τη j ώρα παραγωγής

	$(St_{ij} = 1, \Theta M \text{ παράγει}, St_{ij} = 0 \Theta M \text{ δεν παράγει}).$
T	χρονική περίοδος προγραμματισμού
TC	συνολικό κόστος λειτουργίας του συστήματος.
$t_{\rightarrow OFF,i}, t_{\rightarrow ON,i}$	Χρονικά σημεία σβέσης, έναυσης της i ΘM .
$T_{ON_min,i}, T_{OFF_min,i}$	Ελάχιστος χρόνος λειτουργίας και κράτησης i ΘM
ΔT_j	το j υποδιάστημα της χρονικής περιόδου προγραμματισμού

Βιβλιογραφία

- [1] Δαμούσης,Ι. (2003). “Ανάπτυξη Γενετικών Αλγορίθμων και Εφαρμογή τους σε Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας”. Θεσσαλονίκη: ΑΠΘ
- [2] Κανέλλος, Φ. (2014, Ιανουάριος). “Optimal Power Management with GHG Emissions Limitation in All Electric Ship Power Systems comprising Energy Storage Systems”. IEEE Trans. on Power Systems vol.29 issue 1, σσ. 330-339.
- [3] Μπακιρτζής, Α. (1998). “Οικονομική λειτουργία συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας”. Θεσσαλονίκη: Ζήτη.
- [4] Παπαϊωάννου,Γ. (2014) “Βέλτιστος Προγραμματισμός Λειτουργίας Θερμικών Μονάδων Παραγωγής με Ελαχιστοποίηση Κόστους Λειτουργίας και Παραγόμενων Ρύπων”. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- [5] Παπανικολάου, Δ. (2008). “Οικονομική Λειτουργία Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας”. Πάτρα: Πανεπιστήμιο Πατρών.

6. Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων

6.1 Εισαγωγή

Η τεχνική Σμήνους Σωματιδίων επινοήθηκε από τον Russell Eberhart και τον James Kennedy το 1995 και αρχικά προοριζόταν ως εργαλείο μελέτης κοινωνικής συμπεριφοράς, ωστόσο μετεξελίχτηκε σε μέθοδο βελτιστοποίησης, μιμούμενο τη συμπεριφορά ενός σμήνους ζώων είτε εντόμων κατά την αναζήτηση τροφής. Εάν αποκωδικοποιηθεί ένα σύνολο από επιμέρους δράσεις (όπως π.χ. η αποφυγή της σύγκρουσης μεταξύ τους αλλά παράλληλα η μη απομάκρυνσή τους από το σμήνος) και αποδοθεί σε άτομα μιας πληθυσμιακής στοχαστικής μεθόδου, τότε οδηγούμαστε στη ΒΣΣ.



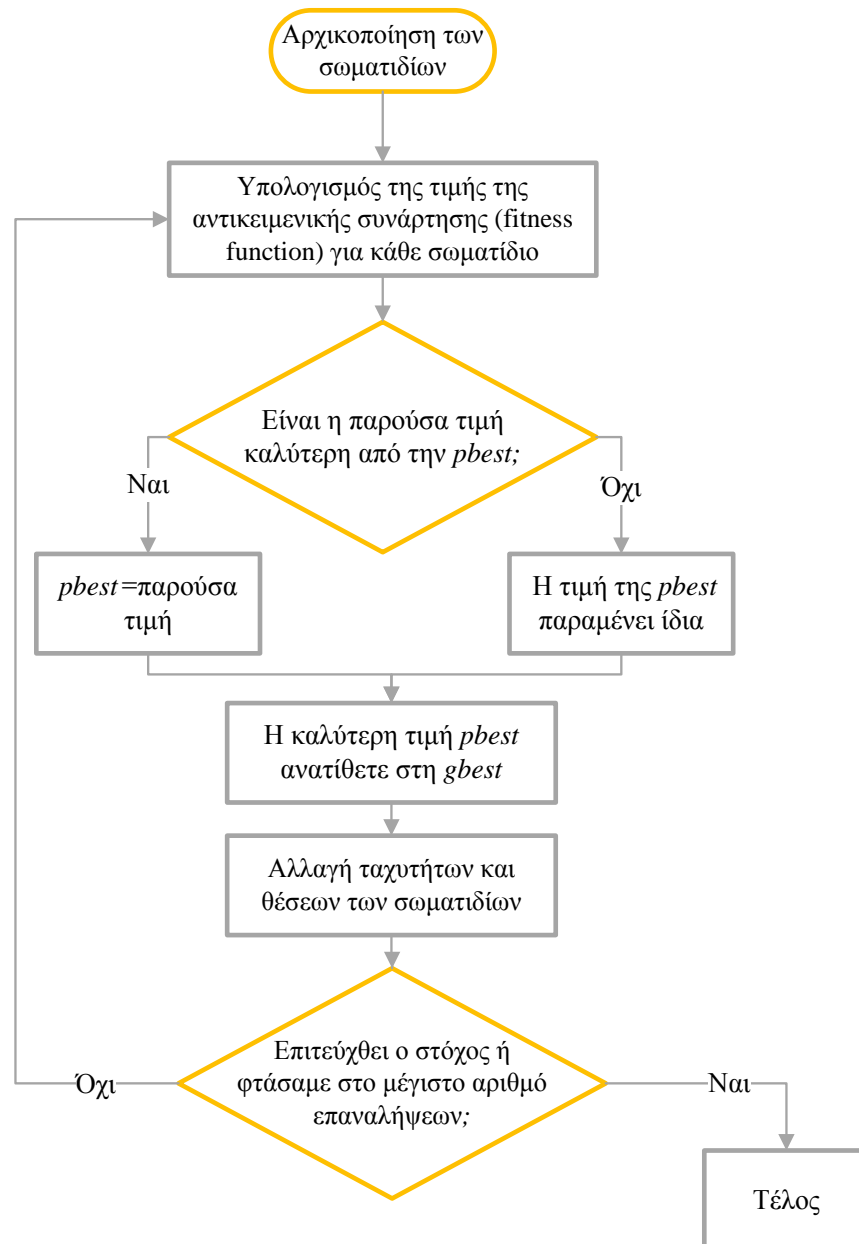
Σχήμα 6.1 Σμήνη ζώων κατά την αναζήτηση τροφής

Η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO) είναι ένας πολυδιάστατος στοχαστικός αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται σε ένα σύνολο σωματιδίων, όπου αναζητεί ανάμεσα από ένα πλήθος δυνατών λύσεων τη βέλτιστη λύση του προβλήματος. Κάθε σωματίδιο αποτελεί και μια πιθανή λύση, ενώ ως σμήνος (swarm) ονομάζονται όλες οι δυνατές λύσεις σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου.

Στον αλγόριθμο ΒΣΣ δεν απαιτείται η προσέγγιση των παραγώγων της συνάρτησης καταλληλότητας (fitness function). Συνήθως ο αρχικός αριθμός των σωματιδίων δημιουργείται μέσω μιας γεννήτριας ψευδοτυχαίων αριθμών έχοντας ως στόχο να υπάρξει ομοιόμορφη κατανομή των σωματιδίων στο χώρο έρευνας, ο οποίος έχει καθοριστεί από τον χρήστη. Έπειτα τα σωματίδια κινούνται εντός του ν-διάστατου χώρου λύσεων, καθώς ακολουθούν ντετερμινιστικούς και στοχαστικούς κανόνες όπου αλλάζουν τις θέσεις και τις ταχύτητές τους. Οι θέσεις αυτές περνούν από αξιολόγηση μέσω της ορισμένης αντικειμενικής συνάρτησης. Κάθε ένα σωματίδιο γνωρίζει τη βέλτιστη θέση που έχει βρεθεί το ίδιο μέχρι εκείνη την ώρα, η οποία καλείται τοπικό βέλτιστο (local best), καθώς και την ολική βέλτιστη θέση που έχει βρεθεί είτε από το

ίδιο είτε από κάποιο άλλο σωματίδιο του σμήνους έως εκείνη τη στιγμή, η οποία καλείται ολικό βέλτιστο (global best).

Όταν το σμήνους καλείται ως γειτονία, τότε χρησιμοποιείται η ολική (global) έκδοση του αλγορίθμου. Σαν αποτέλεσμα, τα σωματίδια του σμήνους έλκονται στοχαστικά κοντά στις προηγούμενες τους βέλτιστες θέσεις καθώς και στις προηγούμενες βέλτιστες θέσεις των γειτόνων τους.



Σχήμα 6.2 Διάγραμμα ροής Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

6.2 Εξισώσεις ενημέρωσης θέσης και ταχύτητας

Έστω ο αριθμός $k \in \mathbb{N}$, ο οποίος εκφράζει τον αριθμό των γενιών, η μεταβλητή $n_p \in \mathbb{N}$ όπου ορίζεται ο αριθμός των σωματιδίων σε κάθε γενιά, η $x_i(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$ η οποία εκφράζει το $i^{\text{οστό}}$ σωματίδιο της $k^{\text{ιστής}}$ γενιάς και η $u_i(k) \in \mathbb{R}^{n_c}$ όπου εκφράζει την ταχύτητα των σωματιδίων. Ακόμα, οι μεταβλητές $c_1, c_2 \in \mathbb{R}_+$ εκπροσωπούν την ατομικότητα και την κοινωνικότητα των σωματιδίων, ενώ οι $p_1(k), p_2(k) \in U(0, 1)$ είναι ομοιόμορφες κατανομές τυχαίων αριθμών μεταξύ 0 και 1. Με βάση την αρχική έκδοση του αλγορίθμου PSO [2. J. Kennedy and R. Eberhart 1942–1948] οι εξισώσεις ενημέρωσης της θέσης και ταχύτητας των σωματιδίων, για κάθε $i \in \{1, \dots, n_p\}$ και για όλα τα $k \in \mathbb{N}$, ορίζονται ως εξής [1. Παπαδόπουλος Κ. 2011] :

Ενημέρωση ταχύτητας

$$u_i(k+1) = u_i(k) + c_1 p_1(p_{l,i}(k) - x_i(k)) + c_2 p_2(p_{g,i}(k) - x_i(k)) \quad (1)$$

Περιορισμός διανύσματος ταχύτητας

$$u_i(k+1) = \text{sign}(u_i(k+1)) \min\{|u_i(k+1)|, u_{\max}\} \quad , \quad i \in \{1, \dots, n_c\} \quad (2)$$

Ενημέρωση θέσης

$$x_i(k+1) = x_i(k) + u_i(k+1) \quad (3)$$

Όπου,

$p_{l,i}(k)$	είναι η προσωπική βέλτιστη θέση του i σωματιδίου, όπου εμφανίζει τη πιο χαμηλή τιμή συνάρτησης κόστους ανά γενιά
$p_{g,i}(k)$	είναι η ολική βέλτιστη θέση στη γειτονιά, που έχει βρεθεί έως εκείνη τη χρονική στιγμή.
u_{\max}	η παράμετρος περιορισμού της ταχύτητας (velocity clamping parameter)
$c_1 p_1(p_{l,i}(k) - x_i(k))$	είναι η σύνδεση της εμπειρίας ενός σωματιδίου με την τρέχουσα θέση και τη σταθερά c_1 η οποία ονομάζεται ατομικότητα (cognitive acceleration).
$c_2 p_2(p_{g,i}(k) - x_i(k))$	είναι οι κοινωνικές επιρροές ανάμεσα στα σωματίδια σε μία γειτονιά, όπου το c_2 καλείται κοινωνικότητα (social acceleration).

Κάθε ένα σωματίδιο έχει οποιαδήποτε στιγμή μια ταχύτητα, η οποία διέπει τη θέση του στο χώρο. Οι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την ταχύτητα αυτή είναι οι όροι : [6. Sofroniou,D. 2011] :

- Κεκτημένης Ταχύτητας ή Ορμής (inertia),
- Νοητικής ή Γνωστικής Επιρροής (cognitive influence) και
- Κοινωνικής Επιρροής (social influence)

Ως κεκτημένη ταχύτητα ή ορμή, ορίζεται η επιρροή της εκάστοτε κεκτημένης ταχύτητας που έχει το σωματίδιο στη νέα του ταχύτητα, έχοντας ως στόχο την ομαλή μεταβολή των τιμών μεταξύ των ταχυτήτων με αποφυγή απότομων αλλαγών.

Ως νοητική είτε γνωστική επιρροή, αναφέρεται το κατά πόσο επηρεάζεται η κίνηση του κάθε σωματιδίου με βάση την δική του εμπειρία και αντίληψη. Ορίζεται ως μια τάση του σωματιδίου να μεταβεί κοντά στην περιοχή όπου έχει σημειώσει έως εκείνη τη στιγμή τη βέλτιστη προσωπική του επίδοση (personal best - pbest) καθώς κρίνει πως εκεί ίσως βρεθεί μια ακόμα καλύτερη λύση για το πρόβλημα.

Ως κοινωνική επιρροή, καλείται η επίδραση που ασκεί η γενική κατάσταση και η συνολική εξέλιξη του σμήνους στην επόμενη κίνηση του κάθε σωματιδίου. Πιο συγκεκριμένα, είναι η τάση του σωματιδίου να μεταβεί κοντά στην περιοχή όπου έχει σημειωθεί έως εκείνη τη στιγμή η ολική βέλτιστη λύση του προβλήματος (Global best - Gbest).

Σύμφωνα με μια έρευνα που διεξήχθη τη δεκαετία του '40 αποδείχθηκε πως η επικοινωνία και, εν τέλει, η απόδοση των ατόμων μέσα σε μια ομάδα επηρεάζεται από τη δομή του κοινωνικού δικτύου. Τόσο η αμοιβαία επίδραση ανάμεσα στα άτομα και τους άμεσους παρακείμενους γείτονές τους, όσο και όλων των ατόμων με εκείνο το οποίο παρουσιάζει την υψηλότερη απόδοση στον πληθυσμό, αποτελούν τις πιο ισχυρές κοινωνικές δομές. Ενώ αντίθετα, έχει διαπιστωθεί πως τα απομονωμένα άτομα του πλήθους αποδίδουν πολύ χειρότερα.

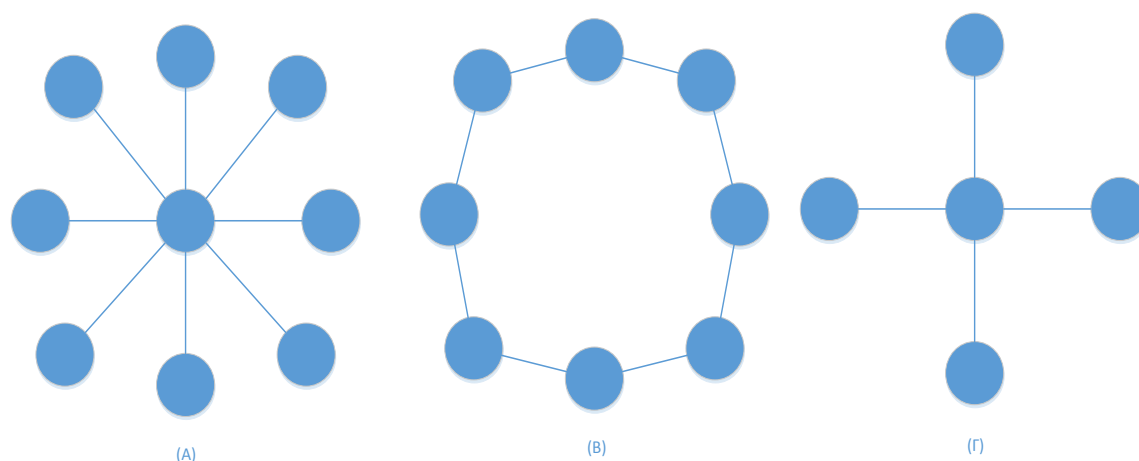
Σύμφωνα με τις μελέτες που έχουν γίνει έως σήμερα, οι γενικοί τύποι γειτονιών που δημιουργούνται από τα σμήνη σωματιδίων, διακρίνονται σε τοπικά καλύτερες (lbest) και ολικά καλύτερες γειτονιές (gbest). Σε μία gbest γειτονιά κάθε σωματίδιο ελκύεται από τη καλύτερη λύση της γειτονιάς, η οποία είναι αποτέλεσμα οποιοδήποτε μέλος του πληθυσμού. Οπότε είναι σαφές πως η δομή αυτή είναι ισοδύναμη με ένα κοινωνικό δίκτυο με πλήρη σύνδεση μεταξύ των ατόμων που το αποτελούν, με κάθε άτομο να έχει τη δυνατότητα σύγκρισης της απόδοσής του με οποιοδήποτε άλλο μέλος του πλήθους, μιμούμενο το καλύτερο. Ενώ, σε μια lbest γειτονιά κάθε σωματίδιο ελκύεται από τη καλύτερη λύση μόνο των άμεσων παρακείμενων γειτόνων του μέσα σε ένα τοπολογικά συνδεδεμένο πληθυσμό, όπως πχ ένα κανονικό δακτυλιωτό πλέγμα.

Οι πιο συνήθεις σε χρήση τοπολογίες γειτονιάς είναι [4. J. Kennedy 1931–1938]:

- η τοπολογία αστέρα (ή ρόδας) και
- οι τοπολογίες δαχτυλιδιών (ή κυκλική).

Σε μία τοπολογία αστέρα, επιλέγεται ένα σωματίδιο ως κεντρικό με όλα τα υπόλοιπα μέλη του σμήνους να συνδέονται αποκλειστικά με αυτό, δίχως να υπάρχει επικοινωνία μεταξύ τους. Σε μία τοπολογία δαχτυλιδιών, οι θέσεις των σωματιδίων δημιουργούν μια κυκλική μορφή, η οποία θυμίζει το σχήμα ενός δαχτυλιδιού. Χαρακτηριστικό αυτής της τοπολογίας είναι ότι κάθε σωματίδιο έχει ένα συγκεκριμένο αριθμό μελών του σμήνους γύρω του, δεξιά και αριστερά του, τα οποία συνθέτουν τη γειτονιά του.

Μία ακόμη πρόταση ήρθε από τους Kennedy και Mendes [3. J. Kennedy and R. Mendes 1671–1676], όπου σε ένα μοντέλο PSO χρησιμοποιείται η τοπολογία Von Neumann. Σε αυτή τη τοπολογία, η σύνδεση του κοινωνικού δικτύου γίνεται μέσω ενός 2-διάστατου δικτυωτού πλέγματος. Πιο αναλυτικά, το κάθε σωματίδιο συνδέεται με τα τέσσερα γειτονικά του σωματίδια, τα οποία βρίσκονται πάνω, κάτω και δεξιά, αριστερά από το σωματίδιο. Ακολουθεί το Σχήμα 6.3, το οποίο αναπαριστά τις πιο συνήθεις τοπολογίες που αναλύθηκαν παραπάνω.



Σχήμα 6.3 Διαγράμματα τοπολογιών Α) αστέρα Β) δαχτυλιδιού Γ) Von Neumann.

Ιδιαίτερα σημαντική είναι η επιλογή της κατάλληλης τοπολογίας της γειτονιάς που θα χρησιμοποιηθεί, έτσι ώστε να αποφευχθούν τυχόν προβλήματα σύγκλισης, καθώς ασκεί μεγάλη επίδραση στη διάδοση της βέλτιστης λύσης από τα σωματίδια του σμήνους. Όταν για παράδειγμα, γίνει χρήση του μοντέλου gbest, ενδέχεται η διάδοση να είναι ιδιαίτερα γρήγορη, με αποτέλεσμα να καταλήγει σε μια πρόωρη σύγκλιση. Αντίθετα, εάν επιλεγεί είτε η τοπολογία των δαχτυλιδιών είτε του Von Neumann, τότε ενδέχεται να μειωθεί ο ρυθμός διάδοσης με αποτέλεσμα να καθυστερήσει η σύγκλιση

αυξάνοντας σημαντικά το χρόνο της προσομοίωσης. Ωστόσο, εάν αυτή η καθυστέρηση της σύγκλισης είναι ελεγχόμενη, τότε είναι επιθυμητή διότι αυτή η αργή διάδοση της βέλτιστης λύσης κάθε φορά δίνει τη δυνατότητα στα σωματίδια να εξετάσουν όλο και πιο πολλές περιοχές αναζήτησης καλύπτοντας έτσι ένα μεγάλο εύρος πιθανών λύσεων.

Ένας αποτελεσματικός τρόπος έτσι ώστε να βελτιωθεί η συμπεριφορά σύγκλισης του αλγορίθμου, είναι η αντικατάσταση του περιορισμού του διανύσματος ταχύτητας με έναν περιορισμό των σωματιδίων στο χώρο έρευνας με τη βοήθεια των απόλυτων οριακών συνθηκών [5. S. Mikki and A. Kishk, 2005] (hard boundary conditions), όπως είναι οι ανακλαστικές και απορροφητικές οριακές συνθήκες (reflective, absorbing boundary conditions - RBC, ABC). Οι συνθήκες αυτές δεν ακολουθούν τη μέθοδο περιορισμού της ταχύτητας, αντίθετα είτε αντιστρέφουν (RBC) το διάνυσμα ταχύτητας είτε το μηδενίζουν (ABC) αντίστοιχα.

