



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάλυση Λειτουργίας του Συστήματος Ηλεκτρικής
Ενέργειας της Κρήτης με Προσθήκη Υβριδικών Σταθμών**

Όνομα: Κωνσταντίνος Εμμ. Φιορέντζης

ΑΜ: 2011030098

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Σταυρακάκης Γεώργιος, Καθηγητής ΗΜΜΥ (επιβλέπων)

Καλαϊτζάκης Κωνσταντίνος, Καθηγητής ΗΜΜΥ

Κατσίγιαννης Ιωάννης, Διδάσκων ΗΜΜΥ

Χανιά, Οκτώβριος 2017

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Δρ. Κατσίγιαννη Ιωάννη, για την πολύτιμη βοήθεια, τις συμβουλές και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια της ενασχόλησης μου, με τη διπλωματική εργασία. Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σταυρακάκη Γεώργιο.

Δε θα μπορούσα να παραλείψω τον Δρ. Αντώνιο Τσικαλάκη, τον οποίο ευχαριστώ ιδιαίτερα για τις σημαντικές συμβουλές και την παροχή των απαραίτητων στοιχείων, αναφορικά με την διπλωματική μου εργασία, όπως επίσης και τον αναπληρωτή καθηγητή του ΤΕΙ Κρήτης Εμμανουήλ Καραπιδάκη, για τις εξίσου σημαντικές πληροφορίες που μου παρείχε.

Περίληψη

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) της Κρήτης είναι το μεγαλύτερο αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και καταναλώνει περίπου το 5% της συνολικής ελληνικής ηλεκτρικής ζήτησης. Αποτελείται από τρεις μεγάλους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής που συνδυάζονται με ένα μεγάλο αριθμό εγκαταστάσεων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Οι αιολικές και φωτοβολταϊκές τεχνολογίες ΑΠΕ λαμβάνουν παραδοσιακά χώρα στην Κρήτη, εξαιτίας των ευνοϊκών, για εκείνων, συνθηκών που επικρατούν στο νησί, με σημαντική εξέλιξη τα τελευταία χρόνια. Η συμβολή τους στο σύνολο της παραγωγής είναι καθοριστική καθώς περιορίζουν τη λειτουργία των δαπανηρών συμβατικών μονάδων. Αξιοσημείωτη όμως είναι και η χρησιμότητα τους σε συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς αποτελούν τις κύριες πηγές για την αποθήκευση ενέργειας σε μια τέτοια διάταξη.

Η εργασία αυτή μελετάει τη λειτουργία ενός υβριδικού συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με αντλησιοταμίευση, που πρόκειται να εγκατασταθεί στο δίκτυο της Κρήτης. Εξετάζει τη λειτουργία του σταθμού αυτού για διαφορετικά σενάρια ζήτησης και αιολικής παραγωγής, που αποτελεί την κύρια πηγή «φόρτισης» του, καθώς και τη συμπεριφορά του δικτύου της Κρήτης ύστερα από την εγκατάστασή του. Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό PowerWorld και διακρίθηκε σε δύο περιπτώσεις. Στην πρώτη περίπτωση προσομοιώθηκε το ΣΗΕ της Κρήτης, εξάγοντας σημαντικά αποτελέσματα σχετικά με τη λειτουργία του. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανάλυση αυτή πλησιάζει σε σημαντικό βαθμό την πραγματική λειτουργία του συστήματος. Ακολούθως, ενσωματώθηκε στο υπάρχον δίκτυο, με κατάλληλες ενέργειες, ο υβριδικός αντλησιοταμιευτικός σταθμός. Εξήχθησαν νέα αποτελέσματα τα οποία ήρθαν σε σύγκριση με εκείνα της αρχικής λειτουργίας του δικτύου. Ακόμη, έγινε μια επιπλέον θεώρηση, διαφοροποιώντας την τελευταία περίπτωση της εγκατάστασης του υβριδικού σταθμού. Ουσιαστικά αναπροσαρμόστηκε εν μέρει ο κανόνας της ένταξης των μονάδων, με στόχο την επιπλέον μείωση της παραγωγής από συμβατικές μονάδες.

Αναλυτικότερα, αρχικά παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη μελέτη του ΣΗΕ στην τωρινή κατάσταση του, ενώ στη συνέχεια αξιολογήθηκε η λειτουργία του υβριδικού σταθμού, αναλύοντας τα νέα αποτελέσματα. Η αξιολόγηση αυτή περιλαμβάνει τα οικονομικά οφέλη που είναι εφικτό να προσφέρει το συγκεκριμένο έργο, με τον περιορισμό της παραγωγής των συμβατικών μονάδων. Παρουσιάζονται επίσης τα αναμενόμενα αυξημένα επίπεδα αιολικής διείσδυσης, καθώς και ορισμένα σημαντικά συμπεράσματα που προκύπτουν για τις γραμμές μεταφοράς.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν ήταν ιδιαίτερα ικανοποιητικά, προσφέροντας σημαντικά πλεονεκτήματα στη λειτουργία του δικτύου. Με την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού, μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά οικονομικά οφέλη στη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, χωρίς να επηρεαστεί η ασφαλής λειτουργία του συστήματος.

Abstract

The Cretan power system is the largest autonomous power system in Greece and it consumes about 5% of the total Greek electricity demand. It consists of three conventional power stations combined with a large number of Renewable Energy Sources (RES). Wind and photovoltaic RES technologies traditionally take place in Crete, due to the favorable conditions prevailing on the island, with a significant development in recent years. Their contribution to the total system's production is considerable, as they reduce the operation of costly conventional units. But their utility in electrical energy storage systems is also remarkable, as they can be the main source for stored energy in such a system.

This thesis studies the operation of a hybrid power storage system with pumped hydro storage, which is planned to be installed in the Cretan network. It examines the operation of this hybrid station for different scenarios of load demand and wind production, which is the main source of its "charging", as well as the behavior of the Cretan network after the Hybrid station installation. The simulation has been implemented in PowerWorld simulator software and was divided in two cases. In the first case, the Cretan Power System was simulated, giving important results on its operation. The results showed that this analysis is very close to the actual operation of the system. Subsequently, the hybrid power station was installed in the existing network, with appropriate actions. New results have been obtained compared to those of the initial network operation. Moreover, an additional endorsement was made, partially modifying the latter case, which considers the installation of the hybrid station. Substantially, the unit commitment rule was adjusted, for further reduce in thermal units production.

In more detail, the results of the study of the Cretan Power system with its current operation are presented initially, and then the operation of the hybrid station was evaluated, analyzing the new results. This evaluation includes the financial benefits that can be achieved with this project, by limiting the production of conventional units. It also shows the expected increased levels of wind penetration, as well as some important conclusions for transmission lines.

The results were particularly satisfactory, offering significant benefits regarding the operation of the network. With the inclusion of the hybrid station, significant financial benefits in Cretan power system operation can be achieved, without affecting the safe operation of the system.

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες.....	1
Περίληψη.....	2
Abstract	3
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	7
1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας.....	7
1.2 Μη διασυνδεδεμένα - Αυτόνομα συστήματα	10
1.3 Συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	10
1.4 Γραμμές Μεταφοράς.....	14
1.4.1 Γενικά στοιχεία	14
1.4.2 Αγωγοί αλουμινίου.....	15
1.4.3 Παράσταση γραμμών μεταφοράς.....	15
1.5 Υποσταθμοί	20
1.6 Αιολική ενέργεια	21
1.6.1 Συντελεστής ισχύος	22
1.6.2 Καμπύλη Ισχύος.....	22
1.6.3 Συντελεστής χρησιμοποίησης	23
1.6.4 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου - κατακόρυφου άξονα	24
1.7 Ηλιακή Ενέργεια.....	25
1.7.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα	27
1.8 Υβριδικός σταθμός με αντλησιοταμίευση	28
1.9 Σκοπός και δομή της εργασίας.....	30
2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ	32
2.1 Νήσος Κρήτη.....	32
2.2 Εισαγωγή στο ΣΗΕ της Κρήτης.....	33
2.3 Συμβατικές μονάδες στο ΣΗΕ της Κρήτης	35
2.4 Κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων	39
2.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	41
2.5.1 Εγκατεστημένα αιολικά πάρκα Κρήτης.....	42
2.5.2 Εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα Κρήτης	47
2.6 Γραμμές μεταφοράς.....	50
2.7 Υποσταθμοί	51
2.8 Το μονογραμμικό διάγραμμα του ηλεκτρικού δικτύου της Κρήτης.....	51

3	ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ	53
3.1	Μελέτη ροής ισχύος	53
3.1.1	Μοντέλα στοιχείων ΣΗΕ	53
3.1.2	Εξισώσεις ροών ισχύος.....	56
3.1.3	Τύποι ζυγών.....	58
3.1.4	Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος ροής ισχύος	58
3.2	Βέλτιστη ροή ισχύος (OPF)	59
3.2.1	Συνάρτηση κόστους.....	59
3.2.2	Μεταβλητές ελέγχου	61
3.2.3	Εξαρτημένες μεταβλητές.....	61
3.2.4	Εξισώσεις ροών ισχύος.....	61
3.2.5	Ανισωτικοί περιορισμοί.....	62
3.2.6	Τεχνικές επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος	63
4	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PowerWorld	64
4.1	Οδηγίες για την κατασκευή του συστήματος - Εισαγωγή των στοιχείων	65
4.2	Παρουσίαση εργαλείου “Case Information”	75
4.3	Παρουσίαση εργαλείου “Run Mode”	76
4.4	Εισαγωγή στο “Time Step Simulation”	77
4.4.1	Εισαγωγή στοιχείων στο Time Step Simulation	80
4.4.2	Παρουσίαση του πεδίου “Custom Inputs”	83
4.5	Αποτελέσματα στο “Time Step Simulation”	85
4.6	Εκτέλεση προσομοίωσης	88
4.7	Υλοποίηση του δικτύου της Κρήτης στο λογισμικό PowerWorld	89
5	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΣΗΕ ΚΡΗΤΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	90
5.1	Επιλογή σεναρίων	90
5.2	Ένταξη μονάδων - Unit commitment	92
5.3	Στρεφόμενη εφεδρεία.....	94
5.4	Αιολική παραγωγή	96
5.4.1	Επιλεγμένα σενάρια αιολικής παραγωγής	96
5.4.2	Αποκοπή παραγωγής αιολικών πάρκων	99
5.5	Διαχείριση φωτοβολταϊκών συστημάτων.....	102
5.6	Διαχείριση φορτίων - Ζήτηση Ισχύος.....	103
5.7	Διαχείριση συμβατικών μονάδων.....	105
5.8	Διαχείριση πυκνωτών.....	106

5.9	Μονογραμμικό διάγραμμα του ΣΗΕ της Κρήτης στο PowerWorld.....	108
5.10	Αποτελέσματα	109
5.10.1	Παραγωγή συμβατικών μονάδων	109
5.10.2	Κόστος κατανάλωσης καυσίμων συμβατικών μονάδων.	114
6	ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ ΝΕΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	118
6.1	Αλγόριθμος λειτουργίας του υβριδικού σταθμού με αντλησιοταμίευση	118
6.2	Εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού.....	119
6.3	Ένταξη μονάδων και εφεδρεία	121
6.4	Αποκοπή αιολικών πάρκων με την προσθήκη του υβριδικού σταθμού.	121
6.5	Στοιχεία ζήτησης του υβριδικού σταθμού.	122
6.6	Στοιχεία παραγωγής του υβριδικού σταθμού.	124
6.7	Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.....	125
6.7.1	Παραγωγή συμβατικών μονάδων	125
6.7.2	Κόστος κατανάλωσης καυσίμου συμβατικών μονάδων.....	130
6.7.3	Αιολική παραγωγή.....	132
6.8	Αναπροσαρμογή του κανόνα για τις «must run units»	134
6.9	Αποτελέσματα έπειτα από την αναπροσαρμογή του κανόνα.....	135
6.10	Φορτίσεις και απώλειες γραμμών	139
7	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	142
8	ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	144

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

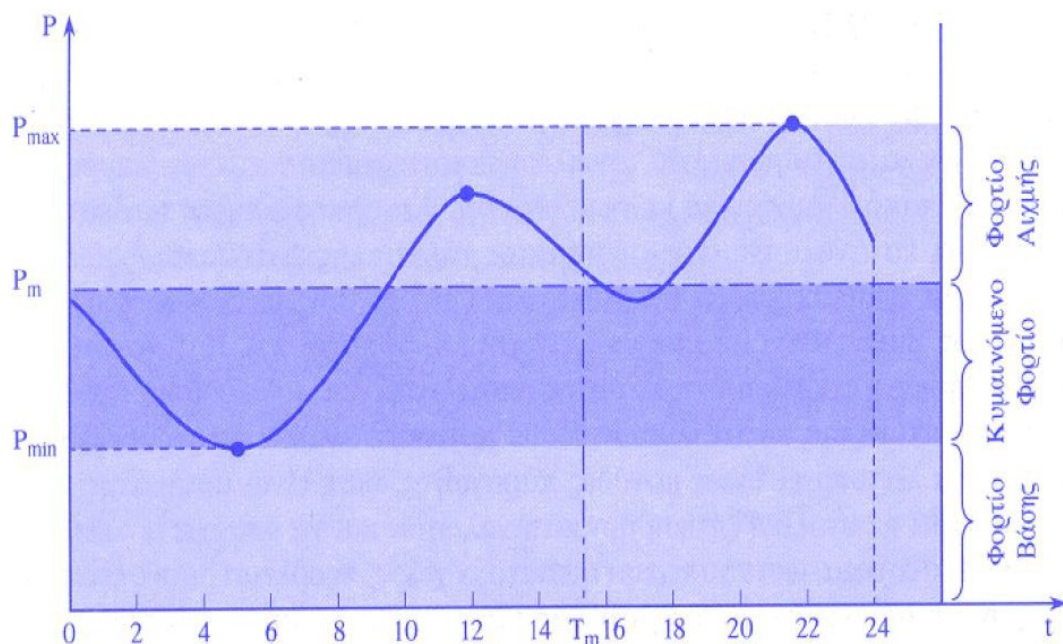
Ως σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) χαρακτηρίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων, αποτελούμενο από σταθμούς παραγωγής, υποσταθμούς ανύψωσης και υποβίβασης της τάσης καθώς επίσης από γραμμές μεταφοράς και διανομής. Η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος, αποσκοπεί στην εξυπηρέτηση διαφόρων ειδών καταναλωτών οι οποίοι είναι αναγκαίο να τροφοδοτούνται ανάλογα με τις ανάγκες ζήτησης τους. Η ασφάλεια, η σταθερότητα σε συχνότητα και τάση και η αξιοπιστία τροφοδότησης με το μικρότερο δυνατό κόστος και απώλειες, είναι στοιχεία που διέπουν τον σχεδιασμό και την ομαλή συμπεριφορά ενός ΣΗΕ.

Η ηλεκτρική ενέργεια περνάει από διάφορα στάδια, ξεκινώντας από τους σταθμούς παραγωγής και καταλήγοντας στους καταναλωτές, φανερώνοντας την πολυπλοκότητα ενός τέτοιου συστήματος. Τα στάδια αυτά διακρίνονται κυρίως με γνώμονα την τάση λειτουργίας σε κάθε περίπτωση. Πρόκειται για τέσσερις ξεχωριστές λειτουργίες: την παραγωγή, τη μεταφορά, τη διανομή και την κατανάλωση, οι οποίες διακρίνουν ένα ΣΗΕ σε τέσσερα υποσυστήματα:

- **Το σύστημα παραγωγής**, αποτελείται από τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης που είναι απαραίτητοι για τη μεταφορά του ρεύματος υπό υψηλή και υπερυψηλή τάση. Ανάλογα με την πηγή πρωτογενούς ενέργειας που χρησιμοποιούν, οι σταθμοί παραγωγής διακρίνονται σε συμβατικούς και υδροηλεκτρικούς. Οι συμβατικοί σταθμοί χρησιμοποιούν καύσιμα όπως το μαζούτ και το πετρέλαιο, μετατρέποντας τη χημική ενέργεια του καυσίμου σε θερμική μέσω της καύσης, στη συνέχεια σε μηχανική, καταλήγοντας στην ζητούμενη ηλεκτρική ενέργεια. Αντίθετα οι υδροηλεκτρικοί σταθμοί εκμεταλλεύονται την δυναμική ενέργεια των υδάτων για τη παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Σημαντική είναι και η παραγωγή από τεχνολογίες ΑΠΕ, κυρίως της αιολικής ενέργειας και σε μικρότερο βαθμό της ηλιακής.
- **Το σύστημα μεταφοράς**, είναι υπεύθυνο για τη μεταφορά υψηλών τιμών ισχύος προς την κατανάλωση, ενώ παράλληλα διασυνδέει όλους τους σταθμούς παραγωγής και όλα τα σημεία κατανάλωσης. Αποτελείται από τα τριφασικά δίκτυα υψηλής τάσης (150kV) μεταφέροντας την ενέργεια που δέχεται από τους σταθμούς παραγωγής μέσω των μετασχηματιστών ανύψωσης. Η διατήρηση της υψηλής τάσης στο σύστημα μεταφοράς, εξυπηρετεί στην μείωση των απωλειών των γραμμών, καθώς επίσης επιτρέπει αυξημένες δυνατότητες μεταφοράς ισχύος. Η νοητή έκταση ενός συστήματος μεταφοράς, ξεκινάει από τις εξόδους των σταθμών παραγωγής και φτάνει έως τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης απ' όπου αρχίζουν τα δίκτυα διανομής. Ακόμη, τα δίκτυα μεταφοράς είναι δυνατόν να τροφοδοτούν απ' ευθείας καταναλωτές υψηλής τάσης, ενώ παράλληλα μπορούν να διασυνδέσουν και γειτονικά ΣΗΕ.
- **Το σύστημα διανομής**, είναι η συνέχεια του συστήματος μεταφοράς μέχρι το σημείο της κατανάλωσης και διακρίνεται σε δύο κατηγορίες ανάλογα με το επίπεδο της τάσης λειτουργίας: *τη μέση τάση και τη χαμηλή τάση*. Περιλαμβάνει τις γραμμές

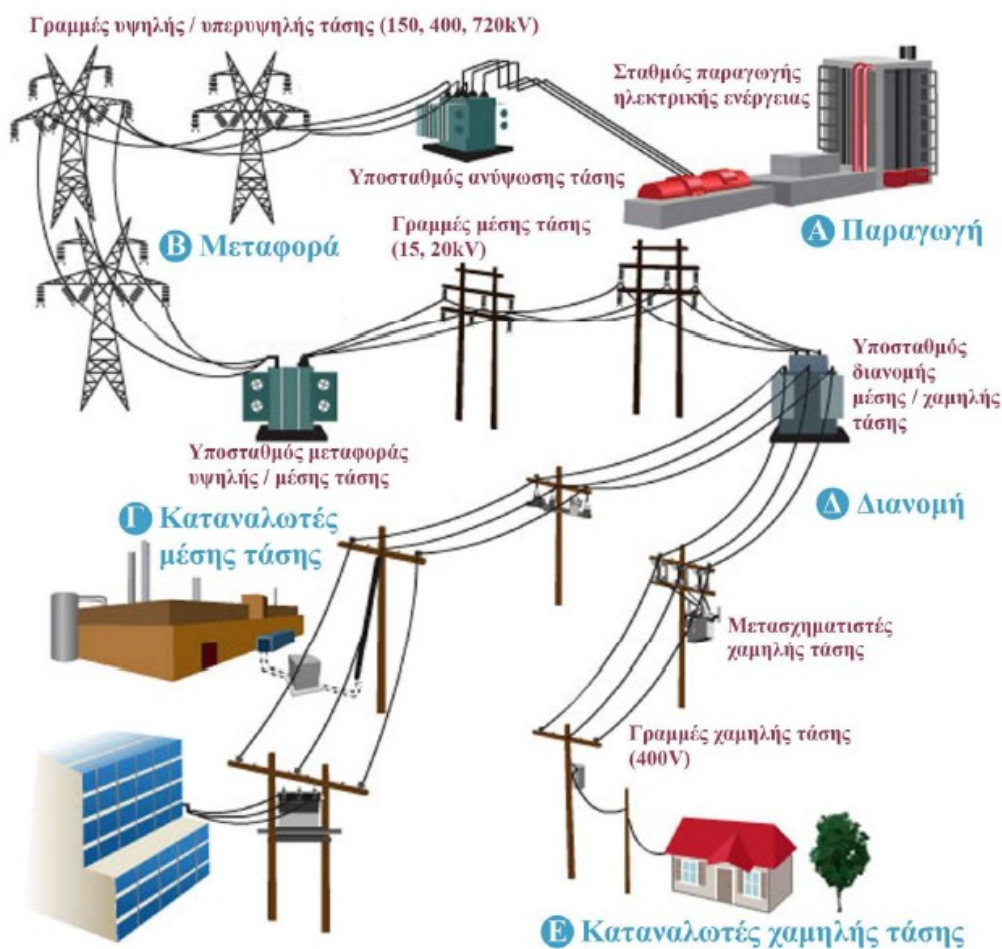
ηλεκτρικής ενέργειας οι οποίες ξεκινούν από τους υποσταθμούς διανομής, που υποβιβάζουν τη τάση στη μέση τάση της διανομής, και φτάνουν στα σημεία της ζήτησης, έως το μετρητή της καταναλισκόμενης ενέργειας του κάθε καταναλωτή. Οι γραμμές στη μέση τάση έχουν τρεις αγωγούς φάσεων όπως και στην υψηλή, με τις γραμμές της χαμηλής τάσης να διαθέτουν επιπλέον έναν, τον ουδέτερο αγωγό.

- **Τα σημεία κατανάλωσης**, τα οποία περιλαμβάνουν φορτία ζήτησης του δικτύου, δηλαδή τους καταναλωτές. Διακρίνονται σε καταναλωτές χαμηλής τάσης και μέσης τάσης. Οι καταναλωτές χαμηλής τάσης αντιπροσωπεύουν την πλειονότητα των φορτίων ενός συστήματος, ενώ σε εκείνους της μέσης τάσης ανήκουν καταναλωτές με υψηλά φορτία ζήτησης που συνήθως διαθέτουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού της τάσης. Σε γενικές γραμμές οι παράγοντες που επηρεάζουν τη ζήτηση του φορτίου είναι αρκετοί και σχετίζονται κυρίως με την ανθρώπινη δραστηριότητα. Στο γράφημα της εικόνας 1.1 διακρίνεται η τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου. Το φορτίο βάσης είναι η πρώτη περιοχή στη βάση του διαγράμματος και περιλαμβάνει τις τιμές ζήτησης που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια όλης της ημέρας. Το φορτίο αιχμής αποτελεί την ανώτερη περιοχή του διαγράμματος και διακρίνεται από τις υψηλότερες τιμές ζήτησης, στη διάρκεια της ημέρας. Τέλος, το κυμαινόμενο φορτίο βρίσκεται μεταξύ του φορτίου βάσης και αιχμής, το οποίο διακρίνεται από συνεχείς μεταβολές σχεδόν για όλη την διάρκεια της ημέρας.



Εικόνα 1.1 Τυπική ημερήσια καμπύλη φορτίου

Η εικόνα 1.2 παρουσιάζει τη δομή ενός ΣΗΕ, όπως αυτό αναλύθηκε στο συγκεκριμένο κεφάλαιο.



Εικόνα 1.2 Δομή ενός ΣΗΕ

Όλα τα ενεργειακά συστήματα είναι τριφασικά με την πολυπλοκότητα τους να είναι δεδομένη και να αυξάνεται με την αύξηση του μεγέθους τους. Το μέγεθος είναι επίσης ο βασικός παράγοντας που καθορίζει τη δομή ενός ΣΗΕ, η οποία εξαρτάται κυρίως από τα χαρακτηριστικά των φορτίων ζήτησης που καλείται να εξυπηρετήσει. Τα διαφορετικά επίπεδα τάσης σε ένα σύστημα διαχωρίζονται και μπορούν να συνυπάρξουν χάρη στη λειτουργία ειδικών μετασχηματιστών. Η τάση στα διαφορετικά συστήματα ενός ΣΗΕ επιδιώκεται να διατηρείται σταθερή, με μικρές αποκλίσεις, έχοντας τιμές κοντά στις επιθυμητές οι οποίες καθορίζονται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε συστήματος (υψηλή - μέση - χαμηλή).

Όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, ένα ΣΗΕ μπορεί να ενωθεί και να λειτουργήσει με άλλα αντίστοιχα συστήματα μέσω κατάλληλων γραμμών μεταφοράς. Οι γραμμές εκείνες μπορεί να είναι είτε εναλλασσόμενου (AC) είτε συνεχούς (DC) ρεύματος, κάτι που καθορίζεται κυρίως από την απόσταση που καλείται να καλύψει η εκάστοτε γραμμή. Η σύνδεση αυτή είναι δυνατόν να βελτιώσει γενικότερα την λειτουργία του νέου ενιαίου συστήματος καθώς και την ασφάλεια του, αναφορικά με θέματα συχνότητας και τάσης. Υπάρχουν όμως και μικρά συστήματα που συναντώνται κυρίως σε νησιά. Πρόκειται για αυτόνομα συστήματα που δεν έχουν συνδεθεί με άλλα μεγαλύτερα, όπως είναι τα ΣΗΕ της Κρήτης και της Ρόδου.

1.2 Μη διασυνδεδεμένα - Αυτόνομα συστήματα

Αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι όλα τα συστήματα μικρής και μεγάλης κλίμακας, που δεν είναι συνδεδεμένα με τα αντίστοιχα ηπειρωτικά συστήματα. Πρόκειται κυρίως για νησιά ή γενικότερα απομονωμένες γεωγραφικές περιοχές, οι οποίες δεν έχουν την δυνατότητα διασύνδεσης με ένα ευρύτερο σύνολο συστημάτων. Σε αυτά τα συστήματα, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερο από εκείνων των διασυνδεδεμένων, λόγω του υψηλού λειτουργικού κόστους των θερμικών μονάδων παραγωγής. Ωστόσο, η πλειονότητα των μη διασυνδεδεμένων νησιών (ΜΔΝ) παρουσιάζει σημαντικό αιολικό και ηλιακό δυναμικό, γεγονός που καθιστά ιδανική την εκμετάλλευση αυτών των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με τη χρήση τεχνολογιών, όπως οι ανεμογεννήτριες και οι φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις.

Η εκμετάλλευση ενός σημαντικού αριθμού τέτοιων πόρων ανανεώσιμης ενέργειας (ιδίως της αιολικής), σε αυτόνομα συστήματα, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή λόγω της αβεβαιότητας που προσφέρουν. Σε πολλές περιπτώσεις η παραγωγή ΑΠΕ αποκόπτεται προκειμένου να αποφευχθούν τυχόν παραβιάσεις των τεχνικών ελαχίστων των θερμικών μονάδων. Για το λόγο αυτό και εξ' αιτίας της μη-διασύνδεσης τους με τα ηπειρωτικά συστήματα, οι απαιτήσεις για τη στρεφόμενη εφεδρεία είναι ιδιαίτερα υψηλές με στόχο τη διατήρηση της ασφαλούς λειτουργίας του συστήματος ενάντια στις αβεβαιότητες σχετικά με τη ζήτηση, τις καιρικές προβλέψεις και γενικότερα τις απρόβλεπτες εξελίξεις.

Το ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας αποτελείται από 32 αυτόνομα συστήματα, με την πλειονότητα εκείνων να βρίσκονται σε νησιά του Αιγαίου. Πιο συγκεκριμένα στην Ελλάδα «φιλοξενούνται»:

- Δεκαεννέα «μικρά» αυτόνομα συστήματα με αιχμή ζήτησης έως 10MW.
- Έντεκα αυτόνομα συστήματα «μέσου» μεγέθους με αιχμή ζήτησης από 10MW έως 100MW.
- Δύο «μεγάλα» αυτόνομα συστήματα με αιχμή άνω των 100MW. (Κρήτη, Ρόδος)

Η ετήσια ζήτηση στα ελληνικά μη διασυνδεδεμένα νησιά ποικίλλει, από ορισμένες εκατοντάδες MWh στα μικρότερα νησιά (Αντικήθουρα, Αγαθονήσι, κ.λ.π), έως και ορισμένες TWh στο μεγαλύτερο ΜΔΝ της Κρήτης.

1.3 Συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Οι μονάδες ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας τους, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

1. Μονάδες βάσης
2. Μονάδες αιχμής

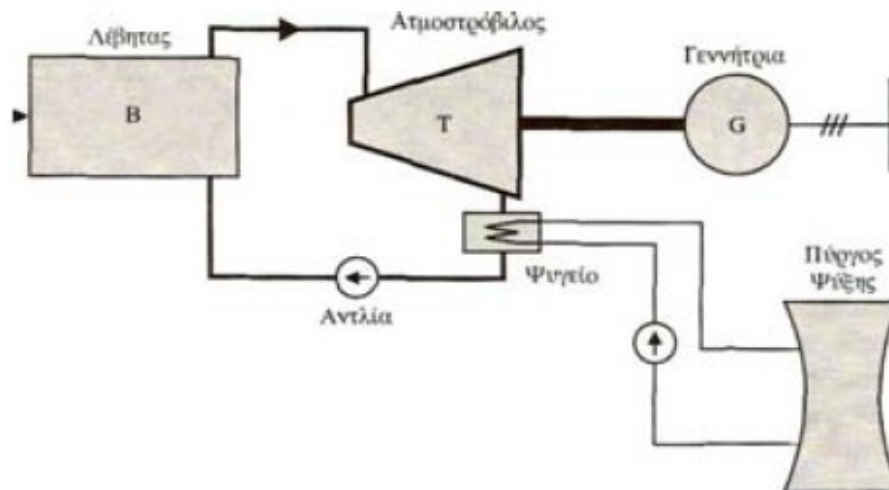
Μονάδες βάσης είναι μονάδες που προγραμματίζονται ανοικτές κατά τη διάρκεια ενός 24-ώρου χωρίς να διακόπτουν τη λειτουργία τους. Είναι μονάδες μεγάλης ισχύος που έχουν συνήθως μεγάλο βαθμό απόδοσης και χαμηλό κόστος ηλεκτροπαραγωγής. Εξαιτίας του μεγέθους τους οι μονάδες βάσης χρειάζονται πολλές ώρες για να τεθούν από την κατάσταση αδρανείας, σε λειτουργία. Το μεγαλύτερο ποσοστό της ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σύστημα παράγεται από μονάδες βάσης. Βασικό χαρακτηριστικό των μονάδων αυτών

είναι ότι η παραγόμενη ισχύς δεν πρέπει να παρουσιάζει μεγάλες αυξομειώσεις, όπως παρουσιάζει η ισχύς που παράγεται από την αιολική ενέργεια. Αξιοποιούν συχνά φθινό καύσιμο (λιγνίτης, μαζούτ) ενώ έχουν ακριβό κόστος εγκατάστασης.

Αντίθετα, μονάδες αιχμής είναι, σε πλήρη αντιδιαστολή με τις μονάδες βάσης, μικρές μονάδες που σκοπό έχουν την παραγωγή ισχύος σε συνθήκες πολύ μεγάλης ζήτησης σε ηλεκτρική ισχύ. Οι μονάδες αιχμής μπορεί να λειτουργούν πολύ λίγες ώρες το χρόνο και γι' αυτό το λόγο κατασκευάζονται με σχετικά χαμηλό βαθμό απόδοσης (20-30%), έτσι ώστε να παραμένει χαμηλό το κόστος αγοράς τους, ενώ παράλληλα απαιτούν μικρό χώρο εγκατάστασης. Βασικό χαρακτηριστικό των μονάδων αιχμής είναι ότι μπορούν να συνδεθούν εύκολα και γρήγορα στο δίκτυο και να παράσχουν την απαιτούμενη ισχύ μέσα σε χρόνο λίγων λεπτών. Απαιτούν πιο «εξευγενισμένο» καύσιμο, συνήθως (ελαφρύ) πετρέλαιο.

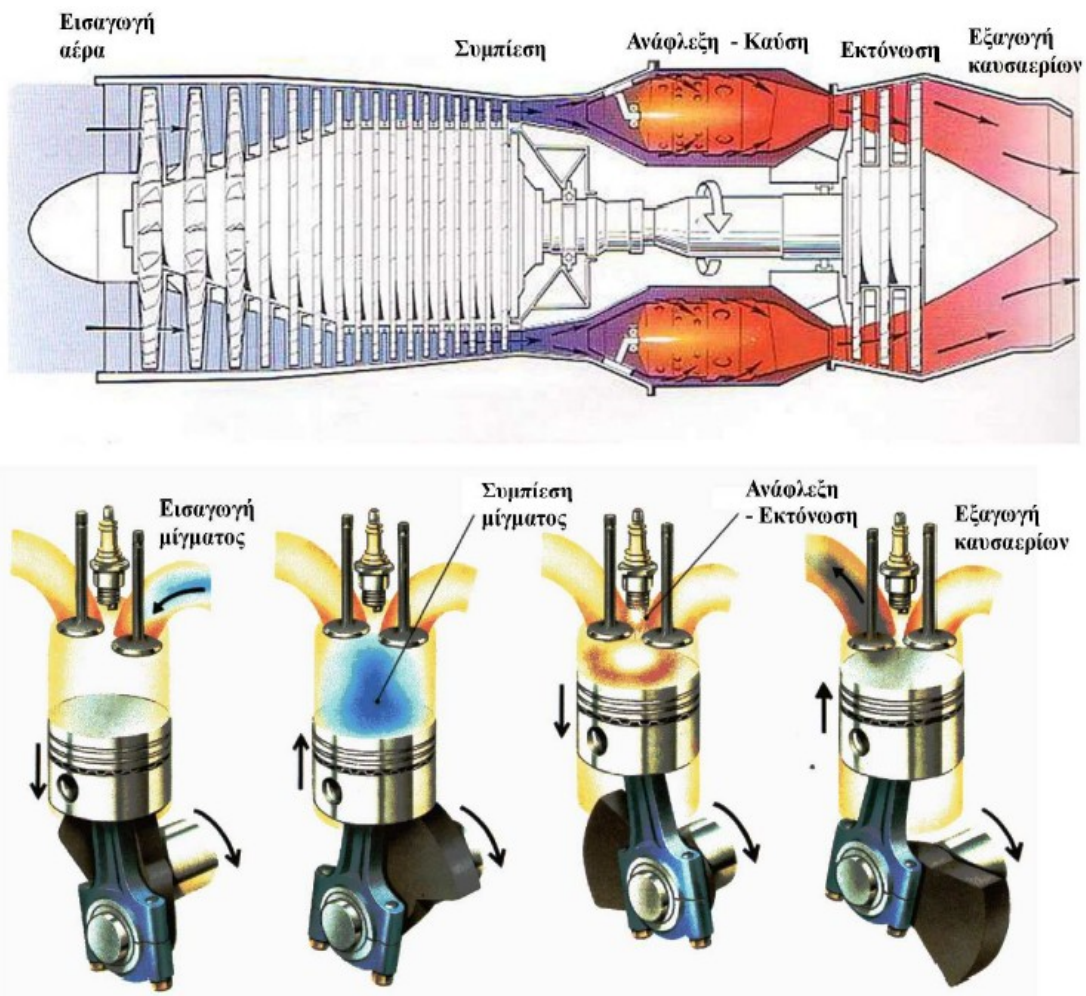
Ανάλογα με το μέσο και τη διαδικασία που ακολουθούν οι θερμικές μονάδες, μπορούν να χωριστούν στις ακόλουθες κατηγορίες:

- **Ατμοστρόβιλοι:** Όπως υποδηλώνει η ονομασία τους, στις γεννήτριες αυτές, η παραγωγή μηχανικής ισχύος επιτυγχάνεται μέσω της εκτόνωσης ατμού υψηλής πίεσης και θερμοκρασίας. Το καύσιμο που χρησιμοποιούν συνήθως είναι το μαζούτ, το οποίο αναφλέγεται στον καυστήρα του λέβητα, θερμαίνοντας το νερό (υψηλής καθαρότητας) που βρίσκεται στο λέβητα. Στη συνέχεια, ο ατμός που δημιουργείται εκτονώνεται στον στρόβιλο, ο οποίος είναι διατεταγμένος σε διαφορετικές βαθμίδες (υψηλής, μέσης, χαμηλής πίεσης) με στόχο την καλύτερη δυνατή δέσμευση της εναπομένουσας ισχύος του ατμού, καθώς κινείται διαμέσου των βαθμίδων. Ο ατμός, εξερχόμενος από τον στρόβιλο σε θερμοκρασία στα επίπεδα βρασμού, ψύχεται και τελικά υγροποιείται μέσω του κρύου νερού στον πύργο ψύξης. Το κρύο νερό επιστρέφει στον πύργο ψύξης και αποβάλλει τη θερμότητα που υιοθέτησε, ενώ το νερό που δημιουργήθηκε μέσω της υγροποίησης του ατμού, επιστρέφει στο λέβητα, αφού πρώτα αποβάλλει τυχόν αέρια. Η εικόνα 1.3 παρουσιάζει μια τυπική διάταξη ενός ατμοστρόβιλου, όπως εκείνη περιγράφηκε. Συνήθως αποτελούν τις μονάδες βάσης σε ένα ΣΗΕ, έχοντας όλα τα χαρακτηριστικά εκείνων των μονάδων, όπως σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής καθώς και μεγάλο χρόνο εκκίνησης. Ο βαθμός απόδοσης τους κυμαίνεται από 30-45% ανάλογα το μέγεθος και τα χρόνια κατασκευής τους.



Εικόνα 1.3 Διάγραμμα διάταξης ενός ατμοστροβίλου

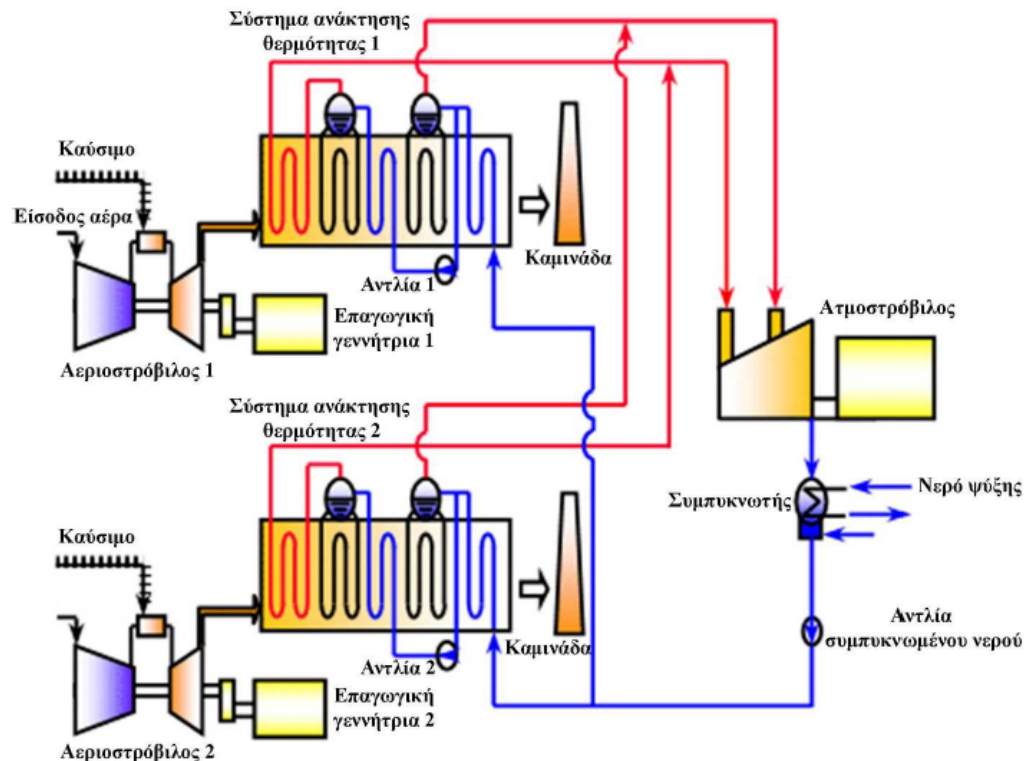
- Ντιζελογεννήτριες:** Αυτού του είδους οι μονάδες, αποτελούνται από μια εμβολοφόρο μηχανή εσωτερικής καύσης και μια γεννήτρια. Η λειτουργία τους βασίζεται στη συμπίεση αέρα ο οποίος έχει συγκεντρωθεί στο θάλαμο καύσης. Στη συνέχεια και ενώ ο αέρας βρίσκεται στη μέγιστη πίεση του, πραγματοποιείται ανάφλεξη καυσίμου το οποίο έχει και αυτό εισαχθεί στο θάλαμο καύσης. Η πίεση και η θερμότητα του αέρα που έχει αυξηθεί μέσω της συμπίεσης ενισχύεται με την επιπλέον θερμότητα που εκλύεται από την καύση του καυσίμου, μέσω χημικής ενέργειας. Η εκτόνωση που πραγματοποιείται από την προαναφερθείσα διαδικασία προκαλεί την ώθηση του εμβόλου, οδηγώντας στη προσφορά ωφέλιμου μηχανικού έργου, κινώντας την γεννήτρια. Ο βαθμός απόδοσης τους ξεπερνάει το 40%, και σε συνδυασμό με την κατανάλωση φτηνού καυσίμου, όπως το μαζούτ, οδηγεί σε χαμηλό κόστος κατανάλωσης καυσίμου. Έχουν γρήγορη απόκριση σε περιπτώσεις εκκίνησης και χρησιμοποιούνται κυρίως σε νησιά όπως η Κρήτη και η Ρόδος, ως μονάδες ενδιάμεσου φορτίου αλλά και ως μονάδες βάσης, σε ορισμένες περιπτώσεις.
- Αεριοστροβίλοι:** Η λειτουργία των μονάδων αυτών μοιάζει με την αντίστοιχη των ντιζελογεννητριών καθώς και οι δύο βασίζονται στη συμπίεση του αέρα με την ανάφλεξη - καύση καυσίμου. Η εικόνα 1.4, παρουσιάζει σχηματικά την διαδικασία παραγωγής ενέργειας σε μια αεριοστροβιλική μονάδα. Οι αεριοστροβίλοι διακρίνονται σε τρία μέρη, το συμπιεστή, το θάλαμο καύσης και τον στρόβιλο. Η περιστροφή του κύριου άξονα εισάγει αέρα από το περιβάλλον, ο οποίος φτάνει στο συμπιεστή και συμπιέζεται, ενώ στη συνέχεια οδηγείται στο θάλαμο καύσης. Εκεί εισάγεται το καύσιμο, το οποίο ενώνεται με τον αέρα υψηλής πίεσης όπου τελικά αναφλέγεται απελευθερώνοντας καυσαέρια. Τα καυσαέρια αυτά οδηγούνται στον στρόβιλο και χάρη στην υψηλή πίεση και θερμοκρασία ($\approx 850^{\circ}\text{C}$) που διαθέτουν αποδίδουν ωφέλιμο μηχανικό έργο που κινεί τη γεννήτρια. Οι μονάδες αυτές έχουν χαμηλό βαθμό απόδοσης με τιμές γύρω στο 30%, διαθέτουν υψηλές τιμές κόστους σχετικά με την κατανάλωση του καυσίμου, συνήθως πετρελαίου (diesel), και για το λόγο αυτό εντάσσονται σε ένα ΣΗΕ ως μονάδες αιχμής.