6.3 Διαφορές μεταξύ Γενετικών και Αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων

Η ΒΣΣ σε ένα μεγάλο μέρος της είναι επηρεασμένη από έννοιες των γενετικών αλγορίθμων. Για παράδειγμα, η χρήση ενός αριθμού σωματιδίων για την αναπαράσταση των δυνατών λύσεων που εξετάζονται από τον αλγόριθμο πηγάζει από τους εξελικτικούς αλγόριθμους. Ακόμα, οι βασικές εξισώσεις ενημέρωσης της θέσης και της ταχύτητας των σωματιδίων παρουσιάζουν μερικά κοινά γνωρίσματα με τους εξελικτικούς τελεστές. Ωστόσο, υπάρχουν και αρκετές βασικές διαφορές ανάμεσά τους, όπως ότι [1. Παπαδόπουλος Κ. 2011] :

- Όλα τα σωματίδια επιβιώνουν από γενιά σε γενιά, δίχως να δημιουργούνται καινούργια μέλη στον πληθυσμό όπως σε ένα γενετικό αλγόριθμο.
- Τα σωματίδια εξελίσσονται μόνο διαμέσου της κοινωνικής τους συμπεριφοράς.
- Η αυτό-οργάνωση που είναι έμφυτη στην κοινωνική συμπεριφορά των σωματιδίων είναι εξίσου σημαντική με την φυσική επιλογή, όπως αυτή προβλέπεται στη διαδικασία εξέλιξης του πληθυσμού στους γενετικούς αλγορίθμους.
- Δυνατότητα προσαρμογής της ταχύτητας των σωματιδίων, ενώ οι θέσεις των ατόμων στους γενετικούς αλγορίθμους χρειάζονται συγκεκριμένους τελεστές για τη τροποποίηση τους.
- Έχει λιγότερο πολύπλοκους τελεστές και μικρότερο αριθμό παραμέτρων.
- Είναι πιο εύκολος στην υλοποίηση και στην εφαρμογή του σε σχεδιαστικά προβλήματα συνεχών και διακριτών μεταβλητών

Βιβλιογραφία

- [1] Παπαδόπουλος Κ. (2011) “Ανάπτυξη Κατανεμημένης Πλατφόρμας Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και Εφαρμογή σε Προβλήματα Σύνθεσης Στοιχειοκεραιών”.
- [2] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, 1995, pp. 1942–1948.
- [3] J. Kennedy and R. Mendes, “Population structure and particle swarm performance,” in Proceedings of the 2002 Congress on Evolutionary Computation (CEC ’02), vol. 2, 2002, pp. 1671–1676.
- [4] J. Kennedy, “Small worlds and mega-minds: effects of neighborhood topology on particle swarm performance,” in Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation (CEC ’99), vol. 3, 1999, pp. 1931–1938.
- [5] S. Mikki and A. Kishk, “Improved particle swarm optimization technique using hard boundary conditions,” Microwave and optical technology letters, vol. 46, no. 5, pp. 422–426, 2005.
- [6] Sofroniou,D. (2011) “Enhanced Variant of the Particle Swarm Method in Optimization”

7. Εφαρμογή του αλγορίθμου βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων στην ένταξη θερμικών μονάδων

7.1 Περιγραφή του Προβλήματος

Προτού αναπτυχθεί η ενότητα των εφαρμογών, για να γίνει πιο κατανοητή η σύνδεση μεταξύ της μεθόδου επίλυσης και του προβλήματος, θα αναλυθεί πως δομείται ένα σωματίδιο και πως αυτό μετατρέπεται σε καταστάσεις λειτουργίας των ΘΜ.

Το κάθε σωματίδιο αναπαριστά ένα πίνακα αλλαγών των καταστάσεων λειτουργίας των ΘΜ ενός ΣΗΕ. Αυτός ο πίνακας έχει διαστάσεις :

$$\begin{array}{c} \text{Αριθμός} \\ \text{δυνατότητας αλλαγής} \\ \text{κατάστασης ΘΜ ανά ώρα} \\ \text{(ch)} \end{array} \times \begin{array}{c} \text{Χρονικός} \\ \text{ορίζοντας} \\ \text{προσομοίωσης} \\ \text{(T)} \end{array}$$

Εφόσον ο χρονικός ορίζοντας είναι ένας ημερήσιος κύκλος, γίνεται κατανοητό πως ο συνολικός χρόνος θα είναι $T=24$ ώρες (h).

Με τον όρο αλλαγή κατάστασης, εννοείται η δυνατότητα μιας μονάδας να

- ενταχθεί στο σύστημα ενώ προηγουμένως ήταν ανενεργή
- ή αντίστροφα να αποσυνδεθεί ενώ προηγουμένως ήταν ενεργή.

Ο αριθμός δυνατότητας αλλαγής κατάστασης λειτουργίας ανά ώρα (ch) είναι μια σημαντική παράμετρος, η τιμή της οποίας καθορίζεται από το χρήστη ανάλογα με το μέγεθος του ΣΗΕ που εφαρμόζεται. Όσο μεγαλύτερο ένα ΣΗΕ, τόσο πιο μεγάλος θα είναι και ο αριθμός των δυνατών αλλαγών. Στις εφαρμογές που θα ακολουθήσουν λόγω του ότι τα ΣΗΕ που επιλέχτηκαν δεν ξεπερνούν τις 26 ΘΜ, παρατηρήθηκε έπειτα από προσομοιώσεις πως η βέλτιστη επιλογή είναι έως $(ch=)2$ αλλαγές ΘΜ ανά ώρα, δηλαδή:

- Καμία αλλαγή
- Μια αλλαγή
- Δύο αλλαγές

Άρα οι διαστάσεις του πίνακα είναι 2×24

	1 ^η ώρα	2 ^η ώρα	... ^η ώρα	... ^η ώρα	24 ^η ώρα
ΘΜ που θα αλλάξει η κατάσταση λειτουργίας τους	U _i	0	...	...	U _m
	U _j	U _k	...	...	U _n

Πίνακας 7.1.1 Δομή σωματιδίου - Πίνακας X_{pso}

Το κάθε ένα σωματίδιο συνεπώς, δίνει και από ένα πίνακα X_{pso} 2 x 24, όπου τα στοιχεία του (U_i, U_j, U_k κλπ.) παίρνουν τιμές από 0 έως Ng , όπου Ng το πλήθος των ΘΜ του ΣΗΕ. Οι ΘΜ 1,2...Ng είναι οι ΘΜ που έχουν καταχωρηθεί στο σύστημα. Πιο αναλυτικά,

- Η τιμή 0 σημαίνει πως δε θα υπάρξει αλλαγή ΘΜ.
- Οι τιμές από 1 έως Ng δηλώνουν πως θα αλλάξει κατάσταση η εν λόγω ΘΜ.

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι τα διάφορα σωματίδια, ο αριθμός των οποίων καθορίζεται από το χρήστη, αποτελούν τις εξεταζόμενες λύσεις του συστήματος. Αυτό το οποίο διαφοροποιεί τα σωματίδια μεταξύ τους, δίδοντας διαφορετική λύση το κάθε ένα, είναι ο διαφορετικός πίνακας X_{pso}

Για να επιτευχθεί όσο το δυνατόν γρηγορότερα η σύγκλιση προς τη βέλτιστη λύση είναι αναγκαία η χρήση μιας καλής αρχικοποίησης. Η προσέγγιση η οποία ακολουθήθηκε, για την αρχικοποίηση των καταστάσεων λειτουργίας των θερμικών μονάδων στόχευε στη ταξινόμηση κατά αύξουσα σειρά των μονάδων συγκρίνοντας το λόγο :

$$\frac{\text{Κόστος}}{\text{Παραγόμενη ισχύς}} \text{ της εκάστοτε ΘΜ.}$$

Η μέθοδος αυτή κατατάσσει τις μονάδες από τη φθηνότερη προς την ακριβότερη, σύμφωνα με το κόστος ανά παραγόμενη ισχύ, δίνοντας την επιλογή αρχικής ένταξης των μονάδων με το μικρότερο λόγο. Θα επιλεγθούν τόσες μονάδες έτσι ώστε να καλυφθεί τουλάχιστον το φορτίο της ζήτησης της 1^{ης} ώρας στην εν λόγω περιοχή που εξετάζεται. Με τον τρόπο αυτό θα δημιουργηθεί ένα διάνυσμα που θα παρουσιάζει ποιες ΘΜ θα ενταχθούν και ποιες όχι. Το διάνυσμα X₀, με διαστάσεις 1 x Ng, θα έχει τη μορφή :

ΘΜ	1 ^η	2 ^η	...	...	Ng-1	Ng
Αρχική Κατάσταση ΘΜ	0	1	...	....	1	0

Πίνακας 7.1.2 Αρχική Κατάσταση Λειτουργίας ΘΜ - Διάνυσμα X₀

Τα στοιχεία του είναι 1 και 0, όπου:

- με 1 συμβολίζεται η ΘΜ σε λειτουργία
- ενώ αντίθετα με 0 η μη ενεργή ΘΜ

Σαν αποτέλεσμα, με γνώση του διανύσματος X_0 καθώς και του πίνακα X_{pso} , καλείται η ρουτίνα `generator_states` η οποία θα δημιουργήσει το πίνακα καταστάσεων λειτουργίας των μονάδων, πίνακας X , για όλο το 24ωρο.

Τα βήματα που ακολουθεί η εν λόγω ρουτίνα αναλύονται μέσω του παρακάτω ψευδοκώδικα :

Για $i=1$ έως T

Για $j=1$ έως ch

Αν υπάρχει αλλαγή [$X_{pso}(i,j) \neq 0$], και έστω ότι αλλάζει η $k^{οστη}$ ΘΜ

Τότε το στοιχείο του διανύσματος $X_0(k) = |X_0(k) - 1|$

Τέλος

Τέλος

Η i γραμμή του πίνακα X θα ισούται με το νέο διάνυσμα X_0

Τέλος

Σχήμα 7.1.1 ψευδοκώδικας `generator_states`

Έτσι προκύπτει ο πίνακας X , όπου οι διαστάσεις του είναι $T \times Ng$ με στοιχεία 1 και 0 όπου δηλώνουν ποιες μονάδες είναι ενεργές και μη ενεργές, την αντίστοιχη ώρα. Άρα ο πίνακας θα έχει τη μορφή :

ΘΜ Ωρες	1 ^η	2 ^η	...	...	Ng-1	Ng
1η ώρα	1	1	...	...	0	0
2η ώρα	1	1	...	...	0	1
...
24η ώρα	...	...	...	...	...	...

Πίνακας 7.1.3 Πίνακας καταστάσεων λειτουργίας των ΘΜ - Πίνακας X

Έχοντας το πίνακα καταστάσεων X γίνονται οι απαραίτητοι έλεγχοι έτσι ώστε ο χώρος αναζήτησης όπου θα κινούνται τα σωματίδια για την εύρεση της βέλτιστης λύσης, να καθορίζεται από τους περιορισμούς που έχουν τεθεί στο σύστημα.

Για να αποτραπεί η σύγκλιση των σωματιδίων σε περιοχές όπου η τελική προτεινόμενη λύση δε θα είναι εφικτή, χρησιμοποιείται η μέθοδος της ποινής (penalty) κάθε φορά που υπάρχει παραβίαση έστω και ενός περιορισμού. Με αυτόν τον τρόπο, οι ανέφικτες λύσεις κρίνονται μη ωφέλιμες καθώς το κόστος αυξάνεται και έτσι ο αλγόριθμος τις αγνοεί και οδηγείται σε λύσεις εντός των περιορισμών που έχουν τεθεί.

Μια σημαντική προσθήκη είναι η συνάρτηση operations_hours, η οποία θα μετρά τις συνεχόμενες ώρες λειτουργίας των ΘΜ.

Ως είσοδο θα έχει τον πίνακα X καθώς και ένα διάνυσμα hours₀.

Τα στοιχεία του hours₀, i,j,k κλπ., αποτελούνται από ακέραιους αριθμούς (θετικούς ή αρνητικούς) όπου φανερώνουν πόσες συνεχόμενες ώρες παρέμειναν ανοιχτές ή κλειστές οι ΘΜ έως τη χρονική στιγμή T=0, δηλαδή :

- Για όσες ΘΜ ήταν σε λειτουργία, θα αναγράφονται οι ώρες με θετικό πρόσημο (π.χ. 1,2 ... κλπ.)
- Ενώ για όσες ήταν κλειστές θα έχουν αρνητικό πρόσημο (π.χ. -1,-2 ... κλπ.)

Το πρόσημο των στοιχείων του διανύσματος hours₀ καθορίζεται από το διάνυσμα X₀, καθώς το X₀ δείχνει ποιες μονάδες ήταν ενεργές ή μη ενεργές κατά τη χρονική περίοδο T=0. Το διάνυσμα hours₀, θα έχει συνεπώς, διαστάσεις 1 x Ng και τη μορφή :

ΘΜ	1 ^η	2 ^η	...	...	Ng-1	Ng
Αρχικές συνεχόμενες ώρες λειτουργίας των ΘΜ	-k	+i	...	...	+j	-m

Πίνακας 7.1.4 Αρχικές συνεχόμενες ώρες λειτουργίας των ΘΜ -
Διάνυσμα hours₀

Η απόλυτη τιμή των στοιχείων του διανύσματος hours₀ στις εφαρμογές που θα ακολουθήσουν θα ισούται με ένα ακέραιο αριθμό ο οποίος θα είναι κοινός για όλες τις ΘΜ. Αυτό είναι αναγκαίο έτσι ώστε η κάθε επανάληψη του κώδικα να ξεκινά από την ίδια βάση, με στόχο τα τελικά αποτελέσματα να μπορούν να συγκριθούν. Η επιλογή του αριθμού θα γίνεται προκειμένου να επιτρέπεται η αλλαγή της κατάστασης όλων των ΘΜ κατά την 1^η ώρα, λόγω ενός περιορισμού συνεχούς λειτουργίας ή κράτησης που θα αναλυθεί αμέσως μετά.

Ως έξοδο οπότε, η συνάρτηση operations_hours θα δίνει ένα πίνακα hours, με τις συνεχόμενες ώρες λειτουργίας της κάθε μονάδας για το επόμενο 24ωρο (T=24).

Τα βήματα που ακολουθεί η εν λόγω ρουτίνα αναλύονται μέσω του παρακάτω ψευδοκώδικα :

Για $i=1$ έως T

Για $j=1$ έως N_g

Αν δεν υπάρχει αλλαγή κατάστασης από 0 σε 1 ή από 1 σε 0 στον X ,

Τότε $hours(i,j) = [| hours(i-1,j) | +1] * \text{το πρόσημο του αριθμού } hours(i-1,j)$

Αλλιώς (εάν δηλαδή υπάρχει αλλαγή κατάστασης στον X)

Τότε $hours(i,j) = \text{με } 1 * \text{το αντίθετο πρόσημο από το } hours(i-1,j)$

Τέλος

Τέλος

Τέλος

Σχήμα 7.1.2 Ψευδοκώδικας operations_hours

Έτσι δημιουργείται ο πίνακας hours, όπου οι διαστάσεις του είναι $T \times N_g$ με στοιχεία ακέραιους αριθμούς (θετικούς ή αρνητικούς) όπου φανερώνουν πόσες συνεχόμενες ώρες παραμένουν ενεργές ή ανενεργές οι ΘΜ για τις επόμενες 24 ώρες ($T=24$) :

- Οι ανενεργές ΘΜ θα έχουν αρνητικό πρόσημο (π.χ. -1, -2 ... κλπ.)
- Και οι ενεργές ΘΜ θα έχουν θετικό πρόσημο (π.χ. 1, 2 ... κλπ.)

Άρα ο πίνακας θα έχει τη μορφή :

ΘΜ Ωρες	1 ^η	2 ^η	...	...	N_g-1	N_g
1η ώρα	1	3	...	...	-1	-3
2η ώρα	2	-1	...	...	-2	1
...
24η ώρα	...	...	...	...	...	...

Πίνακας 7.1.5 Συνεχόμενες ώρες λειτουργίας της κάθε ΘΜ - Πίνακας hours

Έχοντας το πίνακα hours, στην συνέχεια είναι απαραίτητη μια ακόμη συνάρτηση, η control_hours, η οποία ελέγχει τη συχνότητα (ή το ρυθμό) με την οποία αλλάζει κατάσταση η κάθε ΘΜ. Συνεπώς, εάν παρατηρηθεί στον παραπάνω πίνακα hours ότι κάποια ΘΜ ήταν λιγότερες ώρες από το επιτρεπόμενο ρυθμό αλλαγής :

- σε λειτουργία πριν την αποσύνδεση της
- ή σε κράτηση πριν την ένταξή της

Τότε υπάρχει παραβίαση στο σύστημα και ο συνολικός αριθμός των παραβιάσεων θα αποθηκευτεί σε ένα μετρητή.

Τα βήματα που ακολουθεί η εν λόγω ρουτίνα αναλύονται μέσω του παρακάτω ψευδοκώδικα :

Για $i = 1$ έως T

Για $j = 1$ έως N_g

Αν υπάρχει αποσύνδεση μονάδας και οι συνεχόμενες ώρες λειτουργίας είναι λιγότερες του επιτρεπόμενου ρυθμού αλλαγής

Τότε υπάρχει παραβίαση, η οποία θα προστεθεί στο μετρητή (+1)

Αλλιώς αν υπάρχει ένταξη μονάδας και οι συνεχόμενες ώρες κράτησης είναι λιγότερες του επιτρεπόμενου ρυθμού αλλαγής

Τότε υπάρχει παραβίαση, η οποία θα προστεθεί στο μετρητή (+1)

Τέλος

Έπειτα βρίσκει τις θέσεις που έχουν γίνει οι αλλαγές και τις αποθηκεύει σε ένα διάνυσμα changes, το οποίο χρησιμεύει αργότερα

Τέλος

Τέλος

Σχήμα 7.1.3 Ψευδοκώδικας control_hours

Ένας ακόμη απαραίτητος έλεγχος που πρέπει να γίνει είναι εάν το σύστημα μπορεί να λειτουργήσει βάσει των τεχνικών ορίων των γεννητριών και του φορτίου του συστήματος.

Ως δεδομένα δίδονται :

- 1) Ένα διάνυσμα με την ελάχιστη παραγωγή των γεννητριών σε MW.(Pmin)
- 2) Ένα διάνυσμα με την μέγιστη παραγωγή των γεννητριών σε MW.(Pmax)
- 3) Ένα διάνυσμα για το φορτίο του συστήματος για τις επόμενες ώρες σε MW. (Load)

Δημιουργείται επομένως η συνάρτηση technical_limits που έχει ως είσοδο τον πίνακα καταστάσεων X και τα διανύσματα Pmin, Pmax, Load ώστε να ελέγχει για κάθε ώρα λειτουργίας του συστήματος αν το:

- 1) Άθροισμα των ελαχίστων παραγωγών των μονάδων σε λειτουργία είναι μικρότερο ή ίσο από το αντίστοιχο φορτίο
- 2) Άθροισμα των μεγίστων παραγωγών των μονάδων σε λειτουργία είναι μεγαλύτερο ή ίσο από το αντίστοιχο φορτίο

Αν παραβιάζεται κάποιο από τα παραπάνω τότε προστίθεται στο μετρητή (+1).

Τα βήματα που ακολουθεί η ρουτίνα αναλύονται μέσω του παρακάτω ψευδοκώδικα :

Για $i=1$ έως T

Αν το $\text{Σύνολο}(X * P_{\min}) > Load$ ή το $\text{Σύνολο}(X * P_{\max}) < Load$

Τότε υπάρχει παραβίαση, η οποία θα προστεθεί στο μετρητή (+1)

Τέλος

Τέλος

Σχήμα 7.1.4 Ψευδοκώδικας technical_limits

Γνωρίζοντας τα σημεία αλλαγής της κατάστασης λειτουργίας, μέσω του διανύσματος changes, δίδεται η ευκαιρία να υπολογιστεί αυτή τη φορά ένα κόστος, το κόστος έναρξης και κράτησης των ΘΜ.

Θα είναι γνωστά :

- ένα διάνυσμα που δίνει τα κόστη έναρξης σε € των ΘΜ (StartCost)
- και ένα διάνυσμα που δίνει τα κόστη κράτησης σε € των ΘΜ (ShutDownCost)

Τα βήματα που ακολουθεί η ρουτίνα changes_cost αναλύονται μέσω του παρακάτω ψευδοκώδικα :

Για $i=1$ έως μέγεθος αλλαγών changes

Αν η i αλλαγή, είναι ένταξη

Τότε στο Συνολικό κόστος προστίθεται το StartCost

Αλλιώς (δηλαδή αν υπάρχει κράτηση ΘΜ)

Τότε στο Συνολικό κόστος προστίθεται το ShutDownCost

Τέλος

Τέλος

Σχήμα 7.1.5 Ψευδοκώδικας changes_cost

Έπειτα ακολουθεί ο βέλτιστος καταμερισμός της παραγόμενης ισχύος, μέσω της ρουτίνας `total_cost`. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της συνάρτησης `fmincon` η οποία προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει τη συνάρτηση

Με βάση το κόστος καυσίμου

$$F_i(x) = fuel_cost_i \cdot (d_i + c_i \cdot x + b_i \cdot x^2 + a_i \cdot x^3)$$

Αποφεύγοντας παράλληλα την υπέρβαση του ωριαίου ορίου ρυθμού από εκπεμπόμενους ρύπους kgCO_2/h (ο οποίος έχει οριστεί μέσω μιας παραμέτρου από το χρήστη), με τη βοήθεια της μεθόδου ποινής (penalty) που αναλύθηκε σε προηγούμενη παράγραφο :

$$\sum_{i=1}^{Ng} (emissions_i \cdot 10^3 \cdot x_i) < GHG \text{ limit}$$

Όπου,

x_i	Το ζητούμενο, δηλαδή η παραγόμενη ισχύς από κάθε θερμική μονάδα σε MW
a_i, b_i, c_i, d_i	Συντελεστές της συνάρτησης μεταβλητού κόστους λειτουργίας της κάθε μονάδας, με $a_i \rightarrow \text{Kg/MWh}^3$, $b_i \rightarrow \text{Kg/MWh}^2$, $c_i \rightarrow \text{Kg/MWh}$ και $d_i \rightarrow \text{Kg-lt}$
$fuel_cost_i$	Κόστος καυσίμου € / κιλό , ενδεικτικά: λιγνίτης 0.27€/Kg-lt,, μαζούτ 0.4149 €/Kg-lt, diesel 0.6982 €/Kg-lt
$emissions_i$	Ποσότητα παραγόμενων ρύπων ανά kWh , ενδεικτικά: λιγνίτης 1.15 kgCO_2/kWh , diesel 0.6 kgCO_2/kWh
10^3	Μετατροπή του $emissions_i$ από $\frac{\text{kgCO}_2}{\text{kWh}}$ σε $\frac{\text{kgCO}_2}{\text{MWh}}$
$GHG \text{ limit}$	Όριο ρυθμού εκπομπής ρύπων ($\text{kg CO}_2/\text{h}$)

Τα βήματα που ακολουθεί η εν λόγω ρουτίνα αναλύονται μέσω του παρακάτω ψευδοκώδικα :

Αν κάποιος από τους μετρητές είναι >0 (έχουν δηλαδή παραβιαστεί οι περιορισμοί)

Τότε ακολουθείται η μέθοδος ποινής (penalty) και το κόστος ισούται με το σύνολο των παραβιάσεων (ή αλλιώς των μετρητών) $\times 10^9$, δηλαδή με έναν πολύ μεγαλύτερο αριθμό.

Αλλιώς

Για $i=1$ έως T

καλείται η `fmincon` δίνοντάς της για είσοδο `Pmin,Pmax,Load`, συντελεστές `a,b,c,d`, `fuel_cost`, `emissions` και `GHG_limit` καθώς και η εξωτερική συνάρτηση `mscr**`

Έπειτα δίδεται ως έξοδος

- το κόστος παραγωγής το οποίο το προστίθεται στο συνολικό κόστος
- και ο καταμερισμός του παραγόμενου φορτίου από τις ΘΜ σε MW για το επόμενο χρονικό διάστημα T

Τέλος

Τέλος

Σχήμα 7.1.6 Ψευδοκώδικας `total_cost`

Ο ψευδοκώδικας της `mscr**` είναι

Αν με το καταμερισμό αυτό, οι παραγόμενοι ρύποι $> GHG_limit$

Τότε το κόστος παραγωγής πολλαπλασιάζεται 3 φορές σε σύγκριση με τη πραγματική του τιμή

Αλλιώς

Τότε το κόστος παραγωγής υπολογίζεται κανονικά

Τέλος

Σχήμα 7.1.7 Ψευδοκώδικας `mscr`

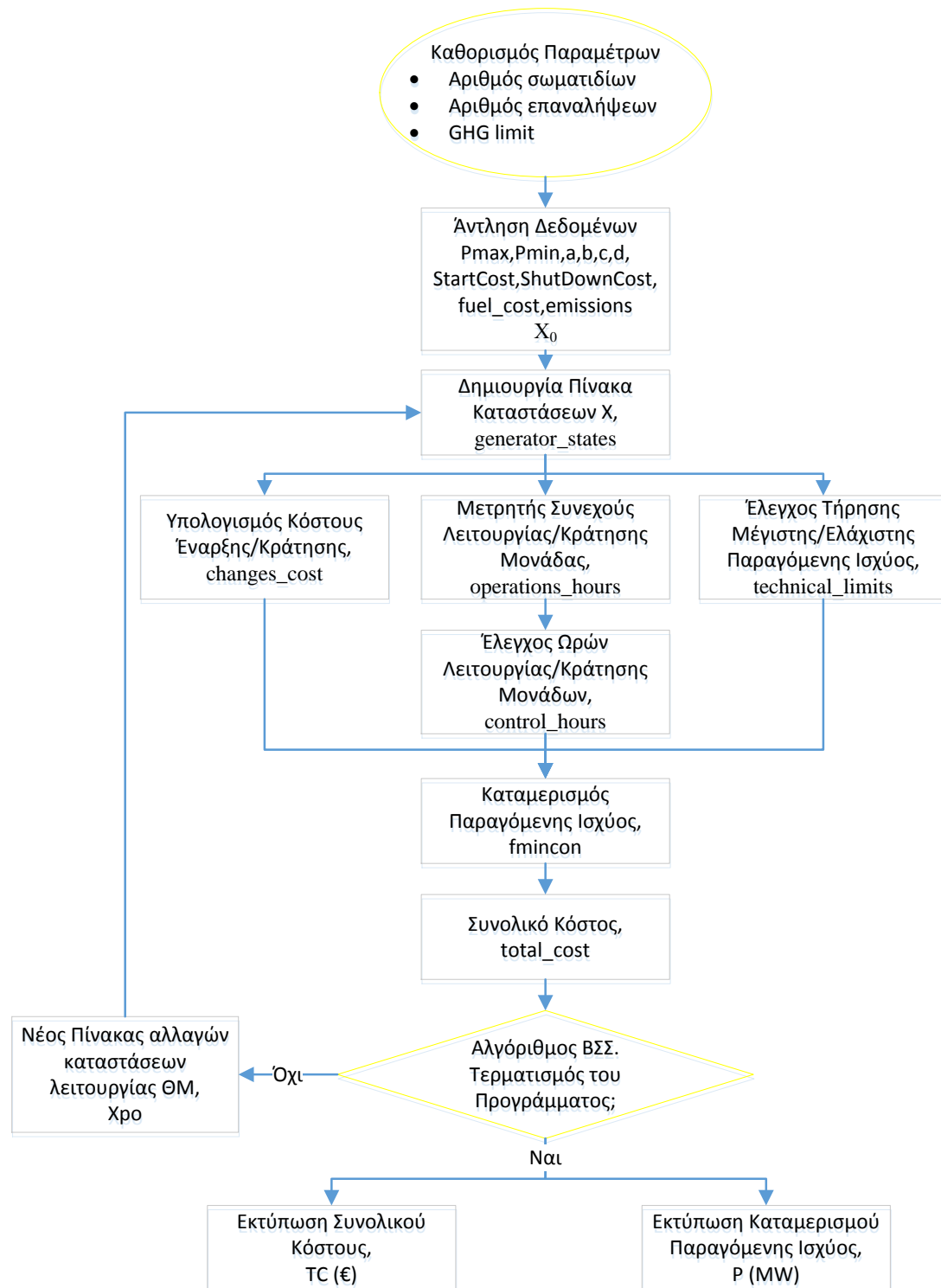
Έπειτα από τα παραπάνω βήματα, ο αλγόριθμος της ΒΣΣ (PSO) συγκρίνει τα αποτελέσματα μεταξύ των σωματιδίων και επιλέγει εκείνο με τη μικρότερη τιμή και προσωπική βέλτιστη του σωματιδίου (pbest). Εάν πρόκειται για τη πρώτη επανάληψη, αυτή η τιμή θα είναι και η ολική βέλτιστη (gbest), ενώ στις επόμενες επαναλήψεις η επικρατέστερη τιμή θα συγκρίνεται με την ολική βέλτιστη (gbest) ώστε να επικρατήσει και πάλι η μικρότερη τιμή.

Όσον αφορά τα δεδομένα της προσομοίωσης, δυο σημαντικοί παράμετροι είναι :

- **Ο αριθμός σωματιδίων**, όπου όπως επισημάνθηκε και προηγουμένως τα σωματίδια αποτελούν τις πιθανές λύσεις του προβλήματος, άρα όσο μεγαλύτερος ο αριθμός τόσο περισσότερες λύσεις εξετάζονται ταυτόχρονα. Ωστόσο πρέπει να σημειωθεί πως όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των σωματιδίων, τόσο αυξάνεται ο χρόνος προσομοίωσης, καθώς καταλαμβάνουν μεγάλο μέρος μνήμης.

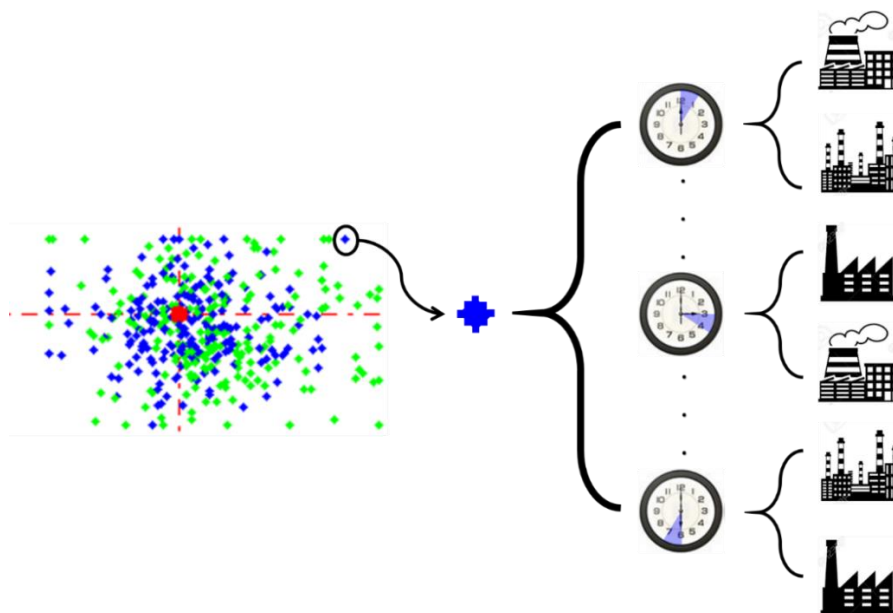
- **Ο αριθμός επαναλήψεων**, όπου λειτουργεί όπως ο αριθμός σωματιδίων. Δηλαδή όσο μεγαλύτερος ο αριθμός των επαναλήψεων τόσο μεγαλύτερος χώρος αναζήτησης εξετάζεται, ωστόσο ένας πολύ μεγάλος αριθμός μπορεί να καθυστερήσει το χρόνο προσομοίωσης.

Τέλος παρουσιάζονται όλα τα παραπάνω βήματα σε ένα διάγραμμα ροής, το σχήμα 7.1.8.



Σχήμα 7.1.8 Διάγραμμα ροής ελαχιστοποίησης Συνολικού Κόστους Παραγωγής

Για να γίνει πιο κατανοητό, θα αναλυθεί μέσω ενός μικρού παραδείγματος :



Σχήμα Π.1 Αναπαράσταση μετατροπής των καταστάσεων λειτουργίας σε σωματίδιο

Έστω ένας ($T=$) 4ωρος σχεδιασμός ΣΗΕ, 5 ΘΜ όπου $ch=2$ και ο η ταξινόμηση των ΘΜ κατά αύξουσα σειρά είναι :

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 5$$

Και για την κάλυψη τουλάχιστον του φορτίου της 1^{ης} ώρας αρκούν οι μονάδες 1,2 και 4.

Τότε για $T=0$, η αρχική κατάσταση των 5 ΘΜ, είναι:

ΘΜ	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
Κατάσταση Λειτουργίας	1	1	0	1	0

Πίνακας Π.1 Αρχική Κατάσταση Λειτουργίας 5 ΘΜ - Διάνυσμα X_0

Σε σύστημα 5 γεννητριών στο οποίο μπορούν να αλλάζουν κατάσταση κάθε ώρα έως 2 ΘΜ ($ch=2$), ένα από τα σωματίδια αναπαριστά το πίνακα X_{rpo} (2×4) με τις προτεινόμενες αλλαγές των ΘΜ ανά ώρα :

ΘΜ Ώρες	ΘΜ όπου θα αλλάξουν κατάσταση λειτουργίας	
1η ώρα	2	3
2η ώρα	1	5
3η ώρα	2	4
4η ώρα	1	0

Πίνακας Π.2 Πίνακας αλλαγών κατάστασης λειτουργίας 5 ΘΜ - πίνακας X_{rpo}

Όπου,

1,2...,5 οι ΘΜ που πρόκειται να αλλάξει η κατάστασή τους,

ενώ με 0 δεν υπάρχει κάποια αλλαγή, όπως την 4^η ώρα όπου θα αλλάξει η κατάσταση μόνο της 1^{ης} ΘΜ.

Σαν αποτέλεσμα, με γνώση της αρχικής κατάστασης λειτουργίας (X_0) καθώς και των μεταβολών το επόμενο 4ωρο (X_{rso}) δημιουργείται ο πίνακας καταστάσεων λειτουργίας των μονάδων, X :

ΘΜ Ώρες	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
1η ώρα	1	0	1	1	0
2η ώρα	0	0	1	1	1
3η ώρα	0	1	1	0	1
4η ώρα	1	1	1	0	1

Πίνακας Π.3 Πίνακας καταστάσεων X

Ακόμη δίδεται ως δεδομένο το διάνυσμα $hours_0$, δηλαδή οι αρχικές ώρες λειτουργίας/κράτησης κάθε ΘΜ, (για το παράδειγμα είναι τυχαίες ακέραιες τιμές):

ΘΜ	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
Ώρες Λειτουργίας/Κράτησης	3	1	-2	2	-1

Πίνακας Π.4 Διάνυσμα $hours_0$

Σαν αποτέλεσμα, με γνώση του διανύσματος $hours_0$ και του πίνακα X , οι ώρες συνεχούς λειτουργίας/κράτησης κάθε μονάδας για τις επόμενες 4 ώρες διαμορφώνονται :

ΘΜ Ώρες	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
1η ώρα	4	-1	1	3	-2
2η ώρα	-1	-2	2	4	1
3η ώρα	-2	1	3	-1	2
4η ώρα	1	2	4	-2	3

Πίνακας Π.5 Πίνακας $Hours$

Στη συνέχεια, εάν η συχνότητα με την οποία αλλάζει κατάσταση η κάθε ΘΜ πρέπει να είναι:

- Τουλάχιστον 3 ώρες σε λειτουργία (+3) πριν την αποσύνδεση της ΘΜ από το σύστημα
- ή τουλάχιστον 3 ώρες σε κράτηση (-3) πριν την ένταξή της ΘΜ στο σύστημα

Τότε παρατηρείται ότι κάποιες ΘΜ ξεπερνάνε το επιτρεπτό όριο λειτουργίας/κράτησης:

ΘΜ	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
Έλεγχος Ωρών Λειτουργίας/Κράτησης	1	2	1	0	1

Πίνακας Π.6 Έλεγχος Ωρών Λειτουργίας/Κράτησης

Και πιο συγκεκριμένα,

ΘΜ	1 ^η	ΘΜ	2 ^η	ΘΜ	3 ^η	ΘΜ	5 ^η
3η ώρα	-2	hours ₀	-1	hours ₀	-2	1η ώρα	-2
4η ώρα	1	1η ώρα	1	1η ώρα	1	2η ώρα	1

ΘΜ	2 ^η
2η ώρα	-2
3η ώρα	1

Τελικά, ο μετρητής έχει διαμορφωθεί :

$$\text{Μετρητής Παραβάσεων} = 1 + 2 + 1 + 0 + 1 = 5$$

Δεδομένου ότι :

- $P_{min} = [200 \ 200 \ 150 \ 170 \ 120]$
- $P_{max} = [500 \ 500 \ 400 \ 450 \ 300]$
- $Load = [800 \ 1200 \ 450 \ 670]$

Και ο Πίνακας καταστάσεων X,

ΘΜ Ώρες	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
1η ώρα	1	0	1	1	0
2η ώρα	0	0	1	1	1
3η ώρα	0	1	1	0	1
4η ώρα	1	1	1	0	1

Πίνακας Π.7 Πίνακας καταστάσεων X

Τότε μέσω της συνάρτησης technical limits προκύπτει :

Για την 1^η ώρα:

ΘΜ	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
1η ώρα	1	0	1	1	0

$$\Sigma Pmin = 200 + 150 + 170 = 520$$

$$\Sigma Pmax = 500 + 400 + 450 = 1350$$

$$Load = 800$$

Αρα δε παραβιάζεται καμία από τις δυο συνθήκες,

$$\Sigma Pmax \geq Load \geq \Sigma Pmin$$

Για την 2^η ώρα:

ΘΜ	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
2η ώρα	0	0	1	1	1

$$\Sigma Pmin = 150 + 170 + 120 = 440$$

$$\Sigma Pmax = 400 + 450 + 300 = 1150$$

$$Load = 1200$$

Αρα υπάρχει παραβίαση μίας εκ των συνθηκών,

$$\Sigma Pmax \not\geq Load \geq \Sigma Pmin$$

Οπότε ο μετρητής αυξάνεται κατά +1.

Για την 3^η ώρα:

ΘΜ	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
3η ώρα	0	1	1	0	1

$$\Sigma Pmin = 200 + 150 + 120 = 470$$

$$\Sigma Pmax = 500 + 400 + 300 = 1200$$

$$Load = 450$$

Αρα υπάρχει παραβίαση μίας εκ των συνθηκών,

$$\Sigma Pmax \geq Load \not\geq \Sigma Pmin$$

Οπότε ο μετρητής αυξάνεται κατά +1.

Για την 4^η ώρα:

ΘΜ	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
4η ώρα	1	1	1	0	1

$$\Sigma Pmin = 200 + 200 + 150 + 120 = 670$$

$$\Sigma Pmax = 500 + 500 + 400 + 300 = 1700$$

$$Load = 670$$

Άρα δε παραβιάζεται καμία από τις δυο συνθήκες,

$$\Sigma P_{max} \geq Load \geq \Sigma P_{min}$$

Τελικά, ο μετρητής έχει διαμορφωθεί :

$$\begin{aligned} \text{Μετρητής Παραβάσεων} &= 0 + 1 + 1 + 0 = 2 \\ +5 \text{ παραβάσεις απο τον προηγούμενο έλεγχο} &= 7 \end{aligned}$$

Στη συνέχεια καλείται η συνάρτηση `changes_cost` για τον υπολογισμό του κόστους έναρξης και κράτησης των ΘΜ. Έστω π.χ. τα κόστη έναρξης και σβέσης, σε €, κάθε ΘΜ

- $StartCost = [500 \ 500 \ 300 \ 350 \ 250]$
- $ShutDownCost = [150 \ 150 \ 100 \ 120 \ 80]$

Σύμφωνα με τα σημεία αλλαγής κατάστασης

ΘΜ Ωρες \	1 ^η	2 ^η	3 ^η	4 ^η	5 ^η
1η ώρα	-	ShutDown	Start	-	-
2η ώρα	ShutDown	-	-	-	Start
3η ώρα	-	Start	-	ShutDown	-
4η ώρα	Start	-	-	-	-

Πίνακας Π.8 Σημεία αλλαγής έναρξης/κράτησης ΘΜ

Άρα,

$$\begin{aligned} \text{Κόστος Έναρξης/Κράτησης} &= 150 + 500 + 150 + 500 + 300 + 120 + 250 \\ &= 1.970\text{€} \end{aligned}$$

Έπειτα ακολουθεί ο βέλτιστος καταμερισμός της παραγόμενης ισχύος. Αυτό επιτυγχάνεται με τη βοήθεια της συνάρτησης `fmincon`. Στο παράδειγμά ωστόσο ο μετρητής είναι

$$\text{Μετρητής Παραβάσεων} = 7 > 0$$

Άρα το συνολικό κόστος σε αυτή τη περίπτωση είναι

$$TC = 10^9\text{€} + \text{Κόστος Έναρξης/Κράτησης}$$

Έπειτα από τα παραπάνω βήματα, και αφού έχει υπολογιστεί το TC για όλα τα σωματίδια του σμήνους, ο αλγόριθμος της ΒΣΣ (PSO) συγκρίνει τα αποτελέσματα μεταξύ των σωματιδίων και επιλέγει εκείνο με τη μικρότερη τιμή και προσωπική βέλτιστη του σωματιδίου (*pbest*). Εάν πρόκειται για τη πρώτη επανάληψη, αυτή η τιμή θα είναι και η ολική βέλτιστη (*gbest*), ενώ στις επόμενες επαναλήψεις η επικρατέστερη τιμή θα συγκρίνεται με την ολική βέλτιστη (*gbest*) ώστε να επικρατήσει η μικρότερη τιμή

Ακολουθεί η ενότητα των εφαρμογών.

7.2 Εφαρμογή του αλγορίθμου στο Σύστημα της Κρήτης

Στο Σ.Η.Ε της Κρήτης βρίσκονται σε λειτουργία 3 σταθμοί παραγωγής τους οποίους διαχειρίζεται αποκλειστικά η Δ.Ε.Η. και βρίσκονται [1. Αντωνίου Α. 2013]:

- Στα Λινοπεράματα του νομού Ηρακλείου, 6 χιλιόμετρα Δυτικά της πόλης του Ηρακλείου.
- Στη Ξυλοκαμάρια του νομού Χανίων, 6 χιλιόμετρα Ανατολικά της πόλης των Χανίων.
- Στον Αθρινόλακκο του νομού Λασιθίου, περίπου 25 χιλιόμετρα Νότια από την πόλη της Σητείας.

Όπου διαθέτουν :

- Ατμοστροβλικές Μονάδες (Μονάδες βάσης).
- Μηχανές Εσωτερικής Καύσης ή Μ.Ε.Κ. (Μονάδες βάσης, μεσαίου φορτίου).
- Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου (Μονάδες βάσης, μεσαίου φορτίου).
- Αεριοστροβλικές Μονάδες (Μονάδες φορτίου αιχμής).

Σταθμός Παραγωγής	Αεριοστρόβιλος	Ατμοστρόβιλος	Μηχανή Ντίζελ	Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου	Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς(MW)
Ηρακλείου	5	6	4	-	265
Χανίων	6	-	-	1	348
Λασιθίου	-	2	2	-	190
Σύνολο	11	8	6	1	803

Πίνακας 7.2.1 Μονάδες ανά σταθμό παραγωγής στο Σ.Η.Ε Κρήτης

Όπως εμφανίζεται στο παραπάνω πίνακα, ο Σταθμός Παραγωγής των Χανίων έχει τη μεγαλύτερη συνολική εγκατεστημένη ισχύ, με 348 MW, καλύπτοντας το 43% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στο ΣΗΕ Κρήτης. Αποτελείται από τις περισσότερες αεριοστροβλικές μονάδες του συστήματος από τις οποίες, οι έξι λειτουργούν αυτόνομα, ενώ άλλες δύο λειτουργούν συνδυασμένα με μία ατμοηλεκτρική μονάδα (λειτουργία Συνδυασμένου Κύκλου).

Οι αεριοστροβλικές μονάδες είναι μονάδες μεγάλης εγκατεστημένης ισχύος καθώς χρησιμοποιούνται ως μονάδες αιχμής, 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, με μέγιστη καθαρή ισχύ στα 126 MW.