Εικόνα 1.4 Δομή και σχηματική απεικόνιση λειτουργίας ενός αεριοστρόβιλου

- Συνδυασμένου κύκλου:** Τέτοιου τύπου μονάδες, υποστηρίζουν τη συνδυασμένη λειτουργία κάποιων από των μονάδων των οποίων η ανάλυση προηγήθηκε. Συνήθως οι βασικές μονάδες παραγωγής ενός συνδυασμένου κύκλου είναι αεριοστρόβιλοι ή κάποιες φορές ντιζελογεννήτριες. Από την άλλη πλευρά είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός ατμοστρόβιλου. Συνήθως υπάρχουν δύο αεριοστρόβιλοι, ενώ η παραγωγή μιας τέτοιας μονάδας υφίσταται και με τη λειτουργία ενός αεριοστρόβιλου. Η διαδικασία παραγωγής είναι σχετικά απλή και αποσκοπεί στην αύξηση της απόδοσης του νέου συστήματος. Τα καυσαέρια που προκύπτουν από τη λειτουργία των αεριοστροβίλων, πριν απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα, διέρχονται από ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας, ένα για κάθε αεριοστρόβιλο. Το σύστημα αυτό, εκμεταλλεύεται την υψηλή θερμότητα των καυσαερίων, θερμαίνοντας το νερό μέχρις ότου παραχθεί ατμός. Στη συνέχεια τα καυσαέρια απελευθερώνονται στο περιβάλλον, ενώ ο ατμός οδηγείται στον ατμοστρόβιλο για την επιπλέον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εικόνα 1.5 που ακολουθεί παρουσιάζει σχηματικά την διαδικασία αυτή. Αυτό που πετυχαίνει η νέα αυτή συστοιχία μονάδων είναι ότι η επιπλέον παραγωγή του ατμοστρόβιλου,

πραγματοποιείται χωρίς πρόσθετη κατανάλωση καυσίμου. Ο βαθμός απόδοσης του είναι γύρω στο 50-55% με το κόστος κατανάλωσης καυσίμου να είναι σχετικά υψηλό από τη στιγμή που λειτουργούν αεριοστροβιλικές μονάδες, όμως είναι σαφώς μικρότερο αν συγκριθεί με ένα αυτούσιο αεριοστρόβιλο.



Εικόνα 1.5 Δομή μιας μονάδας συνδυασμένου κύκλου

1.4 Γραμμές Μεταφοράς

1.4.1 Γενικά στοιχεία

Οι γραμμές μεταφοράς αποτελούν τις αρτηρίες των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Συνδέουν τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τα σημεία μέσης ή χαμηλής τάσης. Το δίκτυο Μεταφοράς, μεταφέρει την ηλεκτρική ισχύ από τους σταθμούς παραγωγής σε ειδικούς υποσταθμούς μέσω των γραμμών μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται σε υψηλή τάση, μέσω του δικτύου υψηλής τάσης (150kV) για να μειωθούν οι απώλειες ισχύος, όταν οι αποστάσεις είναι μεγάλες. Οι γραμμές μεταφοράς δεν μπορούν να τροφοδοτήσουν άμεσα τους καταναλωτές που χρησιμοποιούν χαμηλή τάση (230/400V) αλλά φθάνουν μέχρι ορισμένα σημεία, τους υποσταθμούς μεταφοράς, όπου γίνεται υποβιβασμός της τάσης στη μέση τάση, δηλαδή στα 20 kV του δικτύου.

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.

1.4.2 Αγωγοί αλουμινίου

Οι αγωγοί που χρησιμοποιούνται κατά κόρον στις εναέριες γραμμές μεταφοράς είναι οι αγωγοί αλουμινίου. Είναι ελαφριοί, με χαμηλό κόστος και διαθέτουν πολύ καλή ηλεκτρική αγωγιμότητα. Είναι πολύκλωνοι με τους κλώνους τους να περιελίσσονται ελικοειδώς σε αλληπάλληλες στρώσεις, σχηματίζοντας την μορφή ενός συρματόσχοινου. Προτιμώνται από τους μονόκλωνους αγωγούς καθώς παρουσιάζουν μεγαλύτερη ευκαμψία, ενώ παράλληλα είναι πιο εύχρηστοι, με λιγότερες καταπονήσεις και μεγαλύτερη ασφάλεια σε μηχανική θραύση. Ο αριθμός των κλώνων εξαρτάται από τον αριθμό των στρώσεων αλλά και από το γεγονός αν όλοι οι κλώνοι διαθέτουν την ίδια διάμετρο. Οι αγωγοί αλουμινίου ενισχύονται με πυρήνα από κράμα αλουμινίου ή από χάλυβα, εξαιτίας του μικρού φορτίου θραύσης του αλουμινίου (18 Kgr/mm^2). Κύριοι τύποι αγωγών αλουμινίου είναι:

- Αγωγοί εξ ολοκλήρου από αλουμίνιο (All-aluminium conductors, AAC)
- Αγωγοί εξ ολοκλήρου από κράμα αλουμινίου (All-aluminium-alloy conductors, AAAC)
- Αγωγοί αλουμινίου ενισχυμένοι με χάλυβα (Aluminium conductors, steel-reinforced, ACSR)
- Αγωγοί αλουμινίου ενισχυμένοι με κράμα (Aluminium conductors, alloy-reinforced, ACAR)

Οι αγωγοί των γραμμών μεταφοράς χαρακτηρίζονται από τη διατομή τους που μετριέται σε κυκλικά χιλιοστά (CM).

1.4.3 Παράσταση γραμμών μεταφοράς

Η πραγματική γραμμή μεταφοράς είναι ένα κύκλωμα ισοκατανεμημένων παραμέτρων, με την έννοια ότι διαθέτει αντίσταση (R), αυτεπαγωγή (L), χωρητικότητα (C) και αντίσταση διαρροής (r), ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το μήκος. Ο τρόπος παράστασης μιας γραμμής μεταφοράς καθορίζεται στο μεγαλύτερο βαθμό από το μήκος της. Συνεπώς ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- Γραμμές **μικρού μήκους** (έως 80 km περίπου)
- Γραμμές **μεσαίου μήκους** (έως 250 km περίπου)
- Γραμμές **μεγάλου μήκους** (άνω των 250 km)

Το μήκος μιας γραμμής είναι εκείνο που καθορίζει αν θα ληφθεί υπ' όψιν στην παράσταση της ο κατανεμημένος χαρακτήρας των παραμέτρων της, αν εκείνες θεωρηθούν συγκεντρωμένες σε ένα σημείο ή ποιες από αυτές τις παραμέτρους δεν είναι σημαντικές και συνεπώς είναι δυνατόν να αγνοηθούν. Ως εκ τούτου:

Στις γραμμές μικρού μήκους, η συνολική χωρητική αγωγιμότητα είναι τόσο μικρή με αποτέλεσμα να μπορεί να παραληφθεί. Το ρεύμα της εγκάρσιας αγωγιμότητας είναι συνήθως μικρό σε σχέση με το χωρητικό ρεύμα της γραμμής, επομένως και η εγκάρσια αγωγιμότητα μπορεί επίσης να παραλειφθεί.

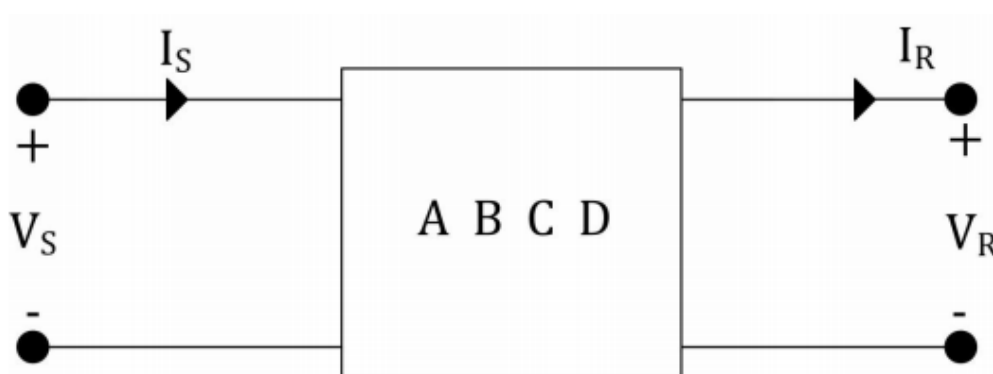
Στις γραμμές μέσου μήκους, η εγκάρσια χωρητικότητα της γραμμής μπορεί να θεωρηθεί χωρισμένη σε δύο ίσα μέρη συγκεντρωμένα στα άκρα της, χωρίς αξιοσημείωτο σφάλμα στον υπολογισμό των τάσεων και των εντάσεων.

Στις γραμμές μεγάλου μήκους, απαιτούνται υπολογισμοί με κατανεμημένες παραμέτρους για την καλύτερη δυνατή ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Οι γραμμές μεταφοράς απεικονίζονται ως δίθυρα κυκλώματα, όπως φαίνεται στην εικόνα 1.6, με δεδομένα τα χαρακτηριστικά της τάσης και του ρεύματος και από την παραγωγή και από την κατανάλωση. Για την ανάλυση των στοιχείων της γραμμής χρησιμοποιούνται οι νόμοι του Kirchhoff για την τάση και την ένταση ρεύματος, όπου A , B , C , D είναι οι παράμετροι του δίθυρου:

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (1.1)$$

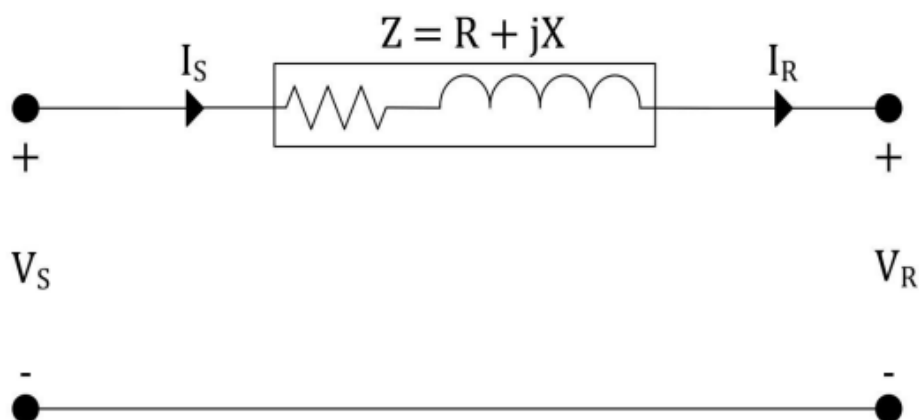
$$I_S = CV_R + DI_R \quad (1.2)$$



Εικόνα 1.6 Γενική μορφή διθύρου

Γραμμές μεταφοράς μικρού μήκους

Εξαιτίας του μικρού μήκους των γραμμών η χωρητική αντίδραση θεωρείται αμελητέα, με συνέπεια να λαμβάνονται υπ' όψιν μόνο τα σε σειρά στοιχεία της γραμμής, η ωμική αντίσταση και η επαγωγική αντίδραση της γραμμής. Στην εικόνα 1.7 απεικονίζεται το μονοφασικό ισοδύναμο κύκλωμα των γραμμών μικρού μήκους.



Εικόνα 1.7 Δίθυρο γραμμής μικρού μήκους

Όπου:

V_s = τάση αναχώρησης στην είσοδο της γραμμής

I_s = ρεύμα αναχώρησης στην είσοδο της γραμμής

V_R = τάση άφιξης στην έξοδο της γραμμής

I_R = ρεύμα άφιξης στην έξοδο της γραμμής

Z = συνολική σύνθετη αντίσταση σειράς

R = ωμική αντίσταση

$X = j\omega L$ = επαγωγική αντίδραση

Από τη στιγμή που δεν υπάρχουν εγκάρσιοι κλάδοι, το ρεύμα στην άφιξη είναι ίδιο με το ρεύμα της αναχώρησης:

$$I_s = I_R \quad (1.3)$$

Ενώ από τον νόμο τάσεων Kirchhoff η τάση V_s προκύπτει ως εξής:

$$V_s = V_R + Z \cdot I_R \quad (1.4)$$

Συνεπώς οι παράμετροι του δίθυρου είναι:

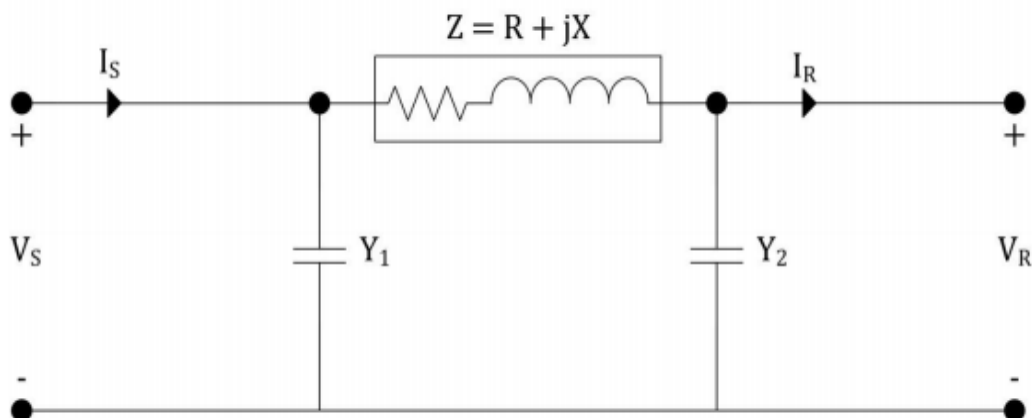
$$A = D = 1 \quad (1.5)$$

$$B = Z \quad (1.6)$$

$$C = 0 \quad (1.7)$$

Γραμμές μεταφοράς μεσαίου μήκους

Για τους υπολογισμούς των γραμμών μέσου μήκους λαμβάνεται υπ' όψιν και η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα, η οποία γενικά θεωρείται ότι αποτελείται μόνο από τη χωρητικότητα. Στην πραγματικότητα η χωρητικότητα είναι κατανεμημένη ομοιόμορφα κατά μήκος της γραμμής. Όμως η ποσότητα αυτή μπορεί να θεωρηθεί συγκεντρωμένη σε ορισμένα σημεία κατά μήκος της γραμμής, με καλή προσέγγιση στους υπολογισμούς. Διαιρώντας την χωρητική αντίδραση σε δύο ίσα μέρη με το καθένα να βρίσκεται στα δύο άκρα της γραμμής, προκύπτει το π-ισοδύναμο των γραμμών μεσαίου μήκους, το οποίο απεικονίζεται στο σχήμα της εικόνας 1.8.



Εικόνα 1.8 Δίθυρο γραμμής μεσαίου μήκους

Έχοντας ως δεδομένο ότι $Y_1=Y_2=Y/2$ προκύπτει ότι:

$$V_S = V_R + Z \cdot (I_R + \frac{V_R \cdot Y}{2}) = (1 + \frac{Y \cdot Z}{2}) \cdot V_R + Z \cdot I_R \quad (1.8)$$

$$I_S = I_R + \frac{V_R \cdot Y}{2} + \frac{V_S \cdot Y}{2} \quad (1.9)$$

Αντικαθιστώντας την (1.8) στην (1.9) στη δεύτερη σχέση προκύπτει ότι:

$$I_S = Y \cdot (1 + \frac{Y \cdot Z}{4}) \cdot V_R + (1 + \frac{Y \cdot Z}{2}) \cdot I_R \quad (1.10)$$

Συμπερασματικά, οι παράμετροι του δίθυρου είναι:

$$A = D = 1 + \frac{Y \cdot Z}{2} \quad (1.11)$$

$$B = Z \quad (1.12)$$

$$C = Y \cdot (1 + \frac{Y \cdot Z}{4}) \quad (1.13)$$

Γραμμές μεταφοράς μεγάλου μήκους

Για τη μελέτη των γραμμών μεταφοράς μεγάλου μήκους, κρίνεται απαραίτητη η θεώρηση των παραμέτρων τους ως ομοιόμορφα κατανεμημένες σε όλο το μήκος τους και όχι ως συγκεντρωμένες παράμετροι. Ως εκ τούτου κάθε τμήμα της γραμμής παρουσιάζει αντίσταση, επαγωγική και χωρητική αντίδραση. Η παράσταση μιας γραμμής μεγάλου μήκους με ένα π-ισοδύναμο κύκλωμα, μπορεί εύκολα να γίνει με τη βοήθεια των υπερβολικών συναρτήσεων. Έτσι, οι γενικευμένες σταθερές A , B , C , D του δίθυρου ορίζονται ως εξής:

$$A = \cosh \gamma l \quad (1.14)$$

$$B = Z_0 \cdot \sinh \gamma l \quad (1.15)$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_0} \quad (1.16)$$

$$D = \cosh \gamma l \quad (1.17)$$

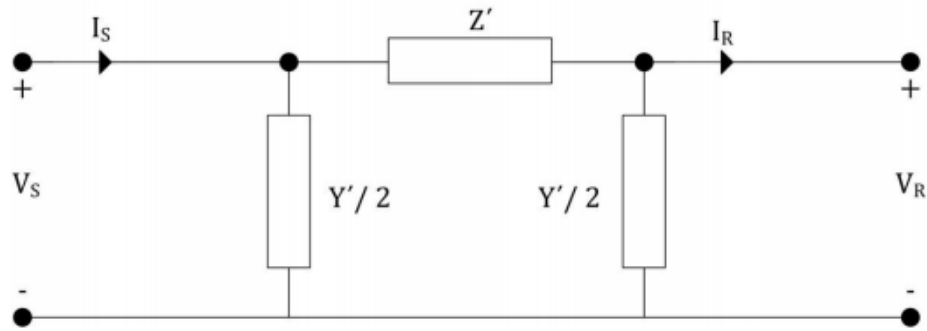
Όπου γ , η σταθερά μετάδοσης της γραμμής με:

$$\gamma = \sqrt{z \cdot y} \quad (km^{-1}) \quad (1.18)$$

Και Z_c η χαρακτηριστική αντίσταση της γραμμής με :

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (\Omega) \quad (1.19)$$

Το π-ισοδύναμο των γραμμών μεταφοράς μεγάλου μήκους είναι πανομοιότυπο με το π-ισοδύναμο των γραμμών μεταφοράς μεσαίου μήκους, με μόνη διαφορά ότι υπάρχουν οι μεταβλητές Z' και Y' αντί των Z και Y , όπως φαίνεται στο σχήμα της εικόνας 1.9 που ακολουθεί:



Εικόνα 1.9 Δίθυρο γραμμής μεγάλου μήκους

$$\begin{bmatrix} \frac{Z'Y'}{2} + 1 & Z' \\ Y' \left(1 + \frac{Z'Y'}{4} \right) & \frac{Z'Y'}{2} + 1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} & \cosh \gamma l \end{bmatrix}$$

Έτσι εξισώνοντας τους δύο πίνακες των παραμέτρων προκύπτει:

$$Z' = Z_c \cdot \sinh \gamma l \quad (1.20)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \cdot \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sinh \gamma l} \quad (1.21)$$

Τροποποιώντας τις εκφράσεις αυτές ώστε να εμφανιστούν οι παράμετροι Z και $Y/2$, προκύπτει ότι:

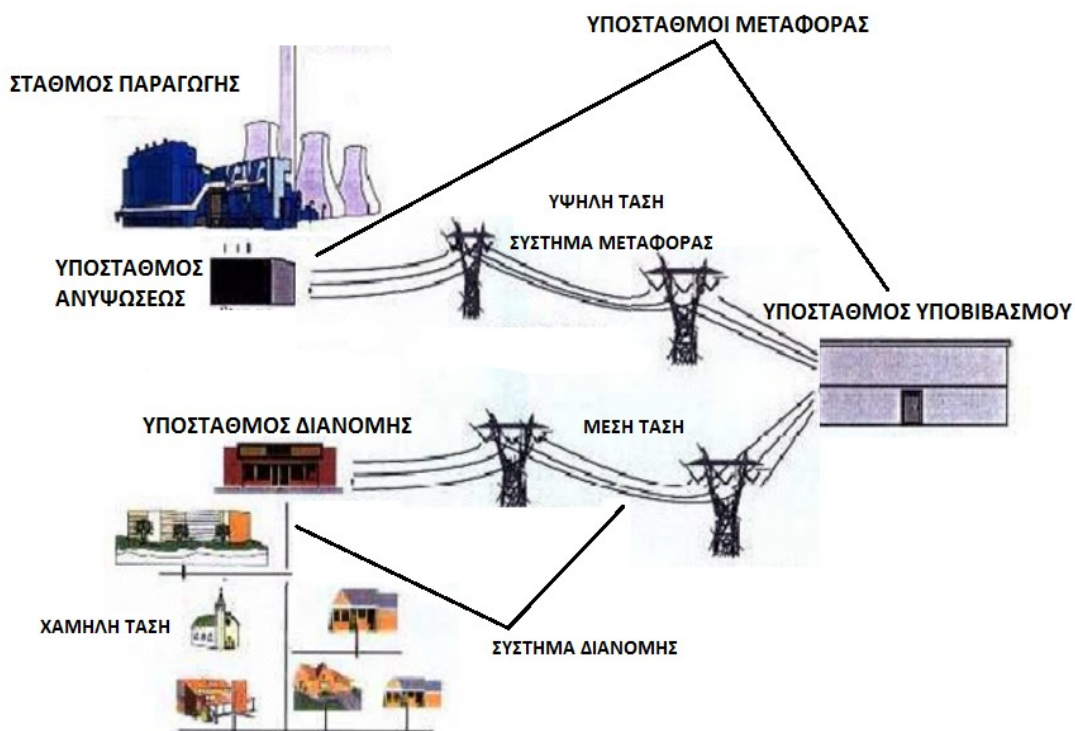
$$Z' = Z_c \cdot \sinh \gamma l = Z \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} \quad (1.22)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_c} \cdot \frac{\cosh \gamma l - 1}{\sinh \gamma l} = \frac{Y}{2} \cdot \left(\frac{\tanh \frac{\gamma l}{2}}{\frac{\gamma l}{2}} \right) \quad (1.23)$$

1.5 Υποσταθμοί

Οι Υποσταθμοί αποτελούν κόμβους στο δίκτυο παροχής Ηλεκτρικής Ενέργειας. Πρόκειται για ηλεκτρικές εγκαταστάσεις που μετασχηματίζουν την τάση, κυρίως με τη λειτουργία κατάλληλων μετασχηματιστών. Ανάλογα με την τάση τροφοδοσίας τους, χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

- **Υποσταθμοί Διανομής.** Είναι εγκατεστημένοι στο δίκτυο διανομής και υποβιβάζουν τη μέση τάση(15-20kV) σε τάση κατανάλωσης (230V).
- **Υποσταθμοί Μεταφοράς.** Βρίσκονται στο δίκτυο μεταφοράς ενός ΣΗΕ και ανάλογα με τη λειτουργία τους διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:
 1. **Υποσταθμοί Ανυψώσεως.** Είναι εγκατεστημένοι κοντά σε σταθμούς παραγωγής, με σκοπό την ανύψωση της τάσης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να μεταφερθεί προς την κατανάλωση με τις λιγότερες δυνατές απώλειες. Δηλαδή από 15 με 20kV που έχουμε στους σταθμούς, γίνεται ανύψωση στα 150kV.
 2. **Υποσταθμοί Υποβιβασμού.** Υποβιβάζουν την υψηλή τάση Μεταφοράς (150kV) σε μέση τάση διανομής(15-20kV).
 3. **Υποσταθμοί Ζεύξεως.** Είναι υπεύθυνοι απλά για την ζεύξη των γραμμών μεταφοράς, χωρίς να συμβαίνει απαραίτητα κάποιος μετασχηματισμός στην τάση.



Εικόνα 1.10 Υποσταθμοί σε ένα ΣΗΕ

Η εικόνα 1.10 περιγράφει συνοπτικά την διαδικασία της μεταφοράς και διανομής της Ηλεκτρικής ενέργειας μέσω των υποσταθμών: Η τάση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, έχει τιμή 15-20kV. Οπότε, μέσω μετασχηματιστή στον υποσταθμό ανύψωσης φτάνει τα 150kV, για να μεταφερθεί σε

μεγάλες αποστάσεις μέσω των γραμμών μεταφοράς, στην πλευρά των καταναλωτών με μικρές απώλειες. Στη συνέχεια μέσω του υποσταθμού υποβιβασμού η υψηλή τάση των 150 kV υποβιβάζεται στην μέση τάση (15-20kV). Από το σημείο αυτό μπορούν να τροφοδοτηθούν μεγάλοι καταναλωτές μέσης τάσης, όπως οι βιομηχανίες. Πριν η ηλεκτρική ενέργεια φτάσει στους μικρούς καταναλωτές, ο υποσταθμός διανομής υποβιβάζει την μέση τάση σε χαμηλή(230V).

1.6 Αιολική ενέργεια

Η οριζόντια και κατακόρυφη κίνηση των αέριων μαζών της ατμόσφαιρας ορίζουν την έννοια του ανέμου. Αιτία της δημιουργίας του ανέμου είναι η διαφορά της θερμοκρασίας του αέρα που δημιουργεί διαφορές βαρομετρικής πίεσης μεταξύ παρακείμενων τόπων, με αποτέλεσμα τη μετακίνηση αέριας μάζας από τη ψυχρότερη προς την θερμότερη περιοχή. Η ισχύς μιας αέριας δέσμης υπολογίζεται με τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{Air} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1.24)$$

όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, A η επιφάνεια που καλύπτει η δέσμη του ανέμου που μελετάται (για τις Α/Γ θεωρείται η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων) και V η ταχύτητα του ανέμου. Η πυκνότητα του αέρα, εξαρτάται από την ατμοσφαιρική πίεση P και την απόλυτη θερμοκρασία T του μέρους που μελετάται, σύμφωνα με το νόμο των ιδανικών αερίων:

$$\rho = \frac{P}{R \cdot T} \quad (1.25)$$

όπου R η παγκόσμια σταθερά αερίων.

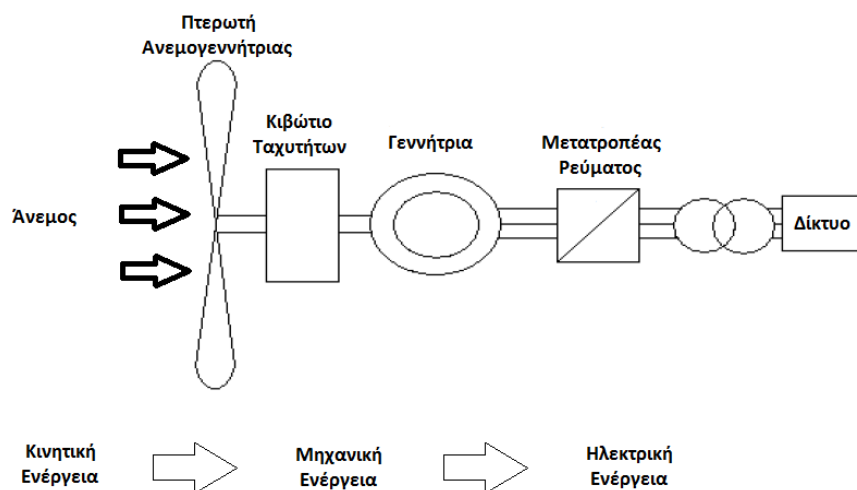
Η ταχύτητα του ανέμου είναι το χαρακτηριστικό που αποτελεί κριτήριο για την εγκατάσταση αιολικών τεχνολογιών (Α/Γ), καθώς η ισχύς του ανέμου είναι ανάλογη με τον κύβο της ταχύτητας του. Η εγκατάσταση αιολικών πάρκων (Α/Π) παρουσιάζει επενδυτικό ενδιαφέρον σε περιοχές με μέση ταχύτητα του ανέμου ετησίως, μεγαλύτερη των 5,5 m/sec. Τέτοιες είναι:

- Περιοχές κοντά σε θαλάσσιες ακτές
- Περιοχές με ομαλό πεδίο
- Ομαλές κορυφογραμμές

Η εγκατάσταση τους γίνεται σύμφωνα με την επικρατούσα διεύθυνση του ανέμου της περιοχής, για την καλύτερη δυνατή απόδοση τους. Επίσης σχετικά με την χωροθέτηση τους, η απόσταση των γεννητριών σε μια συστοιχία δεν πρέπει να είναι κάτω από 2-4 διαμέτρους σαρωτής και η απόσταση μεταξύ των συστοιχιών ορίζεται περίπου στις 7-10 διαμέτρους σαρωτής, για την αποφυγή αλληλεπιδράσεων μεταξύ των Α/Γ.

Η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής γίνεται με τη χρήση των ανεμογεννητριών. Η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική ενέργεια, αποτελεί την αρχή λειτουργίας μιας Α/Γ. Ο άνεμος, εισέρχεται στην διάταξη περιστρέφοντας τα πτερύγια, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα

(δρομέας). Συνεπώς η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική. Στη συνέχεια, η χαμηλή ταχύτητα περιστροφής του δρομέα από τον άνεμο αυξάνεται μέσω του κιβωτίου ταχυτήτων. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής, ο οποίος κινεί μια γεννήτρια, μετατρέποντας πλέον την ενέργεια σε ηλεκτρική. Διατάξεις φρένων (δισκόφρενα) είναι εγκατεστημένες στο σύστημα, με στόχο τον περιορισμό των υψηλών ταχυτήτων περιστροφής των πτερυγίων για την προστασία της Α/Γ. Ειδικοί μετατροπείς ρεύματος (DC/AC, AC/DC/AC), ανάλογα με τις ανάγκες της διάταξης, παρεμβάλλονται πριν την διοχέτευση της ενέργειας στο δίκτυο. Η εικόνα 1.11 παρουσιάζει σχηματικά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μιας τυπικής Α/Γ.



Εικόνα 1.11 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας μιας τυπικής Α/Γ

1.6.1 Συντελεστής ισχύος

Η πραγματική ισχύς που εκμεταλλεύεται μια Α/Γ αποτελεί ένα ποσοστό της ισχύος του αέρα που προσπίπτει στα πτερύγια. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της Α/Γ και ορίζεται ως συντελεστής ισχύος C_p . Ουσιαστικά, αποτελεί τον αεροδυναμικό βαθμό της πτερωτής με αποτέλεσμα η βελτίωση του συντελεστή ισχύος να βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στην αεροδυναμική σχεδίαση των πτερυγίων. Σύμφωνα με τον Betz η βελτίωση του C_p δεν μπορεί να ξεπεράσει το άνω όριο 59,3% ($C_p \leq \frac{16}{27} = 0,593$). Συνεπώς η ισχύς μιας Α/Γ ορίζεται ως εξής:

$$P_{A/G} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot \eta_{H/M} \quad (1.26)$$

Όπου ρ η πυκνότητα του αέρα, A η επιφάνεια σάρωσης των πτερυγίων, V η ταχύτητα του ανέμου και $\eta_{H/M}$ ο ηλεκτρομηχανικός βαθμός απόδοσης της Α/Γ.

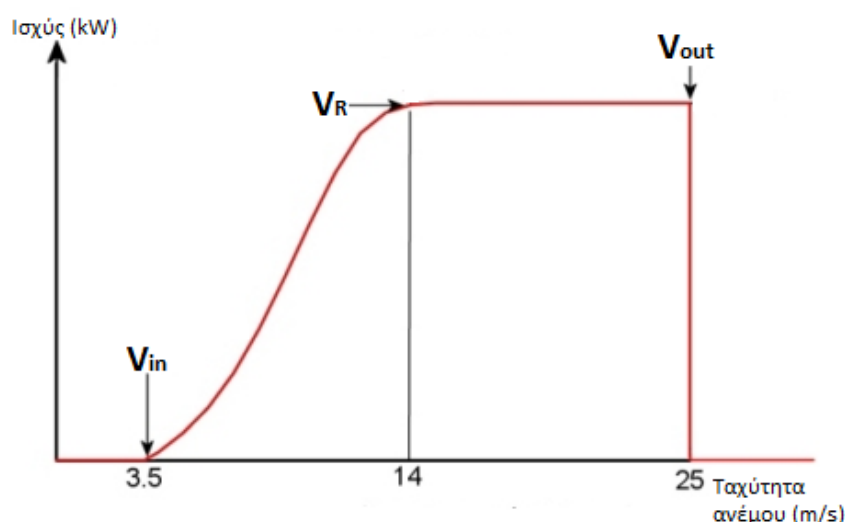
1.6.2 Καμπύλη Ισχύος

Σημαντικό παράγοντα για το αξιοποιήσιμο, από μια Α/Γ, αιολικό δυναμικό μιας περιοχής αποτελεί η καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ, η οποία εξαρτάται από τα τεχνικά

χαρακτηριστικά, το σχεδιασμό της και την ταχύτητα του ανέμου. Συνεπώς, ορίζονται τρία σημεία λειτουργίας για κάθε Α/Γ ανάλογα με την ταχύτητα του ανέμου:

- **Ταχύτητα έναρξης λειτουργίας – V_{in} :** Κυμαίνεται μεταξύ 2 - 5 m/sec ταχύτητας ανέμου και αποτελεί την ταχύτητα στην οποία ξεκινάει τη λειτουργία της η Α/Γ. Για τιμές κάτω από την V_{in} , η Α/Γ δεν περιστρέφεται εξαιτίας του ότι οι απώλειες κενού φορτίου, είναι μεγαλύτερες από την παραγόμενη ισχύ.
- **Ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας - V_R :** Πρόκειται για τη μικρότερη ταχύτητα ανέμου (10 - 15 m/sec), στην οποία η Α/Γ λειτουργεί στην ονομαστική της ισχύ. Για τιμές πάνω από την ονομαστική ταχύτητα λειτουργίας (υψηλές ταχύτητες), υπάρχει απώλεια σημαντικού μέρους της ενέργειας του ανέμου, καθώς η παραγόμενη ισχύς της Α/Γ παραμένει σταθερή για λειτουργικούς λόγους.
- **Ταχύτητα διακοπής λειτουργίας - V_{out} :** Αφορά τις ιδιαίτερα υψηλές ταχύτητες του ανέμου με τυπικές τιμές 20 - 25 m/sec, όπου για λόγους ασφαλείας διακόπτεται η λειτουργία της Α/Γ.

Η εικόνα 1.12 παρουσιάζει την καμπύλη ισχύος μιας Α/Γ για τις τρεις τυπικές ταχύτητες του ανέμου.



Εικόνα 1.12 Καμπύλη ισχύος Α/Γ

1.6.3 Συντελεστής χρησιμοποίησης

Κριτήριο για την αποδοτικότητα των Α/Γ αποτελεί ο ετήσιος συντελεστής χρησιμοποίησης, ο οποίος ορίζεται ως εξής:

$$Ετήσιος _ \Sigma X = \frac{E_{WYear}}{P_R \cdot 8760h} \quad (1.27)$$

όπου E_{WYear} (kWh) είναι η ενέργεια που παράγει η Α/Γ σε ένα χρόνο, και P_R (MW) η ονομαστική της ισχύ και εκφράζει το πηλίκο της ενέργειας που παράγει σε ένα χρόνο η Α/Γ

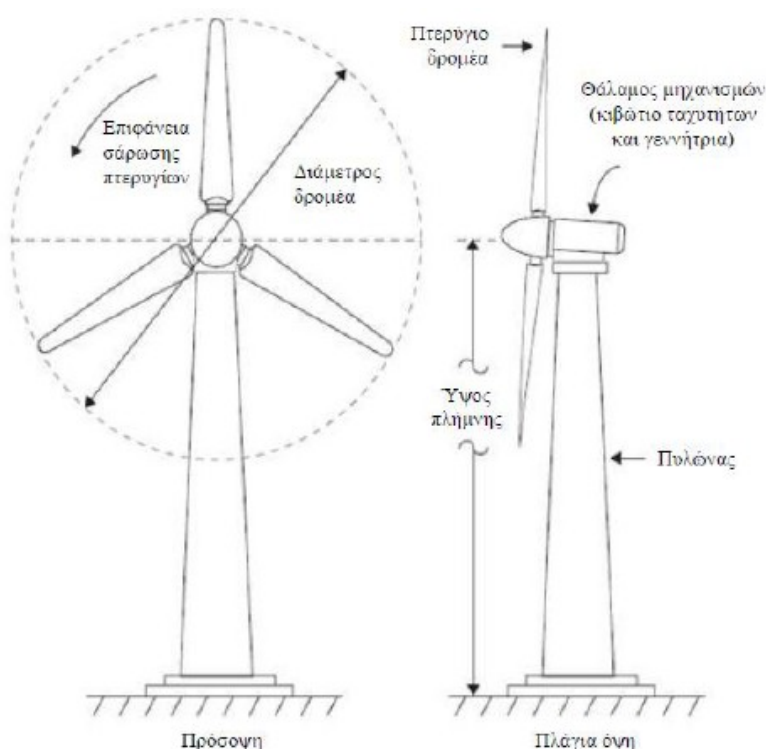
με την ενέργεια που θα παρήγαγε στη διάρκεια ενός έτους (8760 ώρες), εφόσον λειτουργούσε στην ονομαστική της ισχύ.

1.6.4 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου - κατακόρυφου άξονα

Ανάλογα με τον προσανατολισμό του άξονα τους, οι ανεμογεννήτριες διακρίνονται σε 2 κατηγορίες:

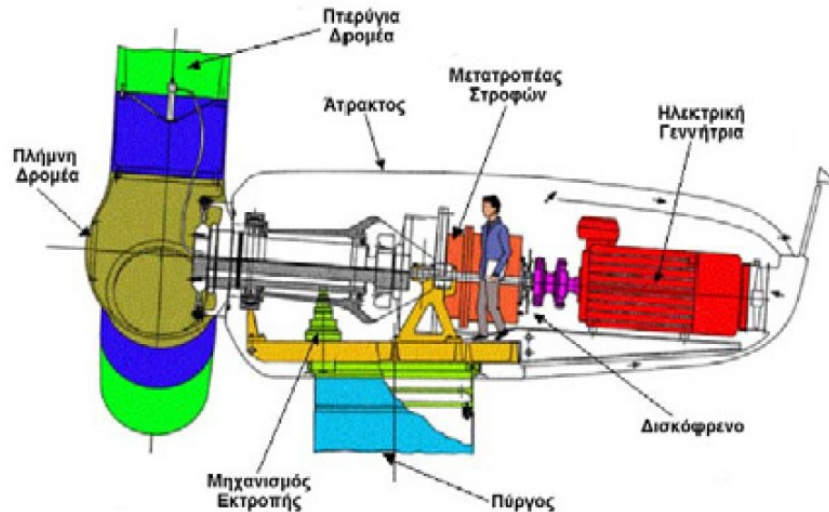
- **Οριζόντιου άξονα**, παράλληλο με την κατεύθυνση του ανέμου και του εδάφους, που συναντώνται κατά κόρον στην πράξη.
- **Κατακόρυφου άξονα**, που είναι σταθερός και κάθετος στην επιφάνεια του εδάφους.

Στην εικόνα 1.13 διακρίνεται η εξωτερική όψη μιας Α/Γ οριζόντιου άξονα σε πρόσοψη και πλάγια όψη. Ο δρομέας αποτελεί το βασικό στοιχείο λειτουργίας της διάταξης και αποτελείται από την πλήμνη και τα πτερύγια (δύο ή τρία), ενώ ο πυλώνας αποτελεί τη βάση στήριξης ολόκληρης της ηλεκτρομηχανολογικής εγκατάστασης.



Εικόνα 1.13 Τμήματα Α/Γ οριζόντιου άξονα

Διεισδύοντας στο εσωτερικό του θαλάμου μηχανισμών της Α/Γ (εικόνα 1.14), τα κύρια μέρη που διακρίνονται είναι η ηλεκτρική γεννήτρια, ο μετατροπέας ισχύος που υπάρχει μεταξύ της γεννήτριας και του φορτίου, το κιβώτιο ταχυτήτων, το σύστημα πέδησης (δισκόφρενο) καθώς και το σύστημα προσανατολισμού που είναι υπεύθυνο για την ασφάλεια και την καλύτερη δυνατή απόδοση της Α/Γ, αναγκάζοντας τον άξονα περιστροφής του δρομέα να είναι συνεχώς παράλληλα με τη διεύθυνση του ανέμου.



Εικόνα 1.14 Θάλαμος μηχανισμών Α/Γ οριζόντιου άξονα

Οι Α/Γ ανάλογα με τις αρχές λειτουργίας και ελέγχου τους, διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, σε ανεμογεννήτριες:

- **Σταθερών στροφών:** με την ταχύτητα περιστροφής τους να βρίσκεται λίγο πιο πάνω από τη σύγχρονη ταχύτητα, που είναι άμεσα συνδεδεμένη με τη συχνότητα του δικτύου. Η σύνδεση αυτών των γεννητριών γίνεται απ' ευθείας με το δίκτυο μέσω μιας επαγωγικής γεννήτριας και δεν υπάρχει η δυνατότητα ελέγχου ποιότητας της εγχεόμενης στο δίκτυο ισχύος.
- **Μεταβλητών στροφών:** σε αντίθεση με τις Α/Γ σταθερών στροφών έχουν ένα μεγαλύτερο εύρος στροφών λειτουργίας πάνω και κάτω από την σύγχρονη ταχύτητα. Ο σχεδιασμός τους, επιδιώκει την βελτιστοποίηση της ταχύτητας περιστροφής ανάλογα με την τιμή του εισερχόμενου ανέμου, οδηγώντας στην καλύτερη ενεργειακή απόδοση των Α/Γ. Αποτελούνται από μια σύγχρονη ή επαγωγική γεννήτρια και συνδέονται στο δίκτυο μέσω ενός μετατροπέα ισχύος.

Οι γεννήτριες των ανεμογεννητριών μπορεί να είναι είτε **σύγχρονες** είτε **ασύγχρονες**. Οι σύγχρονες γεννήτριες είναι πιο απλές στην κατασκευή τους (απλούστερο κιβώτιο ταχυτήτων) , έχουν χαμηλό κόστος και έχουν καλύτερη συμπεριφορά στο δίκτυο που είναι εγκατεστημένες. Αντίθετα οι ασύγχρονες γεννήτριες διαθέτουν παλαιότερες τεχνολογίες ενώ τείνουν να ζητούν άεργο ισχύ από το δίκτυο, ιδίως σε περιπτώσεις υψηλού αιολικού δυναμικού.

1.7 Ηλιακή Ενέργεια

Η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο και φτάνει στη γη, με διάφορες μορφές ενέργειας όπως το φως και η θερμότητα χαρακτηρίζεται ως ηλιακή ενέργεια. Πρόκειται για μια μορφή ενέργειας, στην οποία οφείλεται η ύπαρξη του ανθρώπου και γενικότερα η ζωή πάνω στον πλανήτη γη. Είναι πρακτικά ανεξάντλητη, αφού προέρχεται από τον ήλιο, και ως εκ τούτου δεν υπάρχουν περιορισμοί χώρου και χρόνου για την εκμετάλλευσή της. Η ηλιακή ενέργεια είναι πρωτογενής, ήπια και ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, η οποία έμμεσα δίνει γένεση σε άλλες τρεις ήπιες και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την υδραυλική (υδατοπτώσεις), την αιολική (ενέργεια του ανέμου) και την ενέργεια της βιομάζας (ενέργεια

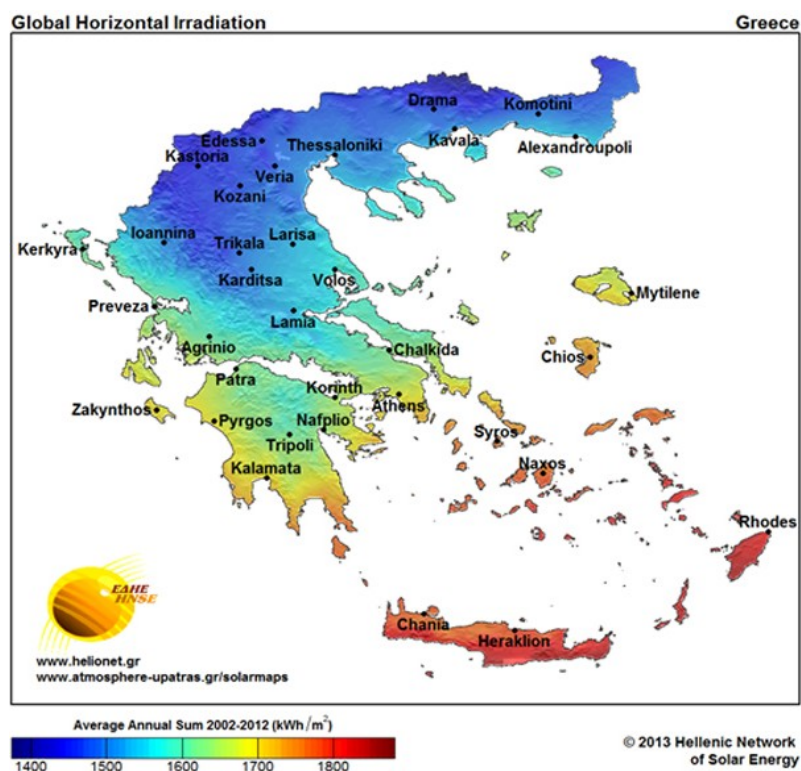
από φυτά). Η γη δέχεται τεράστιες ποσότητες ηλιακής ενέργειας καθημερινά, η οποία φτάνει σχεδόν αμετάβλητη στο ανώτατο στρώμα της ατμόσφαιρας του πλανήτη γη με την προσπίπτουσα ακτινοβολία να διαφέρει ανάλογα με την εποχή, την ώρα και τις καιρικές συνθήκες.

Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας έχει γνωρίσει ραγδαία ανάπτυξη τον 21^ο αιώνα και διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες:

- Τα παθητικά ηλιακά συστήματα
- Τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα
- Τα φωτοβολταϊκά συστήματα

Η λειτουργία των παθητικών και των ενεργητικών ηλιακών συστημάτων βασίζεται στην θερμότητα που εκπέμπεται μέσω της ηλιακής ακτινοβολίας και χρησιμοποιείται σε συστήματα ψύξης και θέρμανσης. Από την άλλη πλευρά, τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Αποτελούν μια ιδιαίτερα ανεπτυγμένη τεχνολογία ΑΠΕ, συμβάλλοντας στην συνολική παραγωγή συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

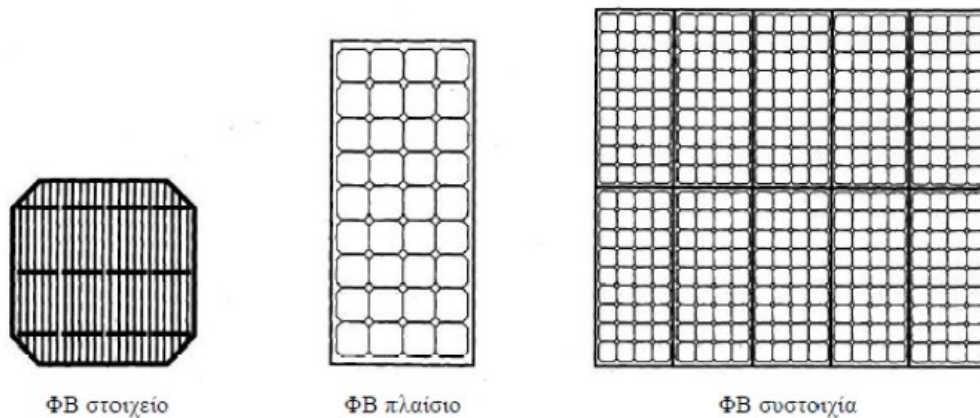
Κύριο χαρακτηριστικό της χώρας μας, αποτελεί η μεγάλη ηλιοφάνεια που παρατηρείται στη διάρκεια του έτους. Η Ελλάδα βρίσκεται στην 11^η θέση ανάμεσα σε 40 χώρες στον κόσμο στον δείκτη ηλιακού δυναμικού. Το μεγαλύτερο τμήμα της έχει ηλιοφάνεια για παραπάνω από 2700 ώρες το χρόνο ενώ σημαντικό στοιχείο για το ηλιακό δυναμικό της χώρας είναι πως η ηλιακή ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο κυμαίνεται από 1390 kWh έως και πάνω από 1670 kWh ανά τετραγωνικό μέτρο. Η εικόνα 1.15 παρουσιάζει τη μέση ετήσια ηλιακή ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας (kWh /m²) για τον ελληνικό χώρο, με την Κρήτη και τα νησιά του νοτίου Αιγαίου να φτάνουν τις 2100 kWh /m².



Εικόνα 1.15 Ελληνικός κλιματολογικός χάρτης ηλιακής ενέργειας

1.7.1 Φωτοβολταϊκά συστήματα

Τα φωτοβολταϊκά (Φ/Β) συστήματα, μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική μέσω του φωτοβολταϊκού φαινομένου. Αποτελούνται από διόδους ημιαγωγών πυριτίου οι οποίες καθώς δέχονται την ηλιακή ακτινοβολία στην επιφάνειά τους, εκδηλώνουν διαφορά δυναμικού στην εμπρός και την πίσω όψη τους, παράγοντας συνεχές ρεύμα. Ουσιαστικά, τα ηλεκτρόνια των ατόμων του Φ/Β στοιχείου απορροφούν την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτός, αναγκάζοντας τα να κινηθούν, με συνέπεια τη δημιουργία ηλεκτρικού συνεχούς ρεύματος (DC). Μια Φ/Β διάταξη έχει ως βασικό μέρος, το Φ/Β στοιχείο, το οποίο αποτελεί τη θεμελιώδη μονάδα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική. Τα Φ/Β στοιχεία συνδέονται μεταξύ τους σε σειρά ή σε παράλληλες σειρές, συνθέτοντας ένα Φ/Β πλαίσιο. Τα Φ/Β πλαίσια με τη σειρά τους, είναι η βασική δομική μονάδα ενός τέτοιου συστήματος και η παράλληλη ή η σε σειρά σύνδεση τους δημιουργεί τη Φ/Β συστοιχία. Η εικόνα 1.16 απεικονίζει την ιεραρχία Φ/Β συστημάτων σύμφωνα με την παραπάνω περιγραφή.



Εικόνα 1.16 Ιεραρχία Φ/Β συστημάτων

Σε μια εγκατάσταση, τα Φ/Β πλαίσια τοποθετούνται σε ειδικές κατασκευές στήριξης. Πρόκειται για δύο κατηγορίες συστημάτων στήριξης:

- Τα σταθεροποιημένα συστήματα, όπου τα Φ/Β πλαίσια διατηρούν σταθερή κλίση και προσανατολισμό.
- Τα συστήματα ιχνηλάτισης, στα οποία τα Φ/Β πλαίσια μετακινούνται, ακολουθώντας την πορεία του ηλίου κατά τη διάρκεια της ημέρας, με στόχο την καλύτερη απόδοση στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια.

Ο προσανατολισμός τους, επιλέγεται από νοτιοανατολικός έως νοτιοδυτικός, ενώ η κλίση της επιφάνειάς τους επιδιώκεται να είναι ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Αξίζει να σημειωθεί ότι η απόδοση μιας Φ/Β εγκατάστασης, υπολογίζεται με τον συντελεστή χρησιμοποίησης (ΣΧ) που ορίζεται ως εξής: Αποτελεί το πηλίκο της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη Φ/Β εγκατάσταση προς την ενέργεια που θα παραγόταν εάν λειτουργούσε στην ονομαστική της ισχύ για διάστημα ενός έτους.

Οι Φ/Β εγκαταστάσεις συνδέονται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας συνήθως στη χαμηλή τάση (230V). Εξαιτίας του ότι τα φωτοβολταϊκά παράγουν συνεχές (DC) ρεύμα και το δίκτυο είναι (AC) εναλλασσόμενου ρεύματος, απαιτείται η εγκατάσταση inverters (DC/AC μετατροπείς). Επιπρόσθετα, υπάρχουν και εγκαταστάσεις Φ/Β που συνδέονται άμεσα στη

μέση τάση (20Kv). Πρόκειται για Φ/Β πάρκα με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη των 100kWp, τα οποία συνδέονται σε υποσταθμούς που μετατρέπουν την χαμηλή σε μέση τάση (ΧΤ/ΜΤ).

1.8 Υβριδικός σταθμός με αντλησιοταμίευση

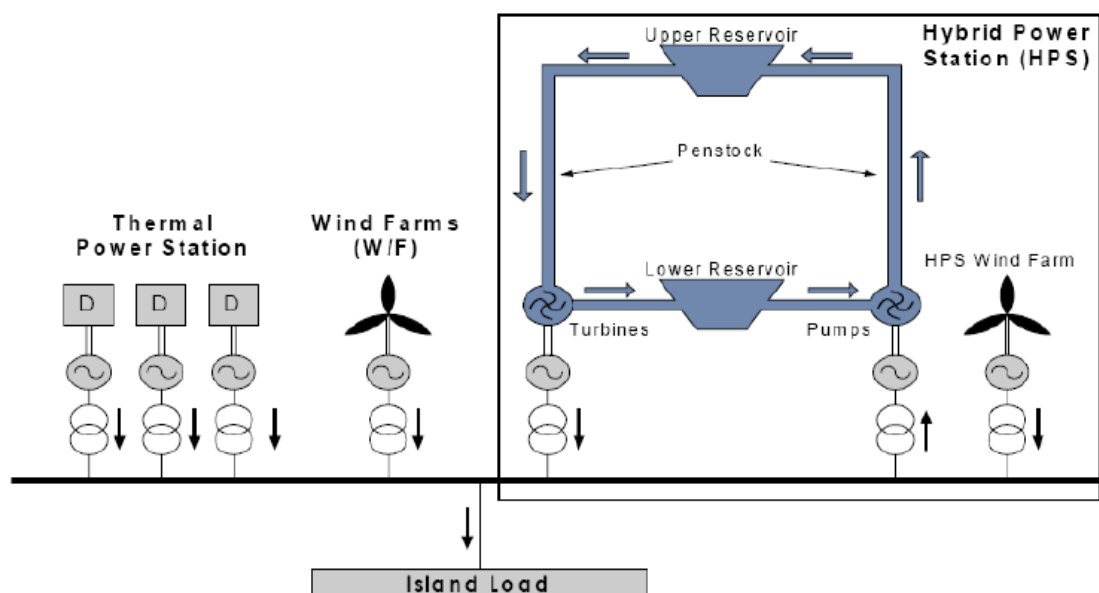
Η εργασία αυτή ερευνά τη λειτουργία της πιο διαδεδομένης τεχνολογίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλων συστημάτων, στο ΣΗΕ της Κρήτης, των υβριδικών αντλησιοταμιευτικών σταθμών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, με αιολικά πάρκα. Κάθε τέτοια διάταξη, αποτελείται από ένα σταθμό αντλησιοταμίευσης και συγκεκριμένα αιολικά πάρκα, η οποία ανήκει σε έναν ιδιοκτήτη. Ο βασικός σκοπός λειτουργίας μιας τέτοιας διάταξης, είναι η αποθήκευση αιολικής ενέργειας (κυρίως για αυτόνομα ΣΗΕ), που υπό κανονικές συνθήκες θα απορριπτόταν από το δίκτυο, εξαιτίας των περιορισμών για την ασφαλή λειτουργία του, αυξάνοντας έτσι την αιολική διείσδυση. Η εγκατεστημένη ισχύς τους ανέρχεται στα 100GW παγκοσμίως, ενώ για την Κρήτη υπάρχει ήδη μελέτη για την εγκατάστασή του στην περιοχή της Σταλίδας του Νομού Ηρακλείου. Έχει υψηλό κόστος κατασκευής και συντήρησης αλλά πολύ μικρό κόστος λειτουργίας, ειδικά αν συγκριθεί με συμβατικές μονάδες. Η λειτουργία του εκκινεί και σταματά σχετικά γρήγορα γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα χρήσιμο σε περιόδους αιχμής.

Σύμφωνα με το ελληνικό νομοθετικό πλαίσιο, ένας υβριδικός σταθμός είναι μια μονάδα παραγωγής ενέργειας που: α) χρησιμοποιεί τουλάχιστον μία μορφή ΑΠΕ, β) η συνολική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που λαμβάνεται από το δίκτυο σε ετήσια βάση δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ποσότητας ενέργειας που καταναλώνεται για την φόρτιση του συστήματος αποθήκευσης του εν λόγω σταθμού, και γ) η μέγιστη ισχύς των μονάδων του σταθμού ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν πρέπει να υπερβαίνει το 20% της εγκατεστημένης ισχύς του υβριδικού σταθμού. Αξίζει να σημειωθεί ότι είναι δυνατόν να εγκατασταθεί ένας σταθμός ΑΠΕ με μεγαλύτερη χωρητικότητα σε σχέση με την χωρητικότητα των μονάδων αντλησιοταμίευσης, ωστόσο η παραγόμενη ποσότητα ΑΠΕ που υπερβαίνει το όριο + 20%, απορρίπτεται.

Ο υβριδικός αντλησιοταμιευτικός σταθμός αντιπροσωπεύει την πιο ώριμη τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλης κλίμακας. Αποτελείται από δύο δεξαμενές, μια σε υψηλό σημείο και μία σε χαμηλό, μια αντλία, κατάλληλους μετασχηματιστές για τη σύνδεση του με το δίκτυο, σωλήνες νερού και ένα υδροστρόβιλο, όπως φαίνεται και στην εικόνα 1.17. Οι δεξαμενές τοποθετούνται σε κατάλληλο υδραυλικό ύψος, συνήθως μεγαλύτερο των 300m, ενώ η χωρητικότητα τους καθορίζεται συνήθως από τις απαιτήσεις του σταθμού για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα του υβριδικού σταθμού για την παραγωγή και την άντληση μπορεί να διαφέρουν, διαθέτοντας διπλή σωλήνωση με ξεχωριστούς αγωγούς για την κάθε λειτουργία. Το γεγονός αυτό, προσφέρει στο σύστημα αντλησιοταμίευσης τη σημαντική δυνατότητα για ταυτόχρονη παραγωγή και άντληση.

Η λειτουργία της αντλησιοταμιευτικής εγκατάστασης οφείλεται στην κινητική ενέργεια που προσφέρει το νερό κινούμενο από την πάνω δεξαμενή στην πιο κάτω, αποφορτίζοντας το σύστημα. Ωστόσο, με την βοήθεια της αντλίας γίνεται η φόρτιση, όπου το νερό κινείται αντίθετα με πριν, από την κάτω στην πιο πάνω δεξαμενή. Οπότε ο

υβριδικός σταθμός, φορτίζεται συνήθως σε περιόδους χαμηλής ζήτησης κυρίως τη νύχτα και αποφορτίζεται σε περιόδους υψηλής ζήτησης ή σε ώρες αιχμής, προσφέροντας ενέργεια στο ΣΗΕ. Η φόρτιση αυτή απαιτεί ενέργεια η οποία του παρέχεται κυρίως από συγκεκριμένα αιολικά πάρκα, αλλά και από το δίκτυο με μικρότερη συχνότητα, με την ανάλογη τιμολόγηση. Τα αιολικά πάρκα που εξυπηρετούν το σταθμό, δεν είναι απαραίτητο να βρίσκονται εγκατεστημένα στον ίδιο ζυγό ή περιοχή με την υπόλοιπη διάταξη.



Εικόνα 1.17 Υβριδικός σταθμός, συνδεδεμένος σε ένα νησιωτικό σύστημα

Η λειτουργία του υβριδικού σταθμού, προσαρμόζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου στο οποίο είναι εγκατεστημένος. Υπάρχει δυνατότητα χρησιμοποίησης του σταθμού ως μονάδα βάσης, προσδίδοντας στο δίκτυο την εγγυημένη ισχύ καθώς επίσης και η δυνατότητα χρησιμοποίησης του ως μονάδα αιχμής σε ώρες υψηλής ζήτησης, υποκαθιστώντας σε κάθε περίπτωση τις αντίστοιχες μονάδες ανάλογα με τη διαθεσιμότητα του νερού. Ανάλογα με τις απαιτήσεις του δικτύου και την κατάσταση των δύο δεξαμενών, προκύπτουν οι καταστάσεις λειτουργίας του, όπως φαίνονται στον πίνακα 1.1:

Πίνακας 1.1 Καταστάσεις λειτουργίας ενός αντλησιοταμιευτικού σταθμού.

Καταστάσεις	Υδροστρόβιλος	Αντλία	Αιολικά
1	OFF	ON	ON
2	OFF	ON	OFF
3	ON	OFF	OFF
4	ON	ON	ON
5	ON	ON	OFF
6	OFF	OFF	ON

Η κατάσταση 1, αντιπροσωπεύει την φόρτιση και την αποθήκευση της αιολικής ενέργειας στην υβριδική διάταξη. Η αντλία «καταναλώνοντας» την αιολική ενέργεια των πάρκων του σταθμού, πραγματοποιεί την άντληση του νερού στην πάνω δεξαμενή. Ίδια διαδικασία

ακολουθείται και στην κατάσταση 2, με τη διαφορά όμως ότι ο σταθμός ζητάει ενέργεια από το δίκτυο, για την άντληση και όχι από τα αιολικά. Στην κατάσταση 3, βρίσκεται σε λειτουργία μόνο ο υδροστρόβιλος όπου γίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της κίνησης του νερού από την πάνω δεξαμενή. Στην κατάσταση 4 και 5 συμβαίνει ταυτόχρονη παραγωγή και άντληση από τον υβριδικό σταθμό, με τη διαφορά στη δεύτερη περίπτωση να είναι ότι υπάρχει ζήτηση ενέργειας από το δίκτυο για τη διαδικασία της άντλησης. Τέλος, υπάρχει και η δυνατότητα η αιολική παραγωγή των πάρκων να διοχετεύεται απ' ευθείας στο δίκτυο εάν υπάρχει δυνατότητα απορρόφησης της, σε περιπτώσεις που ο σταθμός είναι σε πλήρη φόρτιση, όπως δηλώνει η κατάσταση 6.

Ο ιδιοκτήτης του υβριδικού σταθμού ηλεκτροπαραγωγής δηλώνει την εγγυημένη ενέργεια, η οποία ισούται με τη μέγιστη ισχύ του σταθμού P_{hydro} και τον αριθμό ωρών εγγυημένης ισχύος. Όσον αφορά την αρχή λειτουργίας ενός σταθμού αντλησιοταμίευσης με τη χρήση αιολικής ενέργειας, μπορούν να εξεταστούν οι ακόλουθες περιπτώσεις :

1^η Περίπτωση: Εάν η συνολική ισχύς των αιολικών πάρκων είναι μικρότερη από την εγκατεστημένη ισχύ του υβριδικού σταθμού P_{pump} , η συνολική παραγόμενη αιολικής ισχύς μπορεί να αποθηκευτεί στο σταθμό, λαμβάνοντας υπ όψιν τα ανώτερα και κατώτερα όρια των δεξαμενών.

2^η Περίπτωση: Εάν η συνολική ισχύς των αιολικών πάρκων είναι μεγαλύτερη από την εγκατεστημένη ισχύ του υβριδικού σταθμού, P_{pump} και λιγότερη από $1,2 \times P_{pump}$, η ποσότητα αιολικής ισχύος που δεν μπορεί να αποθηκευτεί μπορεί να προσφερθεί απευθείας στο δίκτυο, εφόσον υπάρχει δυνατότητα απορρόφησης πρόσθετης ισχύος από ΑΠΕ, διαφορετικά απορρίπτεται.

3^η Περίπτωση: Εάν η συνολικής ισχύς των αιολικών πάρκων δεν είναι αρκετή για την εξυπηρέτηση της ζήτησης της αντλίας, η ισχύς αυτή παρέχεται από το δίκτυο με ειδική τιμολόγηση.

Άλλοι περιορισμοί που σχετίζονται με τη λειτουργία των υβριδικών σταθμών ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνουν ότι: α) η ενέργεια που παρέχεται από υβριδικούς σταθμούς στις πρώτες 12 ώρες της ημέρας δεν μπορεί να υπερβεί την αντίστοιχη ενέργεια που παρέχεται τις τελευταίες 12 ώρες της ημέρας, β) η ημερήσια παραγόμενη ενέργεια πρέπει να είναι τουλάχιστον $2 \times P_{hydro}$, και γ) σε ορισμένες ημέρες (ειδικά με υψηλό φορτίο) ο υβριδικός σταθμός πρέπει να παρέχει την εγγυημένη ενέργεια.

1.9 Σκοπός και δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασία μελετάει τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης σε δύο στάδια: πριν και μετά την εγκατάσταση ενός υβριδικού σταθμού με αντλησιοταμίευση. Σε αρχικό στάδιο προσομοιώνεται το υπάρχον δίκτυο του νησιού, σε επίπεδο υψηλής τάσης, με στόχο την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της πραγματικής του λειτουργίας. Στη συνέχεια εγκαθίσταται ο υβριδικός σταθμός και γίνεται εκ νέου μελέτη του δικτύου με στόχο την εξαγωγή σημαντικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων για τη λειτουργία του ΣΗΕ και του νέου υβριδικού σταθμού. Η μελέτη της παραγωγής των συμβατικών μονάδων καθώς και η οικονομική μελέτη σχετικά με την κατανάλωση του καυσίμου για τα δύο διαφορετικά στάδια, αποσκοπεί στην παρουσίαση

των εξαιρετικά θετικών στοιχείων που είναι δυνατόν να προσφέρει η εγκατάσταση ενός τέτοιου έργου. Ακολουθεί η δομή των υπόλοιπων κεφαλαίων.

Το δεύτερο κεφάλαιο αφορά αποκλειστικά το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης. Γίνεται μια σύντομη περιγραφή του νησιού και της μορφολογίας του, ενώ στη συνέχεια παρουσιάζονται τα στοιχεία που συνθέτουν το ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης. Αρχικά παρουσιάζονται οι σταθμοί παραγωγής του νησιού με τις γεννήτριες που τους απαρτίζουν και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας τους. Ακολουθεί η καταγραφή των αιολικών και φωτοβολταϊκών πάρκων του νησιού, με στοιχεία παραγωγής για το έτος 2014. Επίσης παρατίθενται οι γραμμές και οι υποσταθμοί του νησιού, ενώ το κεφάλαιο κλείνει με το μονογραμμικό διάγραμμα του ΣΗΕ της Κρήτης.

Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται η ανάλυση της μελέτης ροής ισχύος, με την απεικόνιση των μοντέλων στοιχείων ενός ΣΗΕ, την παρουσίαση των βασικότερων εξισώσεων ροών ισχύος και των ζυγών ενός ηλεκτρικού συστήματος. Στη συνέχεια ακολουθεί το πρόβλημα της βέλτιστης ροής ισχύος (OPF) περιλαμβάνοντας τους βασικότερους περιορισμούς του προβλήματος και μια αναφορά στους τρόπους επίλυσης.

Το τέταρτο κεφάλαιο αναλύει τη λειτουργία του λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Τονίζει τις σημαντικότερες λειτουργίες του λογισμικού PowerWorld και περιέχει αναλυτικές οδηγίες σχετικά με το σχεδιαστικό περιβάλλον και το εργαλείο «Time step» όπως αυτά χρησιμοποιήθηκαν για τις ανάγκες της διπλωματικής εργασίας.

Το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη μελέτη που πραγματοποιήθηκε για την προσομοίωση του δικτύου της Κρήτης στην αρχική του κατάσταση. Αναλύονται λεπτομερώς όλες οι θεωρήσεις και οι διαδικασίες που ακολουθήθηκαν για την επίτευξη του σκοπού αυτού. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα αποτελέσματα τα οποία εξήχθησαν αναφορικά με την αιολική παραγωγή, την παραγωγή των συμβατικών μονάδων καθώς και το κόστος παραγωγής αναφορικά με την κατανάλωση του καυσίμου.

Το έκτο κεφάλαιο μελετά την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού αποθήκευσης ενέργειας καθώς και τη συμπεριφορά του δικτύου της Κρήτης κατόπιν αυτής της διαδικασίας. Αναφέρονται οι ενέργειες που ακολούθησε η εργασία αυτή για την εγκατάσταση και τη λειτουργία του σταθμού αντλησιοταμίευσης. Ακολουθως, παρατίθενται τα νέα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκ νέου προσομοίωση και μελέτη του δικτύου, συμπεριλαμβανομένου του υβριδικού σταθμού. Τα στοιχεία αυτά συγκρίνονται με εκείνα του προηγούμενου κεφαλαίου και προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα και οφέλη που προσφέρει η εγκατάσταση του νέου αυτού έργου, ενώ σημαντικά συμπεράσματα προκύπτουν για τις γραμμές μεταφοράς.

Το έβδομο κεφάλαιο κλείνει την εργασία τονίζοντας τα σημαντικότερα συμπεράσματα ολόκληρης της μελέτης, ενώ παράλληλα προτείνει επιπλέον επεκτάσεις της εργασίας.

2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ

2.1 Νήσος Κρήτη

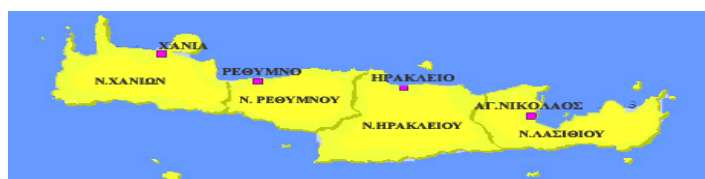
Η Κρήτη είναι το μεγαλύτερο νησί στην Ελλάδα και το δεύτερο μεγαλύτερο της ανατολικής Μεσογείου μετά την Κύπρο. Βρίσκεται στο νότιο άκρο του Αιγαίου πελάγους και καλύπτει μια περιοχή 8.336 km². Ο μόνιμος πληθυσμός της είναι 623.065 κάτοικοι, ενώ ο πραγματικός, 682.928 σύμφωνα με την απογραφή του 2011. Έχει μήκος περίπου 260 χιλιόμετρα και ποικίλλει στο πλάτος από μέγιστο 60 χιλιομέτρων, από το ακρωτήριο Δίον έως το ακρωτήριο Λίθινο, σε ελάχιστο 12 χιλιομέτρων στον ισθμό της Ιεράπετρας στην ανατολική Κρήτη. Η ακτογραμμή της παρουσιάζει βαθύ γεωγραφικό διαμελισμό, ο οποίος παρουσιάζει στην Κρήτη πάνω από 1.000 χιλιόμετρα ακτών.

Το νησί είναι εξαιρετικά ορεινό με τρεις κύριες οροσειρές, τα Λευκά Όρη (2454 μ.), την Ίδη (Ψηλορείτης) (2454 μ.) και τη Δίκτη (Λασιθιώτικα Όρη) (2148 μ.) που το διασχίζουν κατά σειρά από τη δύση ως την ανατολή.

Σε αυτά τα βουνά οφείλεται η ύπαρξη εύφορων οροπεδίων, όπως ο Ομαλός στα Λευκά Όρη, η Νίδα στην Ίδη και το Λασιθί, και το Καθαρό στη Δίκτη. Στο νησί υπάρχουν σημαντικά σπήλαια όπως το Δικταίο και το Ιδαίο άντρο. Κύριο μορφολογικό χαρακτηριστικό της Κρήτης είναι τα επιβλητικά φαράγγια όπως το διάσημο φαράγγι της Σαμαριάς, το φαράγγι Ίμπρου, το Κουρταλιώτικο φαράγγι, το Χα και το Φαράγγι των Νεκρών.

Η Κρήτη ανήκει στη μεσογειακή κλιματολογική ζώνη που προσδίδει τον κύριο κλιματικό χαρακτήρα της, ο οποίος χαρακτηρίζεται ως εύκρατος. Η ατμόσφαιρα μπορεί να είναι αρκετά υγρή, ανάλογα με την εγγύτητα στη θάλασσα. Ο χειμώνας είναι αρκετά ήπιος και υγρός, με αρκετές βροχοπτώσεις, ως επί το πλείστον, στα δυτικά τμήματα του νησιού. Η χιονόπτωση είναι σπάνια στις πεδινές εκτάσεις, αλλά αρκετά συχνή στις ορεινές. Κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, η μέση θερμοκρασία κυμαίνεται στους 25 με 30 °C, οπωσδήποτε πιο χαμηλά από εκείνο την ηπειρωτική Ελλάδα. Η νότια ακτή, συμπεριλαμβανομένης της πεδιάδας της Μεσαράς και των Αστερουσίων ορέων, απολαμβάνει περισσότερες ηλιόλουστες ημέρες και υψηλότερες θερμοκρασίες κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού σε σχέση με την υπόλοιπη μεγαλόνησο. Η χλωρίδα του νησιού απειλείται από τη βαθμιαία ανάπτυξη της κτηνοτροφίας.

Αποτελεί τμήμα της περιφερειακής διοίκησης της Ελλάδας και χωρίζεται στις τέσσερις ακόλουθες περιφερειακές ενότητες: Χανίων, Ρεθύμνου, Ηρακλείου, Λασιθίου με πρωτεύουσες: Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο και Άγιο Νικόλαο αντίστοιχα (εικόνα 2.1). Το Ηράκλειο αποτελεί τη μεγαλύτερη πόλη σε έκταση καθώς έχει και το μεγαλύτερο πληθυσμό συγκριτικά με τις υπόλοιπες πόλεις του Νησιού. Ο πληθυσμός του σημειώνει ραγδαία αύξηση τους θερινούς μήνες, λόγω του τουρισμού, που μαζί με το εμπόριο και την γεωργία αποτελούν τους κύριους οικονομικούς τομείς της Κρήτης. Ο πίνακας 2.1 παρουσιάζει τον πληθυσμό της Κρήτης ανά νομαρχιακό διαμέρισμα, σύμφωνα με την απογραφή του 2011.



Εικόνα 2.1 Το νησί της Κρήτης

Πίνακας 2.1 Πληθυσμιακά χαρακτηριστικά Κρήτης

ΝΟΜΑΡΧΙΑΚΑ ΔΙΑΜΕΡΙΣΜΑΤΑ	ΠΛΗΘΥΣΜΟΣ
ΝΟΜΟΣ ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	304.270
ΝΟΜΟΣ ΧΑΝΙΩΝ	156.220
ΝΟΜΟΣ ΡΕΘΥΜΝΗΣ	85.160
ΝΟΜΟΣ ΛΑΣΙΘΙΟΥ	75.690

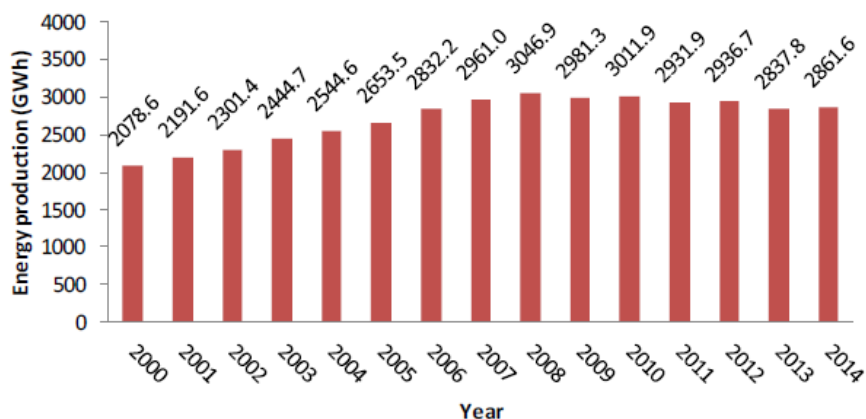
Το νησί της Κρήτης αποτελεί ένα από τους κορυφαίους τουριστικούς προορισμούς παγκοσμίως, με αποτέλεσμα τους θερινούς μήνες ο πληθυσμός της να τριπλασιάζεται. Το γεγονός αυτό αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την οικονομική εξέλιξη αλλά και την ενεργειακή ζήτηση του νησιού. Η ανθρώπινη δραστηριότητα αυξάνεται σε μεγάλο βαθμό και όπως είναι λοιπόν λογικό, μεγάλες τιμές ζήτησης φορτίου παρατηρούνται την καλοκαιρινή περίοδο, με διαφορά από τις υπόλοιπες εποχές του χρόνου.

2.2 Εισαγωγή στο ΣΗΕ της Κρήτης

Οι πληθυσμιακές και οικονομικές εξελίξεις στο νησί κατά το πέρασμα των χρόνων, οδήγησαν σε σημαντική αύξηση των ενεργειακών απαιτήσεων του νησιού. Το γεγονός αυτό είχε ως συνέπεια την εξέλιξη του ΣΗΕ της Κρήτης, κάτι που συνεχίζεται ακόμα και σήμερα. Τον πρώτο σταθμό παραγωγής του νησιού αποτελεί ο ατμοηλεκτρικός σταθμός των Λινοπεραμάτων στο νομό Ηρακλείου, ο οποίος κατασκευάστηκε το έτος 1965. Στη συνέχεια ήρθε η ενσωμάτωση στη λειτουργία του δικτύου ο σταθμός παραγωγής της Ξυλοκαμάρας στο νομό των Χανίων, ενώ αργότερα του Αθρινολάκου στην περιοχή της Σητείας, στο νομό Λασιθίου. Οι πρώτες γραμμές μεταφοράς υψηλής τάσης του δικτύου ήταν εκείνες των 15 kV που το 1966 αντικαταστάθηκαν από γραμμές των 66 kV, ενώ το 1979 εγκατασταθήκαν εκείνες των 150 kV που είναι οι γραμμές υψηλής τάσης που λειτουργούν σήμερα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η εποπτεία του ΣΗΕ Κρήτης γίνεται από ένα on-line σύστημα S.C.A.D.A (Εποπτικός έλεγχος Απόκτησης Δεδομένων) που είναι εγκατεστημένο στο Κέντρο Διανομής του Κατσαμπά, στην πόλη του Ηρακλείου.

Το ΣΗΕ της Κρήτης είναι το μεγαλύτερο αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα και καταναλώνει περίπου 5% της συνολικής ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της χώρας. Το 1980 η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη έφτασε τις 456 GWh. Σύμφωνα με την εικόνα 2.2, η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το 2008, υπερέβη τις 3TWh. Το ποσοστό αύξησης της παραγωγής της ενέργειας του νησιού μεταξύ 2000-2008 ξεπερνάει το 46%, γεγονός που παρουσιάζει τη σημαντική εξέλιξη του συστήματος στην

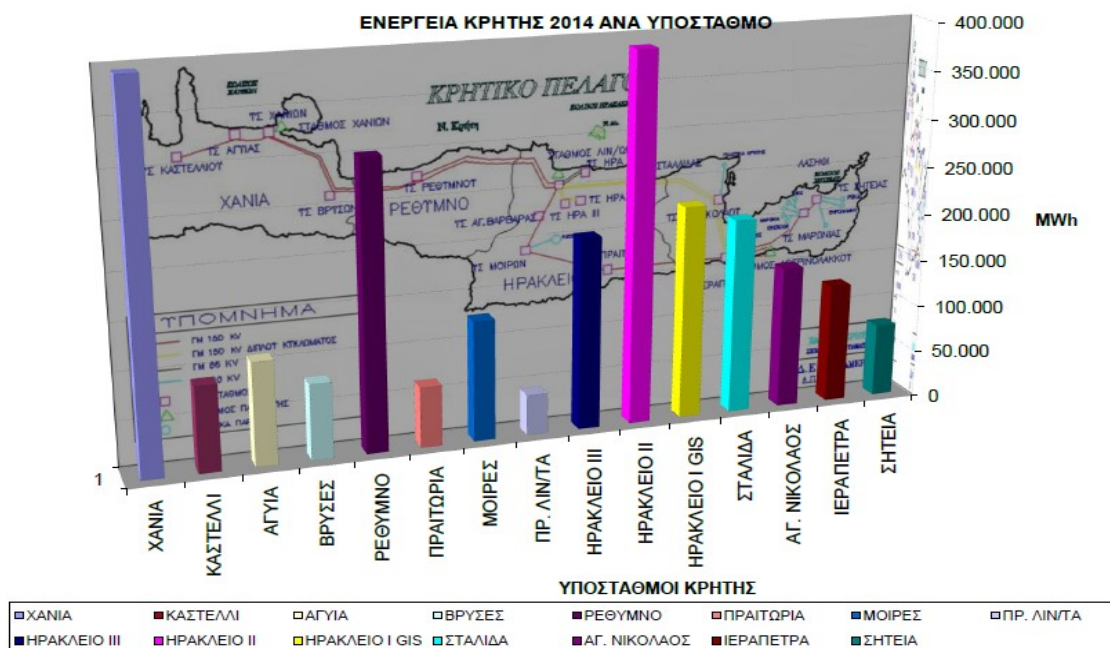
πάροδο των χρόνων. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια (από το 2008 και έπειτα) η παραγωγή παραμένει σταθερή και κυμαίνεται κοντά στις 2.8 TWh ετησίως.



Εικόνα 2.2 Ετήσια Παραγωγή Ενέργειας στο ΣΗΕ Κρήτης

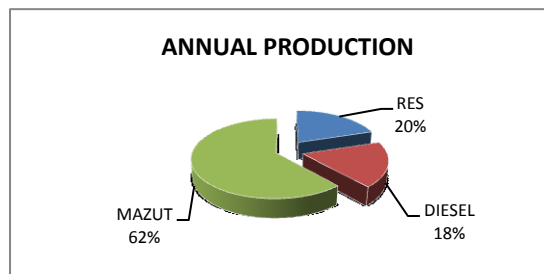
Από το νησί της Κρήτης δε θα μπορούσαν να απουσιάζουν οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, στις αρχές της δεκαετίας του 1990, ξεκίνησε η εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού του νησιού με την ανάπτυξη των αιολικών πάρκων. Η δυνατότητα εγκατάστασης που δόθηκε σε ιδιώτες επενδυτές, καθώς και η συμβολή των ευρωπαϊκών προγραμμάτων στήριξης των ΑΠΕ, έδωσαν σημαντική ώθηση στην εγκατάσταση και εξέλιξη των αιολικών τεχνολογιών. Κάτι ανάλογο συνέβη και με την περίπτωση των Φ/Β τεχνολογιών. Οι πρώτες εγκαταστάσεις μεμονωμένων διασυνδεδεμένων Φ/Β πάρκων στο νησί της Κρήτης έγιναν το 2002, ενώ η μαζικότερη εγκατάσταση έγινε στην τετραετία 2010-2013.

Το διάγραμμα της εικόνας 2.3 παρουσιάζει την ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας ανά υποσταθμό το έτος 2014. Πρωτιά στην ζήτηση και κατανάλωση ενέργειας κατέχει ο υποσταθμός του Ηρακλείου ΙΙ και εκείνος των Χανίων, ενώ την χαμηλότερη ο υποσταθμός των Λινοπεραμάτων.



Εικόνα 2.3 Ζήτηση ενέργειας ανά υποσταθμό το 2014

Το έτος 2014, η ετήσια ζήτηση φορτίου ήταν 2854.4 GWh με την αιχμή ζήτησης να φτάνει τα 579.6 MW. Η εικόνα 2.4 παρουσιάζει την παραγωγή των συμβατικών μονάδων (mazut, diesel) και των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας το έτος 2014, με συνολική παραγωγή 575.9 GWh για τις μονάδες ΑΠΕ και 2285.6 GWh για τις θερμικές συμβατικές μονάδες.



Εικόνα 2.4 Ποσοστό ετήσιας παραγωγής συμβατικών μονάδων - ΑΠΕ, για το 2014

2.3 Συμβατικές μονάδες στο ΣΗΕ της Κρήτης

Το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, βασίζεται κυρίως σε θερμικές μονάδες κατανάλωσης καυσίμου (μαζούτ, ντίζελ). Υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός συμβατικών μονάδων με διαφορετικές τεχνολογίες και χαρακτηριστικά, ανάλογα με τις απαιτήσεις του συστήματος. Στο σύστημα της Κρήτης, υπάρχουν τέσσερα είδη συμβατικών μονάδων τις οποίες διαχειρίζεται αποκλειστικά η ΔΕΗ: ατμοστροβιλικές μονάδες, μηχανές εσωτερικής καύσης (Diesel), αεριοστροβιλικές μονάδες καθώς και μία μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Οι ατμοστροβιλικές μονάδες, αποτελούν συνήθως μονάδες βάσης, οι μονάδες εσωτερικής καύσης καθώς και οι μονάδες συνδυασμένου κύκλου θεωρούνται μονάδες ενδιάμεσου φορτίου ενώ οι αεριοστροβιλικές είναι μονάδες αιχμής. Οι γεννήτριες αυτές είναι εγκατεστημένες σε τρεις σταθμούς παραγωγής, στις εξής περιοχές:

- **Λινοπεράματα**, περίπου έξι χιλιόμετρα δυτικά από την πόλη του Ηρακλείου. Αποτελείται από έξι ατμοστρόβιλους, τέσσερις μονάδες Diesel και πέντε αεριοστρόβιλους. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού φτάνει περίπου τα 265 MW.



Εικόνα 2.5 Ο σταθμός παραγωγής των Λινοπεραμάτων

- **Ξυλοκαμάρια**, στο Νομό Χανίων, έξι χιλιόμετρα ανατολικά από την πόλη των Χανίων. Αποτελείται από μια μονάδα συνδυασμένου κύκλου και έξι αεροστρόβιλους, με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 348 MW.



Εικόνα 2.6 Ο σταθμός παραγωγής της Ξυλοκαμάριας

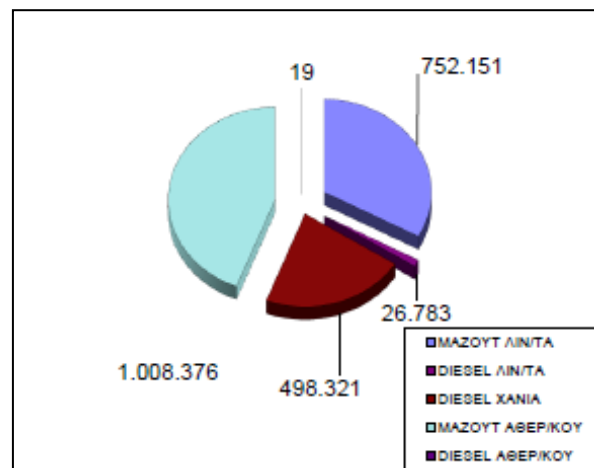
- **Αθρινόλακκος**, 25 χιλιόμετρα νότια της Σητείας του Νομού Λασιθίου. Η εγκατεστημένη ισχύς του σταθμού είναι 190 MW και αποτελείται από 2 μονάδες Diesel και 2 ατμοστρόβιλους.



Εικόνα 2.7 Ο σταθμός παραγωγής του Αθρινόλακκου

Κάθε γεννήτρια έχει συγκεκριμένα χαρακτηριστικά σχετικά με την λειτουργία της, που πολλές φορές πρέπει να λαμβάνει υπ όψιν του και ο διαχειριστής του συστήματος. Τέτοια χαρακτηριστικά είναι η ονομαστικής ισχύς, το τεχνικό μέγιστο και ελάχιστο μιας μονάδας, ο χρόνος κράτησης και λειτουργίας της, καθώς και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της, στοιχεία που διαφέρουν από γεννήτρια σε γεννήτρια. Η λειτουργία κάθε μονάδας καθορίζεται ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της αλλά και τις απαιτήσεις του δικτύου. Για το λόγο αυτό, συνήθως υπάρχει μια ιεραρχία αναφορικά με την ένταξη των

μονάδων, με κριτήρια την κύμανση της ζήτησης σε συνδυασμό με χαρακτηριστικά των μονάδων, όπως είναι η ταχύτητα εκκίνησης μιας γεννήτριας και το κόστος παραγωγής της. Αξίζει να σημειωθεί ότι η μονάδα συνδυασμένου κύκλου που βρίσκεται στον σταθμό της Ξυλοκαμάρας, αποτελείται από δύο αεριοστρόβιλους και ένα ατμοστρόβιλο, πετυχαίνοντας τη συνδυασμένη λειτουργία τους. Όλες οι υπόλοιπες μονάδες χαρακτηρίζονται ως ανοιχτού κύκλου και η λειτουργία τους είναι αυτόνομη. Στον πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι συμβατικές μονάδες ανά υποσταθμό με τα βασικά στοιχεία τους. Οι ατμοστρόβιλοι καθώς και οι μονάδες Diesel καταναλώνουν μαζούτ, μια πιο φθηνή απόσταξη πετρελαίου (diesel) στο οποίο οφείλουν τη λειτουργία τους οι αεριοστρόβιλοι και η μονάδα συνδυασμένου κύκλου. Η εικόνα 2.8 απεικονίζει τη συνολική παραγωγή ανά σταθμό το 2014, με κριτήριο το καύσιμο κατανάλωσης. Οι γεννήτριες που καταναλώνουν μαζούτ κυριαρχούν σε παραγωγή έναντι των υπολοίπων που χρησιμοποιούν πετρέλαιο. Είναι οι ατμοστρόβιλοι και οι ντιζελογεννήτριες που λειτουργούν κατά κόρον στη διάρκεια ενός έτους, συμμετέχοντας σε μεγάλο βαθμό στη συνολική παραγωγή του συστήματος.