Πιο αναλυτικά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ΘΜ ΣΗΕ Κρήτης είναι

ΘΜ	ATM 1 ΛΙΝ	ATM 2 ΛΙΝ	ATM 3 ΛΙΝ	ATM 4 ΛΙΝ	ATM 5 ΛΙΝ	ATM 6 ΛΙΝ	DIESEL 1 ΛΙΝ	DIESEL 2 ΛΙΝ	DIESEL 3 ΛΙΝ	DIESEL 4 ΛΙΝ	AEP 1 ΛΙΝ	AEP 2 ΛΙΝ	AEP 3 ΛΙΝ	AEP 4 ΛΙΝ	AEP 5 ΛΙΝ	AEP 7 Σ.Κ	AEP 1 ΧΑΝ	AEP 4 ΧΑΝ	AEP 5 ΧΑΝ	AEP 11	AEP 12	AEP 13	DIESEL 1 ΑΘΕΡ	DIESEL 2 ΑΘΕΡ	ATM 1 ΑΘΕΡ	ATM 2 ΑΘΕΡ
d	0.001	0.001	0.001	0	0	0	0	0	0	0.01	800	1622.8	2418	1093.8	1675.8	5120	2170	2865	3757	5000	5000	1675.8	0.27	0.27	0.8	0.8
c	727.6	378.94	378.94	355.09	300.58	300.58	230.37	230.37	230.37	230.37	581.5	280.49	197.65	234.95	196.29	145.64	267	219	275	227	227	196.29	222.6	222.6	282.91	282.91
b	-167.2	-11.824	-11.824	-8.053	-4.166	-4.166	-8.378	-8.378	-8.378	-8.378	-5.87	-6.777	0.2533	0.7913	0.3605	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.3605	-1.3	-1.3	-0.958	-0.958
a	17.377	0.476	0.476	0.18	0.092	0.092	0.421	0.421	0.421	0.421	0.248	0.3195	0.0001	0.0001	0.001	0.001	0	0	0	0.001	0.001	0.001	0.017	0.017	-0.003	-0.003
fuel_cost	0.4149	0.4149	0.4149	0.4149	0.4149	0.4149	0.4149	0.4148	0.4149	0.4148	0.6982	0.6982	0.6982	0.6982	0.6982	0.6962	0.6962	0.6962	0.6962	0.6962	0.6962	0.6962	0.3919	0.3919	0.3919	0.3919
start_up	2500	2500	2500	4000	4000	4000	220	220	219	220	179.1	500	1413	858	350	440.41	99	1300	400	0.1	0.1	858	270	270	350	350
Pmax	6	14	14	24	24	24	11	11	11	11	15	15	43	14	28	126	14	20	28	58	58	28	50	50	43	43
Pmin	4	8	8	18	18	18	3	3	6	3	3	3	5	3	5	35	3	3	5	10	10	5	35	25	22	22
emissions	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,95	0,95	0,95	0,95

Πίνακας 7.2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά ΘΜ Σ.Η.Ε. Κρήτης [1. Αντωνίου Α. 2013]

Τα παραπάνω αριθμητικά δεδομένα βασίστηκαν σε στοιχεία της ΔΕΗ και άλλων διπλωματικών εργασιών. Επομένως, τα δεδομένα είναι συνδυαστικά και αποτελούν μία προσέγγιση χωρίς να συνθέτουν την πλήρως ρεαλιστική εικόνα των μονάδων.

Όπου,

a, b, c, d Συντελεστές της συνάρτησης μεταβλητού κόστους λειτουργίας της κάθε μονάδας με $a_i \rightarrow \text{Kg/MWh}^3$, $b_i \rightarrow \text{Kg/MWh}^2$, $c_i \rightarrow \text{Kg/MWh}$ και $d_i \rightarrow \text{Kg-lt}$

fuel_cost Κόστος καυσίμου € / κιλό

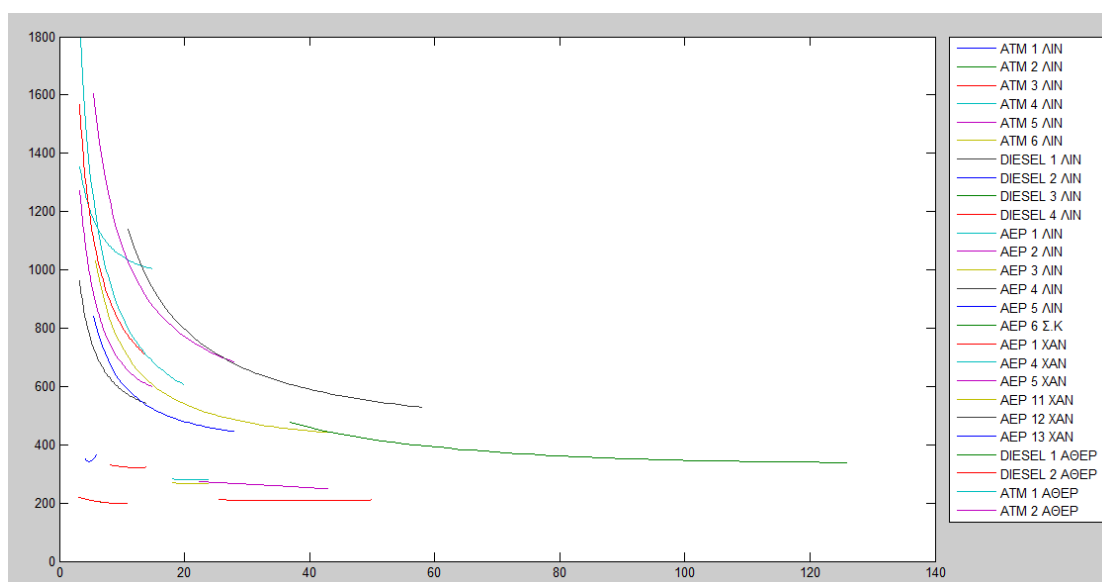
start_up Κόστος έναρξης ΘΜ σε €

P max, P min Μέγιστη / ελάχιστη παραγωγή των ΘΜ σε MW

Emissions Ποσότητα παραγόμενων ρύπων kg/kWh [3. EIA 2016]

Σε αυτή την ενότητα θα επιλυθεί η βέλτιστη ένταξη των θερμικών μονάδων του Σ.Η.Ε. Κρήτης σε δύο διαφορετικές περιόδους όπου υπάρχει εντονότερη ζήτηση. Η μια ημέρα θα είναι για τη χειμερινή περίοδο το μήνα Ιανουάριο, ενώ η δεύτερη τη θερινή περίοδο το μήνα Αύγουστο.

Σημαντικό ρόλο στην επιλογή της αρχικής κατάστασης λειτουργίας των μονάδων είχε το Ειδικό Κόστος Καυσίμου για κάθε μονάδα, όπου αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 7.2.1 Ειδικό Κόστος Καυσίμου για κάθε Μονάδα του Σ.Η.Ε. Κρήτης

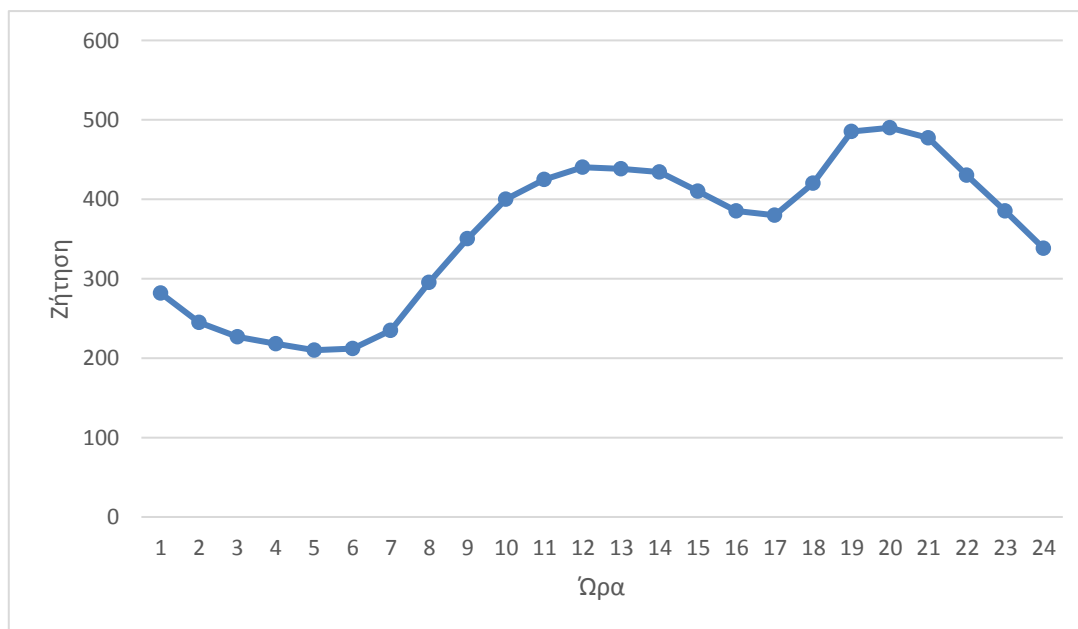
Η Αρχική Κατάσταση Λειτουργίας των μονάδων διαμορφώνεται :

Ανοιχτές	Κλειστές
2,3,4,5,6,7,8,9,10,24,23,25,26	1,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22

Πίνακας 7.2.3 Αρχική Κατάσταση Λειτουργίας Θερμικών Μονάδων Σ.Η.Ε. Κρήτης

7.2.1 Χειμερινή Περίοδος

Από τη Τυπική καμπύλη Ζήτησης, παρατηρείται ότι οι ώρες αιχμής κατά τη χειμερινή περίοδο παρουσιάζονται στο διάστημα 19:00 – 21:00, καθώς και στο διάστημα 11:00-14:00. Η υψηλότερη τιμή της σημειώνεται στα 490 MW στις 20:00, ενώ η χαμηλότερη στα 210 MW στις 05:00.



Σχήμα 7.2.1.1 Τυπική Καμπύλη Ζήτησης [1. Αντωνίου Α. 2013]

Οι παράμετροι που επιλέχτηκαν για τη προσομοίωση είναι:

- | | |
|--|------------------------------|
| • Αριθμός σωματιδίων | 100 |
| • Αριθμός επαναλήψεων | 200 |
| • Αριθμός δυνατότητας αλλαγής κατάστασης λειτουργίας ανά ώρα | 2 |
| • Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων | 350.000 kgCO ₂ /h |

Τα συνολικό κόστος που εξήγαγε ο αλγόριθμος, μη έχοντας βάλει κάποιο περιορισμό ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους, ήταν 1.404.161,5963 € και η μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων ήταν 406.500 kg CO₂/h .

Έπειτα από την επιβολή του ορίου ρύπων, ο χρόνος της προσομοίωσης διήρκεσε 14 λεπτά και 32 δευτερόλεπτα :

- | | |
|--|-------------------------------|
| • με το κόστος να ανέρχεται στα | 1.493.413,8829 € |
| • και η μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων να είναι | 349.250 kg CO ₂ /h |

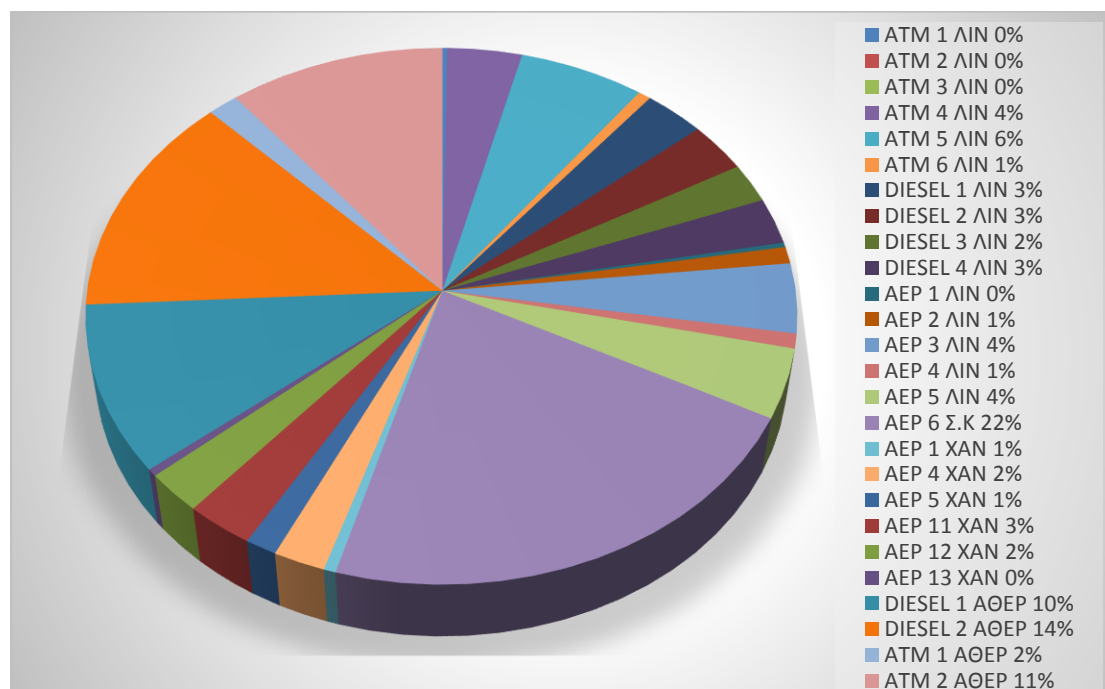
Έτσι εμφανίζεται μία μείωση κατά 14,08% (57.250 kg CO₂/h) στη μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων, με αύξηση 5,98% (89.252,29€) στο συνολικό κόστος.

Στις επόμενες σελίδες ακολουθούν πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με τη βοήθεια των γραφημάτων.

	ATM 1 ΛΙΝ	ATM 2 ΛΙΝ	ATM 3 ΛΙΝ	ATM 4 ΛΙΝ	ATM 5 ΛΙΝ	ATM 6 ΛΙΝ	DIESEL 1 ΛΙΝ	DIESEL 2 ΛΙΝ	DIESEL 3 ΛΙΝ	DIESEL 4 ΛΙΝ	AEP 1 ΛΙΝ	AEP 2 ΛΙΝ	AEP 3 ΛΙΝ	AEP 4 ΛΙΝ	AEP 5 ΛΙΝ	AEP 6 Σ.Κ	AEP 1 ΧΑΝ	AEP 4 ΧΑΝ	AEP 5 ΧΑΝ	AEP 11 ΧΑΝ	AEP 12 ΧΑΝ	AEP 13 ΧΑΝ	DIESEL 1 ΑΘΕΡ	DIESEL 2 ΑΘΕΡ	ATM 1 ΑΘΕΡ	ATM 2 ΑΘΕΡ
1:00	0,00	0	0	18	18	18	11	11	11	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	49	49	43	43
2:00	0,00	0	0	18	18	18	11	11	11	11	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0,00	0	0	48,5	48,5	22	22
3:00	0	0	0	18	18	18	10,186	10,191	10,186	10,191	0	3	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	41,1231	41,123	22	22
4:00	0	0	0	18	18	0	10,439	10,444	10,439	10,444	0	3	0	0	0	0	0	3	5	0	0	0	42,6162	42,616	22	22
5:00	0	0	0	18	18	0	9,6347	9,6406	9,6346	9,6406	0	3	0	0	5	0	0	3	5	0	0	0	37,7247	37,725	22	22
6:00	0	0	0	18	18	0	11	11	11	11	0	3	0	0	5	0	0	3	5	0	0	0	47	47	0	22
7:00	0	0	0	19,425	20,57	0	11	11	11	0	0	3	0	3	5	0	0	3	5	0	0	0	50	50	0	43
8:00	0	0	0	24	24	0	11	11	11	0	0	3	0	3	28	0	0	20	5	0	12	0	50	50	0	43
9:00	0	0	0	24	24	0	11	11	11	11	0	3	0	3	28	0	0	20	5	0	28	28	50	50	0	43
10:00	0	0	0	24	24	0	11	11	11	11	0	3	0	3	7,1219	126	0	3	5	0	10	7,8781	50	50	0	43
11:00	0	0	0	24	24	0	11	11	11	11	0	3	0	3	27,826	126	0	15,17	5	0	10	0	50	50	0	43
12:00	0	0	0	24	24	0	11	11	11	11	0	3	32,211	3	22,789	126	0	3	5	0	10	0	50	50	0	43
13:00	0	0	0	24	24	0	11	11	11	11	0	3	30,972	3	22,028	126	0	3	5	0	10	0	50	50	0	43
14:00	0	0	0	24	24	0	11	11	11	11	0	3	26,65	3	19,35	126	3	3	5	0	10	0	50	50	0	43
15:00	0,00	0	0	24	24	0	11	11	11	11	0	3	6,0185	3	5,9815	126	3	3	5	10,00	10	0	50	50	0	43
16:00	0,00	0	0	0	24	0	11	11	11	11	0	3	5,4212	3	5,5788	126	3	3	5	10,00	10	0	50	50	0	43
17:00	4,74	0	0	0	24	0	11	11	11	11	3	3	5	3	5	114,26	3	3	5	10,00	10	0	50	50	0	43
18:00	4,99	0	0	0	24	0	11	11	11	11	3	3	27,89	3	20,121	126	3	3	5	10	0	0	50	50	0	43
19:00	5,43	0	0	0	24	0	11	11	11	11	3	13,012	43	14	28	126	8,561	20	5	58	0	0	0	50	0	43
20:00	5,49	0	0	0	24	0	11	11	0	11	3	13,685	43	14	28	126	14	20	14,83	58,00	0	0	0	50	0	43
21:00	0,00	0	0	0	24	0	11	11	0	11	3	3	43	3	28	126	3	20	5	46,50	46,5	0	0	50	0	43
22:00	0,00	0	0	0	24	0	11	11	0	11	3	3	43	3	28	126	3	20	5	23,00	23	0	0	50	0	43
23:00	0,00	0	0	0	24	0	11	11	0	11	3	3	40,229	3	27,645	126	0	7,126	5	10	10	0	0	50	0	43
0:00	0,00	0	0	0	24	0	11	11	0	11	3	0	15,649	3	12,351	126	0	3	5	10	10	0	0	50	0	43

Πίνακας 7.2.1.1 Παραγόμενη Ισχύς που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα

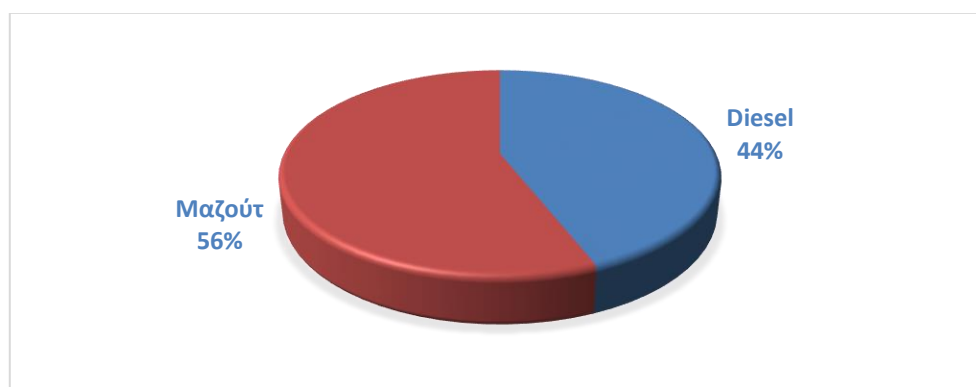
Το ποσοστό συμμετοχής της κάθε μονάδας παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα



Σχήμα 7.2.1.2 Συμμετοχή Μονάδων στην Παραγωγή Ενέργειας

Με τη μεγαλύτερη συμβολή να έχει η μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου με ποσοστό 22% όπως αναμενόταν, καθώς είναι η μεγαλύτερη θερμική μονάδα παραγωγής της Κρήτης, ενώ ακολουθούν οι μονάδες ντίζελ με 10% και 14% αντίστοιχα και μια ατμοστροβιλική με 11%, από τον σταθμό Αθερινόλακκου Λασιθίου.

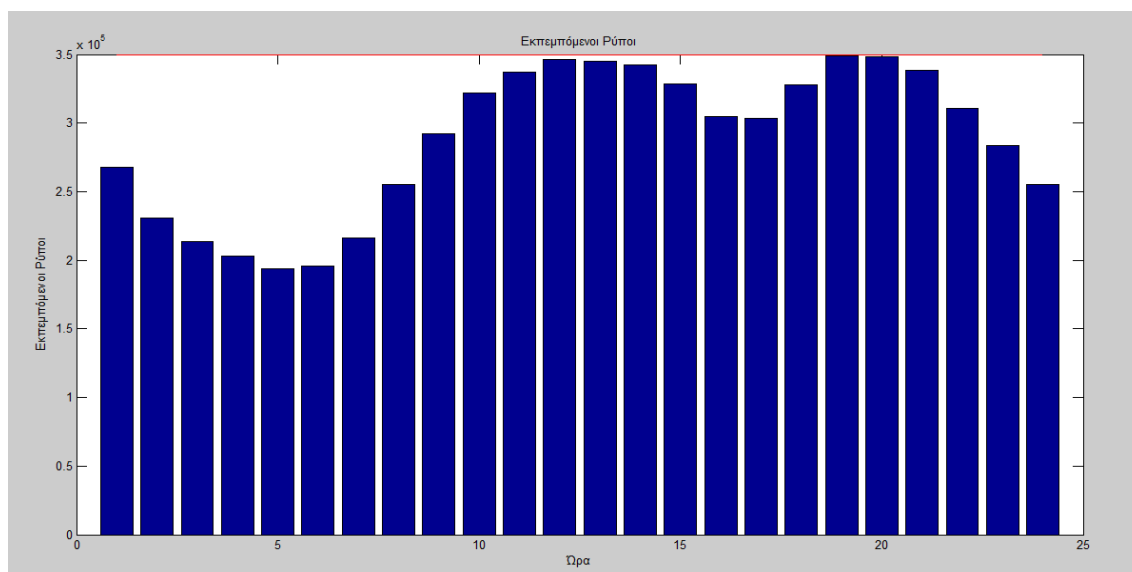
Το ποσοστό ανά τύπο καυσίμου για την κάλυψη της ζήτησης είναι



Σχήμα 7.2.1.3 Κατανομή της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος πηγής παραγωγής με βάση το καύσιμο

Όπου γίνεται αντιληπτό πως και τα δύο καύσιμα χρησιμοποιήθηκαν σε μεγάλο βαθμό, καλύπτοντας το καθένα σχεδόν τη μισή ζήτηση, με τη διαφορά να είναι στο +12% για το μαζούτ.