Εικόνα 2.8 Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά σταθμό και τύπου καυσίμου, για το έτος 2014

Πίνακας 2.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά συμβατικών μονάδων

	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΚΑΘΑΡΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΙΣΧΥΣ ΘΕΡΟΥΣ (MW)	ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ (MW)	ΚΑΥΣΙΜΟ
ΣΤΑΘΜΟΣ ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΩΝ	265				
ATM 1	6	6	6	4	Μαζούτ
ATM 2	14	14	13	8	Μαζούτ
ATM 3	14	14	13	8	Μαζούτ
ATM 4	24	24	23	18	Μαζούτ
ATM 5	24	24	23	18	Μαζούτ
ATM 6	24	24	23	18	Μαζούτ
DIESEL 1	11	11	11	3	Μαζούτ
DIESEL 2	11	11	11	3	Μαζούτ
DIESEL 3	11	11	11	6	Μαζούτ
DIESEL 4	11	11	11	3	Μαζούτ
AEP 1	15	15	13	3	Ντίζελ
AEP 2	15	15	13	3	Ντίζελ
AEP 3	43	43	41	5	Ντίζελ
AEP 4	14	14	13	3	Ντίζελ
AEP 5	28	28	25	5	Ντίζελ
ΣΤΑΘΜΟΣ ΞΥΛΟΚΑΜΑΡΑΣ	348				
ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΣ ΚΥΚΛΟΣ	132	126	112	35	Ντίζελ
AEP 1	16	14	11	3	Ντίζελ
AEP 4	24	20	19	3	Ντίζελ
AEP 5	30	28	27	5	Ντίζελ
AEP 11	59	58	54	10	Ντίζελ
AEP 12	59	58	54	10	Ντίζελ
AEP 13	28	28	25	5	Ντίζελ
ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΟΥ	190				
DIESEL 1	51	50	50	35	Μαζούτ
DIESEL 2	51	50	50	25	Μαζούτ
ATM 1	44	43	44	22	Μαζούτ
ATM 2	44	43	44	22	Μαζούτ
ΣΥΝΟΛΟ	803				

2.4 Κόστος παραγωγής θερμικών μονάδων

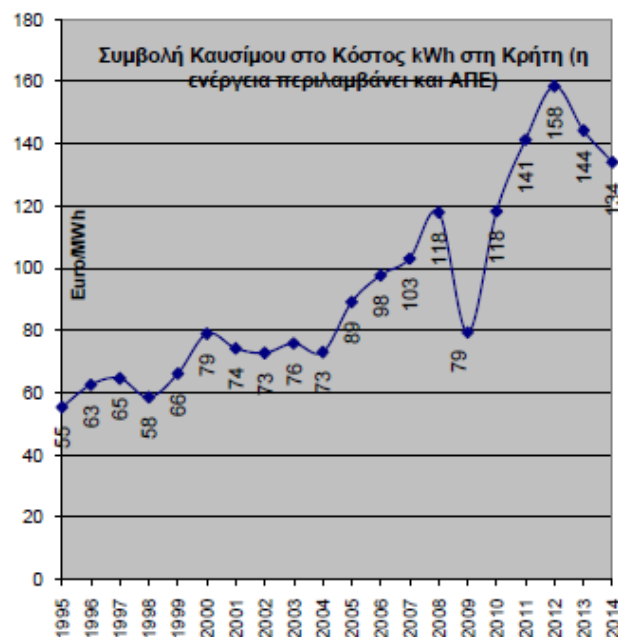
Ο υπολογισμός του κόστους της κατανάλωσης καυσίμων για τις θερμικές μονάδες, γίνεται από την τριτοβάθμια εξίσωση που ακολουθεί.

$$C_i = (a_i + b_i P_i + c_i P_i^2 + d_i P_i^3) \cdot \text{fuel_cost} \quad (2.1)$$

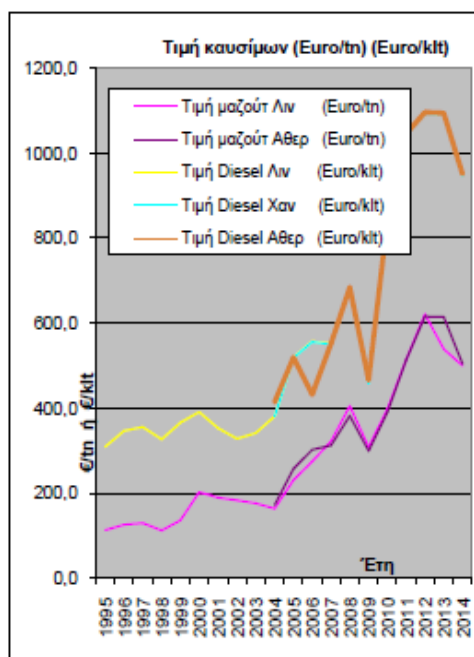
Η παράμετρος P_i αποτελεί το φορτίο παραγωγής (MW) της εκάστοτε γεννήτριας, ενώ οι συντελεστές a , b , c , d και η τιμή καυσίμου για κάθε μονάδα του ΣΗΕ Κρήτης, παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 2.3. Να σημειωθεί ότι για τις γεννήτριες που καταναλώνουν καύσιμο ντίζελ, η μονάδα μέτρησης είναι σε lt και όχι σε kg .

Πίνακας 2.3 Συντελεστές Κόστους Συμβατικών Μονάδων

ΜΟΝΑΔΕΣ	ΤΙΜΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ(€/kg)	A(kg/h)	B(kg/MWh)	C(kg/MWh ²)	D(kg/MWh ³)
ATM 1 ΛΙΝ	0,49964	0,001	727,6	-167,2	17,377
ATM 2 ΛΙΝ	0,49964	442,8	226,62	3,8792	0,001
ATM 3 ΛΙΝ	0,49964	442,8	226,62	3,8792	0,001
ATM 4 ΛΙΝ	0,49964	964,12	253,46	0,4127	0,001
ATM 5 ΛΙΝ	0,49964	0	300,58	-4,166	0,092
ATM 6 ΛΙΝ	0,49964	0	300,58	-4,166	0,092
DIESEL 1 ΛΙΝ	0,49964	253,51	134,16	2,8859	0,0001
DIESEL 2 ΛΙΝ	0,49964	253,51	134,16	2,8859	0,0001
DIESEL 3 ΛΙΝ	0,49964	253,51	134,16	2,8859	0,0001
DIESEL 4 ΛΙΝ	0,49964	253,51	134,16	2,8859	0,0001
AEP 1 ΛΙΝ	0,94881	1990,7	280,96	0,4754	0,0001
AEP 2 ΛΙΝ	0,94881	1990,7	280,96	0,4754	0,0001
AEP 3 ΛΙΝ	0,94881	2418	197,65	0,2533	0,0001
AEP 4 ΛΙΝ	0,94881	986,77	329,24	-7,1804	0,2182
AEP 5 ΛΙΝ	0,94881	1675,8	196,29	0,3605	0,001
AEP 6 ΣΚ	0,94511	6224,2	63,39	1,6315	0,001
AEP 7 ΣΚ	0,94511	6224,2	63,39	1,6315	0,001
AEP 1 ΧΑΝ	0,94511	2170	267	0,01	0
AEP 4 ΧΑΝ	0,94511	2865	219	0,01	0
AEP 5 ΧΑΝ	0,94511	3757	275	0,001	0
AEP 11 ΧΑΝ	0,94511	3966	219,2	0,209	0,001
AEP 12 ΧΑΝ	0,94511	3966	219,2	0,209	0,001
AEP 13 ΧΑΝ	0,94511	1675,8	196,29	0,3605	0,001
DIESEL 1 ΑΘΕΡ	0,50451	0,27	222,6	-1,3	0,017
DIESEL 1 ΑΘΕΡ	0,50451	0,27	222,6	-1,3	0,017
ATM 1 ΑΘΕΡ	0,50451	1321,3	194,22	0,2395	0,0001
ATM 1 ΑΘΕΡ	0,50451	1321,3	194,22	0,2395	0,0001



Εικόνα 2.9 Συμβολή καυσίμου στο κόστος παραγωγής



Εικόνα 2.10 Τιμή καυσίμων στο ΣΗΕ της Κρήτης

Τα γραφήματα των εικόνων 2.9 και 2.10 τονίζουν το κόστος των καυσίμων που καταναλώνονται από τις θερμικές μονάδες του νησιού. Το συμπέρασμα είναι ότι το Diesel καύσιμο κοστίζει ασφαλώς περισσότερο από το Μαζούτ, ενώ η λειτουργία των αεριοστροβιλικών μονάδων, αυξάνει σε μεγάλο βαθμό το κόστος παραγωγής.

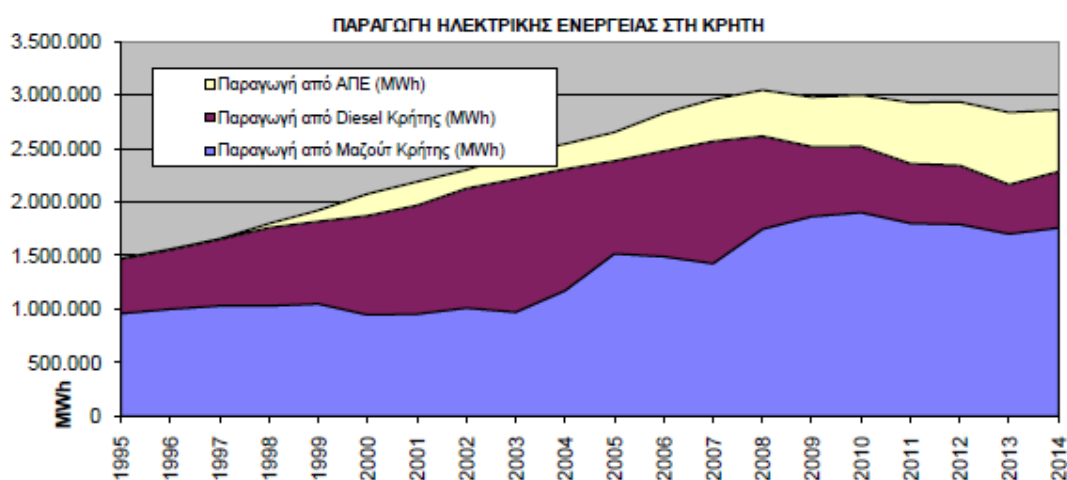
2.5 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Σε πάρα πολλές περιοχές στην Κρήτη, η μέση ταχύτητα του ανέμου ξεπερνάει τα 8.5m/sec. Επίσης το ηλιακό δυναμικό που παρουσιάζει, είναι από τα μεγαλύτερα στην Ευρώπη, αγγίζοντας τις 2100kWh/m²/yr. Τα δύο αυτά χαρακτηριστικά καθιστούν το νησί, ιδανικό για την εγκατάσταση αιολικών και ηλιακών τεχνολογιών. Σχετικά λοιπόν με το αιολικό δυναμικό, είναι εγκατεστημένα 33 Α/Π με ονομαστική ισχύ 187,1 MW. Αντίστοιχα, υπάρχουν περισσότερα από 1000 μικρά Φωτοβολταϊκά πάρκα (80 kW το καθένα) και 1800 στέγες, με την ονομαστική τους ισχύ να ανέρχεται στα 95 MW. Συνεπώς η διείσδυση των ΑΠΕ στο ΣΗΕ της Κρήτης ξεπερνάει το 20%, όπως φαίνεται και στον πίνακα 2.4 που ακολουθεί.

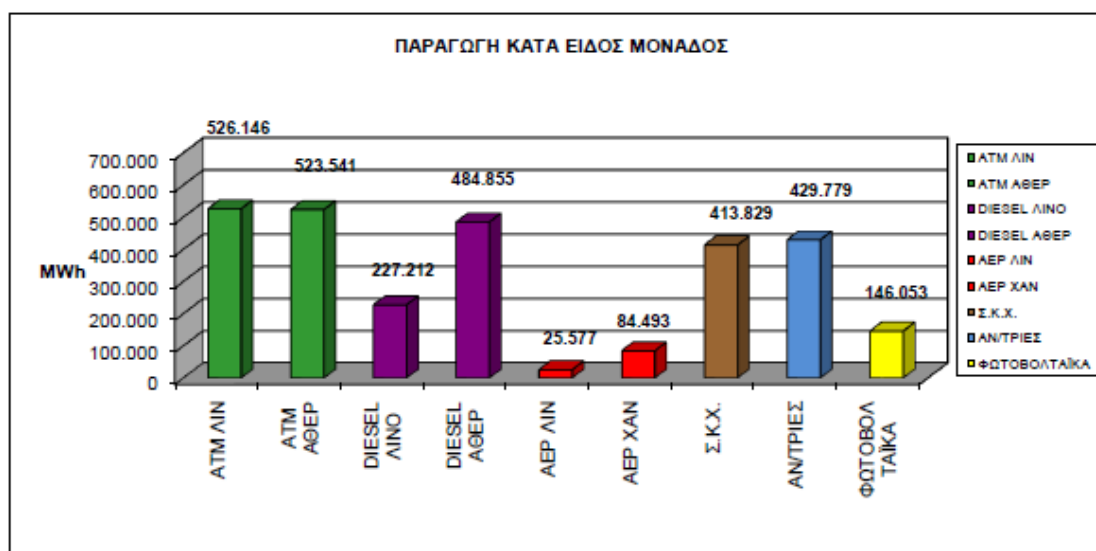
Πίνακας 2.4 Ποσοστό συμμετοχής των διαφόρων πηγών παραγωγής ενέργειας στην Κρήτη

Μονάδες παραγωγής	Καύσιμο	Ετήσιο ποσοστό παραγωγής
Ατμοί	Μαζούτ	36,70%
Diesel	Μαζούτ	24,85%
Αεριοστρόβιλοι	Ντίζελ	3,85%
Συνδυασμένου κύκλου	Ντίζελ	14,47%
Αιολικά πάρκα	-	15,03%
Φ/Β πάρκα	-	5,11%

Στις δύο επόμενες εικόνες (2.11, 2.12) παρουσιάζεται η παραγωγή από ΑΠΕ για το έτος 2014, συγκρινόμενη με την παραγωγή των συμβατικών μονάδων. Για την ακρίβεια η παραγωγή των συμβατικών μονάδων του νησιού έφτασε τις 2.285.653 MWh για το έτος 2014 με την παραγωγή από ΑΠΕ να σημειώνεται στις 575.832 MWh. Πιο συγκεκριμένα η συμβολή των αιολικών πάρκων στο σύνολο της παραγωγής τους ΣΗΕ της Κρήτης το 2014, ήταν 429.779 MWh, με μόλις 146.053 MWh να αντιστοιχούν στα φωτοβολταϊκά του νησιού.



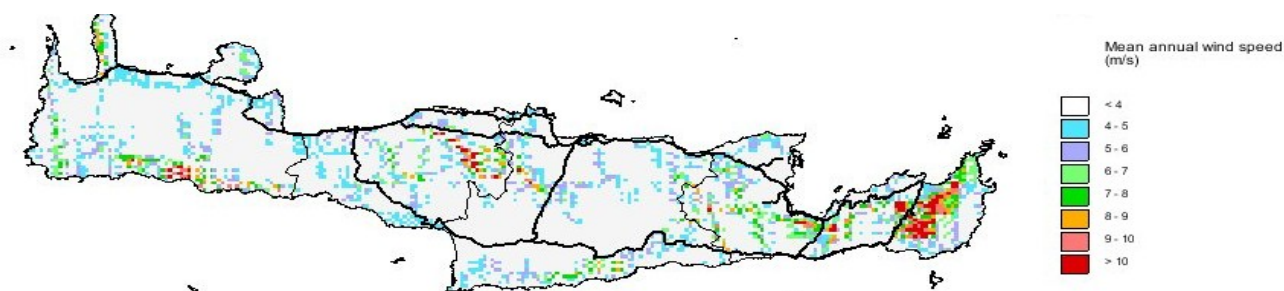
Εικόνα 2.11 Παραγωγή ενέργειας στην Κρήτη, με κριτήριο τη μορφή καυσίμου



Εικόνα 2.12 Παραγωγή ενέργειας στην Κρήτη, κατά είδος μονάδων

2.5.1 Εγκατεστημένα αιολικά πάρκα Κρήτης

Όπως σημειώθηκε και παραπάνω, το κλίμα και οι καιρικές συνθήκες ευνοούν σημαντικά την εγκατάσταση και την εκμετάλλευση αιολικών πάρκων. Υπάρχουν ανεμογεννήτριες κατά μήκος του νησιού με τις περισσότερες να είναι εγκατεστημένες στον Νομό Λασιθίου και πιο συγκεκριμένα στην ευρύτερη περιοχή της Σητείας σύμφωνα με τον πίνακα 2.5. Αυτό οφείλεται στην έντονη δραστηριότητα του ανέμου που παρατηρείται στην περιοχή όπως απεικονίζεται και στην εικόνα 2.13, με ιδανικές συνθήκες για τη λειτουργία ανεμογεννητριών, όπως η υψηλή και μέση ταχύτητα ανέμου καθώς και οι μικρές διακυμάνσεις στην κατεύθυνση του.



Εικόνα 2.13 Αιολικό δυναμικό Κρήτης

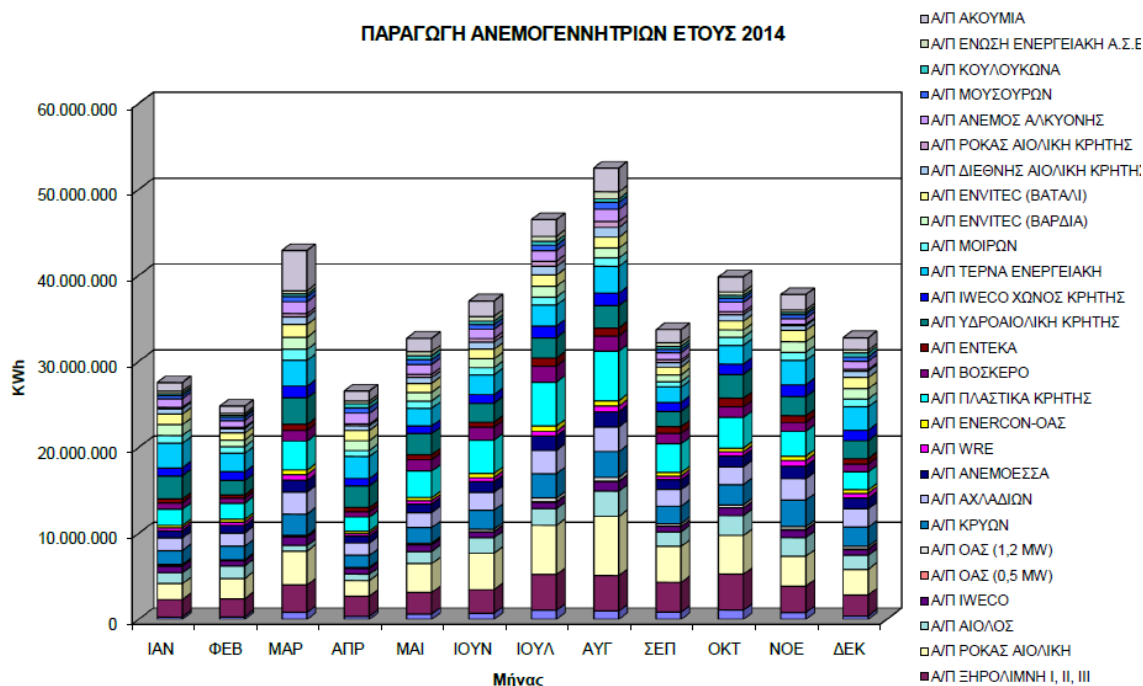
Ο πίνακας 2.5 παραθέτει τα εγκατεστημένα Αιολικά Πάρκα, σύμφωνα με την ετήσια έκθεση της ΔΕΗ 2014. Η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων έφτασε τα 189,16 MW το 2014 ενώ υπάρχουν μελέτες για την εγκατάσταση επιπλέον πάρκων στο νησί. Η πρώτη αιολική εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε το 1993, στην Ι.Μ. Τοπλού Σητείας, στο νομό Λασιθίου, από τη ΔΕΗ. Έκτοτε η εγκατάσταση αιολικών γεννητριών στο νησί είναι καλπάζουσα και η συμμετοχή της αιολικής ενέργειας στη συνολική παραγωγή του ΣΗΕ Κρήτης το 2014 έφτασε το 15% με 429,8 GWh ετησίως.

Πίνακας 2.5 Αδειοδοτημένα αιολικά πάρκα Κρήτης, έτους 2014

Α/Α	ΦΟΡΕΑΣ	ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ	ΕΓΚ. ΙΣΧΥΣ (MW)		ΣΥΜΒΟΛΑΙΟΠΟΙ ΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ	ΘΕΣΗ ΣΕ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ	ΑΔΕΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
1	ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜ ΕΣ Α.Ε.	Ι.Μ Τοπλού Σητείας Λασιθίου	17 Χ 0,3	5,10	5,10	1993	N.4223/2013 (ΕΩΣ 31.12.15)
2	ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜ ΕΣ Α.Ε.	Ι.Μ Τοπλού Σητείας Λασιθίου	2 Χ 0,5	1	1,00	1993	N.4223/2013
3	ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜ ΕΣ Α.Ε.	Ι.Μ Τοπλού Σητείας Λασιθίου	1 Χ 0,5	0,5	0,5	1995	N.4223/2013
4	ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜ ΕΣ Α.Ε.	Ξηρολίμνη Ι Δ. Σητείας	8 Χ 0,6	4,8	4,80	2000	N.4223/2013
5	ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜ ΕΣ Α.Ε.	Ξηρολίμνη ΙΙ Δ. Σητείας	9 Χ 0,6	5,4	5,40	2000	N.4223/2013
6	ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜ ΕΣ Α.Ε.	Ξηρολίμνη ΙΙΙ Δ. Σητείας	5 Χ 0,6	3,00	3,00	10.07.2007	25.06.09
7	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗ ΑΒΕΕ	Ξηρολίμνη (Αγριλίδια Μητάτου)	5 Χ 0,6	3,00	3,00	01.04	14.05.04
8	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗ ΑΒΕΕ(ΦΒ)	Πλακοκερατι ά Δ. Ιτάνου Λασιθίου	0,1716	0,1716	14,70	05.12.01	05.12.01
9	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗ ΑΒΕΕ (ΑΠ)	Πλακοκερατι ά Δ. Ιτάνου Λασιθίου	17 Χ 0,6	10,2		21.05.98	12.05.98
10	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗ ΑΒΕΕ (ΑΠ)	Πλακοκερατι ά Δ. Ιτάνου Λασιθίου	8 Χ 0,6	4,80		ΟΚΤ 06	14.03.07
11	ΑΕΟΛΟΣ Α.Ε.	Χανδράς Λεύκης Λασιθίου	18 Χ 0,55	9,90	9,90	28.07.99	01.06.99
12	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΡΥΩΝ Α.Ε.	Μαρωνιά Σητείας Λασιθίου	(20 Χ 0,5) & 1,2	11,20	11,20	01.12.99	16.12.99
13	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΑΧΛΑΔΙΩΝ Α.Ε.	Μαρωνιά Σητείας Λασιθίου	(20 Χ 0,5) & 1,2	11,20	11,20	17.12.99	16.12.99 3.10.13 (1,2 MW)
14	ΑΝΕΜΟΕΣΣ Α ΑΙΟΛΙΚΑ	Μαρωνιά Σητείας	(10 Χ 0,5) & 1,2	6,20	6,20	17.12.99	16.12.99 3.10.13 (1,2

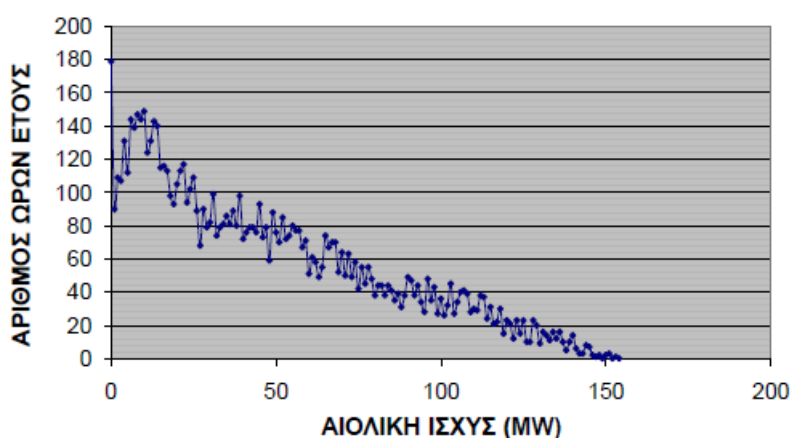
	ΠΑΡΚΑ Α.Ε.	Λασιθίου					MW)
15	Ο.Α. ΣΗΤΕΙΑΣ Α.Ε.	Καμινάκια – Χορδάκι Λασιθίου	1 X 0,5	0,50	0,50	01.10.93	04.02.05
16	IWECO Μ. ΒΡΥΣΗ Α.Ε.Β.Ε	Μεγάλη Βρύση Ηρακλείου	9 X 0,55	4,95	4,95	11.08.99	01.06.99
17	ENERCON ΕΛΛΑΣ Α.Ε.	Πλατύβολα Αχλαδίων Δ. Σητείας Λασιθίου	5 X 0,5	2,50	2,50	14.02.02	27.08.04
18	ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.	Βρουχάς Λασιθίου	9 X 0,85	5,94	11,90	25.05.03	19.09.05
19	ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ Α.Β.Ε.Ε.	Βρουχάς Λασιθίου		5,96		11.2004	
20	WRE ΕΛΛΑΣ Α.Ε.	Πλατύβολα Κρυών Δ. Σητείας Λασιθίου	4 X 0,75	2,40	3,00	08.03	16.12.04
21	WRE ΕΛΛΑΣ Α.Ε.	Πλατύβολα Κρυών Δ. Σητείας Λασιθίου		0,60		01.04	16.12.04
22	ENEL GREEN POWER HELLAS Α.	Βοσκερό Δ. Κρουσώνα	7 X 0,85	5,95	5,95	16.11.04	03.06.05
23	ΕΝΤΕΚΑ Α.Ε.	Ξηρολίμνη Ι Δ. Σητείας	3 X 0,9	2,70	2,70	29.07.05	14.11.05
24	ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΕΛΟΠΟΝΝ ΗΣΟΥ Α.Ε.	Ρόβας Καστελίου Χανίων	11 X 0,85	9,35	9,35	18.11.05	02.08.06
25	IWECO ΧΩΝΟΣ ΚΡΗΤΗΣ	Χώνος Σητείας	6 X 0,85	5,10	4,50	24.02.06	20.06.07
26	ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αγ. Βαρβάρα	17 X 0,85	14,45	14,45	29.04.06	05.04.07
27	ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΟΙΡΩΝ Α.Ε. (ΑΝΤΙΣΚΑΡΙ)	Αντισκάρι Δ. Μοιρών	7 X 0,8	5,60	5,25	08.12.06	09.01.08
28	ENVITEC ΑΝΑΝΕΩΣΙΜ ΕΣ Α.Ε.	Βάρδια Ν. Χανίων	9 X 0,6	5,40	5,40	06.07.07	24.04.08
29	ENVITEC	Βατάλι Ν.	9 X 0,6	5,40	5,40	26.09.07	24.04.08

	ΑΝΑΝΕΩΣΙΜ ΕΣ Α.Ε.	Χανίων					
30	ENEL GREEN POWER HELLAS Α.Ε.	Αγ. Κύριλλος Δ. Γόρτυνας	8 Χ0,9	7,20	7,20	19.04.08	08.12.08
31	ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗ Α.Β.Ε.Ε	Καλόγηρος Δ. Γαζίου	1 Χ 0,9 & 1Χ 0,33	3,60	3,60	13.10.08	05.06.09
32	Ο.Α. ΣΗΤΕΙΑΣ Α.Ε.	Μάρε Ζήρου Λασιθίου	3 Χ 0,85	1,23	1,20	30.01.09	31.07.09
33	ΑΝΕΜΟΣ ΑΛΚΥΟΝΗΣ ΑΕΕ	Προφήτης Ηλίας – Παπούρα Δ. Κισσάμου	7 Χ 0,9	6,30	6,30	06.11.09	23.06.10
34	ΑΙΟΛΙΚΗ ΜΟΥΣΟΥΡΩ Ν Α.Ε.	Δ. Μουσούρων	3 Χ 0,85	2,55	2,55	15.06.11	25.11.11
35	ENEL GREEN POWER HELLAS Α.Ε. (ΚΟΥΛΟΥΚΩ ΝΑΣ)	Δ. Γεροποτάμου	6 Χ 0,85	5,10	4,80	07.08.11	28.12.11
36	ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜ ΕΣ Α.Ε.	Ακούμια Δ. Αγ. Βασιλείου Ρεθύμνου	8 Χ 0,9	7,20	7,20	07.08.12	22.08.13
37	ΜΑΝΟΥΣΕΛ ΗΣ- ΠΡΩΤΟΠΑΠ ΑΔΑΚΗΣ Ο.Ε	Κάντανος Ν. Χανίων	2 Χ 0,02	0,04	0,04	01.03.11	ΔΕΝ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ (ΜΙΚΡΗ Α/Γ)
38	ΠΑΠΑΔΟΠΟ ΥΛΟΥ ΟΥΡΑΝΙΑ	Αρχάνες - Ηρακλείου	2 Χ 0.01	0,02	0,02	02.08.13	ΔΕΝ ΑΠΑΙΤΕΙΤΑΙ (ΜΙΚΡΗ Α/Γ)
39	ΕΝΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Σ.Ε (ΑΣΙΔΕΡΩΤΑ Σ)	Ν. Ρεθύμνου	3 Χ 0.9	2,70	2,40	15.03.13	24.02.14
	ΣΥΝΟΛΟ			189,21	187,16		

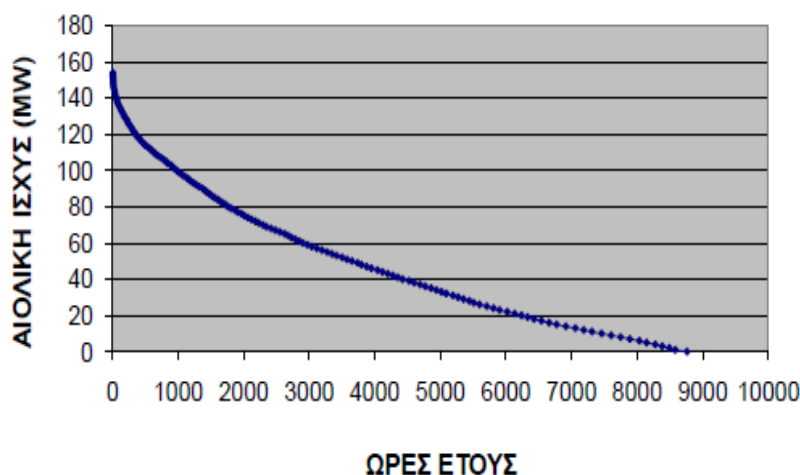


Εικόνα 2.14 Παραγωγή αιολικών πάρκων Κρήτης για το 2014

Το γράφημα της εικόνας 2.14 απεικονίζει τη συνολική μηνιαία αιολική παραγωγή και για κάθε αιολικό πάρκο το έτος 2014. Ο μήνας Αύγουστος είναι εκείνος που προηγείται με παραγωγή πάνω από 50GWh. Το Α/Π ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ(στην Σητεία) και εκείνο στον Νομό Λασιθίου της εταιρίας “ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ” αποτελούν τα πάρκα με την μεγαλύτερη παραγωγή έναντι των υπολοίπων. Αντίθετα η μικρότερη προσφορά αιολικής ενέργειας στο δίκτυο, παρατηρείται τον μήνα Φεβρουάριο με τιμή κάτω από τις 25GWh. Συμπερασματικά, το γράφημα της εικόνας 2.14 επιβεβαιώνει την έντονη δραστηριότητα του ανέμου την καλοκαιρινή περίοδο. Ένα καιρικό φαινόμενο που εξυπηρετεί σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία του ΣΗΕ της Κρήτης, καθώς είναι και η εποχή που παρατηρείται και αυξημένη ζήτηση φορτίου (λόγω ανθρώπινης δραστηριότητας, τουρισμού). Οι εικόνες 2.15 και 2.16 παρουσιάζουν την μέση ωριαία αιολική ισχύ και την καμπύλη διάρκειας αιολικής ισχύος στο ΣΗΕ της Κρήτης αντίστοιχα, για το έτος 2014.



Εικόνα 2.15 Μέση ωριαία αιολική ισχύς στο ΣΗΕ της Κρήτης, έτους 2014

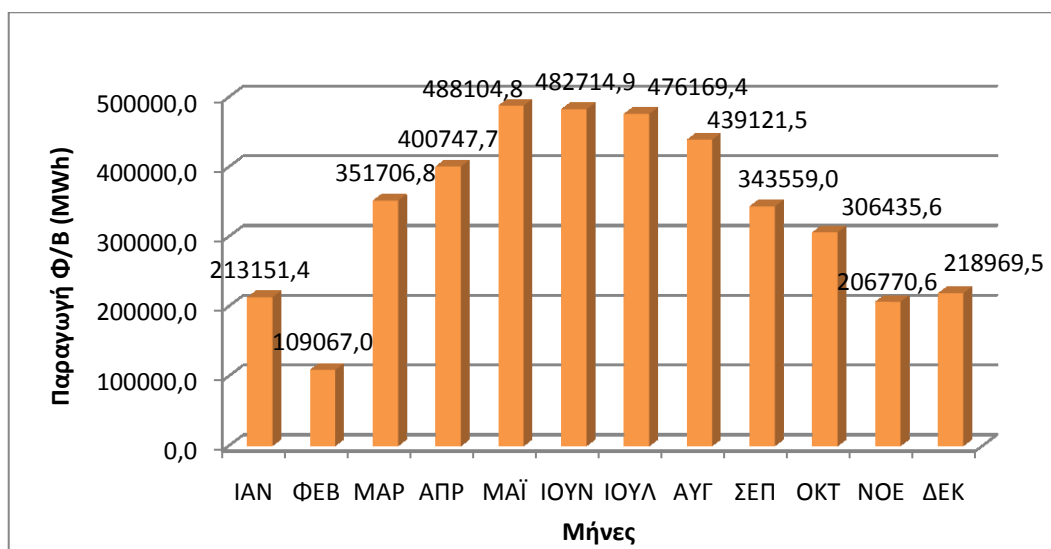


Εικόνα 2.16 Καμπύλη διάρκειας αιολικής ισχύος στο ΣΗΕ της Κρήτης, έτους 2014

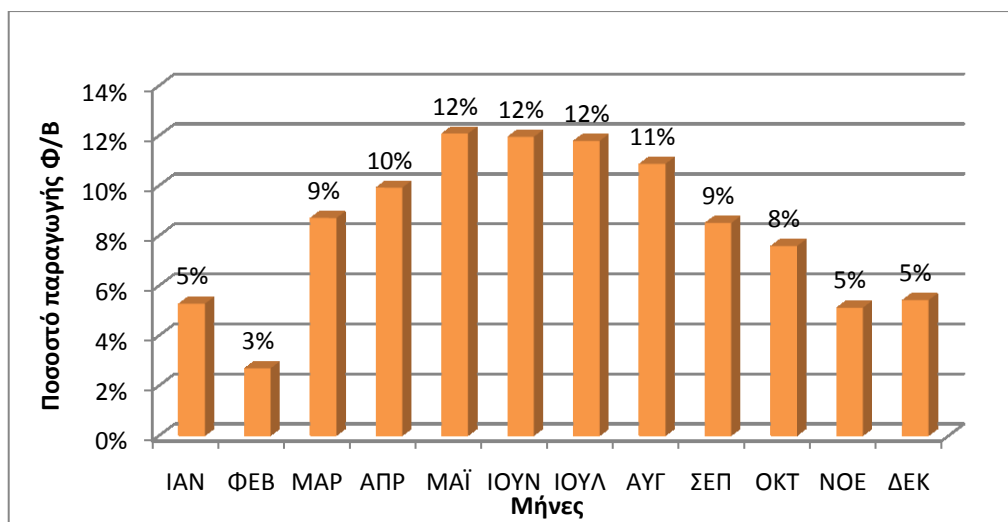
2.5.2 Εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα Κρήτης

Η εγκατάσταση Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα, παρουσίασε σημαντική αύξηση τα τελευταία χρόνια εξαιτίας των υψηλών τιμών αποζημίωσης που παρείχε το κράτος στους παραγωγούς. Αυτό είχε ως αποτέλεσμα τα έτη 2011-2013 να βρίσκεται στις 10 μεγαλύτερες αγορές Φ/Β συστημάτων στον κόσμο. Όμως η οικονομική κατάσταση της χώρας τα τελευταία χρόνια, σταθεροποίησε την κατάσταση στο συγκεκριμένο τομέα, με συνέπεια την μείωση των τιμών πώλησης ηλιακής ενέργειας και συνάμα το «πάγωμα» στην αδειοδότηση νέων Φ/Β εγκαταστάσεων.

Η συμβολή των φωτοβολταϊκών στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη είναι εξίσου σημαντική, κυρίως τις εποχές άνοιξη - καλοκαίρι, κάτι που επιβεβαιώνουν και τα ακόλουθα διάγραμματα (εικόνες 2.17, 2.18). Αυτό οφείλεται στην ιδιαίτερα υψηλή ακτινοβολία αλλά και στην μέτρια θερμοκρασία, (όχι πολύ υψηλή) που επικρατεί τους ανοιξιάτικους και θερινούς μήνες, δύο σημαντικοί παράγοντες για την καλύτερη δυνατή απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ.



Εικόνα 2.17 Μηνιαία παραγωγή Φ/Β Κρήτης, για το 2014



Εικόνα 2.18 Ποσοστό μηνιαίας παραγωγής Φ/Β Κρήτης, για το 2014

Στους παρακάτω πίνακες (2.6, 2.7, 2.8, 2.9) παρουσιάζεται ο αριθμός των Φ/Β πάρκων και στεγών ανά νομό και ανά υποσταθμό με την εγκατεστημένη ισχύς τους. Τα συνολικά Φ/Β πάρκα στο νησί έφτασαν το έτος 2014 τα 1044 σε αριθμό με εγκατεστημένη ισχύ 78.008,52 kWp με τα περισσότερα, να έχουν εγκατασταθεί στο νομό ηρακλείου, ενώ εξετάζοντας κάθε ζυγό ξεχωριστά, ο ζυγός με τα περισσότερα αιολικά είναι εκείνος του Ρεθύμνου. Από την άλλη πλευρά οι φωτοβολταϊκές στέγες, ανήλθαν στις 1855 σε αριθμό, με αρκετά μικρότερη εγκατεστημένη ισχύ συγκριτικά με τα πάρκα, ίση με 16.642,22 kWp. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των Φ/Β πάρκων και των στεγών, σύμφωνα με τα παρακάτω στοιχεία είναι περίπου 95 MW.

Πίνακας 2.6 Φ/Β πάρκα στην Κρήτη ταξινομημένα ανά νομό

ΝΟΜΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ Φ/Β	ΙΣΧΥΣ(kWp)
Ν.ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	444	32.364,98
Ν.ΛΑΣΙΘΙΟΥ	259	19.574,45
Ν.ΧΑΝΙΩΝ	147	11.246,4
Ν.ΡΕΘΥΜΝΗΣ	194	14.822,69
ΣΥΝΟΛΟ	1.044	78.008,52

Πίνακας 2.7 Φ/Β στέγες στην Κρήτη ταξινομημένες ανά νομό

ΠΕΡΙΟΧΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΕΓΩΝ	ΙΣΧΥΣ(kWp)
Ν.ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	925	8.277
Ν.ΛΑΣΙΘΙΟΥ	224	2.082,1
Ν.ΧΑΝΙΩΝ	499	4.437,02
Ν.ΡΕΘΥΜΝΗΣ	207	1.846,1
ΣΥΝΟΛΟ	1.855	16.642,22

Πίνακας 2.8 Φ/Β πάρκα στην Κρήτη ταξινομημένα ανά ζυγό

ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ Φ/Β	ΙΣΧΥΣ(kWp)
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	2	99,43
ΗΡΑΚΛΕΙΟ 1	11	421,46
ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2	79	5.909,29
ΗΡΑΚΛΕΙΟ 3	28	2.006,16
ΣΤΑΛΙΔΑ	21	1.436,36
ΜΟΙΡΕΣ	174	13.456,45
ΠΡΑΙΤΟΡΙΩΝ	129	9.035,83
ΣΗΤΕΙΑΣ	115	8.952,7
ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	58	4.427,66
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	86	6.194,09
ΡΕΘΥΜΝΟ	194	14.822,69
ΒΡΥΣΕΣ	18	1.315,88
ΑΓΥΙΑ	36	2.846,52
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	35	2.476,99
ΧΑΝΙΑ	58	4.607,01
ΣΥΝΟΛΟ	1.044	78.008,52

Πίνακας 2.9 Φ/Β στέγες στην Κρήτη ταξινομημένα ανά ζυγό

ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΣΤΕΓΩΝ	ΙΣΧΥΣ(kWp)
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	27	258
ΗΡΑΚΛΕΙΟ 1	82	726,5
ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2	212	1.859,5
ΗΡΑΚΛΕΙΟ 3	105	937,2
ΣΤΑΛΙΔΑ	114	1.009,6
ΜΟΙΡΕΣ	224	2.012,6
ΠΡΑΙΤΟΡΙΩΝ	161	1.473,6
ΣΗΤΕΙΑΣ	39	366,1
ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	84	782,9
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	101	933,1
ΡΕΘΥΜΝΟ	207	1.846,1
ΒΡΥΣΕΣ	32	293,62
ΑΓΥΙΑ	64	572,1
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	85	748,8
ΧΑΝΙΑ	318	2.822,5
ΣΥΝΟΛΟ	1.855	16.642,22

2.6 Γραμμές μεταφοράς

Οι Γραμμές Μεταφοράς αποτελούν την ραχοκοκαλιά ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς μεταφέρουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τους σταθμούς παραγωγής στους καταναλωτές του δικτύου. Αναλαμβάνουν τη μεταφορά της ενέργειας σε μεγάλες αποστάσεις ώστε να είναι δυνατή η παραγωγή μακριά από τις καταναλώσεις.

Στην Κρήτη οι γραμμές μεταφοράς είναι εναέριες εναλλασσόμενου ρεύματος(AC), Υψηλής Τάσης, των 150kV. Ο πίνακας 2.10 παρουσιάζει τις γραμμές και τους υποσταθμούς που συνδέουν, με τα πιο σημαντικά τους στοιχεία. Η γραμμή που καλύπτει τα περισσότερα χιλιόμετρα είναι η γραμμή «Αθερινόλακκος - Ηράκλειο II» με 115,5 km απόσταση, ενώ το συνολικό μήκος όλων των γραμμών του δικτύου της Κρήτης ανέρχεται στα 770,785 km.

Πίνακας 2.10 Γραμμές μεταφοράς δικτύου Κρήτης

Αναχώρηση	Άφιξη	Τάση	Τύπος Γραμμής	Μήκος(km)	Φόρτιση(MVA)	R(Ω)	L(mH)	C(μF)
ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	150	Βαρέως	11,22	168,9	1,0938	15,0848	0,0978
ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	150	Βαρέως	21,619	168,9	2,1075	29,0625	0,1885
ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	150	Βαρέως	18,84	168,9	1,8288	23,4707	0,175
ΡΕΘΥΜΝΟ	ΒΡΥΣΕΣ	150	Βαρέως	33,76	168,9	3,2772	42,0579	0,3136
ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	150	Βαρέως	52,603	168,9	5,1064	65,5324	0,4887
ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡ	150	Βαρέως	46,741	168,9	4,5336	58,1818	0,4339
ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡ	150	Βαρέως	80,88	168,9	7,8514	124,537	0,9287
ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	150	Ελαφρώς	24,03	116,9	4,4055	34,1428	0,1978
ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΜΟΙΡΕΣ	150	Ελαφρώς	14,22	116,9	2,607	20,2043	0,1171
ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	150	Ελαφρώς	25,91	116,9	4,7429	36,7582	0,213
ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150	Ελαφρώς	54,4	116,9	9,9582	77,1766	0,4472
ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚΛ.Ι (α)	150	Βαρέως+Καλώδιο	10,12	168,9	1,243	8,6688	0,0615
ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	150	Βαρέως+Καλώδιο	16,77	168,9	1,5903	11,091	0,0787
ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚΛ.ΙΙΙ	150	Βαρέως	4,7	168,9	5,0565	39,1882	0,2271
ΗΡΑΚΛ III	ΗΡΑΚΛ II	150	Βαρέως	14,4	168,9	5,0565	39,1882	0,2271
ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚΛ.ΙΙ	150	Βαρέως	19,202	168,9	1,8639	23,9206	0,1783
ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΣΤΑΛΙΔΑ	150	Βαρέως	39,165	168,9	7,1775	55,6257	0,3224
ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	150	Βαρέως	28,847	168,9	5,2732	40,8679	0,2368
ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150	Βαρέως	20,8	168,9	2,03	29,7995	0,1727
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑΣ	150	ΖΗΤΑ	33,402	142,9	6,1193	47,425	0,2754
ΜΑΡΩΝΙΑΣ	ΣΗΤΕΙΑΣ	150	ΖΗΤΑ	8,076	142,9	1,4795	11,4817	0,0664
ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚ.	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150	Βαρέως	37,148	168,9	6,8078	52,7609	0,3057
ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚ.	ΣΗΤΕΙΑ	150	Βαρέως	23,218	168,9	2,253	28,9068	0,2156
ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚ.	ΗΡΑΚΛΕΙΟ 2	150	Βαρεώς	115,44	168,9	11,206	177,751	1,326
ΣΠΗΛΙ	ΡΕΘΥΜΝΟ	150	Βαρεώς+Καλώδιο	15,274	168,9	1,448	10,102	0,072

2.7 Υποσταθμοί

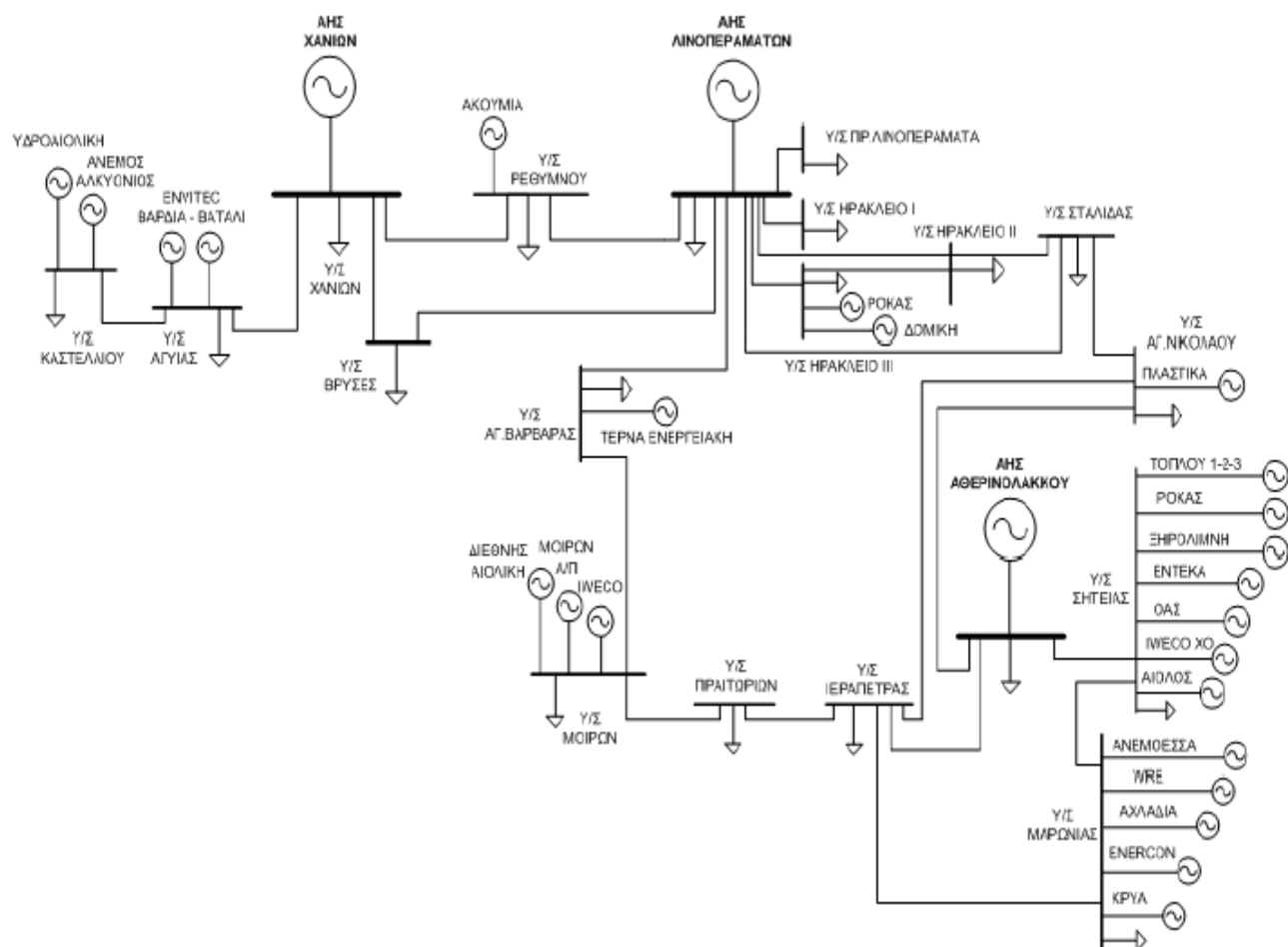
Στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης βρίσκονται συνολικά 17 υποσταθμοί Υ.Τ/Μ.Τ. Ο πίνακας 2.11 παρουσιάζει αναλυτικά τους υποσταθμούς-μετασχηματιστές με τα στοιχεία τους. Στην εργασία αυτή δεν έχουν συμπεριληφθεί υποσταθμοί μεταφοράς ή διανομής. Η μοντελοποίηση έχει γίνει μόνο σε υψηλή τάση, με την χρησιμοποίηση 19 ζυγών που ουσιαστικά αποτελούν υποσταθμούς ζεύξης.

Πίνακας 2.11 Υποσταθμοί και μετασχηματιστές του δικτύου της Κρήτης

ΥΠΟΣΤΑΘΜΟΙ	ΜΕΤΑΣΧΗΜΑΤΙΣΤΕΣ	ΕΓΚ. ΙΣΧΥΣ (ΜΒΑ)	ΕΠΙΠΕΔΟ ΤΑΣΗΣ (kV/kV)
	ΣΗΤΕΙΑ	2 X 12,5	150/20
	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	2 X 50,00	150/20
	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2 X 25,00	150/20
	ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	2 X 50,00	150/20
	ΣΤΑΛΙΔΑ	2 X 50,00	150/20
	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι	2 X 25,00	66/20
	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	3 X 50,00	150/20
	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	2 X 50,00	150/20
	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	1 X 25,00	150/20
	ΜΟΙΡΕΣ	2 X 25,00	150/20
	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	2 X 25,00	150/20
	ΡΕΘΥΜΝΟ	2 X 25,00 & 1 X 50,00	150/20
	ΣΠΗΛΙ	2 X 25,00	150/20
	ΧΑΝΙΑ	3 X 50,00	150/20
	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	2 X 25,00	150/20
	ΑΓΥΙΑ	2 X 50,00	150/20
	ΒΡΥΣΕΣ	2 X 25,00	150/20

2.8 Το μονογραμμικό διάγραμμα του ηλεκτρικού δικτύου της Κρήτης

Αφού αναλύθηκαν τα βασικότερα συστατικά μέρη για το δίκτυο του νησιού, παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα του ΣΗΕ της Κρήτης, στην εικόνα 2.19 που ακολουθεί. Απεικονίζονται όλοι οι ζυγοί υψηλής τάσης του συστήματος οι οποίοι συνδέονται με τις υπάρχουσες γραμμές μεταφοράς. Έχουν τοποθετηθεί οι τρεις σταθμοί παραγωγής του νησιού στους αντίστοιχους ζυγούς καθώς επίσης και τα αιολικά πάρκα που είναι εγκατεστημένα στο δίκτυο.



Εικόνα 2.19 Μονογραμμικό διάγραμμα του ΣΗΕ της Κρήτης

3 ΜΕΛΕΤΗ ΡΟΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΡΟΗ ΙΣΧΥΟΣ

3.1 Μελέτη ροής ισχύος

Ο ρόλος ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι η ικανοποίηση της ζήτησης πραγματικής και αέργου ισχύος των φορτίων, που βρίσκονται στους εγκατεστημένους ζυγούς του δικτύου. Τα φορτία καλούνται να εξυπερετηθούν από ένα δεδομένο αριθμό γεννητριών μέσω των γραμμών του δικτύου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, την επιλογή μιας «βέλτιστης» ροής ισχύος μεταξύ των άπειρων άλλων που προκύπτουν. Η επίλυση του προβλήματος της ροής ισχύος αποτελεί σημαντικό εφόδιο για όλα τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς λαμβάνει υπόψιν σημαντικούς περιορισμούς:

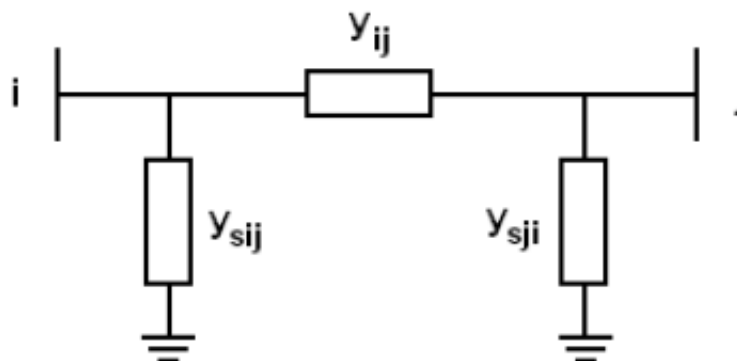
- Διατήρηση των τάσεων των ζυγών σε σταθερά επιθυμητά επίπεδα, μέσα στα επιτρεπόμενα όρια ανοχής.
- Διατήρηση των ορίων λειτουργίας των γραμμών μεταφοράς, σχετικά με τη μεταφορά ενέργειας.
- Επιδίωξη για την οικονομική λειτουργία του συστήματος, με την κατάλληλη προσαρμογή της παραγωγής των γεννητριών με στόχο την οικονομική κατανομή του φορτίου.
- Την πρόβλεψη για την αντιμετώπιση πιθανών διαταραχών του συστήματος.
- Την ευελιξία σχετικά με την εξέλιξη του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, με την προσθήκη ζυγών, γραμμών μεταφοράς και άλλων στοιχείων.

Το πρόβλημα της ροής ισχύος για μεγάλα συστήματα, όπου οι υπολογισμοί και οι εξισώσεις φορτίου είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες, επιλύεται με τη χρήση ψηφιακών υπολογιστών.

3.1.1 Μοντέλα στοιχείων ΣΗΕ

Γραμμή μεταφοράς

Στην εικόνα 3.1 διακρίνεται το π-ισοδύναμο κύκλωμα για την αναπαράσταση των γραμμών μεταφοράς, στη μελέτη ροής ισχύος.



Εικόνα 3.1 π-ισοδύναμο κύκλωμα γραμμής μεταφοράς

Η αγωγιμότητα y_{ij} αποτελεί την αγωγιμότητα σειράς ενώ οι y_{sij} και $y_{sj i}$ τις εγκάρσιες αγωγιμότητες. Οι εξισώσεις που ακολουθούν παρουσιάζουν τις σύνθετες αγωγιμότητες y_{ij} , y_{sij} , $y_{sj i}$ σε μιγαδική μορφή:

$$y_{ij} = g_{ij} + jb_{ij} \quad (3.1)$$

$$y_{sij} = g_{sij} + jb_{sij} \quad (3.2)$$

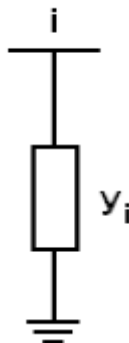
$$y_{sj i} = g_{sj i} + jb_{sj i} \quad (3.3)$$

Εγκάρσιοι πυκνωτές και πηνία

Η εικόνα 3.2 απεικονίζει τους εγκάρσιους πυκνωτές και πηνία όπως εκείνα παρουσιάζονται στη μελέτη ροής ισχύος. Η αγωγιμότητα δίνεται ως :

$$y_i = jb_i \quad (3.4)$$

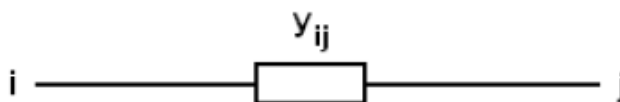
όπου για τους πυκνωτές $b_i > 0$ και για τα πηνία $b_i < 0$.



Εικόνα 3.2 Παράσταση εγκάρσιου στοιχείου

Μετασχηματιστής

Για την αναπαράσταση του μετασχηματιστή (Μ/Σ) στη μελέτη ροής ισχύος, χρησιμοποιείται το π-ισοδύναμο κύκλωμα, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.3.



Εικόνα 3.3 Παράσταση Μ/Σ

Ως y_{ij} θεωρείται η αγωγιμότητα σειράς του μετασχηματιστή και ορίζεται ως:

$$y_{ij} = \frac{1}{R_{i\sigma} + jX_{i\sigma}} \quad (3.5)$$

Το σχήμα αναφέρεται σε ένα μετασχηματιστή με ονομαστική σχέση μετασχηματισμού, δηλαδή τέτοια που να αντιστοιχεί στο λόγο των βασικών τάσεων πρωτεύοντος και δευτερεύοντος. Στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχουν επίσης μετασχηματιστές ρύθμισης, η σχέση μετασχηματισμού των οποίων διαφέρει από το λόγο των ονομαστικών τάσεων. Στους μετασχηματιστές αυτούς πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η σχέση μετασχηματισμού ανάγοντας τις ανά μονάδα αντιστάσεις στο ένα από τα δύο τυλίγματα του.

Γεννήτριες

Στην εικόνα 3.4 απεικονίζεται η σχηματική αναπαράσταση μιας γεννήτριας με μιγαδική ισχύς παραγωγής S_G .



Εικόνα 3.4 Παράσταση γεννήτριας

Χωρίζοντας την παραγωγή σε ενεργό και άεργο ισχύς παραγωγής, προκύπτει:

$$S_{GI} = P_{GI} + jQ_{GI} \quad (3.6)$$

όπου P_{GI} είναι η ενεργός ισχύς παραγωγής της γεννήτριας και Q_{GI} η άεργος ισχύς παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι σύγχρονες γεννήτριες έχουν την ικανότητα να κρατούν σταθερό το μέτρο της τάσης, ρυθμίζοντας ουσιαστικά την άεργο ισχύ και κρατώντας σταθερή την ενεργό ισχύ. Αυτό επιτυγχάνεται με δύο διατάξεις ελέγχου, **τον ρυθμιστή τάσης και τον ρυθμιστή των στροφών.**

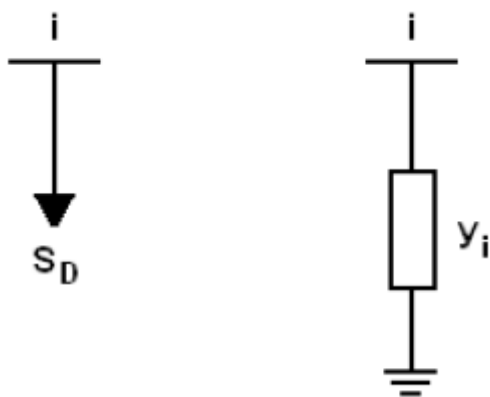
Φορτία

Πρόκειται για δύο κατηγορίες φορτίων που στη μελέτη ροής ισχύος αναπαριστώνται όπως στην εικόνα 3.5. Το πρώτο σχήμα αφορά τα φορτία σταθερής ενεργού και άεργου ισχύος με μιγαδική ισχύς :

$$S_{DI} = P_{DI} + jQ_{DI} \quad (3.7)$$

όπου P_{DI} και Q_{DI} η ενεργός και η άεργος ισχύς που καταναλώνει ένα φορτίο που συνδέεται στον ζυγό i . Στη δεύτερη περίπτωση της εικόνας 3.5, διακρίνεται το φορτίο αγωγιμότητας το οποίο ορίζεται με τη μορφή αγωγιμοτήτων, ως εξής:

$$y_i = g_i + jb_i \quad (3.8)$$

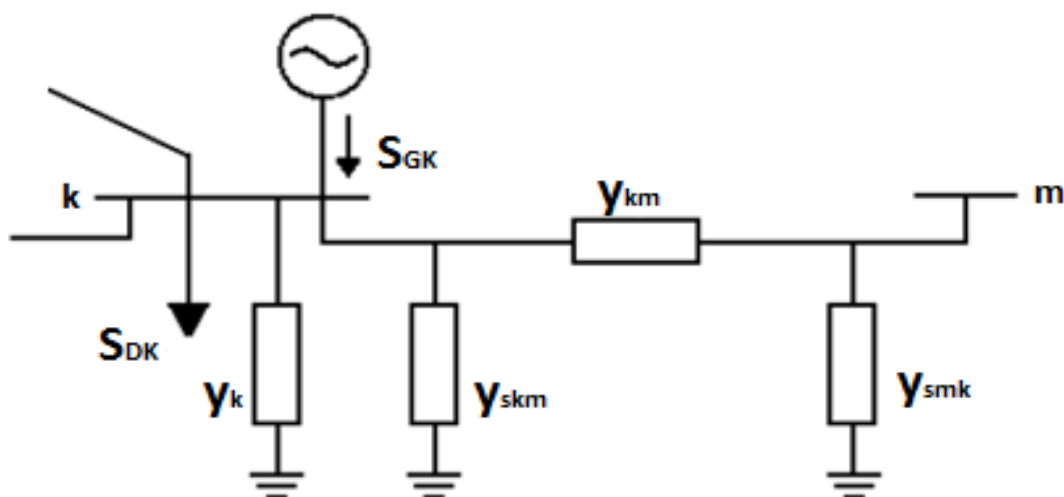


Εικόνα 3.5 Παράσταση φορτίων

3.1.2 Εξισώσεις ροών ισχύος

Για την επίλυση του προβλήματος της μελέτης ροής ισχύος, γίνεται χρήση του μοντέλου «εξισώσεις ροής φορτίου». Η παρουσίαση του, θα γίνει με τη βοήθεια ενός συστήματος δύο ζυγών (k, m) όπως φαίνεται στην εικόνα 3.6. Στον ζυγό k είναι εγκατεστημένο ένα φορτίο σταθερής ενεργού και άεργου ισχύος, ένα φορτίο αγωγιμότητας και μια γεννήτρια, ενώ η γραμμή μεταφοράς που συνδέει τους ζυγούς k και m , παριστάνεται με το π-ισοδύναμο κύκλωμα. Αναλυτικότερα:

- S_{GK} : Η μιγαδικής ισχύς που παράγει η γεννήτρια του ζυγού k .
- S_{DK} : Η μιγαδικής ισχύς που καταναλώνει το φορτίο σταθερής ισχύος του ζυγού k .
- y_k : Η εγκάρσια σύνθετη αγωγιμότητα στο ζυγό k , που συμπεριλαμβάνει οποιαδήποτε συστοιχία πυκνωτών, πηνίων ή φορτίων αγωγιμότητας.
- y_{km} : Η αγωγιμότητα σειράς της γραμμής που συνδέει τους ζυγούς k, m .
- y_{skm}, y_{smk} : Οι εγκάρσιες αγωγιμότητες της γραμμής που συνδέει τους ζυγούς k, m .



Εικόνα 3.6 Γενικευμένος ζυγός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

$$\hat{I}_{km} = (y_{skm} + y_{km}) \cdot \hat{V}_k - y_{km} \cdot \hat{V}_m \quad (3.9)$$

Η παραπάνω εξίσωση, εκφράζει το ρεύμα που ρέει στη γραμμή από τον ζυγό k στον ζυγό m , και προκύπτει από τα ακόλουθα ρεύματα:

1. το ρεύμα του ζυγού k που απορροφάται από την κοντινότερη εγκάρσια αγωγιμότητα της γραμμής:

$$\hat{I}_{skm} = y_{skm} \cdot \hat{V}_k \quad (3.10)$$

2. το ρεύμα του ζυγού k που απορροφάται από την αγωγιμότητα σειράς της γραμμής:

$$\hat{I}_{km} = y_{km} \cdot \hat{V}_k \quad (3.11)$$

3. το ρεύμα του ζυγού m που απορροφάται από την αγωγιμότητα σειράς της γραμμής:

$$\hat{I}_{mk} = y_{km} \cdot \hat{V}_m \quad (3.12)$$

Σύμφωνα με το νόμο του Kirchhoff για το ζυγό k ισχύει :

$$\hat{I}_{Gk} - \hat{I}_{Dk} = y_k \cdot \hat{V}_k + \sum_{m \in A(k)} \hat{I}_{km} \quad (3.13)$$

όπου \bar{I}_{Gk} το ρεύμα που παράγει η γεννήτρια στο ζυγό k , \bar{I}_{Dk} το ρεύμα που απορροφά το φορτίο στο ζυγό k , $y_k \cdot \bar{V}_k$ θεωρείται το ρεύμα που απορροφάται από την εγκάρσια αγωγιμότητα του ζυγού k και $A(k)$, το σύνολο των ζυγών που είναι διασυνδεδεμένοι με τον ζυγό k . Αντικαθιστώντας την εξίσωση (3.9) στην εξίσωση (3.13) προκύπτει:

$$\hat{I}_{Gk} - \hat{I}_{Dk} = \left[y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{skm} + y_{km}) \right] \cdot \hat{V}_k - \sum_{m \in A(k)} y_{km} \cdot \hat{V}_m \quad (3.14)$$

Θέτοντας:

$$Y_{kk} = y_k + \sum_{m \in A(k)} (y_{skm} + y_{km}) \quad (3.15)$$

$$Y_{km} = -y_{km} \quad (3.16)$$

προκύπτει ο πίνακας ή μήτρα αγωγιμοτήτων $n \times n$ διαστάσεων $[Y]$, όπου n ο αριθμός των ζυγών του εξεταζόμενου συστήματος, με τα στοιχεία Y_{kk} να αποτελούν τα διαγώνια στοιχεία του πίνακα και Y_{km} τα μη διαγώνια. Συνεπώς η εξίσωση γενικεύεται και η καθαρή έγχυση ρεύματος στο ζυγό k γράφεται ως:

$$\hat{I}_k = \hat{I}_{Gk} - \hat{I}_{Dk} = Y_{kk} \cdot \hat{V}_k + \sum_{m \in A(k)} Y_{km} \cdot \hat{V}_m \quad (3.17)$$

Οι μιγαδικές ισχύεις παραγωγής και ζήτησης σε ένα σύστημα, ορίζονται ως:

$$S_{GK} = \hat{V}_k \cdot \hat{I}_{Gk}^* \quad (3.18)$$

$$S_{DK} = \hat{V}_k \cdot \hat{I}_{Dk}^* \quad (3.19)$$

Με την καθαρή έγχυση μιγαδικής ισχύος να είναι:

$$S_K = S_{Gk} - S_{Dk} = P_k + jQ_k \quad (3.20)$$

Από τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει ότι:

$$S_K = S_{Gk} - S_{Dk} = Y_{kk}^* \cdot V_k^2 + V_k \cdot \sum_{m \in A(k)} Y_{km}^* V_m^* \quad (3.21)$$

Με την εξίσωση αυτή να αποτελεί το ισοζύγιο ισχύος στο ζυγό k ή αλλιώς την μιγαδική εξίσωση ροής ισχύος του ζυγού k . Οι παραπάνω εξισώσεις μπορούν να γενικευτούν για n ζυγούς, προκύπτοντας n αντίστοιχες εξισώσεις, μια για κάθε ζυγό.

3.1.3 Τύποι ζυγών

Στο πρόβλημα της μελέτης ροής ισχύος ορίζονται τρεις τύποι ζυγών, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του κάθε ζυγού (παραγωγή, ζήτηση) και τις ανάγκες του συστήματος οποίοι είναι:

Ζυγός Ταλάντωσης (slack bus): Αποτελεί τον βασικότερο ζυγό ενός συστήματος καθώς είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση της ισορροπίας του συστήματος. Απαραίτητη προϋπόθεση είναι η ύπαρξη γεννητριών των οποίων η παραγωγή ενεργού και άεργου ισχύος αφήνεται ελεύθερη για έγχυση στο δίκτυο. Το μέτρο τάσης του ζυγού ταλάντωσης θεωρείται γνωστό και συνήθως η γωνία του ορίζεται ως $\delta=0$.

Ζυγός Φορτίου (PQ): Πρόκειται για τους ζυγούς που διαθέτουν κάποιο φορτίο (ακόμα και μηδενικό) όπου η έγχυση ενεργού(P) και άεργου ισχύος(Q) θεωρούνται γνωστές.

Ζυγός Παραγωγής (PV): Αφορά τους ζυγούς που διαθέτουν συστήματα παραγωγής, και για τους οποίους θεωρούνται γνωστά η έγχυση ενεργού(P) ισχύος και το μέτρο της τάσης(V) του ζυγού.

3.1.4 Μέθοδοι επίλυσης του προβλήματος ροής ισχύος

Για το πρόβλημα της ροής ισχύος καλείται να επιλυθεί ένα πλήθος μη γραμμικών, μιγαδικών ή πραγματικών εξισώσεων. Αναφορικά, οι κύριοι μέθοδοι επίλυσης των ροών ισχύος είναι:

- Μέθοδος Gauss
- Μέθοδος Gauss-Seidel
- Μέθοδος Newton-Raphson

3.2 Βέλτιστη ροή ισχύος (OPF)

Η βέλτιστη ροή ισχύος, γνωστή και με την αγγλική ορολογία “Optimal Power Flow” (OPF) αποτελεί μια εξέλιξη της επίλυσης του προβλήματος της μελέτης ροής φορτίου. Αποσκοπεί στην βέλτιστη διαχείριση της παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα ΣΗΕ ακολουθώντας μια αλληλουχία περιορισμών. Βασικό περιορισμό αποτελεί η οικονομική κατανομή ισχύος-φορτίου (Economic Dispatch) επιδιώκοντας την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους των θερμικών μονάδων και ως επέκταση ολόκληρου του δικτύου, πάντα σε συνδυασμό με τους υπόλοιπους περιορισμούς του προβλήματος, που αποτελούν κυρίως τεχνικά όρια λειτουργίας του συστήματος. Η τεχνική του OPF έχει γνωρίσει σημαντική ανάπτυξη σε υπολογιστικά συστήματα, για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, κυρίως σε συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Έχει τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων με βέλτιστο τρόπο, σε πολύσυνθετα συστήματα με αρκετά πολύπλοκους υπολογισμούς.

Το πρόβλημα της Βέλτιστης Ροής Ισχύος διατυπώνεται ως εξής:

- **Ελαχιστοποίηση της συνάρτησης κόστους:** $f(x, u)$, λαμβάνοντας υπόψιν τους περιορισμούς:

$$g(x, u) = 0 \quad (3.22)$$

$$h(x, u) \leq 0 \quad (3.23)$$

Όπου

$g(x, u) = 0$, αφορά τις **εξισώσεις ροών φορτίου του συστήματος**,

$h(x, u) \leq 0$, αφορά **ανισωτικούς περιορισμούς** που αποτελούν τα λειτουργικά όρια του συστήματος. Το διάνυσμα x αποτελείται από τις εξαρτημένες μεταβλητές, ενώ το διάνυσμα u από τις μεταβλητές ελέγχου.

3.2.1 Συνάρτηση κόστους

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η Βέλτιστη Ροή Ισχύος, καλείται να ελαχιστοποιήσει το λειτουργικό κόστος του συστήματος. Η λογική που ακολουθείται είναι ότι εντάσσονται αρχικά οι πιο φθηνές μονάδες, ενώ όσο αυξάνεται το φορτίο ζήτησης, αναγκαστικά θέτονται σε λειτουργία οι πιο ακριβές. Η τιμή του καυσίμου που καταναλώνεται από τις θερμικές μονάδες μετρίεται σε €/hr ή Btu/hr (British thermal units per hour) και η παραγωγή της σε MW. Για την ελαχιστοποίηση του κόστους απαιτείται η χρήση των χαρακτηριστικών καμπυλών κόστους καυσίμου ή καμπύλες εισόδου-εξόδου, των γεννητριών. Οι πιο χαρακτηριστικοί τρόποι προσέγγισης των καμπυλών κόστους είναι:

- η τμηματικά γραμμική,
- η τετραγωνική,
- η κυβική,
- η τμηματικά γραμμική και τετραγωνική,

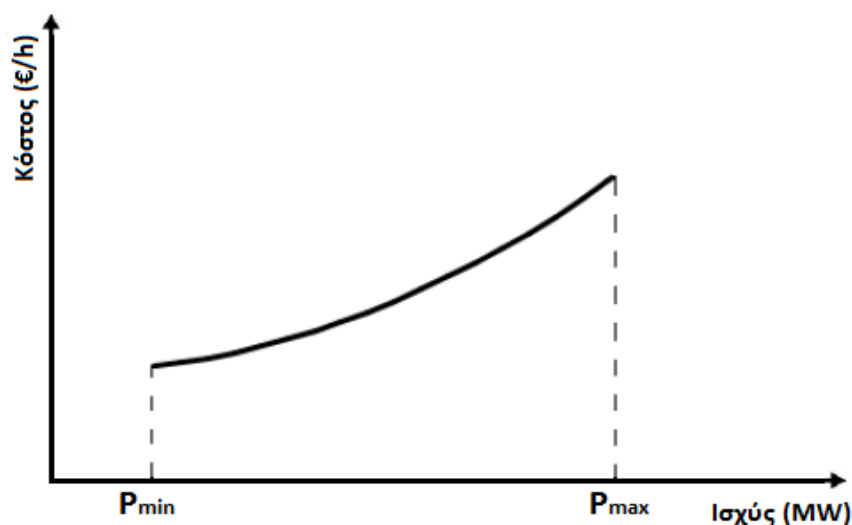
με την τετραγωνική και την κυβική να αποτελούν τις πιο συνηθισμένες μεθόδους απεικόνισης της καμπύλης κόστους στα ΣΗΕ.

Επιλέγοντας την τετραγωνική μορφή η συνάρτηση κόστους, ορίζεται ως:

$$C_i = (a_i + b_i \cdot P_i + c_i \cdot P_i^2) \cdot \text{fuel} \cdot \cos t \quad (3.24)$$

Όπου P_i η ενεργός παραγωγή σε MW και a_i, b_i, c_i , οι συντελεστές κόστους της μονάδας i .

Η καμπύλη κόστους της εικόνας 3.7, εκφράζει το ωριαίο κόστος λειτουργίας σε συνάρτηση με την ισχύ εξόδου.

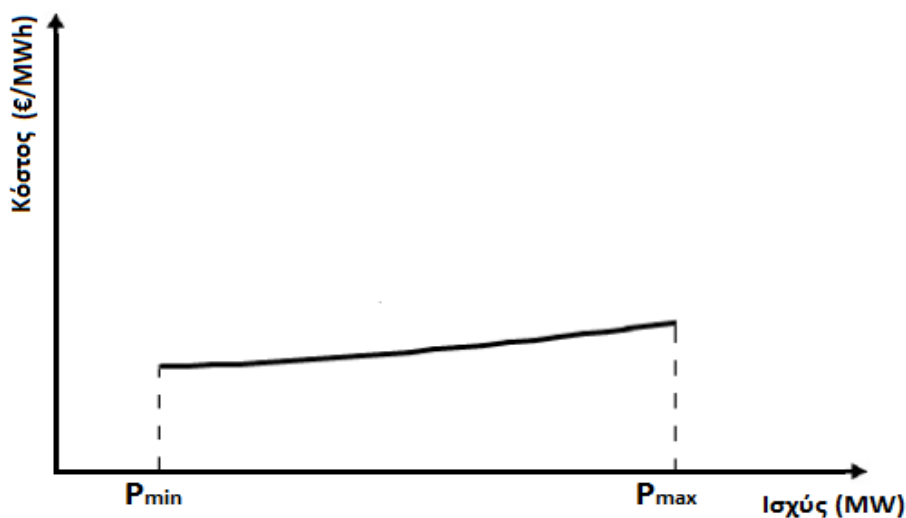


Εικόνα 3.7 Ωριαίο κόστος λειτουργίας

Υπολογίζοντας την παράγωγο του ωριαίου κόστους λειτουργίας:

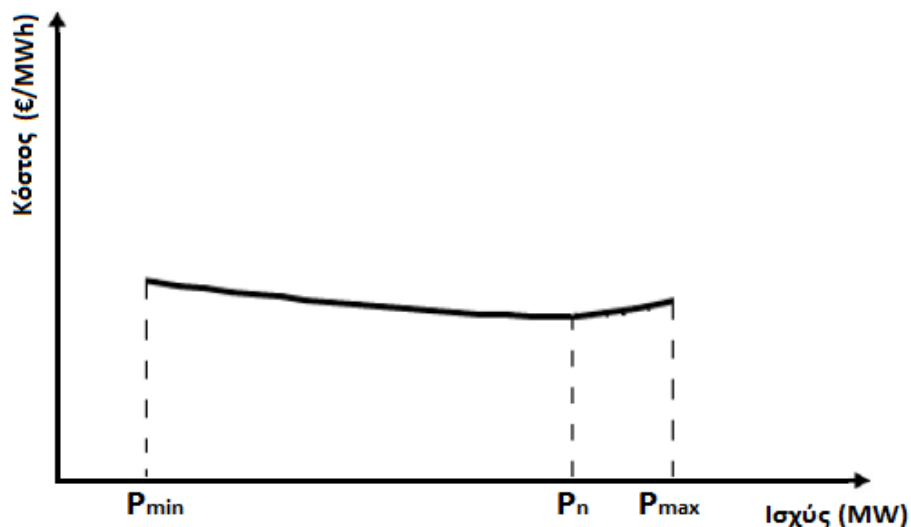
$$\frac{dC_i}{dP_i} = b_i + 2 \cdot C_i \cdot P_i \quad (3.25)$$

προκύπτει η καμπύλη διαφορικού κόστους λειτουργίας (€/MWh), όπως απεικονίζεται στην εικόνα 3.8. Αποτελεί μια καμπύλη κόστους, αύξουσα πολυωνυμική, τμηματικά γραμμική και εκφράζει την αύξηση του κόστους παραγωγής όταν παραχθεί μια επιπλέον MWh από τη μονάδα.



Εικόνα 3.8 Διαφορικό κόστος λειτουργίας

Μια επιπλέον καμπύλη κόστους, αποτελεί η καμπύλη ειδικού κόστους η οποία εκφράζει την τιμή παραγωγής της MWh από τη μονάδα. Μετρείται σε (€/MWh) και αποτελεί το λόγο του ωριαίου κόστους (€/hr) προς την ισχύ εξόδου (MW). Όπως φαίνεται στην εικόνα 3.9, η οικονομική λειτουργία των μονάδων επιτυγχάνεται όταν λειτουργούν κοντά στην ονομαστική τους ισχύ.



Εικόνα 3.9 Ειδικό κόστος λειτουργίας

3.2.2 Μεταβλητές ελέγχου

Οι μεταβλητές ελέγχου αποτελούν ποσότητες των στοιχείων του συστήματος οι οποίες μπορούν να προσαρμοστούν για την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας. Συμβάλλουν δηλαδή στη διαμόρφωση του λειτουργικού κόστους και είναι οι ακόλουθες:

- Ενεργός ισχύς των γεννητριών,
- Άεργος ισχύς των γεννητριών,
- Θέσεις μεταγωγών τυλιγμάτων των μετασχηματιστών,
- Πυκνωτές και επαγωγικά στοιχεία του συστήματος,
- Καθαρή ανταλλαγή ενεργού ισχύος μέσω των γραμμών.

3.2.3 Εξαρτημένες μεταβλητές

Αποτελούν τις μεταβλητές που δεν μπορούν να ελεγχθούν αλλά είναι απαραίτητο να βρίσκονται μέσα στα επιθυμητά όρια. Οι εξαρτημένες μεταβλητές είναι:

- Μέτρο τάσης των ζυγών,
- Γωνίες τάσης των ζυγών.

3.2.4 Εξισώσεις ροών ισχύος

Πρόκειται για τις εξισώσεις ροής ενεργού και άεργου ισχύος σε κάθε ζυγό. Αντικατοπτρίζουν την σωστή λειτουργία του συστήματος με σεβασμό στα όρια της τάσης. Η σωστή λειτουργία του συστήματος επιβάλλεται μέσω των εξισώσεων που ορίζουν ότι η ενεργός και η άεργος ισχύ σε κάθε ζυγό ισούται με μηδέν. Κάτι τέτοιο είναι δυνατόν να επιτευχθεί με την ακόλουθη ανάλυση:

Οι εξισώσεις της βέλτιστης ροής ισχύος ορίζονται ως:

$$G(V, \delta) = \begin{cases} P_i(V, \delta) - P_i^{net} \\ Q_i(V, \delta) - Q_i^{net} = 0 \\ P_m(V, \delta) - P_m^{net} \end{cases} \quad (3.26)$$

Όπου P_{inet}, Q_{inet} είναι η καθορισμένη ενεργός και άεργος ισχύς του ζυγού φορτίου (PQ), V, δ είναι η τάση και η γωνία τάσης κάθε ζυγού του συστήματος ενώ τα P_i, Q_i υπολογίζονται ως εξής:

$$P_i = P_{Load} + P_{Loss} \quad (3.27)$$

$$Q_i = Q_{Load} + Q_{Loss} \quad (3.28)$$

Όπου P_i, Q_i είναι η ενεργός και η άεργος ισχύς εξόδου αντίστοιχα, P_{Load}, Q_{Load} η ενεργός και η άεργος ζήτηση και P_{Loss}, Q_{Loss} οι απώλειες ενεργού και άεργου ισχύος.

3.2.5 Ανισωτικοί περιορισμοί

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας απαρτίζεται από ένα σύνολο περιορισμών, που διέπουν την ασφαλή λειτουργία του συστήματος. Πρόκειται για ανισότητες που οριοθετούν την λειτουργία των οντοτήτων ενός ΣΗΕ και ικανοποιούνται αποκλειστικά από τη βέλτιστη ροή ισχύος. Είναι αναγκαίο τα στοιχεία του συστήματος να ακολουθούν τους λειτουργικούς αυτούς περιορισμούς, για τη διατήρηση της ασφάλειας και της ευστάθειας του δικτύου.

Ενεργός και άεργος παραγωγή γεννητριών

Η ενεργός και άεργος παραγωγή των γεννητριών οριοθετείται μεταξύ του τεχνικού της ελαχίστου και μέγιστου. Η λειτουργία των γεννητριών είναι περισσότερο αποδοτική και περισσότερο οικονομική όταν η παραγωγή της κυμαίνεται στα επιτρεπτά όρια, ενώ υπάρχει πιθανότητα η υπέρβαση των ορίων να αποφέρει τεχνικά προβλήματα στην ίδια τη γεννήτρια. Η ανισότητες της παραγωγής ορίζονται ως ακολούθως:

$$P_{gi}^{\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{\max} \quad (3.29)$$

$$Q_{gi}^{\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{\max} \quad (3.30)$$

Όπου P_{gi}, Q_{gi} είναι η ενεργός και η άεργος παραγωγή της μονάδας i .

Τάση και γωνία τάσης ζυγών

Σε κάθε ζυγό του εξεταζόμενου συστήματος, η τάση απαιτείται να διατηρείται σταθερή χωρίς μεγάλες αποκλίσεις, εντός των ορίων που έχουν οριστεί. Για τους ζυγούς που διαθέτουν κάποια μονάδα (PV), η τάση μπορεί εύκολα να ελεγχθεί και να ρυθμιστεί μέσω της ρύθμισης, κυρίως της άεργου παραγωγής της γεννήτριας. Σύμφωνα με τον κώδικα διαχείρισης μη διασυνδεδεμένων νησιών η τάση κυμαίνεται από 0,95pu έως 1,08pu. Τα όρια της τάσης και της γωνίας της τάσης για κάθε ζυγό ορίζονται ως:

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad (3.31)$$

$$\delta_i^{\min} \leq \delta_i \leq \delta_i^{\max} \quad (3.32)$$

Όπου V_i η τάση και δ_i η γωνία τάσης του ζυγού i .

Ροή γραμμών μεταφοράς

Κάθε γραμμή μεταφοράς επιτρέπει την μεταφορά ενός συγκεκριμένου ποσού ισχύος. Συνήθως υπολογίζεται σε MVA (φαινόμενη ισχύς) ή σε Amps (Ρεύμα) για το διάστημα μιας ώρας. Εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της γραμμής, το μήκος της και τον τύπο των ζυγών που συνδέει.

3.2.6 Τεχνικές επίλυσης του προβλήματος της βέλτιστης ροής ισχύος

Η χρησιμότητα της βέλτιστης ροής ισχύος στις μελέτες για τη ροή ισχύος σε μεγάλα συστήματα, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη και την εξέλιξη διαφόρων τεχνικών βελτιστοποίησης. Οι πιο βασικές και ευρέως διαδεδομένες είναι:

- Η μέθοδος Lagrange
- Η μέθοδος κλίσης (Gradient)
- Η μέθοδος Newton
- Ο γραμμικός προγραμματισμός (LP)
- Ο αλγόριθμος εσωτερικού σημείου
- Η μέθοδος εσωτερικού σημείου (IP)
- Ο τετραγωνικός προγραμματισμός (QP)

Κάθε μέθοδος επίλυσης έχει πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Η μέθοδος Lagrange δεν είναι αποτελεσματική για πολύπλοκες συναρτήσεις κόστους, εξαιτίας του δύσκολου υπολογισμού της παραμέτρου λ . Στη μέθοδο Gradient συναντάται το πρόβλημα της σύγκλισης εξαιτίας των ανισοτικών περιορισμών. Η μέθοδος Newton είναι σαφώς πιο γρήγορη από την Gradient μέθοδο με τα αποτελέσματα που προκύπτουν να διατηρούν αρκετά χαμηλά το κόστος λειτουργίας με το μειονέκτημα ότι υπάρχει ιδιαίτερη ευαισθησία στον ορισμό των αρχικών συνθηκών. Η μέθοδος του γραμμικού προγραμματισμού (LP) παρέχει τη δυνατότητα για πολύ γρήγορους υπολογισμούς άλλα όχι και ιδιαίτερα ακριβής εξαιτίας της γραμμικότητας του προβλήματος. Τέλος, η μέθοδος εσωτερικού σημείου είναι ταχύτερη από εκείνη του γραμμικού προγραμματισμού, όμως και εκείνη υπάρχει περίπτωση να οδηγήσει σε λανθασμένα αποτελέσματα εάν το βήμα δεν έχει οριστεί καταλλήλως.