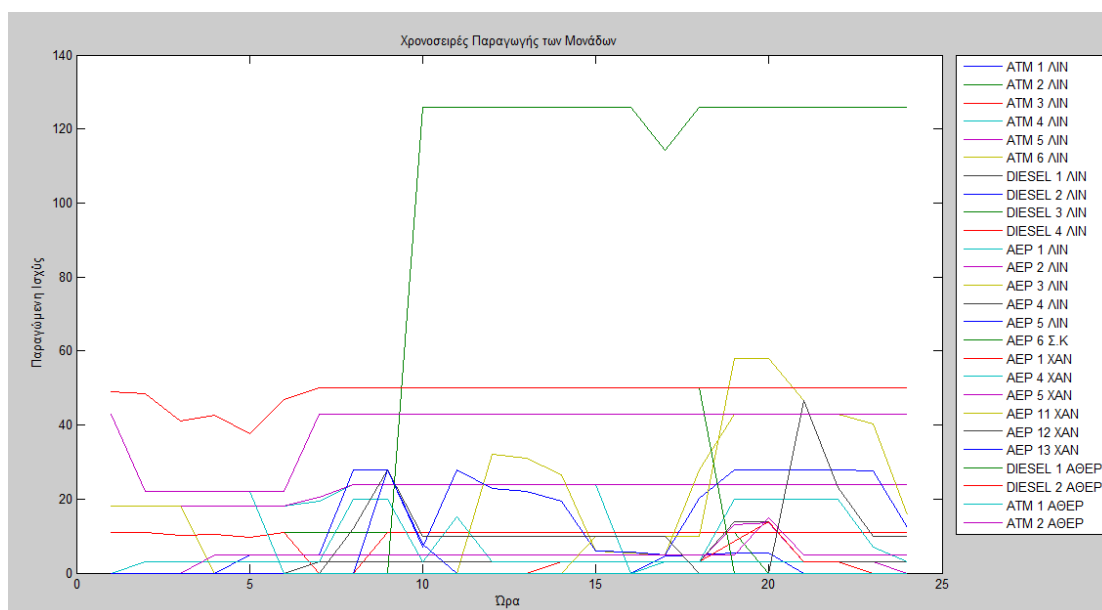
Σαν αποτέλεσμα, δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους, διότι όπως παρατηρείται και από το επόμενο γράφημα τηρείται το ανώτατο όριο εκπεμπόμενων ρύπων όλο το 24ωρο.



Σχήμα 7.2.1.4 Εκπεμπόμενοι Ρύποι ανά ώρα
(Κόκκινη Γραμμή : Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων)

Παρακάτω, παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα, σε δύο διαφορετικά σχήματα.

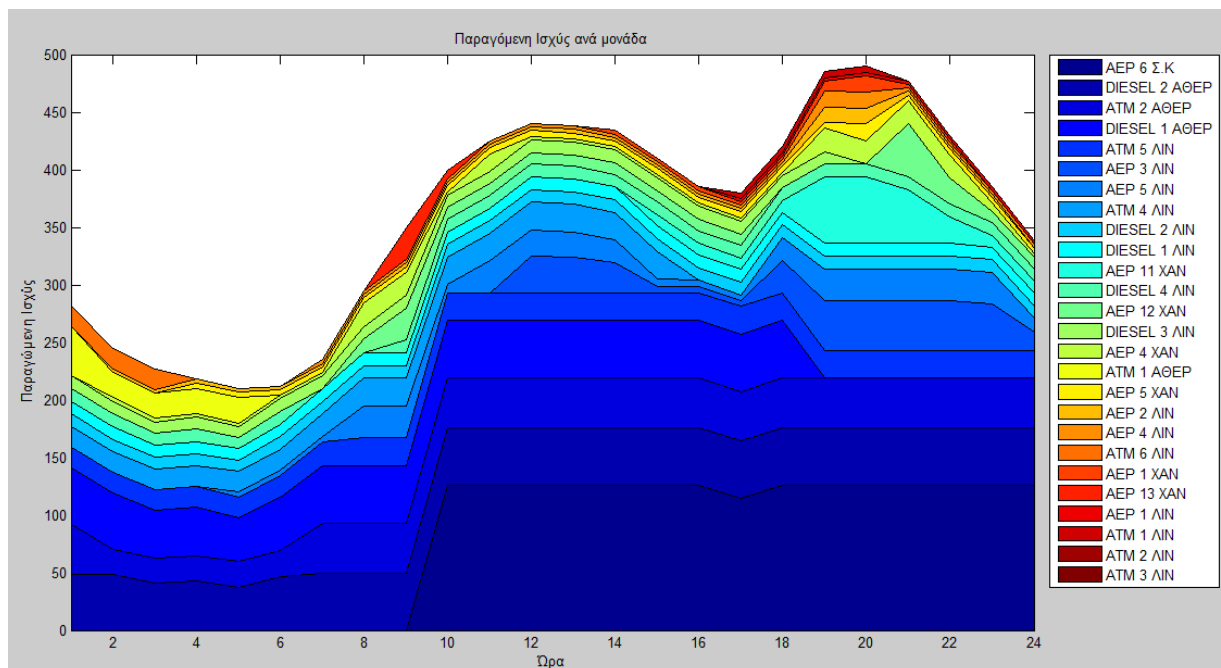
Στο πρώτο μεμονωμένα, δηλαδή η κάθε γραμμή απεικονίζει τη προσφερόμενη ισχύ κάθε μονάδας στο σύστημα, εντός ενός 24ωρου.



Σχήμα 7.2.1.5 Χρονοσειρές Παραγωγής των Μονάδων

Και στο δεύτερο συγκεντρωτικά, δηλαδή ποιες μονάδες καλύπτουν :

- το φορτίο βάσης,
- το κυμαινόμενο φορτίο,
- και το φορτίο αιχμής



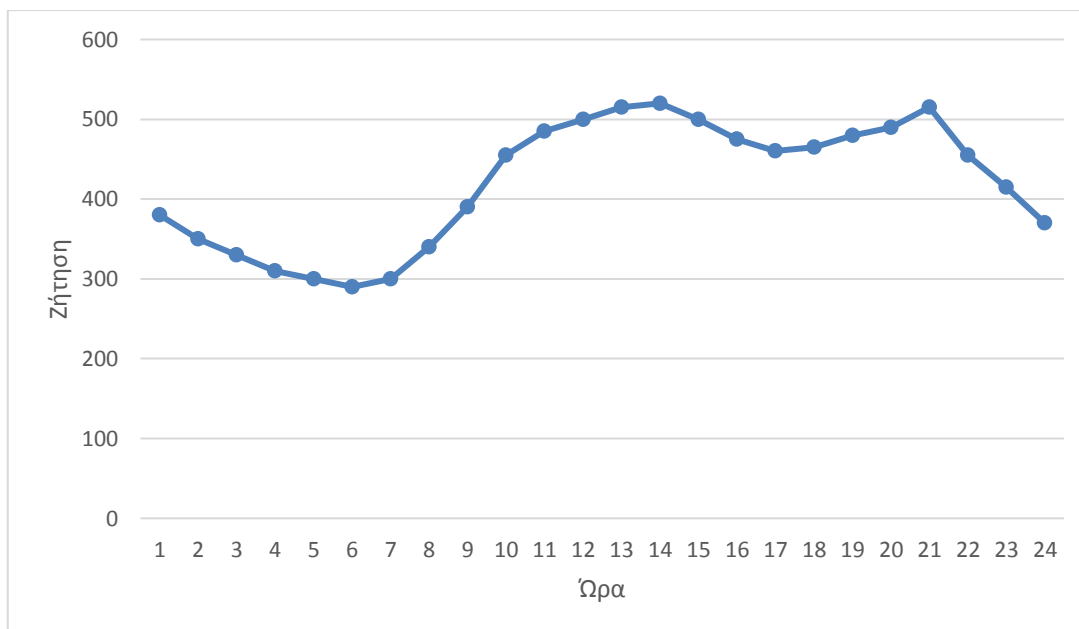
Σχήμα 7.2.1.6 Παραγόμενη Ισχύς ανά μονάδα

Όπου στο φορτίο αιχμής, συμβάλουν οι μονάδες Ατμοστροβίλου 1 και Αεριοστροβίλου 1,2,4 του σταθμού Λινοπεραμάτων, καθώς και οι μονάδες Αεριοστροβίλου 1,5 Χανίων.

Οι μονάδες Ατμοστροβίλου 2,3 Λινοπεραμάτων του νομού Ηρακλείου, κρίθηκαν μη συμφέρουσες σε αυτή την εφαρμογή και δε χρησιμοποιήθηκαν.

7.2.2 Θερινή Περίοδος

Από τη Τυπική καμπύλη Ζήτησης, παρατηρείται ότι οι ώρες αιχμής κατά τη θερινή περίοδο παρουσιάζονται στο διάστημα 12:00 – 15:00, καθώς και στο διάστημα 20:00-21:00. Η υψηλότερη τιμή της σημειώνεται στα 520 MW στις 14:00, ενώ η χαμηλότερη στα 290 MW στις 06:00.



Σχήμα 7.2.2.1 Τυπική Καμπύλη Ζήτησης [1. Αντωνίου Α. 2013]

Οι παράμετροι που επιλέχτηκαν για τη προσομοίωση είναι:

- | | |
|--|------------------------------|
| • Αριθμός σωματιδίων | 100 |
| • Αριθμός επαναλήψεων | 200 |
| • Αριθμός δυνατότητας αλλαγής κατάστασης λειτουργίας ανά ώρα | 2 |
| • Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων | 390.000 kgCO ₂ /h |

Τα συνολικό κόστος που εξήγαγε ο αλγόριθμος, μη έχοντας βάλει κάποιο περιορισμό ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους, ήταν 1.608.424,1016 € και η μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων ήταν 429.290 kg CO₂/h .

Έπειτα από την επιβολή του ορίου ρύπων, ο χρόνος της προσομοίωσης διήρκεσε 19 λεπτά και 56 δευτερόλεπτα :

- | | |
|--|-------------------------------|
| • με το κόστος να ανέρχεται στα | 1.637.732,0892 € |
| • και η μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων να είναι | 389.190 kg CO ₂ /h |

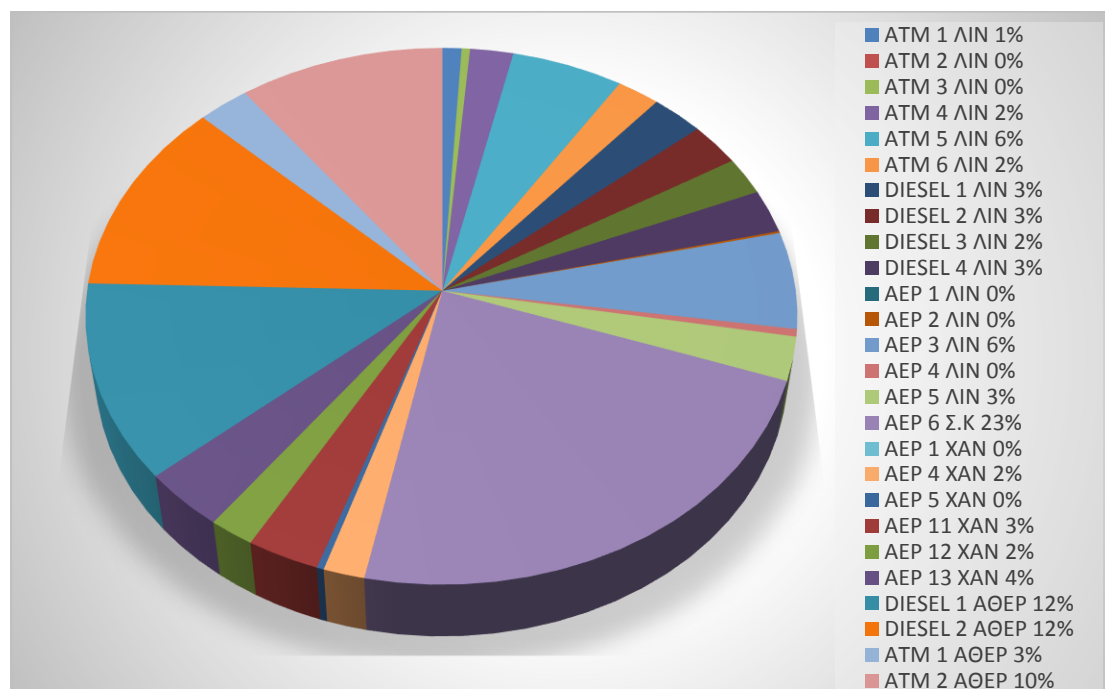
Έτσι εμφανίζεται μία μείωση κατά 9,34 % (40.100 kg CO₂/h) στη μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων, με αύξηση μόνο 1,79 % (29.307,99 €) στο συνολικό κόστος.

Στις επόμενες σελίδες ακολουθούν πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με τη βοήθεια των γραφημάτων

	ATM 1 ΛΙΝ	ATM 2 ΛΙΝ	ATM 3 ΛΙΝ	ATM 4 ΛΙΝ	ATM 5 ΛΙΝ	ATM 6 ΛΙΝ	DIESEL 1 ΛΙΝ	DIESEL 2 ΛΙΝ	DIESEL 3 ΛΙΝ	DIESEL 4 ΛΙΝ	AEP 1 ΛΙΝ	AEP 2 ΛΙΝ	AEP 3 ΛΙΝ	AEP 4 ΛΙΝ	AEP 5 ΛΙΝ	AEP 6 Σ.Κ	AEP 1 ΧΑΝ	AEP 4 ΧΑΝ	AEP 5 ΧΑΝ	AEP 11 ΧΑΝ	AEP 12 ΧΑΝ	AEP 13 ΧΑΝ	DIESEL 1 ΑΘΕΡ	DIESEL 2 ΑΘΕΡ	ATM 1 ΑΘΕΡ	ATM 2 ΑΘΕΡ
1:00	0,00	0	0	23,58	24	24	11	11	11	11	0	0	0	3	0	75,42	0	0	0	0	0	0	50	50	43	43
2:00	4,32	0	0	21,163	23,26	23,26	11	11	11	11	0	0	0	3	0	45,001	0	0	0	0,00	0	0	50	50	43	43
3:00	4,334	0	0	21,363	23,56	0	11	11	11	11	0	0	0	3	0	47,747	0	0	0	0	0	0	50	50	43	43
4:00	4	0	0	18	18	0	11	11	11	11	0	0	5	3	0	35	0	0	5	0	0	0	46	46	43	43
5:00	4	0	0	18	18	0	10,376	10,381	10,376	10,381	0	0	5	3	0	35	0	0	5	0	0	0	42,2438	42,244	43	43
6:00	4,299	0	0	20,762	22,65	0	11	11	11	11	0	0	5	3	0	39,285	0	3	5	0	0	0	50	50	0	43
7:00	4,353	0	0	21,68	24	0	11	11	11	11	0	0	5	3	0	51,967	0	3	0	0	0	0	50	50	0	43
8:00	4,567	0	0	24	24	0	11	11	11	11	0	0	5	3	0	89,433	0	3	0	0	0	0	50	50	0	43
9:00	4,816	0	0	24	24	0	11	11	11	11	0	0	5	3	0	124,18	0	3	0	0	10	5	50	50	0	43
10:00	5,059	0	0	24	24	0	11	11	11	11	0	0	42,941	3	0	126	0	0	5	0	10	28	50	50	0	43
11:00	5,145	0	0	0	24	0	11	11	11	11	0	0	43	3	0	126	0	0	5	31,927	31,927	28	50	50	0	43
12:00	5,16	0	0	0	24	0	11	11	11	11	0	0	43	3	0	126	0	0	5	39,42	39,42	28	50	50	0	43
13:00	5,16	0	0	0	24	0	11	11	11	11	0	0	43	3	0	126	0	20	0	39,42	39,42	28	50	50	0	43
14:00	5,201	0	0	0	24	0	11	11	11	11	0	0	43	3	28	126	0	20	0	55,799	0	28	50	50	0	43
15:00	5,15	0	0	0	24	0	11	11	11	11	0	0	43	3	28	126	0	20	0	35,85	0	28	50	50	0	43
16:00	5,12	0	0	0	24	0	11	11	11	11	0	0	43	0	28	126	0	20	0	13,88	0	28	50	50	0	43
17:00	5,05	0	0	0	24	0	11	11	11	11	0	3	40,297	0	27,686	126	0	8,97	0	10,00	0	28	50	50	0	43
18:00	0,00	0	0	0	24	24	11	11	11	11	0	3	36,494	0	25,398	126	0	3	0	10	0	26,109	50	50	0	43
19:00	0,00	0	0	0	24	24	11	11	0	11	0	3	41	0	28	126	0	20	0	10	0	28	50	50	0	43
20:00	0,00	0	0	0	24	24	11	11	0	11	0	3	41	0	28	126	0	20	0	10,00	10	28	50	50	0	43
21:00	5,13	0	0	0	24	24	11	11	0	11	0	0	43	0	28	126	0	20	0	20,44	20,436	28	50	50	0	43
22:00	4,95	0	14	0	24	24	11	11	11	11	0	0	20,446	0	15,434	126	0	3	0	10,00	10	16,167	50	50	0	43
23:00	4,88	0	14	0	24	24	11	11	11	11	0	0	6,0881	0	6,0283	126	0	3	0	10	10	0	50	50	0	43
0:00	4,99	0	14	0	24	24	11	11	11	11	0	0	29,12	0	20,885	0	0	3	0	10	10	0	50	50	43	43

Πίνακας 7.2.2.1 Παραγόμενη Ισχύς που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα

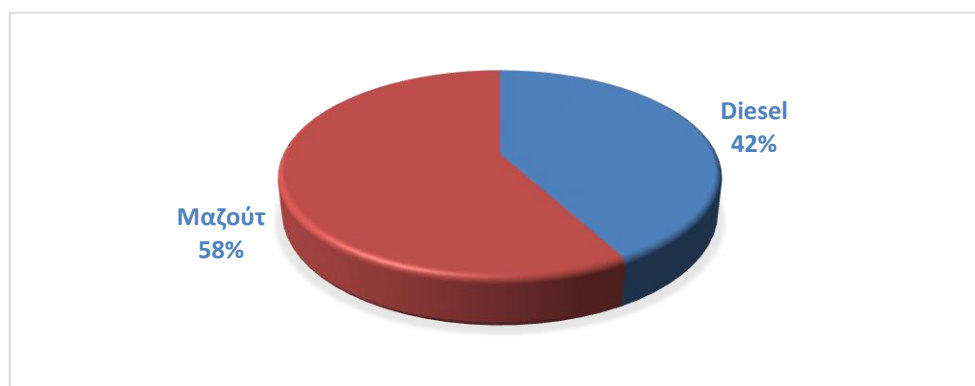
Το ποσοστό συμμετοχής της κάθε μονάδας παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα



Σχήμα 7.2.2.2 Συμμετοχή Μονάδων στην Παραγωγή Ενέργειας

Με τη μεγαλύτερη συμβολή να έχει και πάλι η μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου με ποσοστό 23%, ενώ ακολουθούν οι δύο μονάδες ντίζελ καλύπτοντας 12% της ζήτησης η κάθε μία, καθώς και η μονάδα ατμοστροβίλου με 10% από τον σταθμό Αθερινόλακκου Λασιθίου.

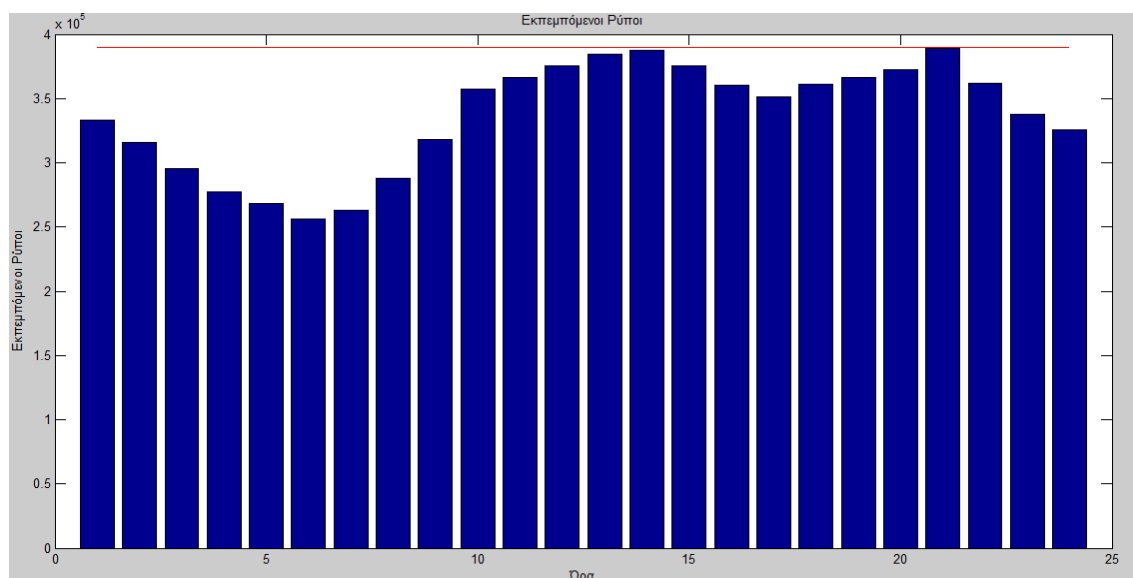
Το ποσοστό ανά τύπο καυσίμου για την κάλυψη της ζήτησης είναι



Σχήμα 7.2.2.3 Κατανομή της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος πηγής παραγωγής με βάση το καύσιμο

Όπου γίνεται αντιληπτό πως το μαζούτ υπερಿಸχύει έναντι του ντίζελ, κάτι που είναι φυσιολογικό καθώς είναι φθηνότερο αλλά και διότι η πλειονότητα των μονάδων δέχεται ως καύσιμη ύλη το μαζούτ.