4 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ PowerWorld

Το λογισμικό PowerWorld αποτελεί ένα αρκετά εύχρηστο εκπαιδευτικό πρόγραμμα για την εκμάθηση και εξάσκηση σε ΣΗΕ, εξαιτίας της γραφικής παρουσίασης του υπό μελέτη συστήματος και των αποτελεσμάτων. Είναι ένα αλληλοδραστικό πακέτο προσομοίωσης που σχεδιάστηκε για την προσομοίωση της λειτουργίας ΣΗΕ σε χρονική περίοδο που κυμαίνεται από κάποια λεπτά σε αρκετές ώρες. Συγκεκριμένα, περιέχει ένα πακέτο ανάλυσης ροής φορτίου που μπορεί να προσομοιώσει συστήματα έως 100.000 ζυγών. Το γραφικό περιβάλλον περιλαμβάνει μονογραμμικά διαγράμματα, ενώ υπάρχει η δυνατότητα πανοραμικής λήψης και μεγέθυνσης συγκεκριμένων σημείων του συστήματος. Ακόμα, προσφέρει εργαλεία για τη βέλτιστη ροή ισχύος με περιορισμούς ασφαλείας, για τη διαθέσιμη ικανότητα μεταφοράς, και ένα εργαλείο για τον αυτόματο έλεγχο της παραγωγής.

Σε ό,τι αφορά τις δυνατότητες του προγράμματος αξίζει να αναφερθούν τα παρακάτω:

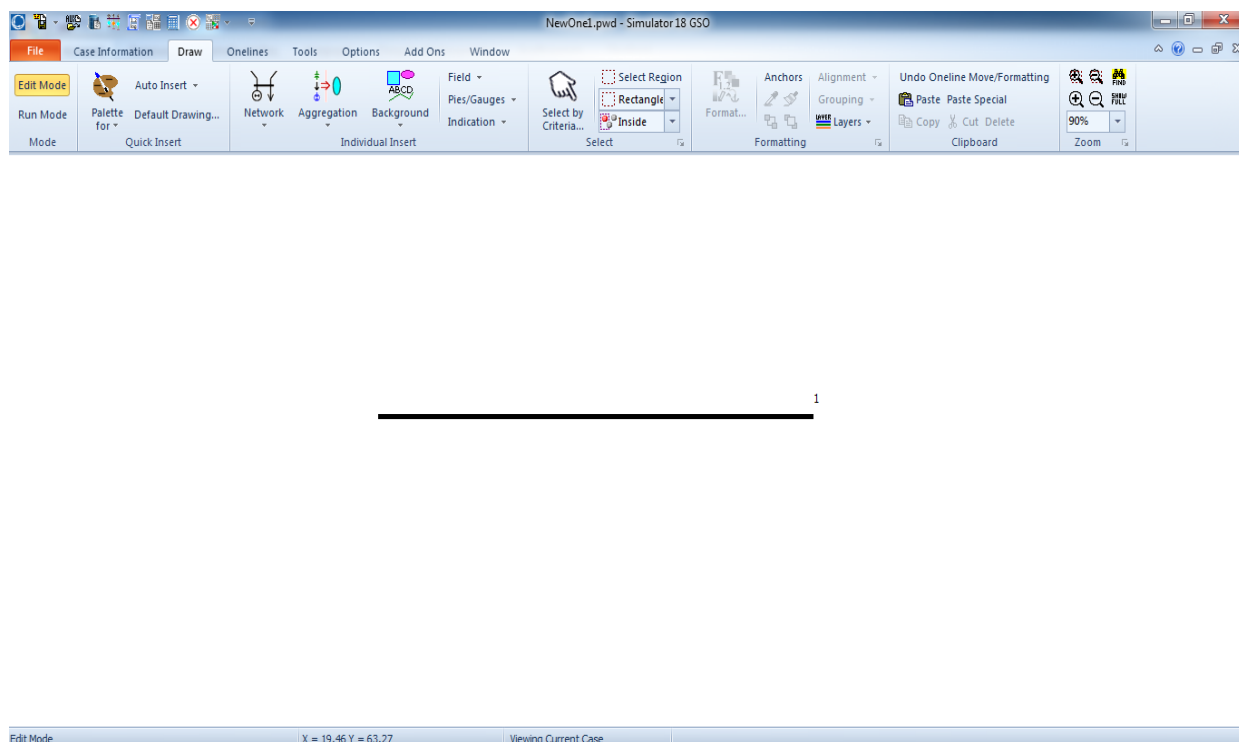
- Υποστηρίζει τη λεπτομερή μοντελοποίηση μετασχηματιστών με σύστημα αλλαγής τάσης υπό φορτίο και αλλαγής φάσης, διακοπών, καμπυλών ενεργού και αέργου ικανότητας φόρτισης γεννητριών, καμπυλών κόστους γεννητριών, προγραμμάτων φορτίων, προγραμμάτων ανταλλαγής ισχύος, γραμμών συνεχούς ρεύματος και απομακρυσμένου ελέγχου τάσης ζυγών.
- Είναι δυνατή η αξιολόγηση όχι μόνο των τεχνικών πτυχών μιας αλλαγής (π.χ. ανακατανομή φορτίου) αλλά και της οικονομικής σημασίας της αλλαγής.
- Ενσωματώνει τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής περιοχής (Automatic Generation Control – AGC) στην επίλυση της ροής φορτίου, προσφέροντας τρεις διαφορετικούς τρόπους ελέγχου: με ένα ζυγό ταλάντωσης, διανεμημένο έλεγχο με πολλαπλούς ζυγούς ταλάντωσης (με χρήση των συντελεστών συμμετοχής των ζυγών) και οικονομική κατανομή φορτίου. Ταυτόχρονα, ο τύπος του ελέγχου AGC είναι δυνατόν να διαφέρει από περιοχή σε περιοχή (π.χ. δυνατότητα χρησιμοποίησης της οικονομικής κατανομής φορτίου σε εκείνες μόνο τις περιοχές όπου είναι γνωστές οι πληροφορίες για τις δαπάνες). Η χρήση του ελέγχου AGC καθιστά τη διαδικασία της επίλυσης σαφώς γρηγορότερη.
- Στη γραφική απεικόνιση του συστήματος και των ροών φορτίου, τα βέλη στις γραμμές, στα φορτία και στις γραμμές μεταφοράς είναι μεγαλύτερα και κινούνται ταχύτερα ανάλογα με το μέγεθος και την κατεύθυνση της ροής ισχύος. Παράλληλα, με την χρήση των pie charts (διαγράμματα πίτας), είναι άμεση η δυνατότητα ελέγχου των υπερφορτίσεων των γραμμών, καθώς η ροή φαίνεται ως ποσοστό της πλήρους φόρτισης της γραμμής.
- Το εξαιρετικά εύχρηστο γραφικό περιβάλλον βοηθά τόσο στην χρησιμοποίηση του ίδιου του προγράμματος, όσο και στην επεξεργασία και ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Μέσα από τα μονογραμμικά διαγράμματα του προσομοιωτή και τους διαλόγους πληροφοριών καθίσταται δυνατή η δημιουργία και ο έλεγχος σωστής λειτουργίας ενός συστήματος γραφικά. Κατά τη λειτουργία edit mode δημιουργείται ή τροποποιείται το σύστημα, και κατά τη λειτουργία run mode το σύστημα «τρέχει» και οπτικοποιούνται τα αποτελέσματα.

- Η αυτοματοποιημένη διαδικασία εισαγωγής στοιχείων (γεννητριών, γραμμών, Μ/Σ, φορτίων κλπ) έχει ως αποτέλεσμα την μεγάλη ταχύτητα δημιουργίας σχεδίων, ειδικά μετά από μικρή εμπειρία χρήσης του προγράμματος. Ταυτόχρονα, είναι δυνατή η λεπτομερής απεικόνιση και ανάλυση του συστήματος, και η εύκολη χρήση των λειτουργιών μεγέθυνσης.
- Οι διακόπτες σε οποιοδήποτε σημείο του συστήματος ανοίγουν ή κλείνουν με ένα απλό πάτημα, γεγονός το οποίο διευκολύνει ιδιαίτερα τη συνολική εποπτεία των αλλαγών ή προβλημάτων που προκαλούνται στο σύστημα με την απομόνωση ή επαναλειτουργία κλάδων ή υποσυστημάτων του συστήματος (κυρίως σε ό,τι αφορά στις γεννήτριες και στα φορτία).
- Παρέχονται εργαλεία για τον υπολογισμό ευαίσθητων σημείων. Για παράδειγμα, αυτά μπορεί να είναι οι παράγοντες διανομής μεταφοράς ισχύος, οι ευαισθησίες ροής στη γραμμή μεταφοράς, ή η ευαισθησία των απωλειών.
- Δίνεται η δυνατότητα παραγωγής ισοϋψών χαρτών, οι οποίοι παρέχουν πληροφορίες για την ποικιλομορφία των τάσεων, των φορτίων, των ευαισθησιών απωλειών και ροής, του οριακού κόστους.
- Περιέχονται εργαλεία ανάλυσης πιθανότητας διαταραχών που βοηθούν στην αναγνώριση προβλημάτων. Η ανάλυση πιθανότητας διαταραχών γίνεται με την εφαρμογή μιας πλήρους ροής φορτίου για κάθε πιθανότητα με αυξανόμενη ακρίβεια. Στη συνέχεια καταρτίζονται κατάλογοι ενδεχομένων και σχετικών παραβιάσεων και δίνεται η δυνατότητα της ευέλικτης επεξεργασίας των καταλόγων ώστε να ικανοποιούνται δεδομένα κριτήρια.
- Δίνεται, πέρα από τη δυνατότητα γραφικής αναπαράστασης, και η δυνατότητα παρουσίασης και επεξεργασίας των στοιχείων υπό μορφή πινάκων, σε λογιστικό φύλλο. Όπως θα δούμε στη συγκεκριμένη χρήση του προγράμματος, οι πίνακες, εκτός από τις δυνατότητες ταξινόμησης και αντιγραφής των στοιχείων, είναι εξαιρετικά χρήσιμο για τον έλεγχο των δεδομένων και τυχόν λαθών, που δεν είναι πάντα εύκολο να εντοπιστούν στη γραφική αναπαράσταση.
- Είναι δυνατή η αποθήκευση των εγγράφων σε μορφή HTML, και η εκτύπωση υψηλής ευκρίνειας διαγραμμάτων στον εκτυπωτή. Υποστηρίζεται τέλος μια γλώσσα προγραμματισμού που επιτρέπει την αυτοματοποίηση συχνών εργασιών και την οργάνωσή τους, ώστε να διευκολύνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

4.1 Οδηγίες για την κατασκευή του συστήματος - Εισαγωγή των στοιχείων

Ζυγός

Το κυριότερο στοιχείο ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο ζυγός. Οι ζυγοί χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν σημεία συνδέσεων στους υποσταθμούς, όπου συνδέονται οι διάφορες συσκευές. Για την εισαγωγή ενός ζυγού, ακολουθούνται τα βήματα από το μενού Draw -> Network -> Bus, δημιουργώντας τον ζυγό της εικόνας 4.1.



Εικόνα 4.1 Εισαγωγή ζυγού

Στην καρτέλα του ζυγού που εμφανίζεται (εικόνα 4.2) εισάγονται τα δεδομένα του ζυγού, τα κυριότερα από τα οποία είναι:

- Όνομα και αριθμός ζυγού
- Μορφή απεικόνισης στην επιλογή display (μέγεθος, πάχος, πλάτος κλπ)
- Ονομαστική τάση
- Πληροφορίες για το αν ο ζυγός αποτελεί ζυγό ταλάντωσης ή αναφοράς.

Ο ζυγός αναφοράς, ο οποίος είναι ζυγός παραγωγής, χρησιμεύει για να αντισταθμίζει τις, άγνωστες αρχικά, απώλειες του δικτύου και για την άμεση αντιμετώπιση των μεταβολών ισχύος. Σε αυτόν το ζυγό επιβάλλουμε σταθερή κατά μέτρο και γωνία τάση και προσδιορίζουμε τις ισχείς παραγωγής.

Είναι απαραίτητο τουλάχιστον ένας εκ των ζυγών του συστήματος να οριστεί ως ζυγός ταλάντωσης. Επιλέγοντας το στοιχείο System Slack Bus και ορίζοντας την τάση ως 1 pu και την γωνία 0 degrees, ο ζυγός αυτός είναι εκείνος που κρατάει την ισορροπία του συστήματος. Να σημειωθεί ότι είναι απαραίτητη και εισαγωγή γεννήτριας στο ζυγό αυτό.

Bus Options

This will insert a new bus in the power system data model

Bus Number: 1 Find By Number Find ...

Bus Name: 1 Find By Name

Nominal Voltage: 150 kV

Labels ...

	Number	Name
Area	1	1
Zone	1	1
Owner	1	
Substation		

Bus Information: Display Attached Devices Geography Custom

Bus Voltage: 1,00

Angle (degrees): 0,00

Bus Voltage Regulator Devices

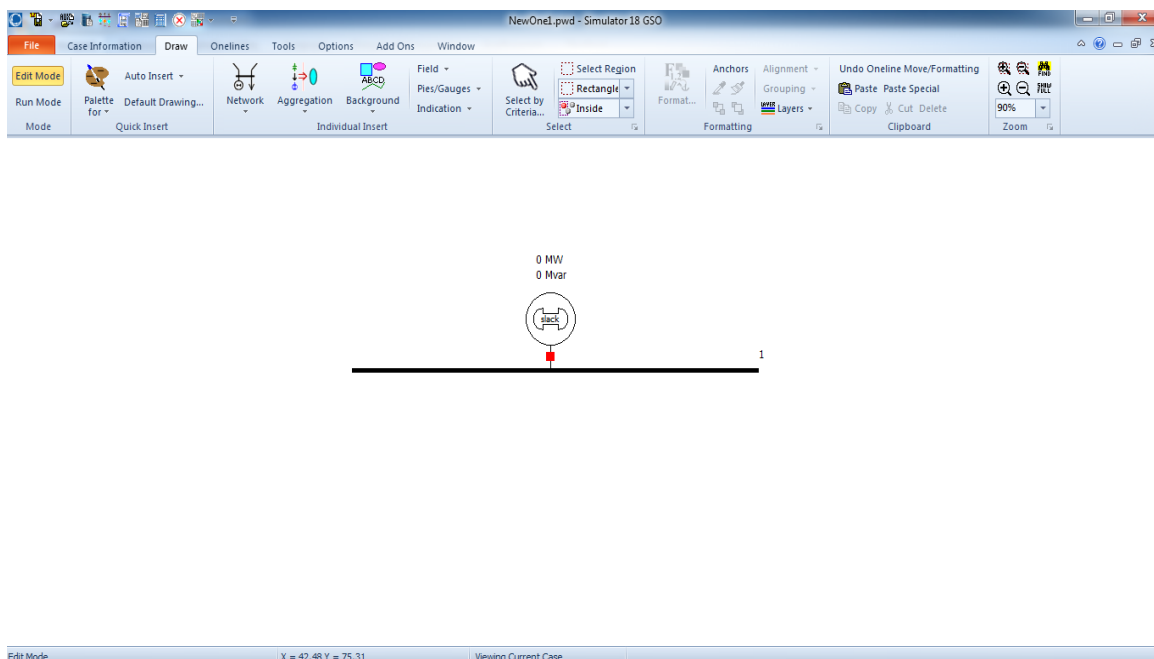
☐ System Slack Bus

OK Save Cancel

Εικόνα 4.2 Καρτέλα επιλογών για ένα ζυγό

Γεννήτρια

Για την εισαγωγή γεννήτριας, αντίστοιχα με το ζυγό, γίνεται η επιλογή στο μενού Draw -> Network -> Generator και επιλέγεται ο ζυγός στον οποίο θα εισαχθεί η γεννήτρια (εικόνα 4.3).



Εικόνα 4.3 Εισαγωγή γεννήτριας

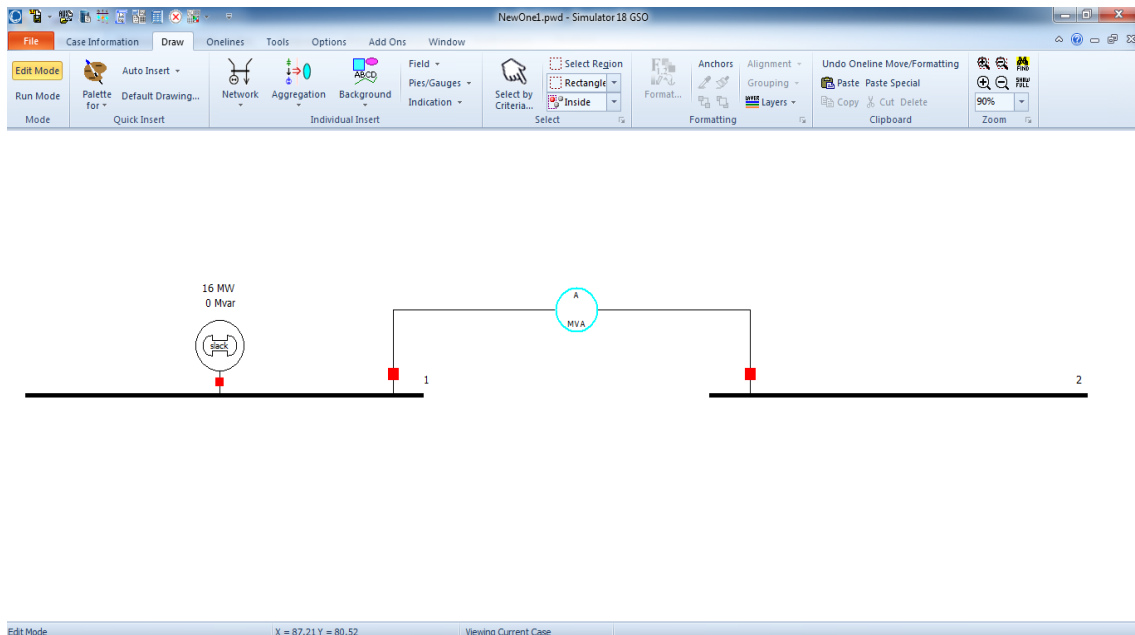
Στην καρτέλα εισαγωγής δεδομένων γεννήτριας (εικόνα 4.4) που εμφανίζεται εισάγονται τα στοιχεία της. Τα κυριότερα είναι:

- Τα όρια λειτουργίας της γεννήτριας (ελάχιστη/μέγιστη παραγωγή)
- Παραγωγή ενεργού ισχύος
- Αν η γεννήτρια χρησιμοποιείται από τον αυτόματο έλεγχο παραγωγής (AGC)
- Το πόσο γρήγορα αλλάζει η παραγωγή της γεννήτριας
- Αν έχει έλεγχο για τη διατήρηση σταθερής τάσης εξόδου (AVR)
- Τα όρια μέσα στα οποία μπορεί να παραλάβει ή να παράξει άεργο ισχύ
- Η μορφή απεικόνισης (στην επιλογή display)
- Ο ζυγός στον οποίο συνδέεται η γεννήτρια

Εικόνα 4.4 Καρτέλα επιλογών για μια γεννήτρια

Γραμμή μεταφοράς

Η γραμμή μεταφοράς εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) συνδέει δύο ζυγούς. Για την εισαγωγή της επιλέγεται Draw -> Network-> Transmission Line. Με το πρώτο κλικ γίνεται η επιλογή του ζυγού εκκίνησης και με το επόμενο του ζυγού στον οποίο καταλήγει. Η εικόνα 4.5, παρουσιάζει μια τυπική γραμμή μεταφοράς που συνδέει δύο ζυγούς.



Εικόνα 4.5 Εισαγωγή γραμμής μεταφοράς

Στην καρτέλα που εμφανίζεται μετά το τέλος της σχεδίασης, σύμφωνα με την εικόνα 4.6, εισάγονται τα δεδομένα της γραμμής, κυρίως τα εξής:

- Ωμική αντίσταση (R) (Per Unit)
- Επαγωγική αντίδραση (X) (Per Unit)
- Εγκάρσια χωρητικότητα (B) (Per Unit)
- Τα όρια της ροής ισχύος
- Τη μορφή απεικόνισης της γραμμής
- Δύο ζυγούς με τους οποίους συνδέεται η γραμμή
- Την κατάσταση της (Status -> Open, Closed)

Εικόνα 4.6 Καρτέλα επιλογών για μια γραμμή μεταφοράς

Πατώντας την επιλογή Calculate Impedances, ανοίγει ένα παράθυρο με περισσότερες επιλογές (εικόνα 4.7) για την εισαγωγή στοιχείων σχετικά με τις γραμμές μεταφοράς, όπως:

- Ωμική αντίσταση (R) (Ohms/km)
- Επαγωγική αντίδραση (X) (Ohms/km)
- Εγκάρσια χωρητικότητα (B) (Mhos/km)
- Km/miles
- MVA Limit

Εικόνα 4.7 Ορισμός των παραμέτρων μιας γραμμής μεταφοράς

Όπως φαίνεται από την εικόνα 4.5, μετά την τοποθέτηση της Γραμμής μεταφοράς, εμφανίζεται πάνω σε αυτήν ένα διάγραμμα (pie chart) το οποίο ουσιαστικά ενημερώνει τον χρήστη για την φόρτιση της γραμμής και τον προειδοποιεί όταν ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια. Πατώντας διπλό κλικ ανοίγει το μενού της εικόνας 4.8, με το οποίο ο χρήστης μπορεί να το χειριστεί, με τις κυριότερες επιλογές του να είναι:

- Μέγεθος διαγράμματος
- Τον τρόπο απεικόνισης της φόρτισης της Γραμμής. (Ampere, MW, MVar, MVA, %)
- Το ποσοστό μετά το οποίο θα αλλάζει το χρώμα του διαγράμματος και θα προειδοποιεί τον χρήστη.

Line/Transformer Flow Pie Chart

From Bus Number: 1 To Bus Number: 2

From Bus Name: 1 To Bus Name: 2

Circuit: 1 Size: 8,0

MVA Rating: 0,000 Percent: 0,0

☐ Ignore Dynamic Sizing ☐ Always Show Value (Percent)

☐ Ignore Dynamic Open Sizing ☒ Anchored

Style

☐ * Use Online Options ☐ Line Amp, Transf. MVA

☒ Total power (MVA) ☐ Max % Load Cont.

☐ Real power (MW) ☐ PTDF

☐ Reactive power (Mvar)

* recommended setting

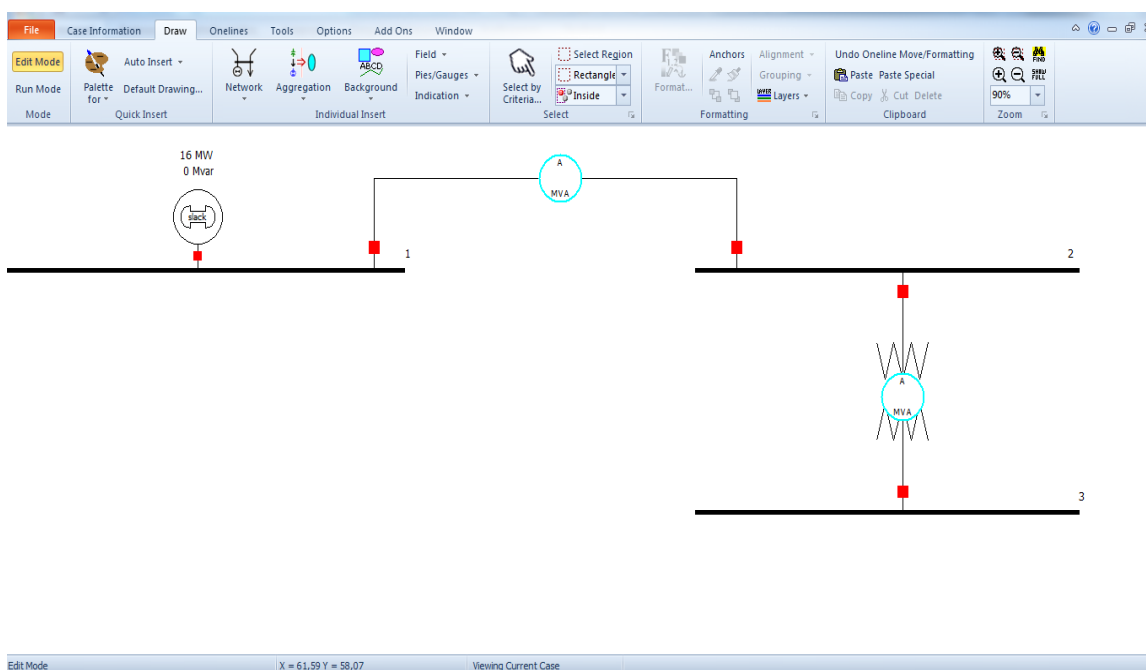
View Pie Chart Display Options

OK Cancel Help

Εικόνα 4.8 Καρτέλα επιλογών, για το διάγραμμα "πίτας" μιας γραμμής μεταφοράς

Μετασχηματιστής

Όπως και η γραμμή μεταφοράς, έτσι και ο μετασχηματιστής ενώνει δύο ζυγούς, όμως με διαφορετικά επίπεδα τάσης ο καθένας. Χρησιμοποιείται δηλαδή σε περιπτώσεις όπου γίνεται υποβιβασμός/ανόρθωση της τάσης. Η εισαγωγή του μετασχηματιστή γίνεται από το μενού επιλέγοντας Draw -> Network -> Transformer, όπου με το πρώτο κλικ επιλέγεται ο ζυγός που συνδέεται το πρωτεύον του μετασχηματιστή, και με το επόμενο ο ζυγός του δευτερεύοντος (εικόνα 4.9).



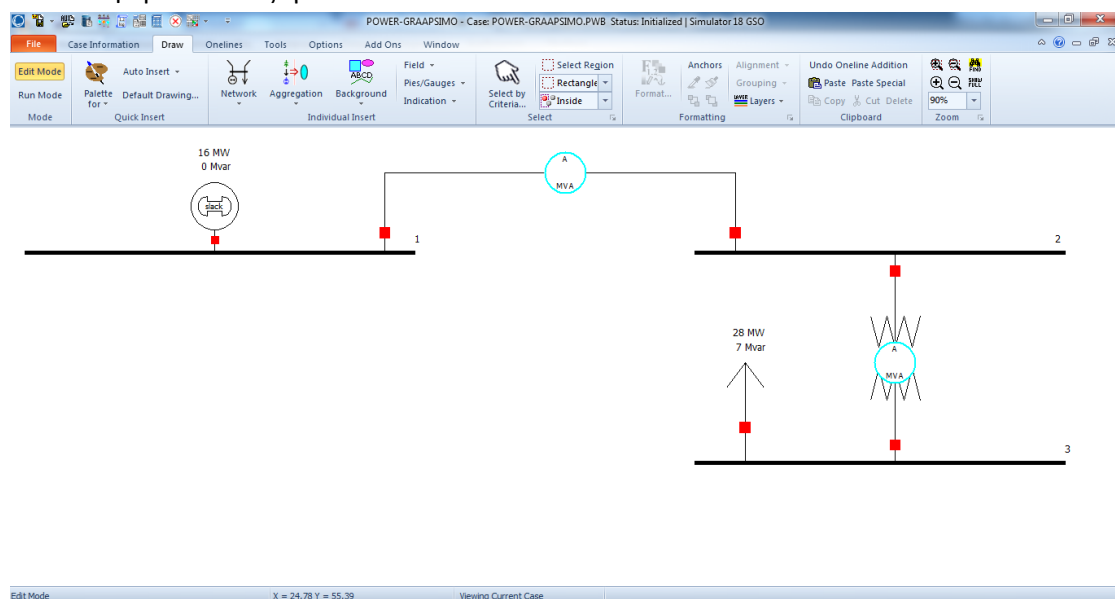
Εικόνα 4.9 Εισαγωγή μετασχηματιστή

Τα στοιχεία που εισάγονται στην καρτέλα της εικόνας 4.10, είναι του ίδιου τύπου με εκείνα της γραμμής μεταφοράς:

Εικόνα 4.10 Καρτέλα επιλογών για ένα μετασχηματιστή

Φορτίο

Για το φορτίο ακολουθείται η διαδικασία: Draw -> Network -> Load και στη συνέχεια επιλέγεται ο ζυγός όπου θα τοποθετηθεί. Σύμφωνα με την εικόνα 4.11, έγινε εισαγωγή ενός τυπικού φορτίου στο ζυγό 3.



Εικόνα 4.11 Εισαγωγή φορτίου

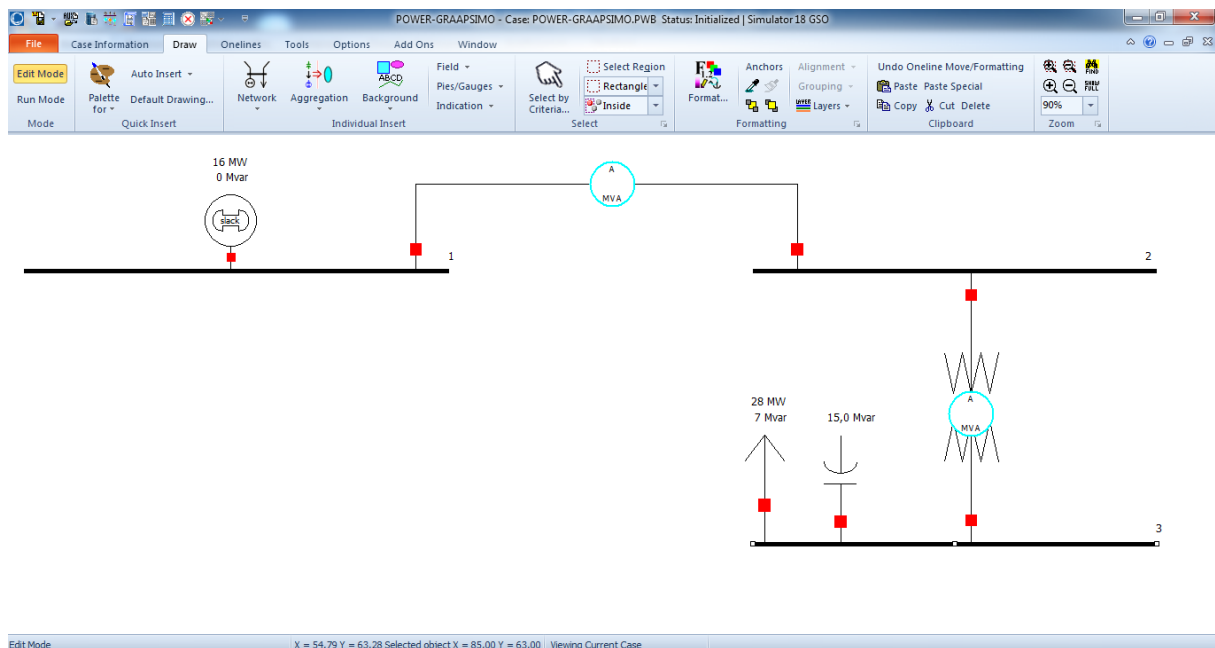
Στο παράθυρο για τα δεδομένα του φορτίου (εικόνα 4.12), διακρίνονται τα ακόλουθα κυριότερα στοιχεία:

- Η κατάσταση του (Open, Closed)
- Ο ζυγός στον οποίο συνδέεται το φορτίο
- Η ενεργός και άεργος ισχύς του
- Η σύνθετη αντίστασή του
- Η ένταση του ρεύματος
- Στοιχεία για την απεικόνιση του

Εικόνα 4.12 Καρτέλα επιλογών για ένα φορτίο

Εγκάρσιο άεργο στοιχείο

Αντιπροσωπεύουν ουσιαστικά τα στοιχεία αντιστάθμισης που τοποθετούνται σε ένα ΣΗΕ, για την παραγωγή (πυκνωτές) ή την απορρόφηση (επαγωγικές αντιδράσεις- πηνία) αέργου ισχύος. Συνήθως οι συσκευές αυτές αποτελούνται από συστοιχίες κλιμακούμενης σύνθετης αγωγιμότητας που συνδέονται στο σύστημα με διακριτά βήματα, και οι συσκευές θεωρούνται ενεργές αν έστω και ένα από τα μπλοκ αυτά είναι συνδεδεμένο στο σύστημα. Αντίστοιχα με τα προηγούμενα, ακολουθείται η διαδικασία Draw -> Network -> Switched Shunt επιλέγοντας το στο ζυγό που επιθυμούμε να εγκατασταθεί. Η εγκατάσταση του πραγματοποιήθηκε στο ζυγό 3, όπως απεικονίζει η εικόνα 4.13.



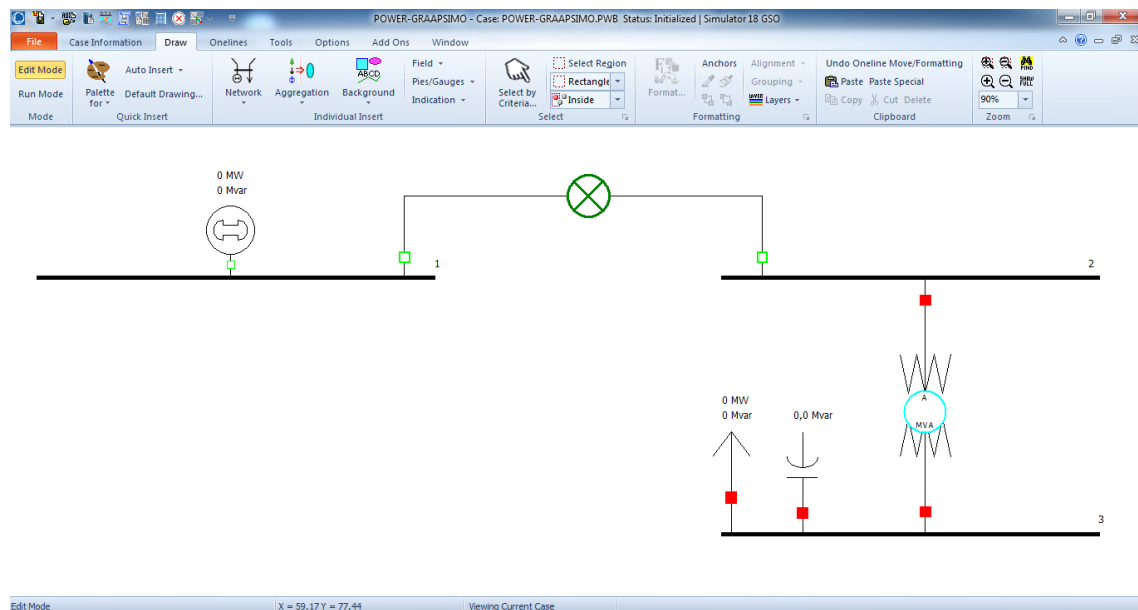
Εικόνα 4.13 Εισαγωγή εγκάρσιου άεργου στοιχείου

Στο παράθυρο των στοιχείων (εικόνα 4.14) του Switched Shunt εισάγονται:

- Ο ζυγός που ανήκει
- τα στοιχεία απεικόνισης του
- Η τιμή της άεργου ισχύος που παράγει ή καταναλώνει
- Ο τύπος του (fixed, discrete, continuous, Bus shunt)
- Η κατάσταση του (Open, Closed)

Εικόνα 4.14 Καρτέλα επιλογών για ένα εγκάρσιο άεργο στοιχείο

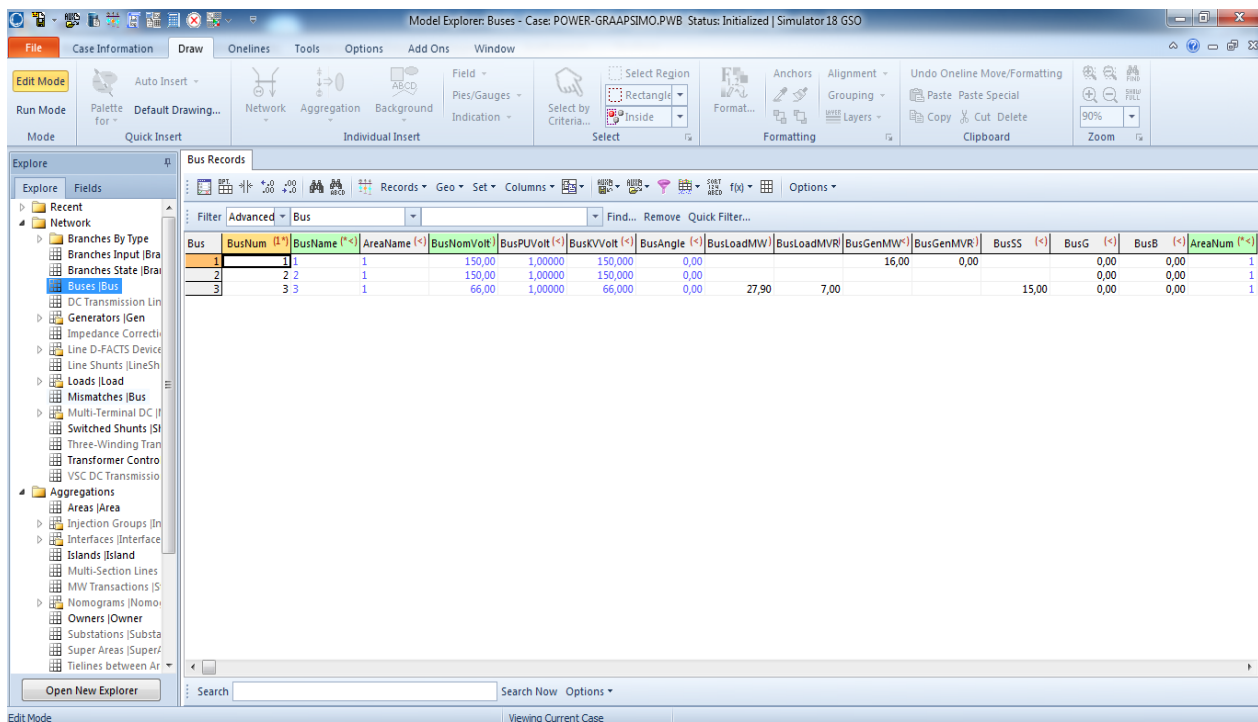
Αξίζει να σημειωθεί ότι τα κόκκινα τετραγωνάκια που διακρίνονται κατά μήκος όλου του συστήματος αποτελούν διακόπτες ισχύος. Όταν έχουν κόκκινο χρώμα σημαίνει ότι είναι κλειστοί (σε λειτουργία) ενώ όταν είναι με πράσινο περίγραμμα είναι ανοιχτοί (εκτός λειτουργίας). Κάθε στοιχείο διαθέτει ένα διακόπτη, οπότε όταν ο χρήστης θέτει εκτός λειτουργίας ένα στοιχείο του συστήματος (από το Status του όπως αναφέρθηκε παραπάνω) ανοίγει ουσιαστικά τον διακόπτη. Στην εικόνα 4.15 διακρίνεται το σύστημα που έχει δημιουργηθεί από την αρχή της περιγραφής, με το φορτίου του ζυγού 1 και τη γραμμή μεταφοράς που ενώνει τους ζυγούς 1 και 2 εκτός λειτουργίας.



Εικόνα 4.15 Παρουσίαση διακοπών


4.2 Παρουσίαση εργαλείου “Case Information”

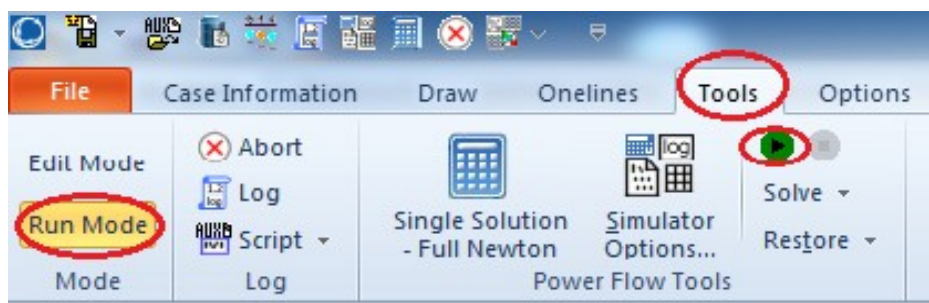
Τελειώνοντας με την παρουσίαση των οδηγιών εισαγωγής των σημαντικότερων στοιχείων ενός ΣΗΕ, στο PowerWorld είναι ιδιαίτερα χρήσιμο να παρουσιαστούν και οι δυνατότητες που παρέχει το εργαλείο Case Information που είναι ενσωματωμένο στο πρόγραμμα. Διαθέτει συγκεντρωμένα όλα τα στοιχεία του συστήματος που έχει δημιουργήσει ο χρήστης σε πίνακες, χωρισμένα σε κατηγορίες (Buses, Generators, Lines, Loads, Switched Shunts κ.α). Οπότε ο χρήστης μπορεί εύκολα να συλλέξει αλλά ακόμα και να εισάγει δεδομένα στο Σύστημα που πρόκειται να προσομοιώσει. Ακολουθεί η εικόνα 4.16, με μια τυπική απεικόνιση του Case Information όπου αριστερά φαίνεται το Toolbar με τις κατηγορίες ανάλογα με τα στοιχεία του συστήματος.



Εικόνα 4.16 Εισαγωγή στο περιβάλλον του Case Information

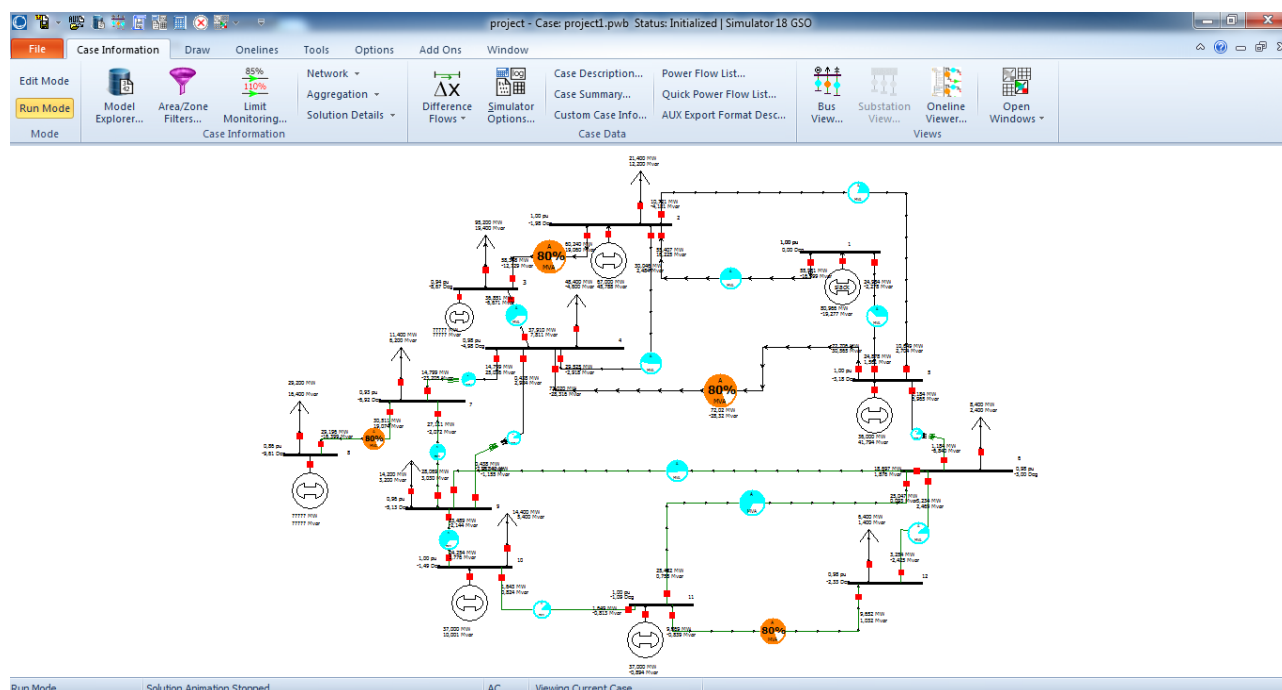
4.3 Παρουσίαση εργαλείου “Run Mode”

Πρόκειται για το εργαλείο που τρέχει την προσομοίωση για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Επιλέγοντας από το κεντρικό toolbar του προγράμματος **Run Mode** -> **Tools** ->  (εικόνα 4.17) επιτυγχάνεται το τρέξιμο της προσομοίωσης.