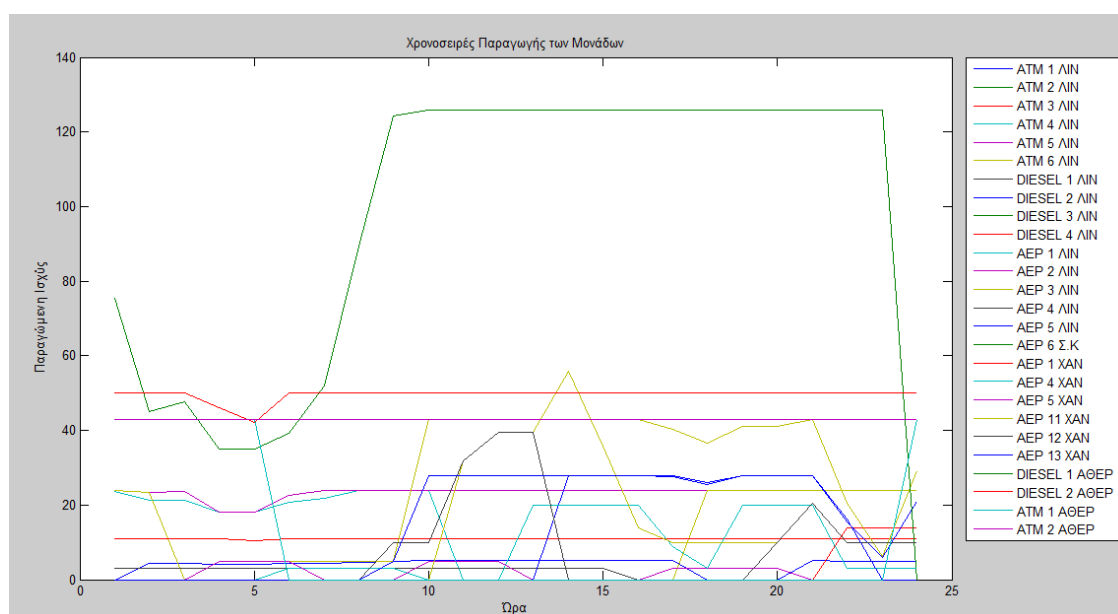
Ωστόσο, δεν αποτελεί κάποιο πρόβλημα ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους καθώς όπως φαίνεται και από το επόμενο γράφημα τηρείται το ανώτατο όριο όλο το 24ωρο, με οριακή τιμή 389.190 kg CO₂/h στις 21:00.



Σχήμα 7.2.2.4 Εκπεμπόμενοι Ρύποι ανά ώρα
(Κόκκινη Γραμμή : Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων)

Παρακάτω, εμφανίζεται η γραφική απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα, σε δύο διαφορετικά σχήματα.

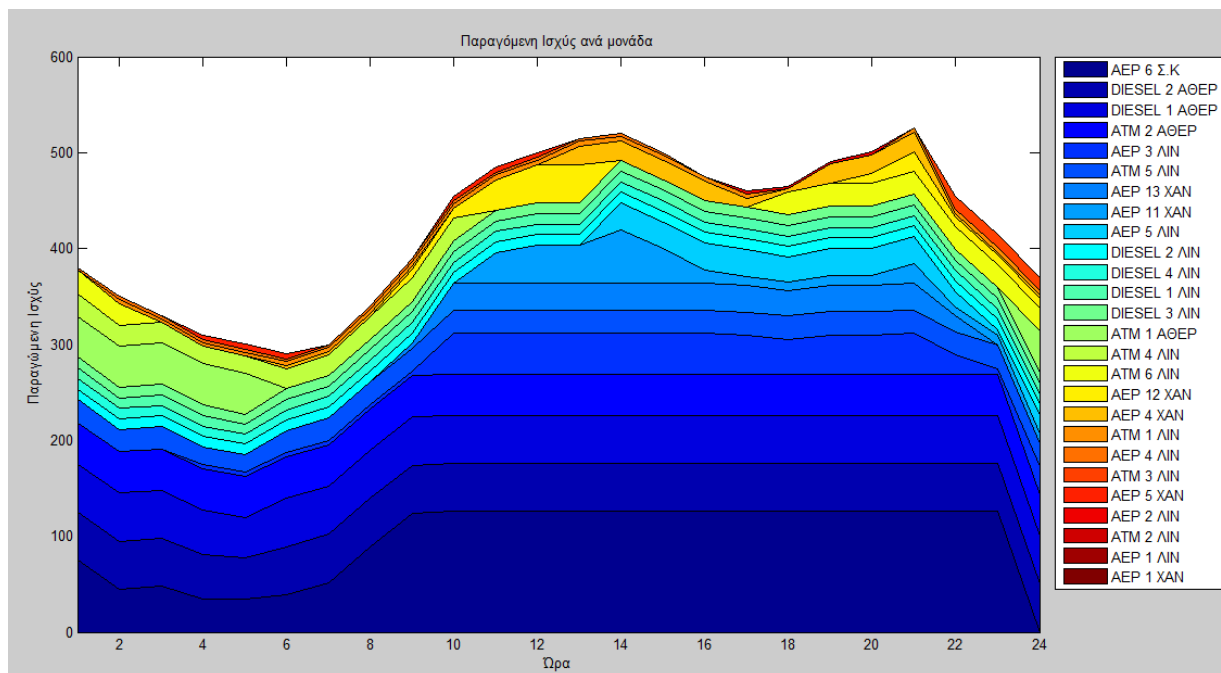
Στο πρώτο μεμονωμένα, δηλαδή η κάθε γραμμή απεικονίζει τη προσφερόμενη ισχύ κάθε μονάδας στο σύστημα, εντός ενός 24ωρου.



Σχήμα 7.2.2.5 Χρονοσειρές Παραγωγής των Μονάδων

Και στο δεύτερο συγκεντρωτικά, δηλαδή ποιές μονάδες καλύπτουν :

- το φορτίο βάσης,
- το κυμαινόμενο φορτίο,
- και το φορτίο αιχμής.



Σχήμα 7.2.2.6 Παραγόμενη Ισχύς ανά μονάδα

Όπου στο φορτίο αιχμής, συμβάλουν οι μονάδες Ατμοστρόβιλου 1 και Αεριοστρόβιλου 2,4 του σταθμού Λινοπεραμάτων, καθώς και οι μονάδες Αεριοστρόβιλου 4,5,12 Χανίων.

Οι μονάδες Αεριοστρόβιλου 1 και Ατμοστρόβιλου 2 του σταθμού Λινοπεραμάτων καθώς και η μονάδα Αεριοστρόβιλου 1 του σταθμού Χανίων, κρίθηκαν μη συμφέρουσες σε αυτή την εφαρμογή και δε χρησιμοποιήθηκαν.

7.3 Εφαρμογή του αλγορίθμου στο Σύστημα της Κύπρου

Η Κύπρος δεν διαθέτει πρωτογενείς πηγές ενέργειας, γι' αυτό η Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου (ΑΗΚ) βασίζεται για την παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας αποκλειστικά σε εισαγόμενα καύσιμα, κυρίως μαζούτ. Λειτουργούν τρεις Ηλεκτροπαραγωγοί Σταθμοί, των οποίων η ιδιοκτησία και ευθύνη λειτουργίας ανήκει στην Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου. Οι Σταθμοί Παραγωγής είναι [2.ΑΗΚ 2016]:

- Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Βασιλικού.
- Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Δεκέλειας .
- Ο Ηλεκτροπαραγωγός σταθμός Μονής.

Οι τρεις Σταθμοί Παραγωγής του νησιού διαθέτουν σχεδόν όλα τα είδη συμβατικών μονάδων που υπάρχουν. Η βασική διαφορά ως προς τον τρόπο λειτουργίας τους, είναι ο τύπος της καύσιμης ύλης που χρησιμοποιούν. Επομένως, υπάρχει μια ποικιλομορφία των συμβατικών μονάδων παραγωγής καθώς περιλαμβάνονται συνολικά τα εξής είδη:

- Ατμοστροβλικές Μονάδες (Μονάδες βάσης).
- Μηχανές Εσωτερικής Καύσης ή Μ.Ε.Κ. (Μονάδες βάσης, μεσαίου φορτίου).
- Μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου (Μονάδες βάσης, μεσαίου φορτίου).
- Αεριοστροβλικές Μονάδες (Μονάδες φορτίου αιχμής).

Σταθμός Παραγωγής	Αεριοστρόβιλος	Ατμοστρόβιλος	ΜΕΚ	Μονάδα Συνδυασμένου Κύκλου	Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς(MW)
Βασιλικού	1	3	-	2	868
Δεκέλεια	-	6	2	-	460
Μονή	4	-	-	-	150
Σύνολο	5	9	2	2	1478

Πίνακας 7.3.1 Μονάδες ανά σταθμό παραγωγής στο Σ.Η.Ε. Κύπρου [2.ΑΗΚ 2016]

Το μεγαλύτερο μέρος της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος βρίσκεται στο σταθμό παραγωγής του Βασιλικού, και προέρχεται από τους τρεις ατμοστρόβιλους των 130 MW αλλά και από τις δύο μονάδες συνδυασμένου κύκλου των 220 MW, με τη συνολική ισχύ του σταθμού να ανέρχεται στα 868 MW.

Πιο αναλυτικά, τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ΘΜ Σ.Η.Ε. Κύπρου είναι :

ΘΜ	ΑΕΡ 1 Μονή	ΑΕΡ 2 Μονή	ΑΕΡ 3 Μονή	ΑΕΡ 4 Μονή	ΑΤΜ 1 Δεκέλεια	ΑΤΜ 2 Δεκέλεια	ΑΤΜ 3 Δεκέλεια	ΑΤΜ 4 Δεκέλεια	ΑΤΜ 5 Δεκέλεια	ΑΤΜ 6 Δεκέλεια	ΜΕΚ 1 Δεκέλεια	ΜΕΚ 2 Δεκέλεια	ΑΤΜ 1 Βασιλικό	ΑΤΜ 2 Βασιλικό	ΑΤΜ 3 Βασιλικό	ΑΕΡ 1 Βασιλικό	ΑΕΡ 1 Σ.Κ Βασιλικό	ΑΕΡ 2 Σ.Κ Βασιλικό
d	2563.3	2563.3	2563.3	2563.3	2932.9	2932.9	2932.9	2932.9	2932.9	2932.9	721.5	721.5	3627.8	3627.8	3627.8	2563.3	3833.7	3833.7
c	174.73	174.73	174.73	174.73	185.73	185.73	185.73	185.73	185.73	185.73	158.57	158.57	167.45	167.45	167.45	174.73	115.15	115.15
b	0.7508	0.7508	0.7508	0.7508	0.8282	0.8282	0.8282	0.8282	0.8282	0.8282	0.5319	0.5319	0.1952	0.1952	0.1952	0.7508	0.054	0.054
a	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
fuel_cost	0.539	0.539	0.539	0.539	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359	0.359	0.539	0.539	0.539
start_up	8	8	8	8	10	10	10	10	10	10	270	270	10	10	10	8	440.01	440.01
P _{max}	36	36	36	36	60	60	60	60	60	60	50	50	130	130	130	36	210	210
P _{min}	4	4	4	4	30	30	30	30	30	30	0	0	60	60	60	4	60	60
emissions	0,6	0,6	0,6	0,6	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,6	0,6	0,6

Πίνακας 7.3.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά ΘΜ Σ.Η.Ε. Κύπρου [1. Αντωνίου Α. 2013]

Τα παραπάνω αριθμητικά δεδομένα βασίστηκαν σε στοιχεία της ΑΗΚ και άλλων διπλωματικών εργασιών. Επομένως, τα δεδομένα είναι συνδυαστικά και αποτελούν μία προσέγγιση χωρίς να συνθέτουν την πλήρως ρεαλιστική εικόνα των μονάδων.

Όπου,

a, b, c, d Συντελεστές της συνάρτησης μεταβλητού κόστους λειτουργίας της κάθε μονάδας με $a_i \rightarrow \text{Kg/MWh}^3$, $b_i \rightarrow \text{Kg/MWh}^2$, $c_i \rightarrow \text{Kg/MWh}$ και $d_i \rightarrow \text{Kg-lt}$

fuel_cost Κόστος καυσίμου € / κιλό

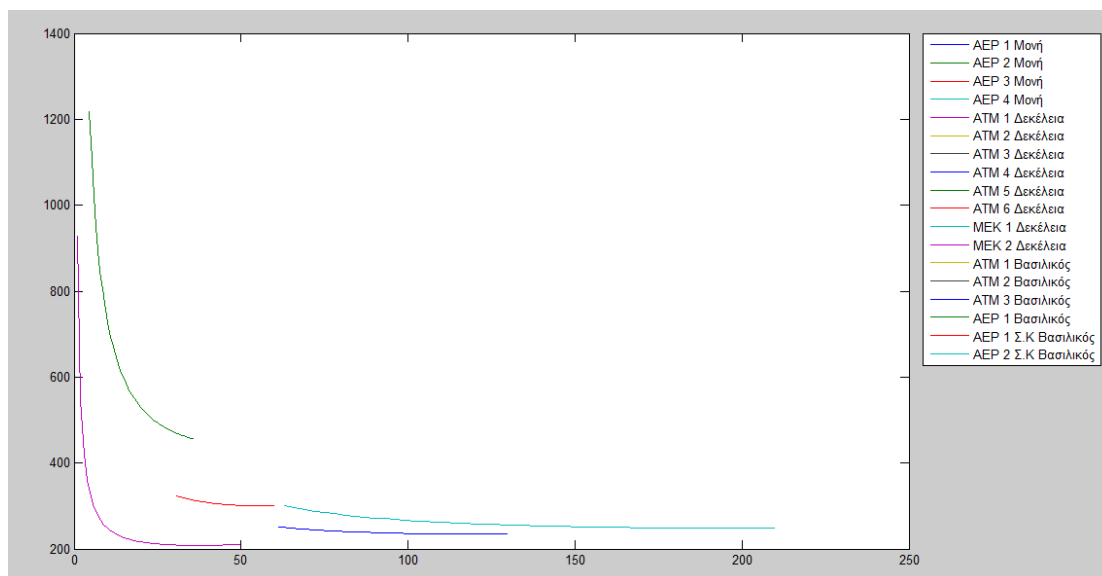
start_up Κόστος έναρξης ΘΜ

P_{max}, P_{min} Μέγιστη / ελάχιστη παραγωγή των ΘΜ

Emissions Ποσότητα παραγόμενων ρύπων kg/kWh [3. EIA 2016]

Σε αυτή την ενότητα θα μελετηθεί η βέλτιστη ένταξη των θερμικών μονάδων του Σ.Η.Ε. Κύπρου σε δύο διαφορετικές περιόδους όπου υπάρχει εντονότερη ζήτηση. Η μία ημέρα θα είναι για τη χειμερινή περίοδο το μήνα Ιανουάριο, ενώ η δεύτερη την θερινή περίοδο το μήνα Αύγουστο.

Σημαντικό ρόλο στην επιλογή της αρχικής κατάστασης λειτουργίας των μονάδων είχε το Ειδικό Κόστος Καυσίμου για κάθε μονάδα, όπου αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα.



Σχήμα 7.3.1 Ειδικό Κόστος Καυσίμου για κάθε Μονάδα του ΣΗΕ Κύπρου

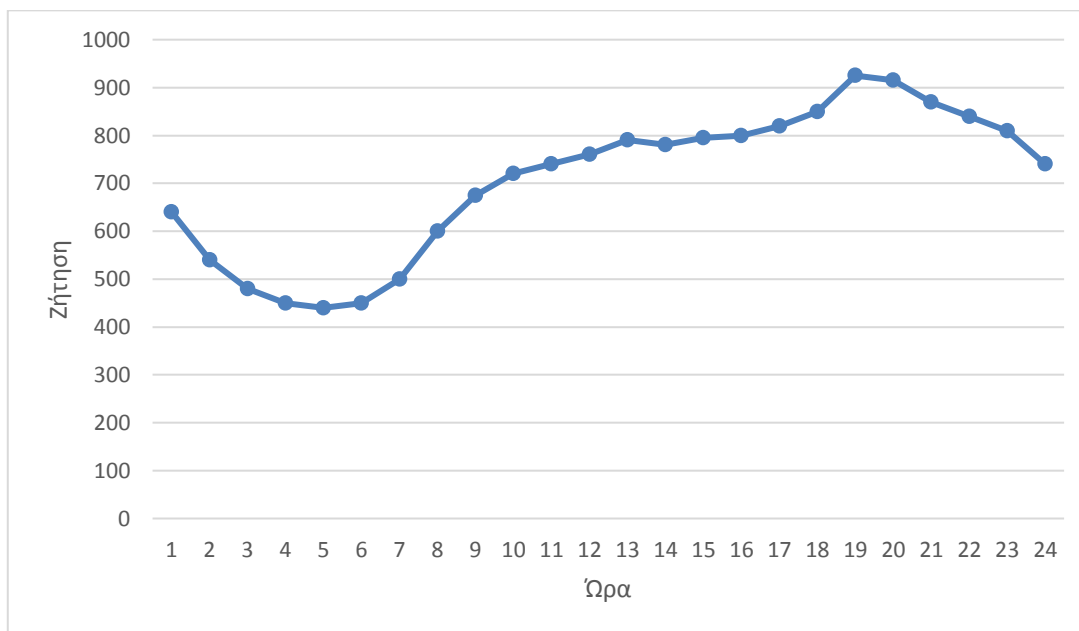
Η Αρχική Κατάσταση Λειτουργίας των μονάδων διαμορφώνεται :

Ανοιχτές	Κλειστές
5,6,11,12,13,14,15,17,18	1,2,3,4,7,8,9,10,16

Πίνακας 7.3.3 Αρχική Κατάσταση Λειτουργίας Θερμικών Μονάδων Σ.Η.Ε. Κύπρου

7.3.1 Χειμερινή Περίοδος

Από τη Τυπική καμπύλη Ζήτησης, παρατηρείται ότι οι ώρες αιχμής κατά τη χειμερινή περίοδο παρουσιάζονται στο διάστημα 19:00 – 21:00. Η υψηλότερη τιμή της σημειώνεται στα 925 MW στις 19:00, ενώ η χαμηλότερη στα 440 MW στις 05:00.



Σχήμα 7.3.1.1 Τυπική Καμπύλη Ζήτησης [1. Αντωνίου Α. 2013]

Οι παράμετροι που επιλέχτηκαν για την προσομοίωση είναι:

- | | |
|--|------------------------------|
| • Αριθμός σωματιδίων | 100 |
| • Αριθμός επαναλήψεων | 200 |
| • Αριθμός δυνατότητας αλλαγής κατάστασης λειτουργίας ανά ώρα | 2 |
| • Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων | 710.000 kgCO ₂ /h |

Το συνολικό κόστος που εξήγαγε ο αλγόριθμος, μη έχοντας βάλει κάποιο περιορισμό ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους, ήταν 1.673.016,677 € και η μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων ήταν 763.240 kg CO₂/h .

Έπειτα από την επιβολή του ορίου ρύπων, ο χρόνος της προσομοίωσης διήρκεσε 31 λεπτά και 11 δευτερόλεπτα :

- | | |
|--|-------------------------------|
| • με το κόστος να ανέρχεται στα | 1.685.907,2394 € |
| • και η μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων να είναι | 709.000 kg CO ₂ /h |

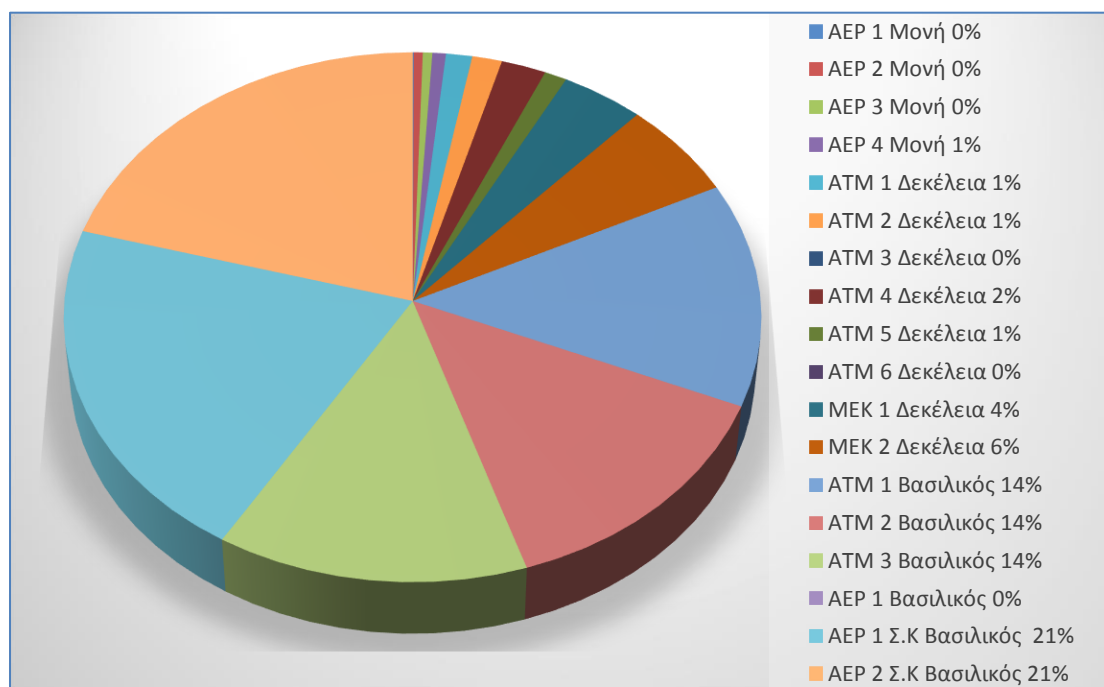
Έτσι εντοπίζεται μία μείωση κατά 7,1% (54.236 kg CO₂/h) στη μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων, με αύξηση μόνο 0,76% (12.891 €) στο συνολικό κόστος.

Στις επόμενες σελίδες ακολουθούν πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με τη βοήθεια των γραφημάτων.

	ΑΕΡ 1 Μονή	ΑΕΡ 2 Μονή	ΑΕΡ 3 Μονή	ΑΕΡ 4 Μονή	ΑΤΜ 1 Δεκέλεια	ΑΤΜ 2 Δεκέλεια	ΑΤΜ 3 Δεκέλεια	ΑΤΜ 4 Δεκέλεια	ΑΤΜ 5 Δεκέλεια	ΑΤΜ 6 Δεκέλεια	ΜΕΚ 1 Δεκέλεια	ΜΕΚ 2 Δεκέλεια	ΑΤΜ 1 Βασιλικός	ΑΤΜ 2 Βασιλικός	ΑΤΜ 3 Βασιλικός	ΑΕΡ 1 Βασιλικός	ΑΕΡ 1 Σ.Κ Βασιλικός	ΑΕΡ 2 Σ.Κ Βασιλικός
1:00	0	0	0	0	30	30	0	0	30	0	37,86482	37,86482	76,9799	76,9799	76,97988	0	121,6653	121,6653
2:00	0	4	0	0	30	30	0	0	30	0	32,03673	32,03673	62,35406	62,35406	62,35406	0	97,43219	97,43218
3:00	4	4	0	0	30	30	0	0	30	0	26,87717	26,87717	60	60	60	0	74,12283	74,12284
4:00	4	0	0	0	30	30	0	30	30	0	13	13	60	60	60	0	60	60
5:00	0	0	0	0	30	0	0	30	30	0	24,13785	24,13785	60	60	60	0	60,86215	60,86215
6:00	0	0	0	4	30	0	0	30	30	0	24,64222	24,64222	60	60	60	0	63,35779	63,35776
7:00	0	4	0	4	30	0	0	30	30	0	28,64913	28,64913	60	60	60	0	82,35089	82,35086
8:00	0	4	0	4	30	0	0	30	0	0	36,83818	36,83818	74,42103	74,42101	74,42101	0	117,5303	117,5303
9:00	0	4	0	4	0	0	0	30	0	0	42,93262	42,93262	89,50138	89,50138	89,50139	0	141,3153	141,3153
10:00	0	4	4	4	0	0	0	30	0	0	45,37823	45,37823	95,48171	95,4817	95,4817	0	150,3992	150,3992
11:00	0	0	4	4	0	30	0	30	0	0	45,01805	45,01805	94,60361	94,60361	94,6036	0	149,0765	149,0766
12:00	0	0	4	4	0	30	0	30	0	0	46,22182	46,22182	97,53373	97,5337	97,53375	0	153,4776	153,4776
13:00	0	0	0	4	0	30	0	0	0	0	50	50	107,0272	107,0272	107,0272	0	167,4592	167,4592
14:00	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	50	50	110,4222	110,4222	110,4222	0	172,3667	172,3667
15:00	0	0	0	4	0	0	0	30	0	0	50	50	107,8744	107,8744	107,8744	0	168,6883	168,6884
16:00	0	0	0	4	0	0	0	30	0	0	50	50	108,7227	108,7227	108,7227	0	169,916	169,916
17:00	0	0	4	4	0	0	0	30	0	0	50	50	111,4438	111,4438	111,4438	0	173,8343	173,8343
18:00	0	4	4	4	0	0	0	0	0	0	50	50	121,0449	121,0449	121,0449	0	187,4327	187,4327
19:00	0	21,67	21,67	21,67	0	0	0	0	0	0	0	50	130	130	130	0	210	210
20:00	0	18,33	18,33	18,33	0	0	0	0	0	0	0	50	130	130	130	0	210	210
21:00	0	4	4	4	0	0	0	0	0	0	0	50	130	130	130	0	209	209
22:00	0	0	4	4	0	0	0	0	0	0	0	50	128,6674	128,6674	128,6674	0	197,999	197,999
23:00	0	0	4	4	0	30	0	0	0	0	0	50	118,2897	118,2897	118,2897	0	183,5655	183,5655
0:00	0	0	4	4	0	30	0	0	0	0	0	49,87395	106,3711	106,3711	106,3712	0	166,5063	166,5063

Πίνακας 7.3.1.1 Παραγόμενη Ισχύς που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα

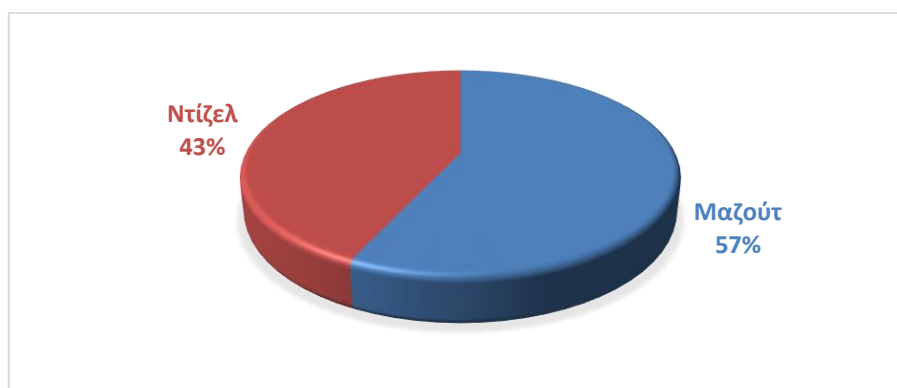
Το ποσοστό συμμετοχής της κάθε μονάδας παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα



Σχήμα 7.3.1.2 Συμμετοχή Μονάδων στην Παραγωγή Ενέργειας

Με τη μεγαλύτερη συμβολή να έχουν όπως αναμενόταν οι μονάδες στον σταθμό παραγωγής του Βασιλικού, με τις δύο μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου και τις τρεις Ατμοστροβιλικές μονάδες να καλύπτουν όλες μαζί το 84% της ζήτησης.

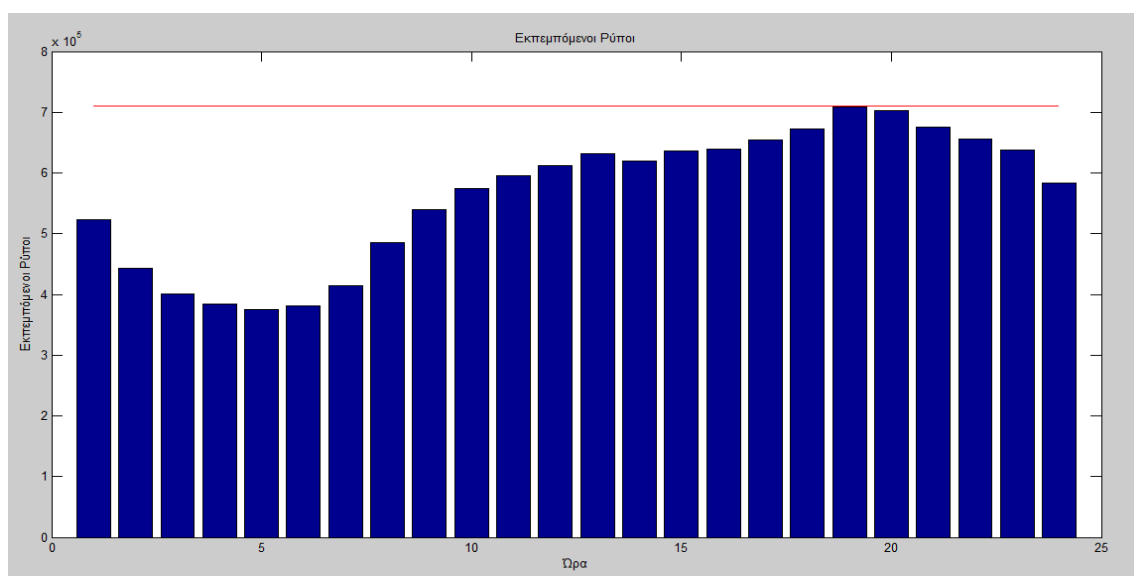
Το ποσοστό ανά τύπο καυσίμου για την κάλυψη της ζήτησης είναι



Σχήμα 7.3.1.3 Κατανομή της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος πηγής παραγωγής με βάση το καύσιμο

Όπου το Μαζούτ αποτελεί για ακόμη μια φορά τη πλειοψηφία της καύσιμης ύλης που χρησιμοποιείται για τη κάλυψη της ζήτησης, έναντι του Ντίζελ.

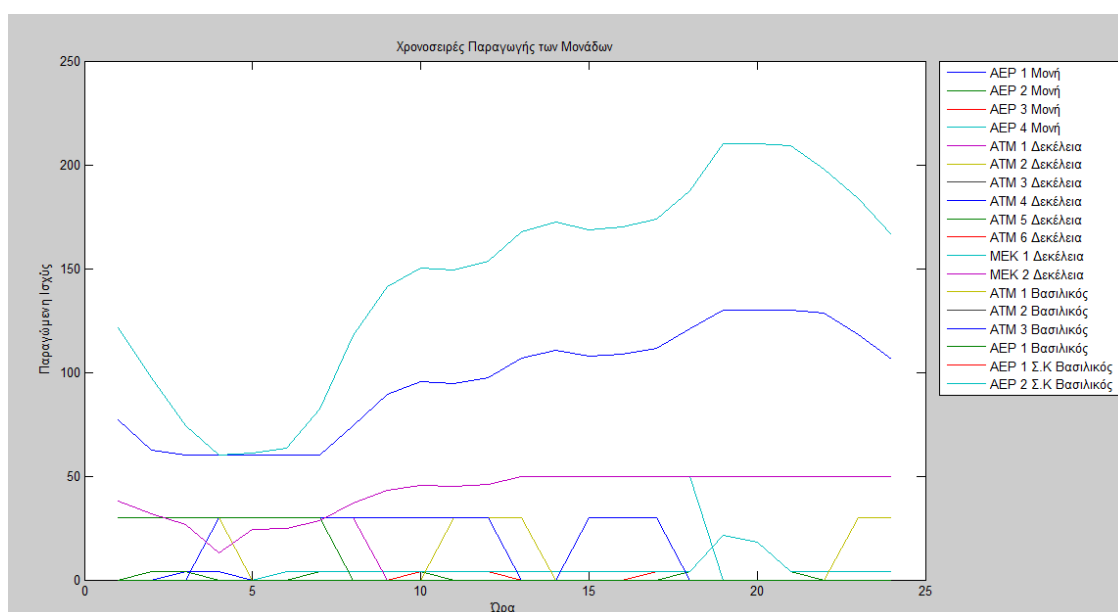
Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους, διότι όπως παρατηρείται και από το επόμενο γράφημα τηρείται το ανώτατο όριο όλο το 24ωρο.



Σχήμα 7.3.1.4 Εκπεμπόμενοι Ρύποι ανά ώρα
(Κόκκινη Γραμμή : Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων)

Παρακάτω, παρουσιάζεται η γραφική απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα, σε δύο διαφορετικά σχήματα.

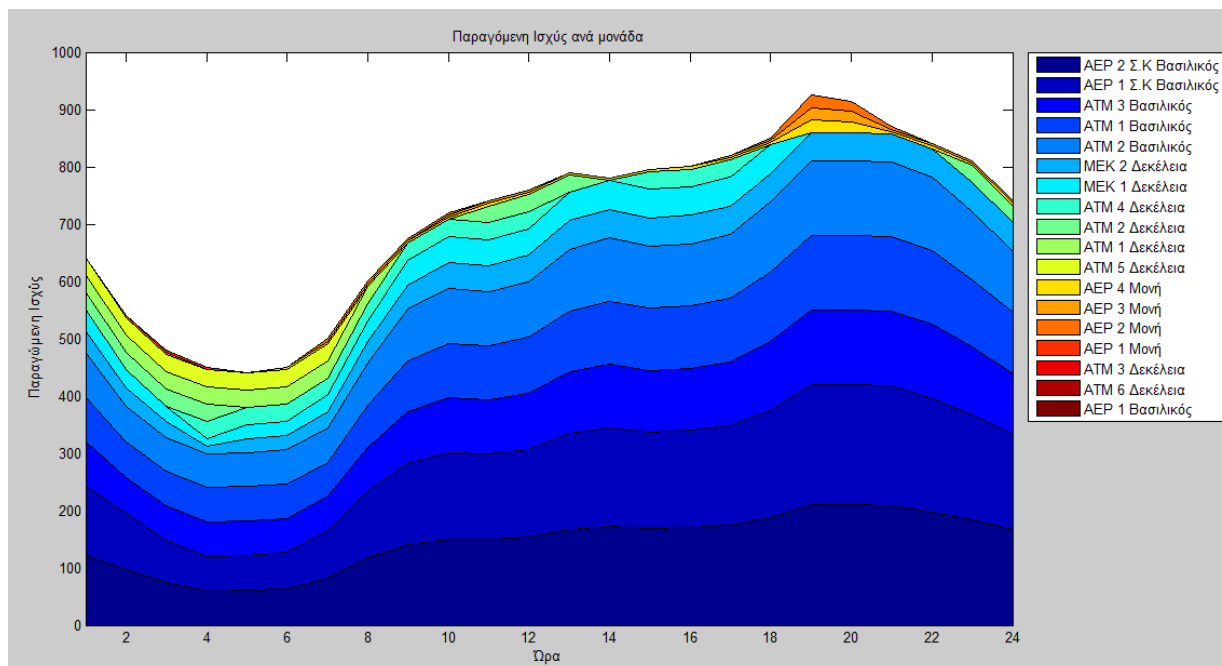
Στο πρώτο μεμονωμένα, δηλαδή η κάθε γραμμή απεικονίζει την προσφερόμενη ισχύ κάθε μονάδας στο σύστημα, εντός ενός 24ωρου.



Σχήμα 7.3.1.5 Χρονοσειρές Παραγωγής των Μονάδων

Και στο δεύτερο συγκεντρωτικά, δηλαδή ποιές μονάδες καλύπτουν :

- το φορτίο βάσης,
- το κυμαινόμενο φορτίο,
- και το φορτίο αιχμής.



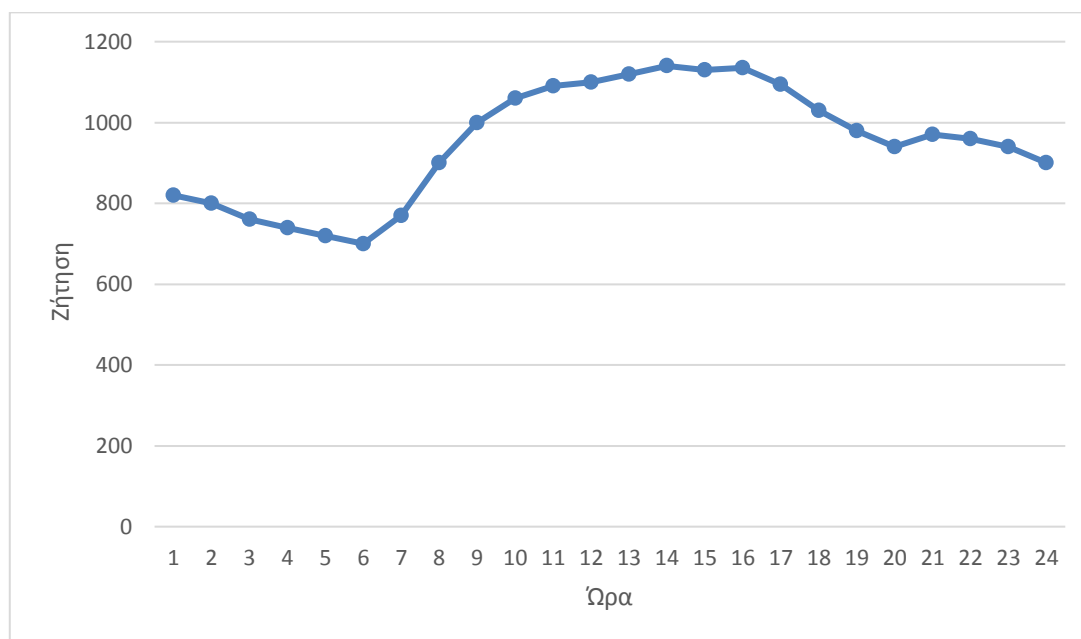
Σχήμα 7.3.1.6 Παραγόμενη Ισχύς ανά μονάδα

Όπου στο φορτίο αιχμής, συμβάλουν οι μονάδες Αεριοστρόβιλου 2,3,4 του σταθμού Μονής.

Οι μονάδες Ατμοστρόβιλου 3,6 του σταθμού Δεκέλειας καθώς και η μονάδα Αεριοστρόβιλου 1 του σταθμού Βασιλικού, κρίθηκαν μη συμφέρουσες σε αυτή την εφαρμογή και δε χρησιμοποιήθηκαν.

7.3.2 Θερινή Περίοδος

Από τη Τυπική καμπύλη Ζήτησης, παρατηρείται ότι οι ώρες αιχμής κατά τη θερινή περίοδο παρουσιάζονται στο διάστημα 9:00 – 18:00. Η υψηλότερη τιμή της σημειώνεται στα 1140 MW στις 14:00, ενώ η χαμηλότερη στα 700 MW στις 06:00.



Σχήμα 7.3.2.1 Τυπική Καμπύλη Ζήτησης [1. Αντωνίου Α. 2013]

Οι παράμετροι που επιλέχτηκαν για τη προσομοίωση είναι:

- | | |
|--|------------------------------|
| • Αριθμός σωματιδίων | 100 |
| • Αριθμός επαναλήψεων | 200 |
| • Αριθμός δυνατότητας αλλαγής κατάστασης λειτουργίας ανά ώρα | 2 |
| • Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων | 910.000 kgCO ₂ /h |

Τα συνολικό κόστος που εξήγαγε ο αλγόριθμος, μη έχοντας βάλει κάποιο περιορισμό ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους, ήταν 2.117.182,5781 € και η μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων ήταν 934.600 kg CO₂/h .

Έπειτα από την επιβολή του ορίου ρύπων, ο χρόνος της προσομοίωσης διήρκεσε 21 λεπτά και 17 δευτερόλεπτα :

- | | |
|--|-------------------------------|
| • με το κόστος να ανέρχεται στα | 2.138.503,3903 € |
| • και η μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων να είναι | 897.500 kg CO ₂ /h |

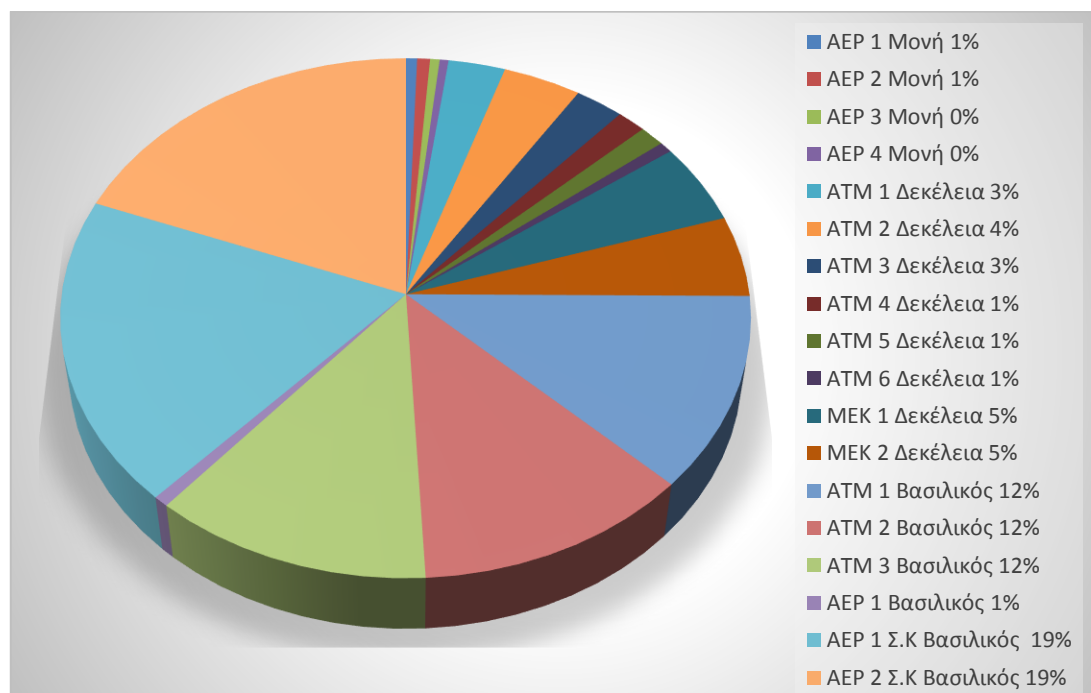
Έτσι εντοπίζεται μία μείωση κατά 3,97% (37.100 kg CO₂/h) στη μέγιστη τιμή των εκπεμπόμενων ρύπων, με αύξηση μόνο 0,99% (21.320,81 €) στο συνολικό κόστος.

Στις επόμενες σελίδες ακολουθούν πιο αναλυτικά τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, με τη βοήθεια των γραφημάτων.