Εικόνα 4.17 Οδηγίες μετάβασης στο εργαλείο Run Mode

Η εικόνα 4.18 παρουσιάζει ένα πιο σύνθετο σύστημα σε Run Mode:

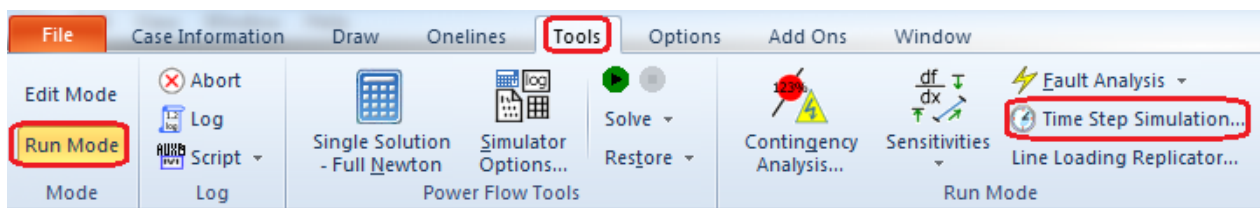


Εικόνα 4.18 "Τρέξιμο" ενός πιο σύνθετου συστήματος

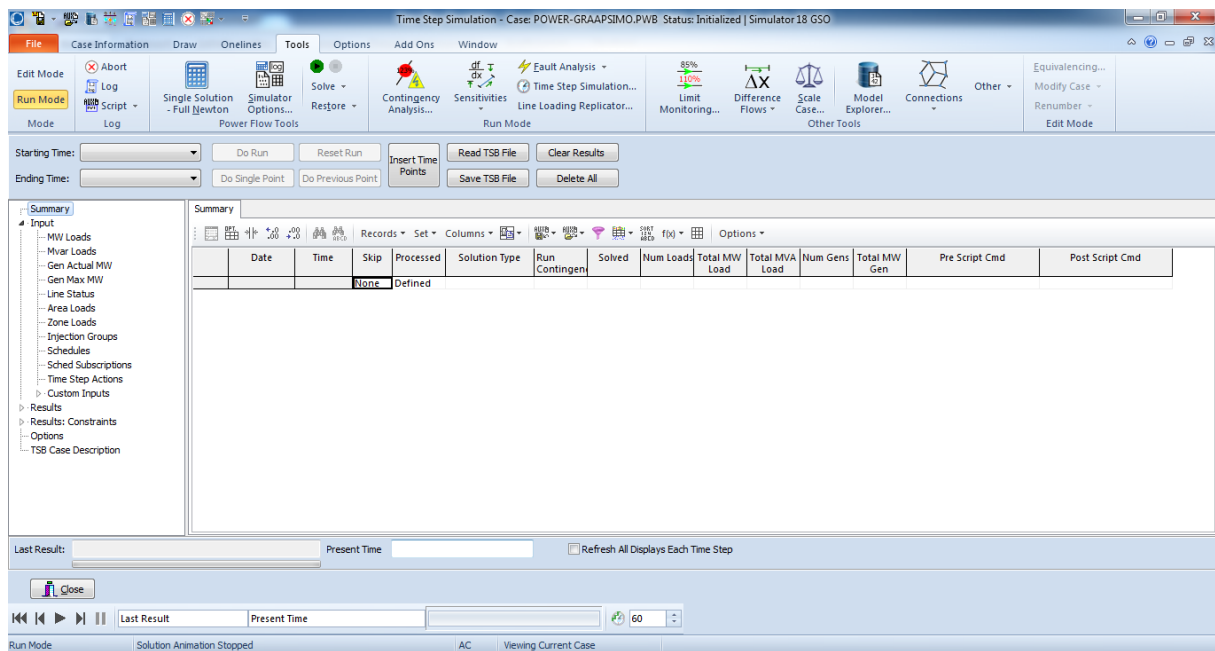
Τα αποτελέσματα που προκύπτουν απεικονίζονται στην κεντρική σελίδα του προγράμματος (φορτίσεις γραμμών, παραγωγή γεννητριών) ή στο Case Information όπως αναφέρθηκε παραπάνω.

4.4 Εισαγωγή στο "Time Step Simulation"

Ένα πάρα πολύ χρήσιμο εργαλείο που διαθέτει το PowerWorld είναι το Time Step Simulation. Πρόκειται για ένα εργαλείο που όπως φαίνεται και από το όνομά του προσομοιώνει το σύστημα που δημιουργεί ο χρήστης (όπως εξηγήθηκε παραπάνω) σε χρονικά διαστήματα που ο ίδιος ορίζει. Ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αλλάζει τα δεδομένα του συστήματος ανά χρονικό διάστημα (στοιχεία φορτίου, γεννητριών, γραμμών κ.α.) και να παρατηρεί τη συμπεριφορά του. Για να γίνει η εισαγωγή στο περιβάλλον του Time Step Simulation ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία: **Run Mode -> Tools -> Time Step Simulation** (εικόνα 4.19).



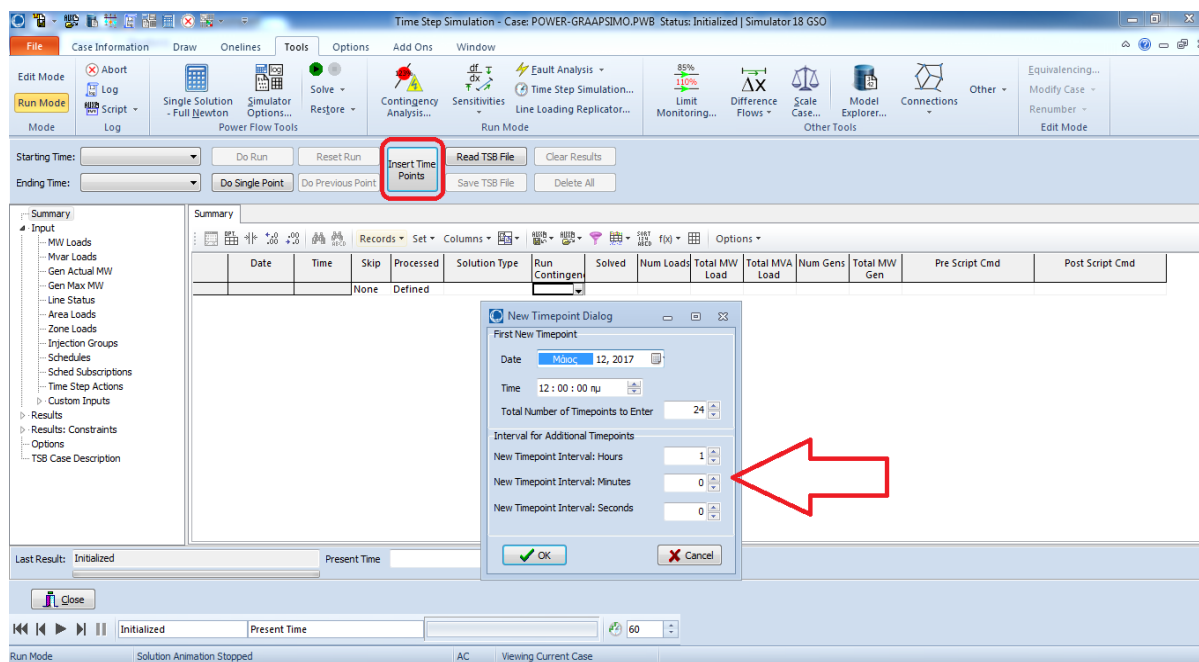
Εικόνα 4.19 Οδηγίες μετάβασης στο εργαλείο Time Step



Εικόνα 4.20 Εισαγωγή στο περιβάλλον του Time Step Simulation

Η εικόνα 4.20 απεικονίζει την αρχική κατάσταση εισαγωγής στο εργαλείο του “Time Step”. Η εικόνα 4.21 παρουσιάζει τα βήματα που ακολουθούνται για τον ορισμό των χρονικών διαστημάτων:

- Επιλέγεται **Insert Points** και εμφανίζεται η καρτέλα **New Timepoint Dialog**.
- Στην καρτέλα αυτή, ο χρήστης ορίζει την ημερομηνία και την ώρα εκκίνησης της προσομοίωσης, ενώ στη συνέχεια μπορεί να επιλέξει τον αριθμό των διαστημάτων καθώς και την χρονική διαφορά μεταξύ τους, με δυνατότητα επιλογής ανά ώρα λεπτό και δευτερόλεπτο.



Εικόνα 4.21 Ορισμός χρονικών διαστημάτων

Ορίζοντας ως διάστημα μια ημέρα με μια ώρα ανά χρονική στιγμή (24 ώρες σύνολο) , προκύπτει το ακόλουθο αποτέλεσμα (εικόνα 4.22):

Date	Time	Skip	Processed	Solution Type	Run Contingency	Solved	Num Loads	Total MW Load	Total MVA Load	Num Gens	Total MW Gen	Pre Script Cmd	Post Script Cmd
12/5/2017	00:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
212/5/2017	01:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
312/5/2017	02:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
412/5/2017	03:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
512/5/2017	04:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
612/5/2017	05:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
712/5/2017	06:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
812/5/2017	07:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
912/5/2017	08:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1012/5/2017	09:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1112/5/2017	10:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1212/5/2017	11:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1312/5/2017	12:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1412/5/2017	13:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1512/5/2017	14:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1612/5/2017	15:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1712/5/2017	16:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1812/5/2017	17:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1912/5/2017	18:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
2012/5/2017	19:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		

Εικόνα 4.22 Δημιουργία και εμφάνιση των χρονικών διαστημάτων

Στο πεδίο Solution Type, υπάρχει η δυνατότητα επιλογής του τύπου επίλυσης ανά χρονικό πεδίο όπως δείχνει η εικόνα 4.23:

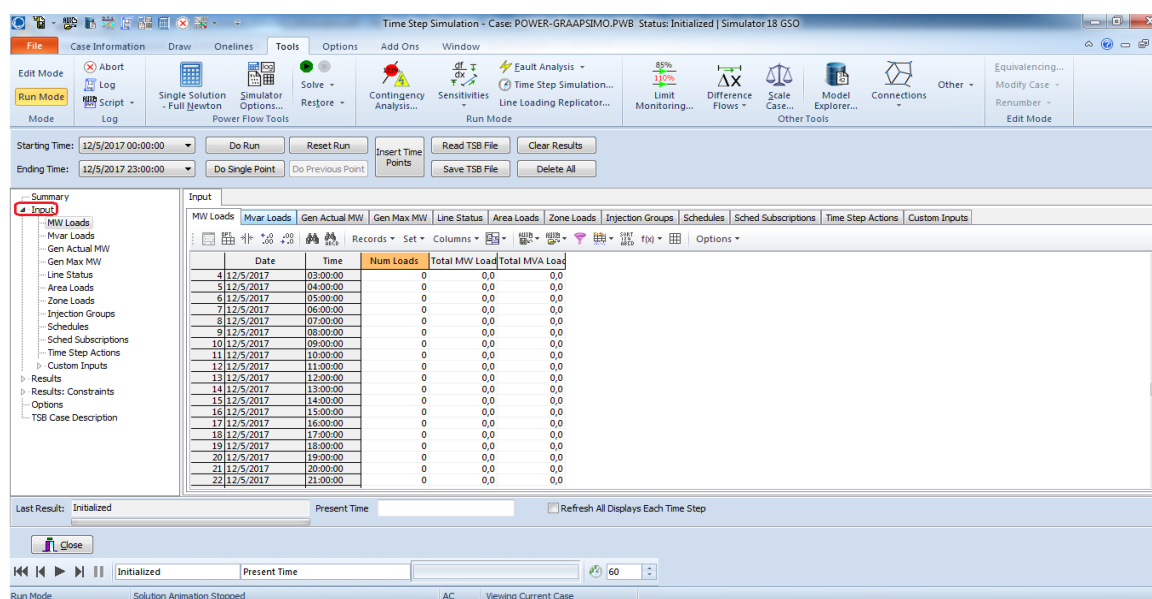
Date	Time	Skip	Processed	Solution Type	Run Contingency	Solved	Num Loads	Total MW Load	Total MVA Load	Num Gens	Total MW Gen	Pre Script Cmd	Post Script Cmd
12/5/2017	00:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
212/5/2017	01:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
312/5/2017	02:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
412/5/2017	03:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
512/5/2017	04:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
612/5/2017	05:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
712/5/2017	06:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
812/5/2017	07:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
912/5/2017	08:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1012/5/2017	09:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1112/5/2017	10:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1212/5/2017	11:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1312/5/2017	12:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1412/5/2017	13:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1512/5/2017	14:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1612/5/2017	15:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1712/5/2017	16:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1812/5/2017	17:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
1912/5/2017	18:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		
2012/5/2017	19:00:00	NO	NO	Single Solution	NO	0	0	0,0	0,0	0	0,00		

Εικόνα 4.23 Επιλογή τρόπου επίλυσης

4.4.1 Εισαγωγή στοιχείων στο Time Step Simulation

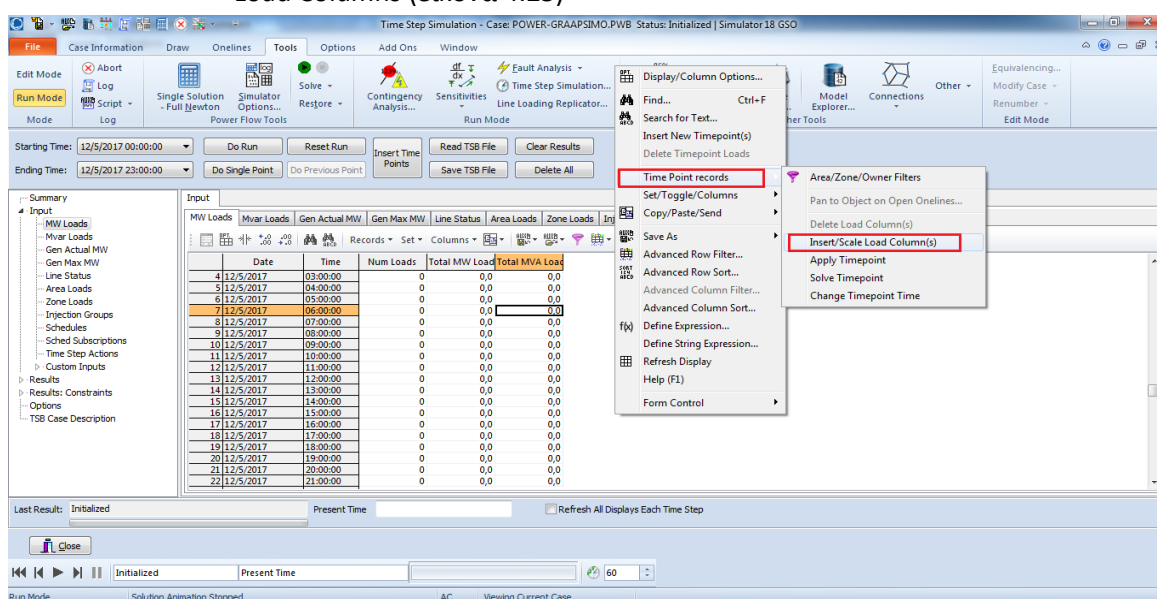
Για την εισαγωγή των δεδομένων ο χρήστης ακολουθεί τα παρακάτω βήματα:

- Επιλέγει **Input** και εμφανίζεται μια λίστα με τα στοιχεία τα οποία μπορεί να εισάγει, (εικόνα 4.24) όπως: MW και MVar φορτίου, MW και Max MW γεννητριών και στοιχεία γραμμών Μεταφοράς. Ακολουθεί η παρουσίαση του τρόπου εισαγωγής στοιχείων για τα MW φορτίου. Όμοια διαδικασία ακολουθείται και για τα υπόλοιπα στοιχεία.



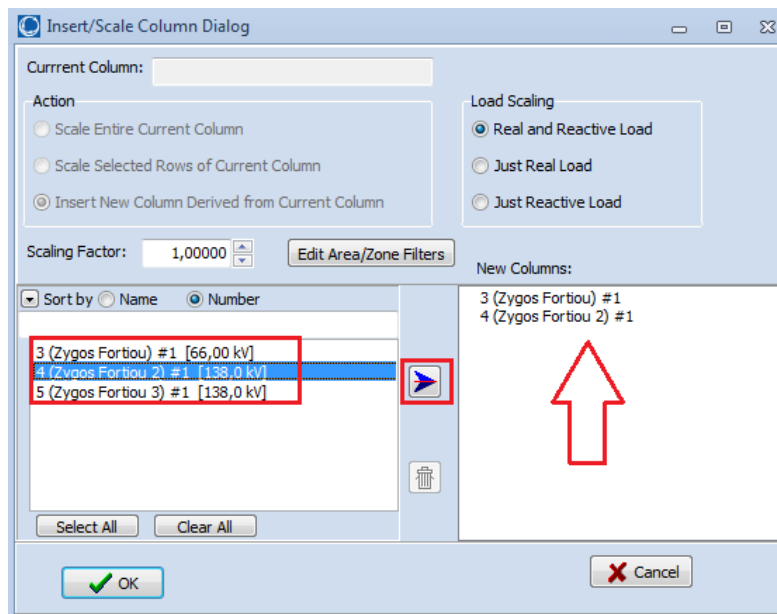
Εικόνα 4.24 Εισαγωγή δεδομένων

- Επιλέγοντας στη συνέχεια, MW Loads εμφανίζεται ο πίνακας εισαγωγής για το φορτίο. Ο ορισμός των ζυγών φορτίου για το time step simulation γίνεται ως εξής:
 - Δεξί κλικ σε κάποιο σημείο του πίνακα -> Time Point Records -> Insert/Scale Load Columns (εικόνα 4.25)



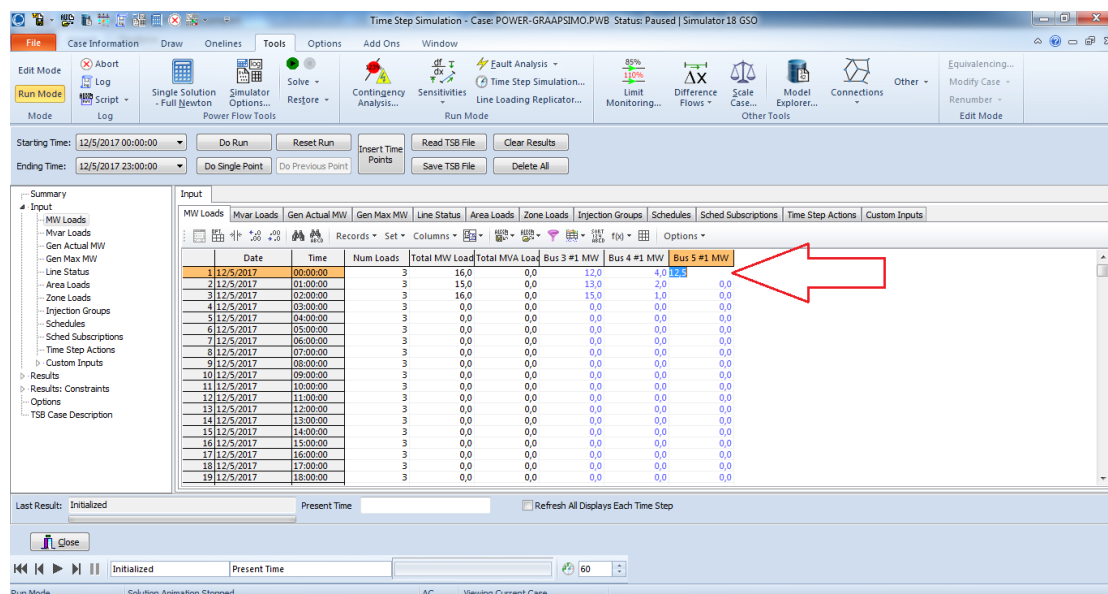
Εικόνα 4.25 Εισαγωγή δεδομένων φορτίου

Αμέσως μετά εμφανίζεται το ακόλουθο παράθυρο με τη δυνατότητα επιλογής των ζυγών φορτίων. (Στο συγκεκριμένο παράδειγμα έχουμε τρεις ζυγούς φορτίου). Γίνεται η επιλογή του ζυγού κάνοντας κλικ πάνω του και πατώντας το μπλε εικονίδιο στη μέση της εικόνας 4.26, δημιουργείται μια νέα στήλη στον αρχικό πίνακα που θα αποτελείται από τον ζυγό φορτίου που μόλις επιλέχθηκε. Κάνοντας κλικ στο **Select All** συμπεριλαμβάνονται όλοι οι διαθέσιμοι ζυγοί φορτίου.



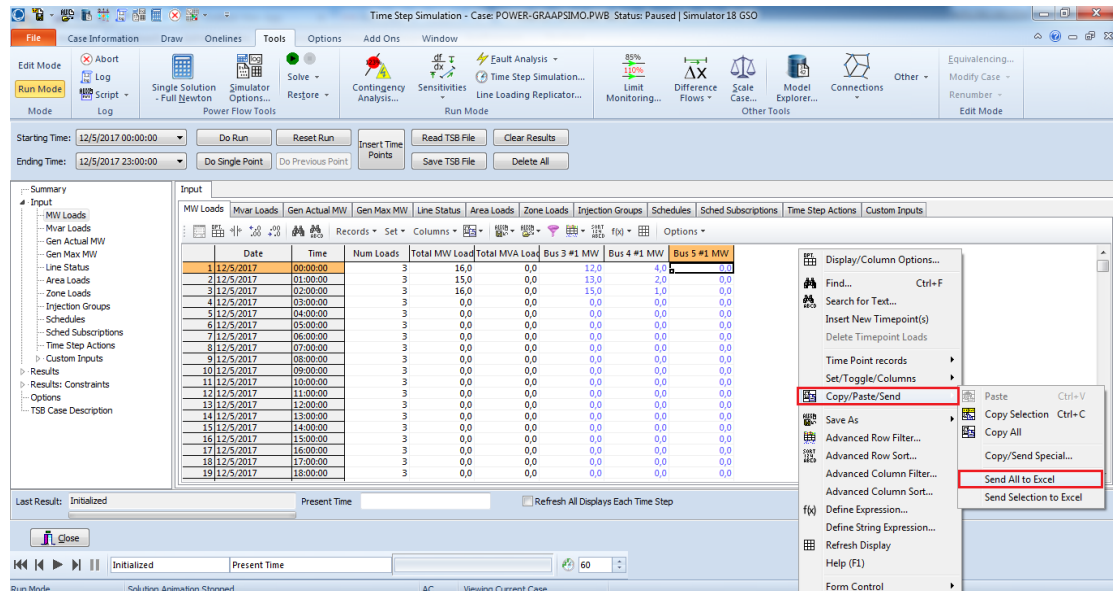
Εικόνα 4.26 Επιλογή των ζυγών φορτίου

Πατώντας **OK** δημιουργείται ο πίνακας της εικόνας 4.27 στην αρχική σελίδα του εγαλείου. Η εισαγωγή δεδομένων στον πίνακα αυτόν μπορεί να γίνει είτε χειροκίνητα με την πληκτρολόγηση τιμών σε κάθε κελί:

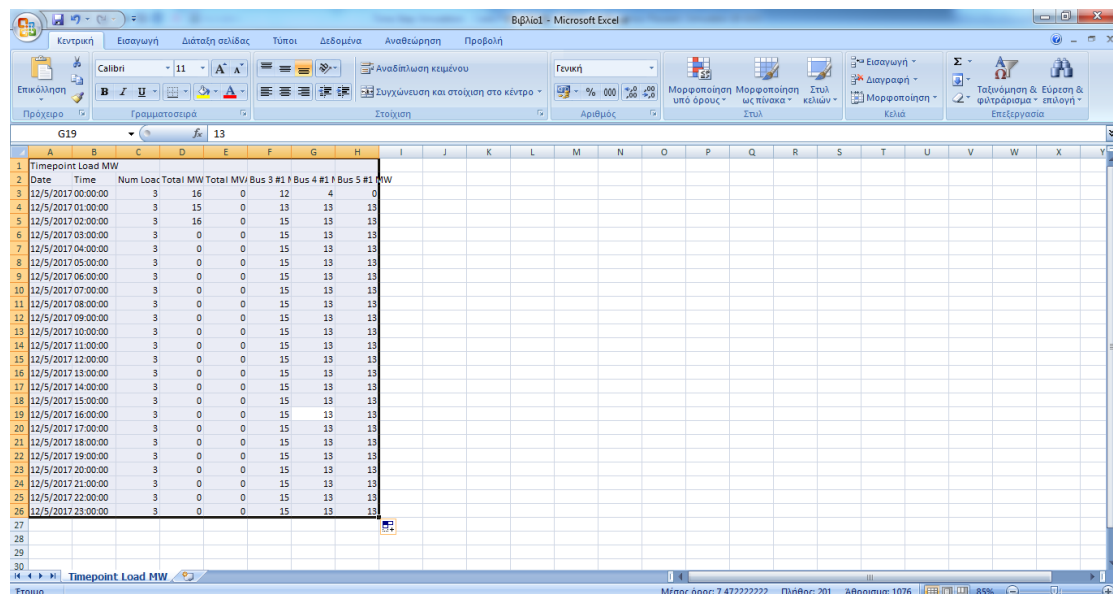


Εικόνα 4.27 Δημιουργία πίνακα για την εισαγωγή των δεδομένων

είτε με την εισαγωγή δεδομένων από το Excel. Η διαδικασία αυτή έχει ως εξής: Αρχικά είναι απαραίτητο να σταλεί ο υπάρχων πίνακας σε ένα αρχείο excel. Πατώντας **δεξί κλικ σε κάποιο σημείο του πίνακα -> Copy/Paste/Send -> Send All to Excel**, τα στοιχεία αντιγράφονται σε ένα υπολογιστικό φύλλο excel (εικόνες 4.28, 4.29).



Εικόνα 4.28 Αποστολή δεδομένων στο excel

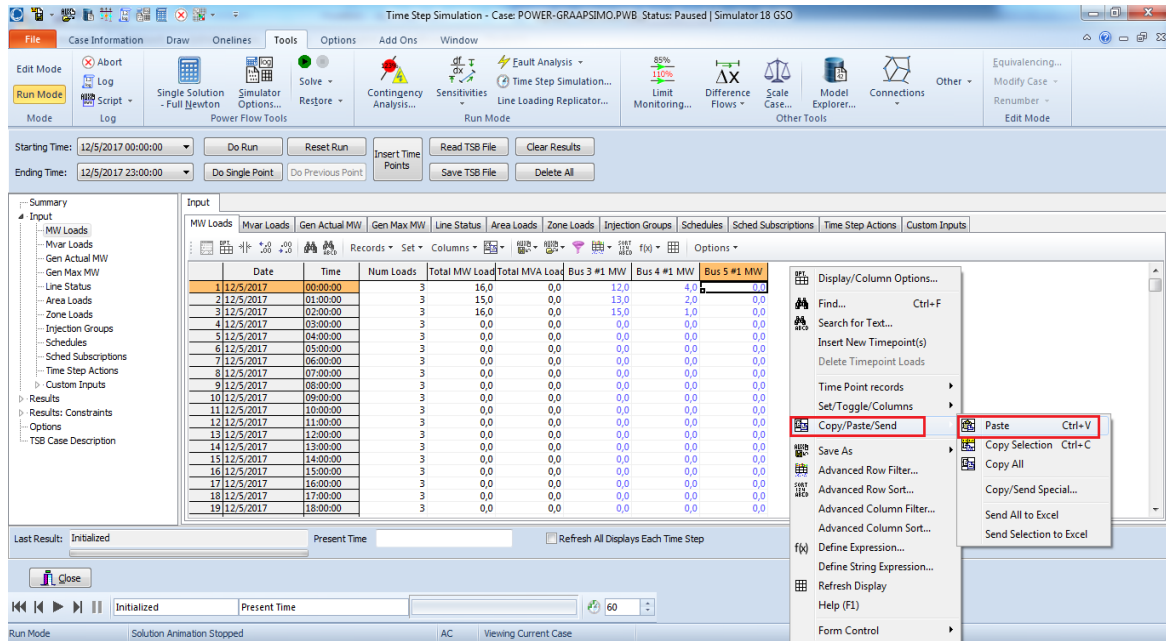


Εικόνα 4.29 Τα δεδομένα όπως αποστέλλονται στο excel

Στη συνέχεια, ο χρήστης μπορεί να κάνει όποιες αλλαγές θέλει εισάγοντας τα στοιχεία που επιθυμεί και στη συνέχεια τα στέλνει πίσω στο PowerWorld με την ακόλουθη διαδικασία:

- Επιλέγει όλα τα κελιά που εισήχθησαν στο excel
- Τα αντιγράφει
- Επιστρέφει στο περιβάλλον του PowerWorld, στον πίνακα του φορτίου (MW)
- Κάνει δεξί κλικ σε οποιοδήποτε σημείο του πίνακα -> **Copy/Paste/Send -> Paste** και εμφανίζονται τα νέα στοιχεία.

Η παραπάνω διαδικασία διακρίνεται στην εικόνα 4.30.

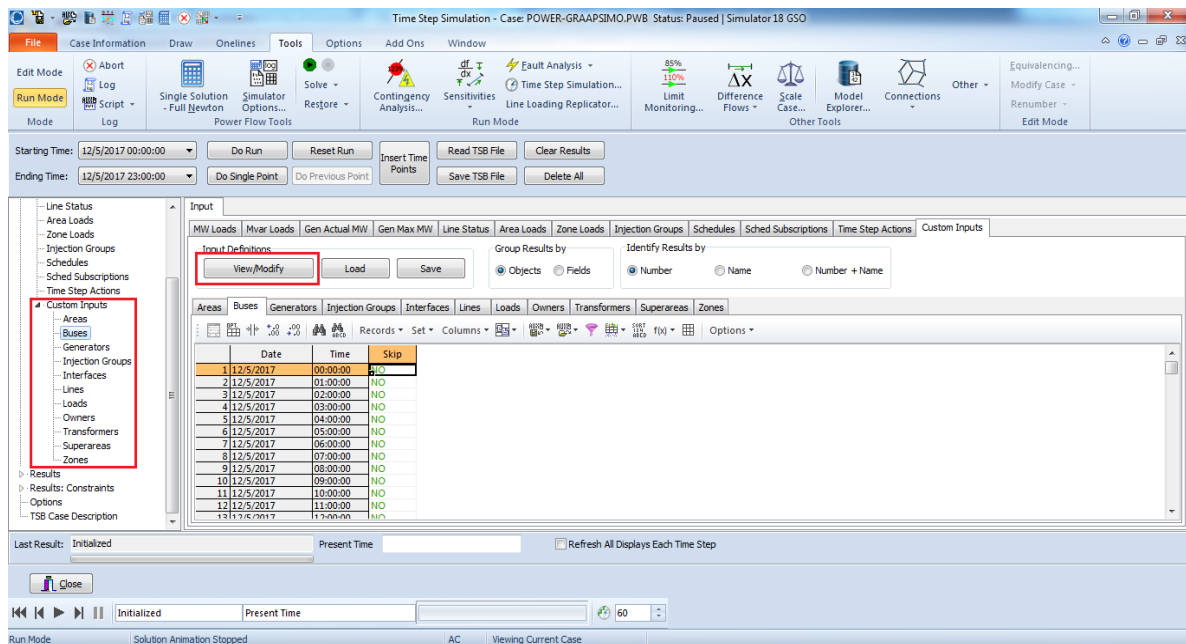


Εικόνα 4.30 Εισαγωγή δεδομένων από το excel

4.4.2 Παρουσίαση του πεδίου “Custom Inputs”

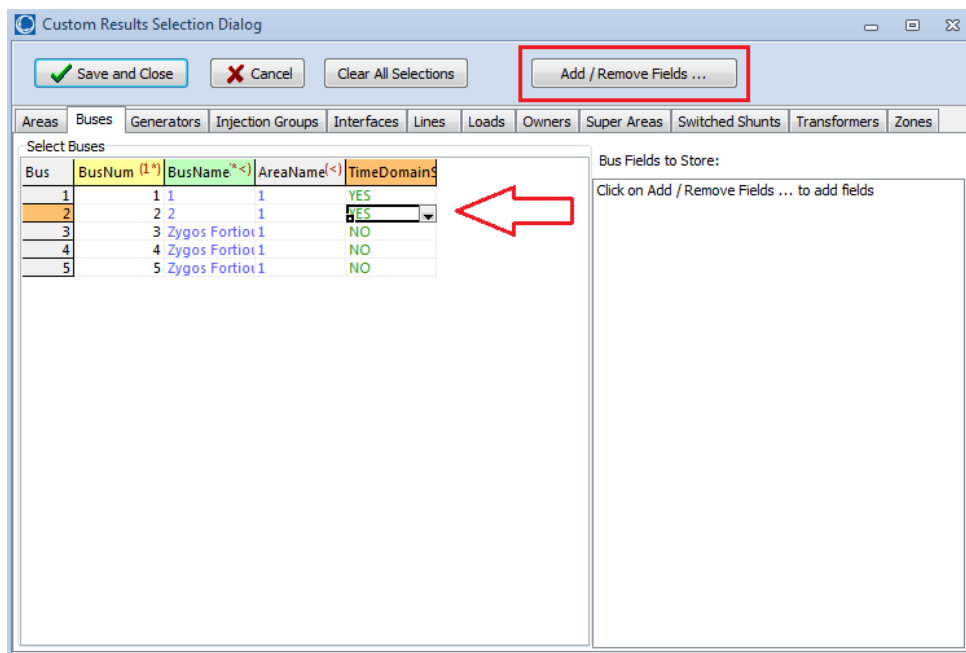
Όπως δηλώνει και το όνομα του συγκεκριμένου πεδίου των εισόδων, πρόκειται για επιπλέον στοιχεία εισαγωγής των ζυγών, των γεννητριών, των γραμμών κ.α. που εισάγονται με τον ακόλουθο τρόπο, όπως διακρίνεται στην εικόνα 4.31:

- Γίνεται επιλογή από το toolbar, του τμήματος του ΣΗΕ στο οποίο θα γίνει η επεξεργασία (Buses, Generators, Lines κ.α)
- Στη συνέχεια γίνεται κλικ στο “View/Modify”



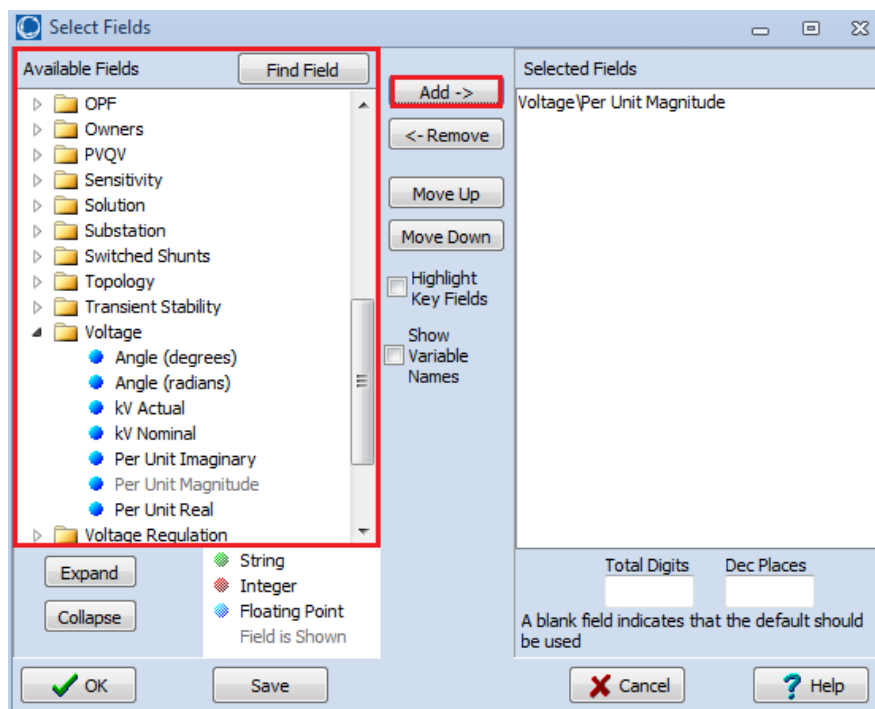
Εικόνα 4.31 Διαδικασία εισαγωγής επιπλέον προσαρμοσμένων δεδομένων

- Εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 4.32, δηλώνεται με YES το στοιχείο στο οποίο θα γίνει επεξεργασία και γίνεται επιλογή του πεδίου Add/Remove Fields



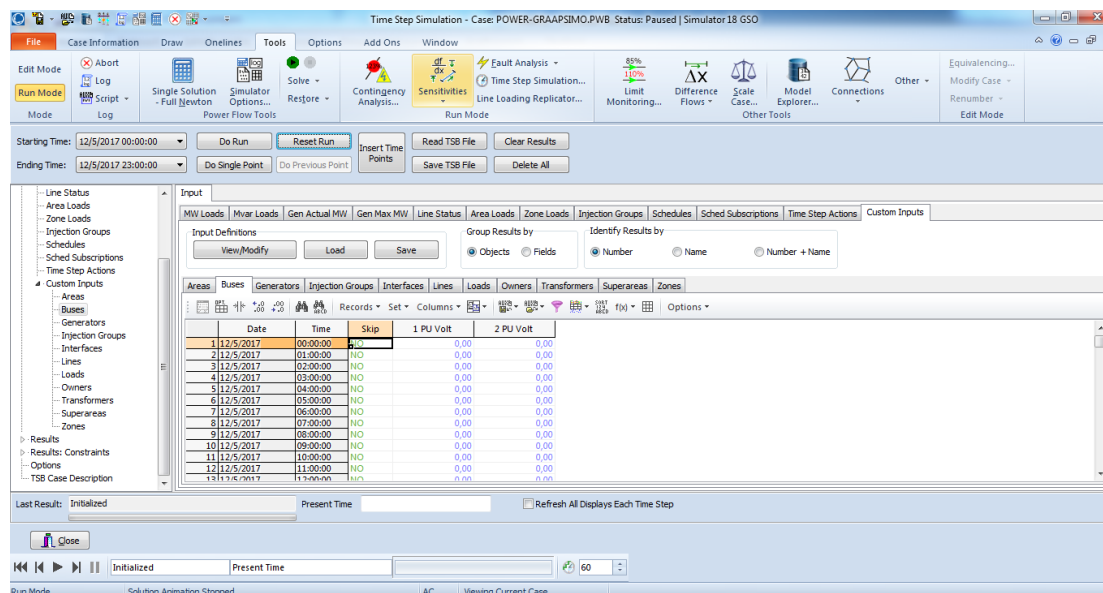
Εικόνα 4.32 Επιλογή ζυγών για τους οποίους θα γίνει η εισαγωγή

- Στη συνέχεια γίνεται η επιλογή των δεδομένων που θα εισαχθούν, από την λίστα που βρίσκεται αριστερά, πατώντας Add και OK με αποτέλεσμα την δημιουργία στηλών για τα νέα δεδομένα που θα εισαχθούν.



Εικόνα 4.33 Επιλογή τύπου στοιχείων που θα εισαχθούν

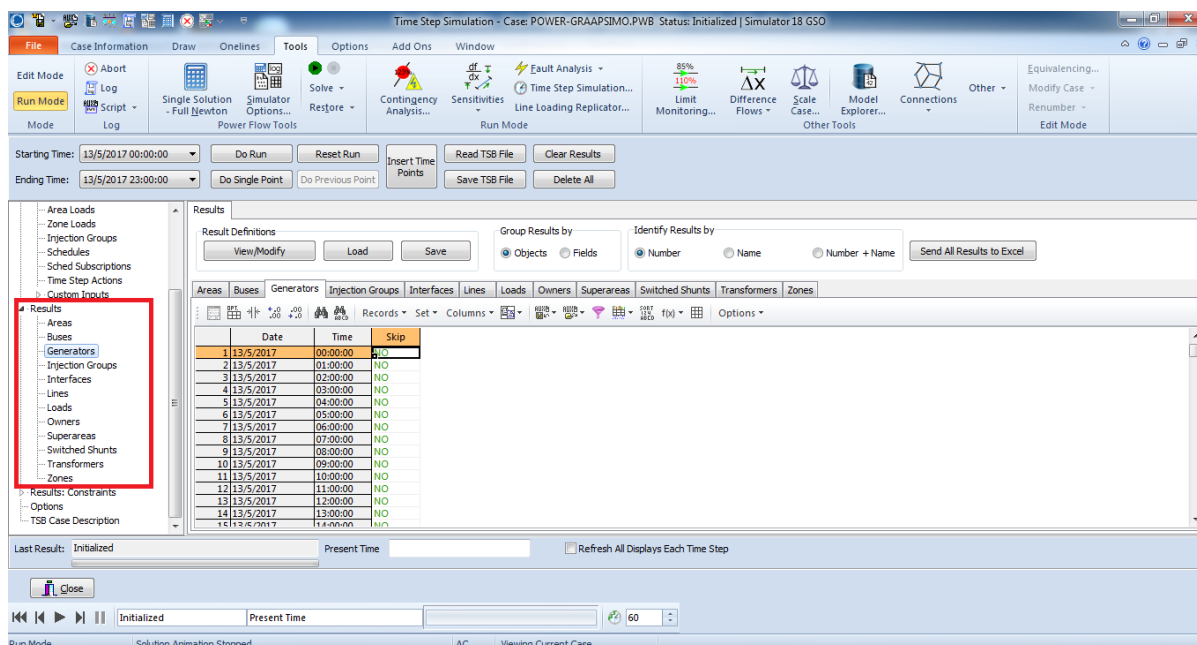
Η εικόνα 4.34 παρουσιάζει το αποτέλεσμα της παραπάνω διαδικασίας



Εικόνα 4.34 Δημιουργία του νέου πίνακα στοιχείων

4.5 Αποτελέσματα στο “Time Step Simulation”

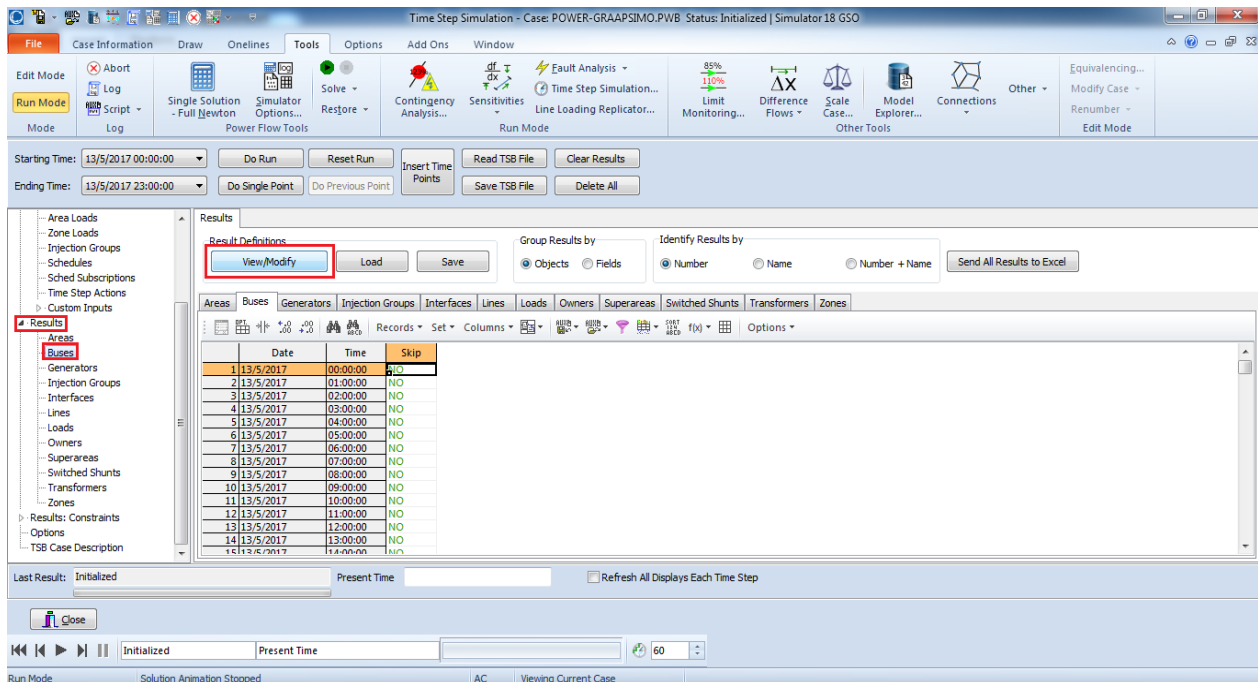
Στο πεδίο Results που βρίσκεται στο toolbar, αριστερά του προγράμματος, ο χρήστης έχει την εποπτεία των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης του. Έχει τη δυνατότητα να συγκεντρώσει δεδομένα σχετικά με τις μονάδες και τη λειτουργία τους, τους ζυγούς, τις γραμμές μεταφοράς τα επαγωγικά στοιχεία κ.α. μέσω μια ευρείας λίστας (εικόνα 4.35).