	ΑΕΡ 1 Μονή	ΑΕΡ 2 Μονή	ΑΕΡ 3 Μονή	ΑΕΡ 4 Μονή	ΑΤΜ 1 Δεκέλεια	ΑΤΜ 2 Δεκέλεια	ΑΤΜ 3 Δεκέλεια	ΑΤΜ 4 Δεκέλεια	ΑΤΜ 5 Δεκέλεια	ΑΤΜ 6 Δεκέλεια	ΜΕΚ 1 Δεκέλεια	ΜΕΚ 2 Δεκέλεια	ΑΤΜ 1 Βασιλικός	ΑΤΜ 2 Βασιλικός	ΑΤΜ 3 Βασιλικός	ΑΕΡ 1 Βασιλικός	ΑΕΡ 1 Σ.Κ Βασιλικός	ΑΕΡ 2 Σ.Κ Βασιλικός
1:00	0	0	0	0	30	30	30	0	0	0	48,53101	48,53101	103,1324	103,1324	103,1324	0	161,7703	161,7704
2:00	0	0	0	0	30	30	30	0	0	0	47,3119	47,3119	100,1823	100,1823	100,1823	0	157,4146	157,4147
3:00	0	0	0	0	30	30	30	0	30	0	42,87336	42,87336	89,35614	89,35612	89,35614	4	141,0924	141,0924
4:00	0	0	0	0	30	30	30	0	30	0	41,69431	41,69431	86,45694	86,45696	86,45694	4	136,6203	136,6203
5:00	0	0	0	4	30	30	30	0	30	0	40,29016	40,29015	82,9949	82,99487	82,9949	4	131,2175	131,2175
6:00	0	0	0	4	30	30	30	0	30	0	39,1299	39,1299	80,1231	80,1231	80,1231	4	126,6855	126,6855
7:00	0	4	0	4	30	30	30	0	30	0	42,99176	42,99176	89,64669	89,64671	89,64671	4	141,5382	141,5382
8:00	0	4	0	0	30	30	30	0	30	0	50	50	109,7419	109,7419	109,7419	4	171,3871	171,3871
9:00	4	0	0	0	30	30	30	0	30	0	50	50	126,9295	126,9295	126,9295	4	195,6057	195,6057
10:00	4	0	0	4	34,49999	34,50001	34,5	0	34,5	0	50	50	130	130	130	4	210	210
11:00	4	0	0	4	42,00001	42,00001	42	0	41,99998	0	50	50	130	130	130	4	210	210
12:00	6,537	6,536	0	6,537	54,61793	54,61791	54,61794	0	0	0	50	50	130	130	130	6,536551	210	210
13:00	22,5	22,5	0	22,5	0	60	60	0	0	0	50	50	130	130	130	22,49999	210	210
14:00	22	22	22	22	0	60	60	0	0	0	50	50	130	130	130	22	210	210
15:00	25	25	25	0	0	60	60	0	0	0	50	50	130	130	130	25	210	210
16:00	26,25	26,25	26,25	0	0	60	0	60	0	0	50	50	130	130	130	26,25001	210	210
17:00	5,913	5,912	5,913	0	53,78314	53,78312	0	53,78309	0	0	50	50	130	130	130	5,912725	210	210
18:00	4	4	4	4	34,66667	34,66668	0	34,66665	0	0	50	50	130	130	130	0	210	210
19:00	0	4	4	4	30	30	0	30	0	0	50	50	127,9721	127,972	127,972	0	197,0419	197,0419
20:00	0	4	4	4	30	30	0	30	0	30	50	50	115,8869	115,8869	115,8869	0	180,1696	180,1696
21:00	0	4	4	4	30	30	0	30	0	30	50	50	121,0449	121,0449	121,0449	0	187,4327	187,4327
22:00	0	4	4	4	30	30	0	30	0	30	50	50	119,322	119,322	119,322	0	185,017	185,017
23:00	0	4	4	4	30	30	0	30	0	30	50	50	115,8869	115,8869	115,8869	0	180,1696	180,1696
0:00	0	4	4	4	30	30	0	30	0	30	50	50	109,0623	109,0623	109,0623	0	170,4066	170,4065

Πίνακας 7.3.2.1 Παραγόμενη Ισχύς που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα

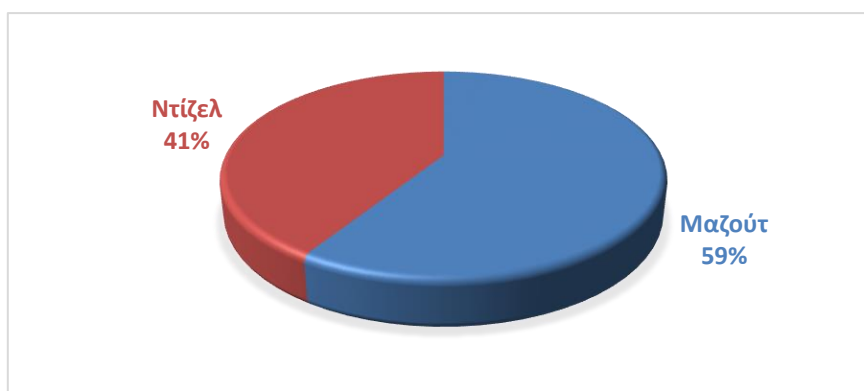
Το ποσοστό συμμετοχής της κάθε μονάδας παρουσιάζεται στο επόμενο σχήμα



Σχήμα 7.3.2.2 Συμμετοχή Μονάδων στην Παραγωγή Ενέργειας

Με τη μεγαλύτερη συμβολή να έχουν και πάλι οι μονάδες στο σταθμό παραγωγής του Βασιλικού, με τις δύο μονάδες Συνδυασμένου Κύκλου και τις τρεις Ατμοστροβιλικές μονάδες να καλύπτουν όλες μαζί το 74% της ζήτησης.

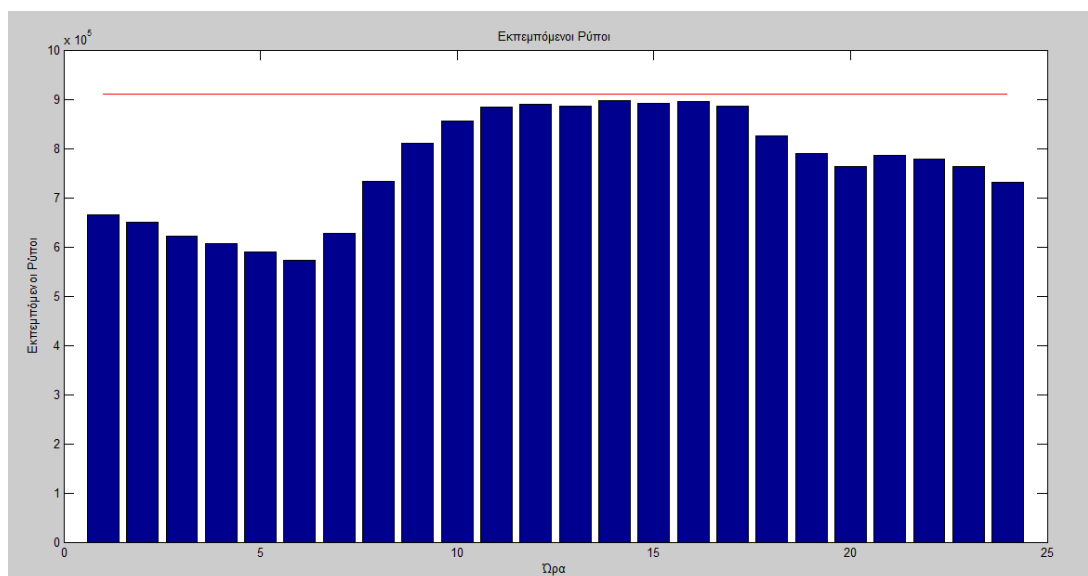
Το ποσοστό ανά τύπο καυσίμου για την κάλυψη της ζήτησης είναι



Σχήμα 7.3.2.3 Κατανομή της συνολικής παραχθείσας ηλεκτρικής ενέργειας ανά είδος πηγής παραγωγής με βάση το καύσιμο

Όπου γίνεται αντιληπτό πως και σε αυτή τη περίπτωση το μαζούτ υπερिशύχει έναντι του ντίζελ.

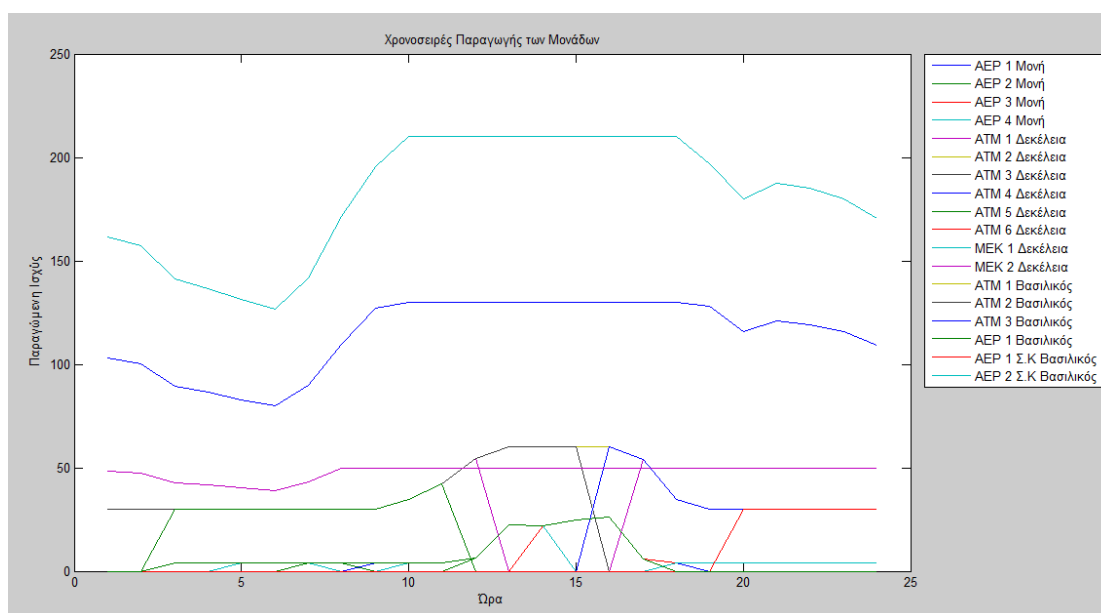
Ωστόσο, δεν αποτελεί κάποιο πρόβλημα ως προς τους εκπεμπόμενους ρύπους διότι όπως φαίνεται και από το επόμενο γράφημα τηρείται το ανώτατο όριο ρύπων όλο το 24ωρο, με τη μέγιστη τιμή στα 897.500 kg CO₂/h στις 14:00.



Σχήμα 7.3.2.4 Εκπεμπόμενοι Ρύποι ανά ώρα
(Κόκκινη Γραμμή : Όριο Εκπεμπόμενων Ρύπων)

Παρακάτω, εμφανίζεται η γραφική απεικόνιση της παραγόμενης ισχύος που προσφέρει κάθε μονάδα ανά ώρα, σε δύο διαφορετικά σχήματα.

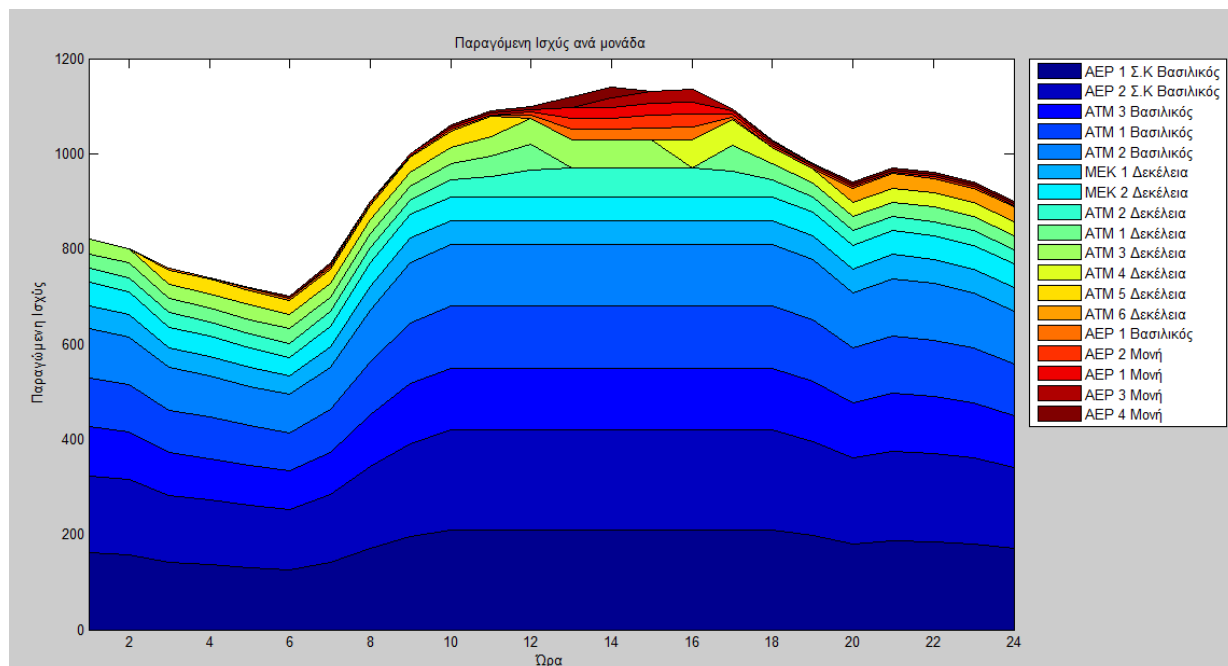
Στο πρώτο μεμονωμένα, δηλαδή η κάθε γραμμή απεικονίζει τη προσφερόμενη ισχύ κάθε μονάδας στο σύστημα, εντός ενός 24ωρου.



Σχήμα 7.3.2.5 Χρονοσειρές Παραγωγής των Μονάδων

Και στο δεύτερο συγκεντρωτικά, δηλαδή ποιες μονάδες καλύπτουν :

- το φορτίο βάσης,
- το κυμαινόμενο φορτίο,
- και το φορτίο αιχμής.



Σχήμα 7.3.2.6 Παραγόμενη Ισχύς ανά μονάδα

Όπου στο φορτίο αιχμής, συμβάλουν όλες οι μονάδες Αεριοστρόβιλου 1,2,3,4 του σταθμού Μονής, καθώς και η μονάδα Αεριοστρόβιλου 1 του σταθμού του Βασιλικού.

Σε αυτή την εφαρμογή συνέβαλαν όλες οι διαθέσιμες μονάδες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου για την αποτελεσματική κάλυψη της ζήτησης.

Βιβλιογραφία

- [1] Αντωνίου,Α. (2013). “Επιπτώσεις στην Οικονομική Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας Κρήτης και Κύπρου λόγω της διασύνδεσής τους”. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- [2] ΑΗΚ – Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου. (2016) “Παραγωγή”. Διαθέσιμο : <https://www.eac.com.cy/EL/EAC/Operations/Pages/Generation.aspx>
- [3] Παπαϊωάννου,Γ. (2014). “Βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας θερμικών μονάδων παραγωγής με ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας και παραγόμενων ρύπων”. Χανιά: Πολυτεχνείο Κρήτης
- [3] EIA - Energy Information Administration. “Pounds of CO2 per kWh”
doi : <https://www.eia.gov/tools/faqs/faq.cfm?id=74&t=11>

7.4 Συμπεράσματα και Προοπτικές Συνέχισης της Διπλωματικής Εργασίας

Από τις παραπάνω εφαρμογές προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων αντέδρασε όπως ήταν επιθυμητό, πετυχαίνοντας δηλαδή την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους και τηρώντας τους περιορισμούς του συστήματος ενώ παράλληλα εξήγαγε λογικά αποτελέσματα. Συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα :

	Περίοδος	Αριθμός Σωματιδίων	Αριθμός επαναλήψεων	ch	GHG limit (kgCO ₂ /h)	TC χωρίς όριο CO ₂ (€)	TC με όριο CO ₂ (€)	Αύξηση TC (%)	max CO ₂ χωρίς όριο (kgCO ₂ /h)	max CO ₂ με όριο (kgCO ₂ /h)	Μείωση max CO ₂ (%)	Χρόνος της προσομοίωσης
Κρήτη	Χειμ	100	200	2	350.000	1.404.161,60	1.493.413,88	5,98	406.500	349.250	14,08	14' 32"
	Θερ	100	200	2	390.000	1.608.424,10	1.637.732,09	1,79	429.290	389.190	9,34	19' 56"
Κύπρος	Χειμ	100	200	2	710.000	1.673.016,68	1.685.907,24	0,76	763.240	709.000	7,1	31' 11"
	Θερ	100	200	2	910.000	2.117.182,58	2.138.503,39	0,99	934.600	897.500	3,97	21' 17"

Πίνακας 7.4 Αποτελέσματα εφαρμογών σε Σ.Η.Ε. Κρήτης και Σ.Η.Ε. Κύπρου

Πιο αναλυτικά τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν είναι :

- Ο αλγόριθμος ο οποίος αναπτύχθηκε είναι κατάλληλος και για μεγάλα συστήματα Σ.Η.Ε., καθώς ο χρόνος προσομοίωσης κυμάνθηκε σε χαμηλά επίπεδα.
- Το όριο εκπεμπόμενων ρύπων (GHG limit) είναι αντιστρόφως ανάλογο του συνολικού κόστους. Όσο μειώνεται, τόσο αυξάνεται το τελικό κόστος και το αντίστροφο.
- Οι τιμές των ορίων εκπεμπόμενων ρύπων kgCO₂/h μπορούν να μειωθούν ακόμη περισσότερο δίδοντας και πάλι εφικτές λύσεις. Ωστόσο, επιλέχθηκαν συγκεκριμένες τιμές ώστε να επιτευχθεί μικρή αύξηση κόστους και ταυτόχρονα μεγάλη μείωση ρύπων.
- Πρέπει να τονισθεί πως δεν υπάρχει καμία υπέρβαση του ορίου εκπεμπόμενων ρύπων, λόγω της αυστηρής ποινής που καταβάλλεται σε περίπτωση μη τήρησής του. Με αυτό το τρόπο αποτρέπεται αυτή η ενέργεια, δίνοντας ένα μη ωφέλιμο αποτέλεσμα.
- Οι ατμοστροβιλικοί σταθμοί και οι σταθμοί συνδυασμένου κύκλου κλήθηκαν να καλύψουν τα φορτία βάσης, έναντι των αεριοστροβιλικών όπου κλήθηκαν να καλύψουν τη ζήτηση του φορτίου αιχμής.
- Ο σημαντικός ρόλος της πρόβλεψης του φορτιού. Όλες οι εφαρμογές βασίστηκαν σε αυτό με την τυπική καμπύλη ζήτησης να λειτουργεί ως θεμέλιο για την υλοποίηση της κάθε μίας προσομοίωσης.

- Τέλος, είναι εμφανής η προτίμηση των φθηνότερων μονάδων με δυνατότητα παραγωγής μεγάλης ποσότητας ηλεκτρικού φορτίου.

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν η ανάπτυξη του αλγόριθμου ΒΣΣ ώστε να επιλυθεί το προβλήματα της Βέλτιστης Ένταξης θερμικών σταθμών παραγωγής. Η διαδικασία επετεύχθη, εάν όχι σε ολική σίγουρα σε τοπική βέλτιστη λύση και σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα, έπειτα από κατάλληλη αρχικοποίηση και επεξεργασία των δεδομένων, σε κώδικα Matlab.

Λόγω της απελευθέρωσης της αγοράς στην ηλεκτρική ενέργεια και του ανταγωνισμού που υπάρχει στο χώρο, υπήρχε μια δυσκολία ως προς την εύρεση δεδομένων. Τα αριθμητικά δεδομένα που εντοπίστηκαν, βασίστηκαν σε στοιχεία των ΑΗΚ, ΔΕΗ και άλλων διπλωματικών εργασιών, όπως αναφέρεται και στη βιβλιογραφία κάθε κεφαλαίου. Επομένως, είναι συνδυαστικά και αποτελούν μια προσέγγιση χωρίς να συνθέτουν την πλήρως ρεαλιστική εικόνα των μονάδων. Ωστόσο επιτεύχθηκε η συλλογή σημαντικών στοιχείων, όπως:

- Το κόστος καυσίμου €/kg
- Το κόστος εκκίνησης και κράτησης της μονάδας
- Η ποσότητα παραγόμενων ρύπων kgCO₂/h
- Η μέγιστη και ελάχιστη παραγωγή της μονάδας
- Ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας/κράτησης της μονάδας
- Οι συντελεστές της συνάρτησης μεταβλητού κόστους λειτουργίας της μονάδας
- Η τυπική καμπύλη ζήτησης

για κάθε σύστημα και τις επιμέρους θερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ξεχωριστά.

Προοπτική συνέχισης της διπλωματικής θα μπορούσε να αποτελέσει η επέκταση του αλγορίθμου για μη θερμικούς σταθμούς παραγωγής

- με συστήματα ΑΠΕ, όπως αιολικά πάρκα, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά-ηλιακούς συλλέκτες κλπ.
- και με υδροθερμική συνεργασία και διαχείριση υδροαντλητικών σταθμών

Επιπλέον, η προσθήκη ορισμένων ακόμη σημαντικών πληροφοριών σε σχέση με τα χαρακτηριστικά κάθε μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θερμικής ή μη, θα έφερναν ένα ακόμη πιο ρεαλιστικό αποτέλεσμα, όπως :

- Ο ακριβής χρόνος συγχρονισμού των μονάδων που χρειάζεται ώστε να ενταχθούν στο σύστημα
- Το εν δυνάμει ανθρώπινο δυναμικό του κάθε σταθμού
- Τυχόν προβλήματα τροφοδότησης καύσιμης ύλης είτε υποχρεωτικής λειτουργίας κάποιων μονάδων.