Εικόνα 4.35 Αποτελέσματα στο Time Step

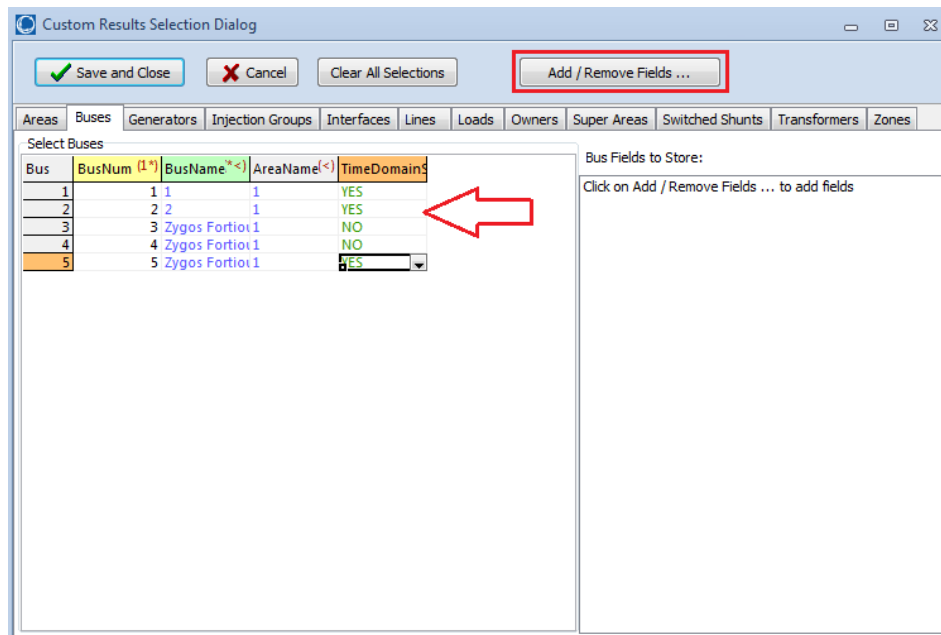
Ακολουθεί ένα παράδειγμα για την παρουσίαση της τάσης (pu) των ζυγών του παραδείγματός μας:

- Από τη λίστα των **Results** επιλέγουμε το πεδίο **Buses** (εικόνα 4.36)



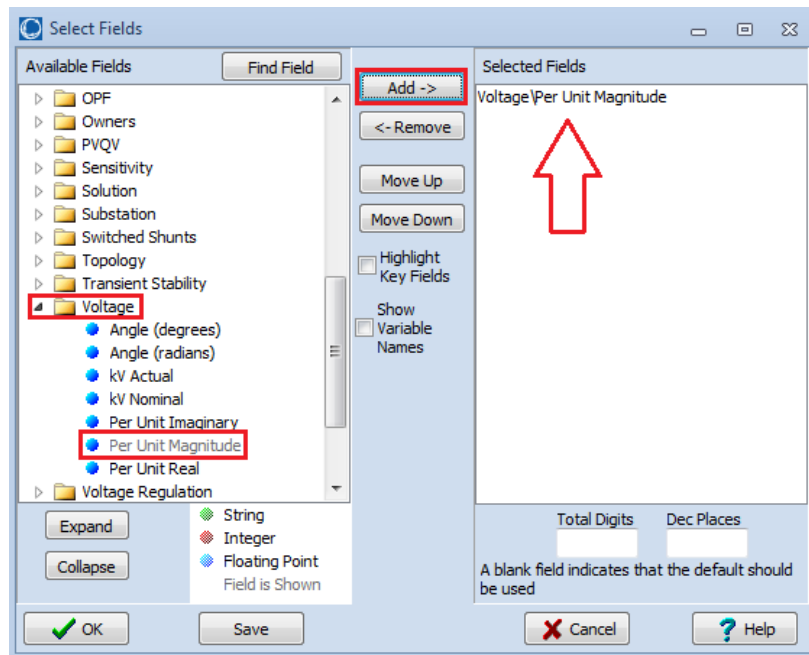
Εικόνα 4.36 Διαδικασία συλλογής αποτελεσμάτων για τους ζυγούς

- Γίνεται επιλογή του **View/Modify** και εμφανίζεται το παράθυρο της εικόνας 4.37:



Εικόνα 4.37 Επιλογή ζυγών για τους οποίους θα συλλεχθούν αποτελέσματα

- Δηλώνεται με **YES** ο ζυγός για τον οποίο θα εξαχθούν αποτελέσματα και έπειτα επιλέγεται **Add/Remove Fields**



Εικόνα 4.38 Επιλογή του τύπου των αποτελεσμάτων

- Στο παράθυρο που εμφανίζεται (εικόνα 4.38), ακολουθείται η διαδικασία **Voltage -> Per Unit Magnitude -> Add**
- Πατώντας **OK** δημιουργείται ο επιθυμητός πίνακας στην αρχική σελίδα του προγράμματος, όπως απεικονίζεται στην εικόνα 4.39.

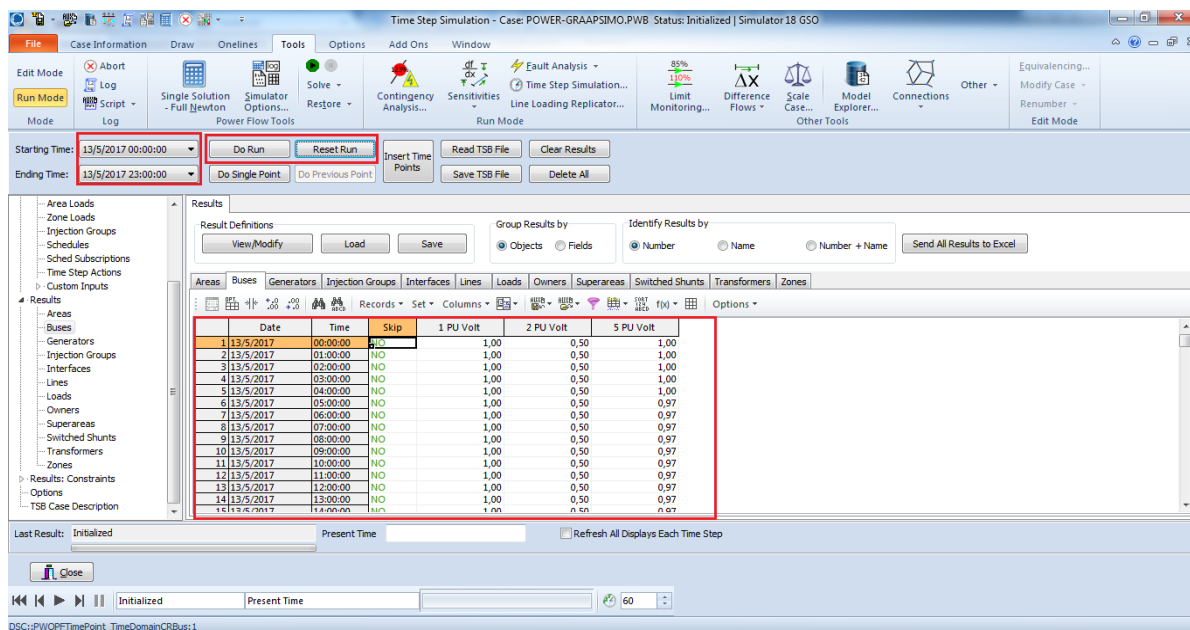
Date	Time	Skip	1 PU Volt	2 PU Volt	5 PU Volt
13/5/2017	00:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
2	01:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
3	02:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
4	03:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
5	04:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
6	05:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
7	06:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
8	07:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
9	08:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
10	09:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
11	10:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
12	11:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
13	12:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
14	13:00:00	NO	0,00	0,00	0,00
15	14:00:00	NO	0,00	0,00	0,00

Εικόνα 4.39 Δημιουργία πίνακα αποτελεσμάτων

Όμοια διαδικασία με την παραπάνω, ακολουθείται για τη συλλογή και άλλων αποτελεσμάτων.

4.6 Εκτέλεση προσομοίωσης

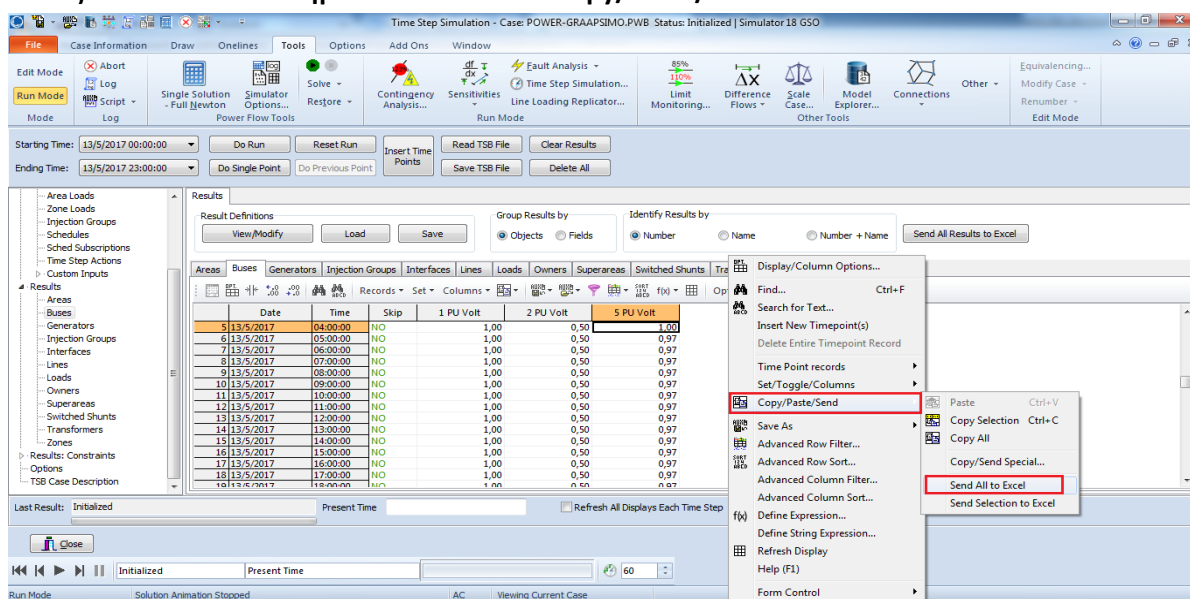
Διαμορφώνοντας τα δεδομένα εισόδου, καθώς και τα αποτελέσματα που θα εξαχθούν, ο χρήστης είναι έτοιμος για το “τρέξιμο” της προσομοίωσης του. Στα πεδία Starting Time και Ending Time επιλέγεται η χρονική στιγμή έναρξης και λήξης της προσομοίωσης αντίστοιχα. Το πλήκτρο Do Run τρέχει την προσομοίωση για όλες τις χρονικές στιγμές ενώ το Reset Run την επανακινεί από την αρχική της κατάσταση. Όλα τα αποτελέσματα διακρίνονται στο κεντρικό πίνακα, ανά χρονική στιγμή. Ακολουθεί η εικόνα 4.40 με ένα τυπικό τρέξιμο με τα αποτελέσματα της pu τάσης ανά ζυγό, ενός μικρού πρόχειρου συστήματος:



Εικόνα 4.40 Διαδικασία εκτέλεσης της προσομοίωσης

Τέλος όλα τα αποτελέσματα μπορούν να σταλούν στο excel ως εξής (εικόνα 4.41):

Δεξί κλικ σε κάποιο σημείο του πίνακα -> Copy/Paste/Send -> Send All to Excel.



Εικόνα 4.41 Αποστολή των αποτελεσμάτων στο excel

Και τελικά τα αποτελέσματα εμφανίζονται στο υπολογιστικό φύλλο excel, όπως απεικονίζει η εικόνα 4.42.

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y
2	Date	Time	Skip	1 PU Volt	2 PU Volt	5 PU Volt																			
3	13/5/2017	00:00:00	NO	1	0,5	1																			
4	13/5/2017	01:00:00	NO	1	0,5	1																			
5	13/5/2017	02:00:00	NO	1	0,5	1																			
6	13/5/2017	03:00:00	NO	1	0,5	1																			
7	13/5/2017	04:00:00	NO	1	0,5	1																			
8	13/5/2017	05:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
9	13/5/2017	06:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
10	13/5/2017	07:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
11	13/5/2017	08:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
12	13/5/2017	09:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
13	13/5/2017	10:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
14	13/5/2017	11:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
15	13/5/2017	12:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
16	13/5/2017	13:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
17	13/5/2017	14:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
18	13/5/2017	15:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
19	13/5/2017	16:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
20	13/5/2017	17:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
21	13/5/2017	18:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
22	13/5/2017	19:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
23	13/5/2017	20:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
24	13/5/2017	21:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
25	13/5/2017	22:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
26	13/5/2017	23:00:00	NO	1	0,5	0,97																			
27																									
28																									
29																									
30																									

Εικόνα 4.42 Αποτελέσματα όπως συλλέχθηκαν στο excel

4.7 Υλοποίηση του δικτύου της Κρήτης στο λογισμικό PowerWorld

Στη συγκεκριμένη εργασία, ο σχεδιασμός του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης πραγματοποιήθηκε στο λογισμικό του PowerWorld (version 18 GSO). Η συγκεκριμένη έκδοση παρέχει τη δυνατότητα στους χρήστες, για μοντελοποίηση συστημάτων έως 42 ζυγούς. Για το σχεδιασμό του δικτύου, χρησιμοποιήθηκαν 19 ζυγοί υψηλής τάσης (150kV), 27 συμβατικές θερμικές μονάδες, 25 γραμμές μεταφοράς και ένας μεγάλος αριθμός αιολικών πάρκων και φωτοβολταϊκών κατά μήκος του νησιού. Τα δεδομένα εισόδου για τα στοιχεία του συστήματος έχουν παρουσιαστεί σε προηγούμενες ενότητες, ενώ η περιγραφή για την σχεδίαση και την είσοδο των στοιχείων στο λογισμικό του PowerWorld, έχει περιγραφεί αναλυτικά στην ενότητα περιγραφής του προγράμματος.

5 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΥΦΙΣΤΑΜΕΝΟΥ ΣΗΕ ΚΡΗΤΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σκοπός της εργασίας είναι η μελέτη της συμπεριφοράς του ΣΗΕ της Κρήτης πριν και μετά την εγκατάσταση ενός υβριδικού σταθμού. Πιο συγκεκριμένα έγινε ο σχεδιασμός του δικτύου σύμφωνα με τα στοιχεία του έτους 2014 για το δίκτυο της Κρήτης, η μελέτη της συμπεριφοράς του και η εξαγωγή των αποτελεσμάτων. Στη συνέχεια έγινε η εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού στον ζυγό της Σταλίδας στο Νομό Ηρακλείου της ανατολικής Κρήτης. Στόχος είναι η μελέτη της λειτουργίας του ίδιου του σταθμού αλλά και της λειτουργίας ολόκληρου του δικτύου, μετά την εγκατάσταση του αντλησιοταμιευτικού συστήματος.

5.1 Επιλογή σεναρίων

Αρχικά, το γεγονός ότι παρατηρούνται σημαντικές διακυμάνσεις στο φορτίο ζήτησης καθώς και στην αιολική παραγωγή στο ΣΗΕ της Κρήτης, στη διάρκεια ενός έτους, οδήγησε στη θεώρηση εννέα διαφορετικών σεναρίων (24ωρης βάσης) συνδυάζοντας τη ζήτηση φορτίου και την αιολική παραγωγή. Συνεπώς, χρησιμοποιώντας στοιχεία για το φορτίο ζήτησης αλλά και την αιολική παραγωγή από το έτος 2014, επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές ημέρες για το φορτίο ζήτησης (υψηλό, μέσο, χαμηλό) και τρεις αντίστοιχα για την αιολική παραγωγή (υψηλή, μέση, χαμηλή). Οι πίνακες 5.1 και 5.2 παρουσιάζουν τις τυπικές μέρες για κάθε περίπτωση. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο «Time Step» του PowerWorld. Πραγματοποιήθηκε είσοδος των στοιχείων σε 24ωρη βάση για κάθε ένα από τα σενάρια που θα αναλυθούν στη συνέχεια.

Πίνακας 5.1 Επιλεγμένα σενάρια φορτίου ζήτησης

Σενάρια Φορτίου	Ημερήσια Ζήτηση (MWh)	Αιχμή (MW)
Χαμηλή Ζήτηση (LLoad)	4.855,65	307,27
Μέση Ζήτηση (MLoad)	7.231,87	420,99
Υψηλή Ζήτηση (HLoad)	10.177,89	524,03

Πίνακας 5.2 Επιλεγμένα σενάρια αιολικής παραγωγής

Σενάρια Αιολικής Παραγωγής	Ημερήσια Αιολική Παραγωγή (MWh)
Χαμηλός Άνεμος (LWind)	215,8
Μέσος Άνεμος (MWind)	848,25
Υψηλός Άνεμος (HWind)	2.060,97

Συνδυάζοντας λοιπόν τους πίνακες 5.1, 5.2 προκύπτουν τα εννέα σενάρια που απεικονίζονται στον πίνακα 5.3. Με τα εννέα αυτά σενάρια καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό οι διαφορετικές περιπτώσεις λειτουργίας του δικτύου στη διάρκεια ενός έτους, των οποίων η συχνότητα εμφάνισης για το έτος 2014, απεικονίζεται στην εικόνα 5.1.

Πίνακας 5.3 Συνδυασμός των σεναρίων φορτίου - αιολικής παραγωγής

ΣΕΝΑΡΙΑ	
Χαμηλή Ζήτηση - Χαμηλός Άνεμος	LLoad - LWind
Χαμηλή Ζήτηση - Μέσος Άνεμος	LLoad - MWind
Χαμηλή Ζήτηση - Υψηλός Άνεμος	LLoad - HWind
Μέση Ζήτηση - Χαμηλός Άνεμος	MLoad - LWind
Μέση Ζήτηση - Μέσος Άνεμος	MLoad - MWind
Μέση Ζήτηση - Υψηλός Άνεμος	MLoad - HWind
Υψηλή Ζήτηση - Χαμηλός Άνεμος	HLoad - LWind
Υψηλή Ζήτηση - Μέσος Άνεμος	HLoad - MWind
Υψηλή Ζήτηση - Υψηλός Άνεμος	HLoad - HWind

Κάνοντας χρήση της χρονοσειράς για τη ζήτηση φορτίου το έτος 2014 και με τη βοήθεια του τυπικού μέσου όρου, υπολογίστηκε η συχνότητα εμφάνισης των σεναρίων του φορτίου, της αιολικής παραγωγής αλλά και ο συνδυασμός ζήτησης - αιολικής παραγωγής, των εννέα σεναρίων στη διάρκεια του έτους. Το μέσο φορτίο είναι το πιο συχνά εμφανιζόμενο, σύμφωνα με τα στοιχεία της προσομοίωσης με ποσοστό 52,6% (πίνακας 5.4), ενώ ο πίνακας 5.5 επιβεβαιώνει το ιδιαίτερα υψηλό αιολικό δυναμικό του νησιού, με 258 ημέρες του έτους υψηλής και μέσης έντασης ανέμου.

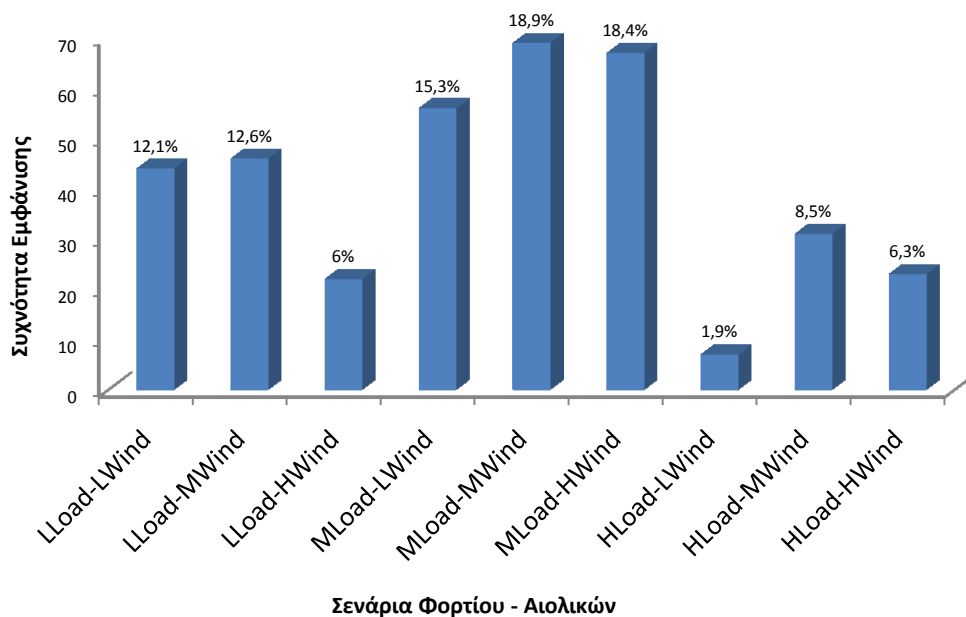
Πίνακας 5.4 Συχνότητα εμφάνισης σεναρίων φορτίου στη διάρκεια του έτους

Σενάρια	Συχνότητα (ημέρες/έτος)
High Load	61
Medium Load	192
Low Load	112

Πίνακας 5.5 Συχνότητα εμφάνισης σεναρίων αιολικής παραγωγής στη διάρκεια του έτους

Σενάρια	Συχνότητα (ημέρες/έτος)
High Wind	112
Medium Wind	146
Low Wind	107

Σχετικά με το συνδυασμό φορτίου και ανέμου, παρατηρείται ότι τα σενάρια μέσης ζήτησης με μέσο και υψηλό άνεμο (MLoad-MWind, MLoad-HWind) έχουν τη μεγαλύτερη συχνότητα με ποσοστό 18,9% και 18,4% αντίστοιχα, ενώ το λιγότερο συχνό σενάριο για το ΣΗΕ της Κρήτης το 2014, είναι το σενάριο υψηλής ζήτησης και χαμηλού ανέμου (HLoad-LWind) με ποσοστό 1,9%, σύμφωνα με το γράφημα της εικόνας 5.1. Ιδιαίτερης σημασίας είναι και ο πίνακας 5.6 που παρουσιάζει τη συχνότητα των σεναρίων σε μηνιαία βάση. Ο Αύγουστος είναι ο μήνας με τις περισσότερες μέρες υψηλής ζήτησης αλλά και υψηλού - μέσου ανέμου, γεγονός που δικαιολογείται από την έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα - τουρισμός στην καρδιά του καλοκαιριού, καθώς και από τους έντονους ανέμους που παρατηρούνται στο νησί εκείνη τη περίοδο.



Εικόνα 5.1 Συχνότητα εμφάνισης των σεναρίων στο ΣΗΕ της Κρήτης, για το έτος 2014

Πίνακας 5.6: Μηνιαία συχνότητα εμφάνισης των σεναρίων

ΣΕΝΑΡΙΑ	ΙΑΝ	ΦΕΒ	ΜΑΡ	ΑΠΡ	ΜΑΪ	ΙΟΥΝ	ΙΟΥΛ	ΑΥΓ	ΣΕΠ	ΟΚΤ	ΝΟΕ	ΔΕΚ
LLoad-LWind	4	9	5	9	2	0	0	0	0	4	6	5
LLoad-MWind	5	1	8	15	1	1	0	0	0	2	10	3
LLoad-HWind	1	1	7	2	0	1	0	0	0	1	9	0
MLoad-LWind	9	11	1	0	8	8	0	0	10	4	1	4
MLoad-MWind	10	6	4	3	12	8	2	0	6	8	1	9
MLoad-HWind	2	0	6	1	7	9	7	3	7	12	3	10
HLoad-LWind	0	0	0	0	0	2	1	3	1	0	0	0
HLoad-MWind	0	0	0	0	1	0	14	10	6	0	0	0
HLoad-HWind	0	0	0	0	0	1	7	15	0	0	0	0

5.2 Ένταξη μονάδων - Unit commitment

Ο προγραμματισμός ένταξης των μονάδων (Unit Commitment) αποτελεί μια πολύ σημαντική διαδικασία βελτιστοποίησης, κατέχοντας σημαντικό ρόλο στον καθημερινό προγραμματισμό λειτουργίας των ηλεκτρικών συστημάτων και ειδικότερα στο πλαίσιο των απελευθερωμένων αγορών ενέργειας. Στόχος του είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού λειτουργικού κόστους των μονάδων παραγωγής λαμβάνοντας υπ' όψιν τους τεχνικούς περιορισμούς των μονάδων και γενικότερα του συστήματος. Ειδικότερα, δύο είναι οι βασικοί παράμετροι που καθορίζουν τη σειρά ένταξης των συμβατικών μονάδων:

- Η ασφαλής λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, πάντα με γνώμονα την ικανοποίηση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας,
- η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής με συνέπεια την οικονομική λειτουργία του συστήματος.

Από την πρώτη παράμετρο προκύπτει, ότι οι θερμοηλεκτρικές μονάδες αργής εκκίνησης και απόκρισης σε διακυμάνσεις φορτίου, θέτονται πρώτες σε λειτουργία σε σύγκριση με τις υπόλοιπες. Αποτελούν δηλαδή τις μονάδες βάσης και πρόκειται για τις ατμοηλεκτρικές μονάδες και τις μονάδες συνδυασμένου κύκλου. Η λειτουργία τους επιβάλλεται να είναι συνεχής επί 24ωρου βάσης, ακόμα και σε περιπτώσεις χαμηλού φορτίου όπου «αγγίζουν» τα τεχνικά τους ελάχιστα. Είναι δυνατόν να περιορίσουν την λειτουργία οικονομικότερων, ίσως και πιο αποδοτικών, γεννητριών σε περιπτώσεις χαμηλής ζήτησης, γεγονός που είναι αναγκαίο καθώς αποτελούν τις βασικές μονάδες διατήρησης και ρύθμισης του συστήματος. Η δεύτερη παράμετρος χρησιμοποιεί οικονομικά κριτήρια και εντάσσει τις μονάδες σύμφωνα με το κόστος λειτουργίας τους. Μια τυπική σειρά ένταξης είναι:

1. συνδυασμένοι κύκλοι φυσικού αερίου,
2. ντιζελογεννήτριες φυσικού αερίου,
3. ατμοστρόβιλοι στερεών καυσίμων,
4. ντιζελογεννήτριες μαζούτ,
5. συνδυασμένοι κύκλοι ελαφρού καυσίμου,
6. ατμοστρόβιλοι μαζούτ,
7. ντιζελογεννήτριες ελαφρού καυσίμου,
8. αεριοστρόβιλοι ελαφρού καυσίμου.

Συνδυάζοντας τους δύο αυτούς παραμέτρους, το πρόβλημα της ένταξη των μονάδων διαμορφώνεται ως εξής: Οι μονάδες βάσης είναι οι πρώτες στη λίστα για τεχνικούς λόγους κυρίως, ενώ στη συνέχεια η ένταξη γίνεται με οικονομικό κριτήριο με αύξουσα σειρά από την φθηνότερη στην ακριβότερη μονάδα. Η σειρά συνήθως είναι όπως αναλύθηκε, εκτός από περιπτώσεις βλαβών του συστήματος ή θέματα συντήρησης των γεννητριών.

Στο ΣΗΕ της Κρήτης χρησιμοποιείται η λίστα προτεραιότητας ως επίλυση του προβλήματος του Unit Commitment, κάτι που ακολουθήθηκε και στην παρούσα εργασία. Ο πίνακας 5.7 παρουσιάζει την λίστα προτεραιότητας των μονάδων στο ΣΗΕ της Κρήτης με τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά τους. Οι μονάδες που έχουν υψηλή προτεραιότητα είναι οι μονάδες βάσης, που παραμένουν ανοιχτές όλο το 24ωρο και γενικότερα οι μονάδες με το χαμηλότερο κόστος λειτουργίας, ενώ χαμηλά στη λίστα βρίσκονται οι μονάδες αιχμής που έχουν σαφώς υψηλότερο κόστος λειτουργίας. Για τις ανάγκες της εργασίας, ως must-run units ορίστηκαν όλες οι μονάδες ατμού και το ένα μέρος του Συνδυασμένου κύκλου (ΣΚ 1) της Ξυλοκαμάρας, οι μονάδες δηλαδή 1 έως 8 στη λίστα προτεραιότητας.

Πίνακας 5.7 Λίστα προτεραιότητας για την ένταξη των μονάδων του ΣΗΕ της Κρήτης

Θερμικές Μονάδες	Λίστα Προτεραιότητας	P _{min} (MW)	P _{max} (MW)
ATM 2 Λινοπεράματα	1	8	14
ATM 3 Λινοπεράματα	2	8	14
ATM 4 Λινοπεράματα	3	18	24
ATM 5 Λινοπεράματα	4	18	24
ATM 6 Λινοπεράματα	5	18	24
ΣΚ 1 Ξυλοκαμάρα	6	17,5	63
ATM 1 Αθρινόλακκος	7	22	43
ATM 2 Αθρινόλακκος	8	22	43
ΣΚ 2 Ξυλοκαμάρα	9	17,5	63
Diesel 1 Αθρινόλακκος	10	35	50
Diesel 2 Αθρινόλακκος	11	25	50
Diesel 1 Λινοπεράματα	12	3	11
Diesel 2 Λινοπεράματα	13	3	11
Diesel 3 Λινοπεράματα	14	6	11
Diesel 4 Λινοπεράματα	15	3	11
ΑΕΡ 3 Λινοπεράματα	16	5	43
ΑΕΡ 13 Ξυλοκαμάρα	17	5	28
ΑΕΡ 5 Λινοπεράματα	18	5	28
ΑΕΡ 11 Ξυλοκαμάρα	19	10	58
ΑΕΡ 12 Ξυλοκαμάρα	20	10	58
ΑΕΡ 4 Λινοπεράματα	21	3	14
ΑΕΡ 5 Ξυλοκαμάρα	22	5	28
ΑΕΡ 2 Λινοπεράματα	23	3	15
ΑΕΡ 1 Ξυλοκαμάρα	24	3	14
ΑΕΡ 4 Ξυλοκαμάρα	25	3	20
ΑΕΡ 1 Λινοπεράματα	26	3	15
ATM 1 Λινοπεράματα	27	4	6
Σύνολο	-	283	783

5.3 Στρεφόμενη εφεδρεία

Η συνολική περίσσεια ισχύος των ενταγμένων θερμοηλεκτρικών μονάδων, από την τρέχουσα παραγωγή ισχύος έως τη μέγιστη ικανότητά τους, ονομάζεται στρεφόμενη εφεδρεία. Αποτελεί ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα προς επίλυση που αποσκοπεί στην ασφαλή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Αφορά ουσιαστικά την επιπλέον ισχύ που θα πρέπει οι μονάδες που θα ενταχθούν με βάση το πρόγραμμα ένταξης μονάδων (unit commitment) να μπορούν να ικανοποιήσουν. Η επιπλέον αυτή ισχύς προκύπτει από τον υπολογισμό των σημαντικότερων αβεβαιοτήτων που μπορούν να εμφανιστούν σε ένα ΣΗΕ. Οι σημαντικότεροι παράγοντες που επιδρούν στην αβεβαιότητα σε ένα αυτόνομο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας είναι :

1. Η αρχική εκτίμηση του φορτίου και το σφάλμα της.
2. Η πρόβλεψη παραγωγής από ΑΠΕ.

3. Σφάλμα κάποια μονάδας από εκείνες που πρόκειται να ενταχθούν ή κάποιας διασυνδετικής γραμμής, είτε με μονάδες παραγωγής ΑΠΕ, είτε με κάποιο άλλο εργοστάσιο παραγωγής.
4. Την πολιτική για τα κρίσιμα ή μη φορτία εάν υπάρχει, ή αν υπάρχουν διαθέσιμα ελεγχόμενα φορτία για διακοπή ή για αύξηση κατανάλωσης.
5. Την ύπαρξη ή μη αποθηκευτικής διάταξης.

Η αβεβαιότητα έχει σαφώς μεγαλύτερη επίδραση σε αυτόνομα συστήματα όπου δεν υπάρχει η δυνατότητα ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ γειτονικών συστημάτων. Μια πιθανότητα υποεκτίμησης του φορτίου ή υπερεκτίμησης της παραγωγής των ΑΠΕ θα μπορούσε να οδηγήσει σε προσωρινή διακοπή της τροφοδοσίας κάποιας ομάδας καταναλωτών, ενώ μια υποεκτίμηση της παραγωγής των ΑΠΕ θα μπορούσε να οδηγήσει σε απόρριψη παραγόμενης ανανεώσιμης ενέργειας. Η μεγάλη διείσδυση των μονάδων μη εγγυημένης παραγωγής και κυρίως των αιολικών πάρκων, δυσχεραίνουν την ασφαλή λειτουργία του συστήματος, ένα πρόβλημα που αντιμετωπίζεται με τη διατήρηση της στρεφόμενης εφεδρείας. Η στρεφόμενη εφεδρεία επιτυγχάνεται με την κατανομή της παραγωγής σε περισσότερες μονάδες, ώστε να διατηρείται η παραγωγή της καθεμίας, χαμηλότερη από τη μέγιστη ικανότητά της. Η διαδικασία αυτή χρήζει προσοχής, καθώς θέτοντας ένα σχετικά υψηλό αριθμό γεννητριών σε λειτουργία, αυξάνεται σημαντικά το κόστος λειτουργίας.

Η ύπαρξη τεχνολογιών αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα σύστημα είναι δυνατόν να μειώσει την ανάγκη για υψηλή στρεφόμενη εφεδρεία. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό καθώς, τέτοιοι σταθμοί παρέχουν τη δυνατότητα αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας σε συνδυασμό με ταχύτερο ρυθμό απόκρισης από τις συμβατικές μονάδες. Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας παρέχουν εγγυημένη ενέργεια για συγκεκριμένο αριθμό ωρών, που είναι απαραίτητο να δηλώνεται από τον ιδιοκτήτη τους. Συγχρόνως όμως ο διαχειριστής του δικτύου έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει το σύστημα αυτό ως μονάδα αιχμής όποτε απαιτείται, αμβλύνοντας έτσι την ανάγκη για στρεφόμενη εφεδρεία.

Το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, όπως είναι γνωστό, αποτελεί ένα αυτόνομο ΣΗΕ με σχετικά υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Συνεπώς, είναι απαραίτητο η διατήρηση σχετικά υψηλής εφεδρείας με ιδιαίτερη προσοχή στις προβλέψεις φορτίου και παραγωγής από ΑΠΕ για την αποφυγή αβεβαιοτήτων. Για το λόγο αυτό στην συγκεκριμένη εργασία χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος «αυστηρός» κανόνας εφεδρείας, με στόχο την ασφαλή διατήρηση της λειτουργίας του ΣΗΕ:

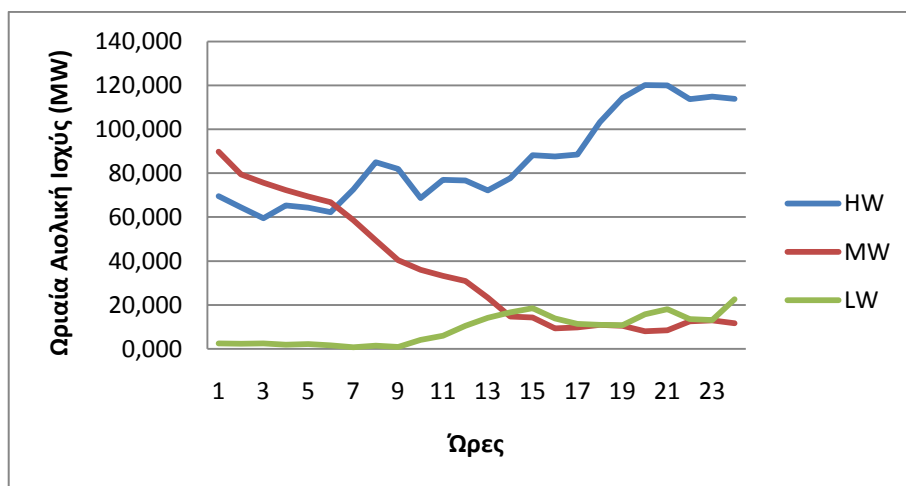
$$\sum_i u_i \cdot P_{i\max} \geq 1.1 \cdot P_{Load} + 0.2 \cdot P_{WT} + 0.1 \cdot P_{PV} \quad (5.1)$$

όπου u_i είναι η κατάσταση λειτουργίας της i συμβατικής μονάδας (1 σε κατάσταση λειτουργίας και 0 σε κατάσταση σβέσης) με το $P_{i\max}$ να αποτελεί τη μέγιστη ισχύ που αποδίδει η γεννήτρια i , P_{Load} και P_{WT} είναι το φορτίο ζήτησης του δικτύου και η αιολική ισχύς αντίστοιχα, ενώ P_{PV} είναι η ισχύς των φωτοβολταϊκών.

5.4 Αιολική παραγωγή

5.4.1 Επιλεγμένα σενάρια αιολικής παραγωγής

Για την μελέτη της παρούσας προσομοίωσης επιλέχθηκαν τρεις καταστάσεις αιολικού δυναμικού για το ΣΗΕ της Κρήτης, που πηγάζουν από ρεαλιστικές μετρήσεις του έτους 2014. Αντιστοιχούν σε τρεις τυπικές ημέρες του χρόνου με υψηλή (HWind), μέση (MWind) και χαμηλή (LWind) αιολική παραγωγή. Η καταγραφή της εξέλιξης της ωριαίας παραγωγής για κάθε σενάριο, στη διάρκεια της ημέρας, παρουσιάζεται στην εικόνα 5.2. Στην περίπτωση του υψηλού ανέμου (HW) η καμπύλη διατηρεί μια σχεδόν αύξουσα πορεία με μικρές διακυμάνσεις, με την ισχύ του ανέμου να κορυφώνεται τις πρώτες βραδινές ώρες. Αντίθετα για το μεσαίο αιολικό δυναμικό (MW) η αιολική παραγωγή ακολουθεί μια φθίνουσα πορεία, με αρκετά υψηλές τιμές ανέμου τις μεσημεριανές ώρες και σημαντικά χαμηλότερες κατά το πέρασμα της ημέρας. Το σενάριο LW διατηρεί σταθερά μικρές τιμές ανέμου έως τις 08:00 με μια μικρή αύξηση την υπόλοιπη μέρα, ξεπερνώντας τα 20MW ωριαίας αιολικής παραγωγής την ώρα 23:00.



Εικόνα 5.2 Ωριαία αιολική παραγωγή για τα τρία επιλεγμένα σενάρια

Στον πίνακα 5.8 σημειώνονται κάποια ωριαία στοιχεία για τα τρία σενάρια ανέμου. Οι εξαιρετικά χαμηλές ωριαίες παραγωγές για το Low Wind και Medium Wind σημειώθηκαν τις ώρες 06:00 και 19:00 αντίστοιχα, ενώ η ελάχιστη παραγωγή για το High Wind σενάριο την ώρα 02:00. Επιπλέον, η μέγιστη αιολική παραγωγή των τριών περιπτώσεων καταγράφηκε τις βραδινές ώρες 19:00, 23:00 και 00:00 για το High Wind, το Low Wind και Medium Wind αντίστοιχα.

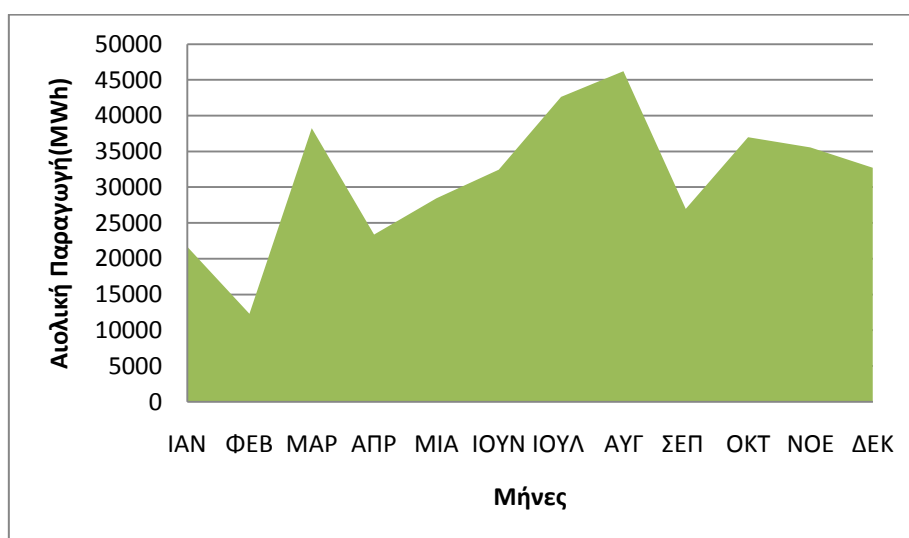
Πίνακας 5.8 Ωριαία στοιχεία για τα επιλεγμένα σενάρια αιολικής παραγωγής

Σενάρια	Ελάχιστη παραγωγή (MW)	Μέγιστη παραγωγή (MW)	Μέση ωριαία παραγωγή (MW)
High Wind	59,46	120,08	85,87
Medium Wind	8,01	89,77	35,34
Low Wind	0,76	22,53	8,99

Στο σημείο αυτό σημειώνεται ότι ο υπολογισμός της ετήσιας αιολικής παραγωγής έγινε σύμφωνα με τη συχνότητα εμφάνισης του κάθε σεναρίου στη διάρκεια του έτους. Ο πίνακας 5.5 χρησιμοποιήθηκε για το σκοπό αυτό, ενώ τα τελικά αποτελέσματα για την ημερήσια και ετήσια αιολική παραγωγή κάθε σεναρίου, καταγράφονται στον πίνακα 5.9. Το σενάριο του υψηλού ανέμου κατέχει την πρωτιά με ποσοστό 61,1% του συνόλου της ετήσιας παραγωγής. Τονίζεται ότι όλα αυτά τα στοιχεία αφορούν την συνολική παραγωγή των ανεμογεννητριών του ΣΗΕ της Κρήτης και όχι την απορρόφηση της αιολικής ενέργειας από το δίκτυο.

Πίνακας 5.9 Ημερήσια και ετήσια αιολική παραγωγή των τριών σεναρίων φορτίου

Σενάρια	Ημερήσια παραγωγή (MWh)	Ετήσια παραγωγή (MWh)
High Wind	2.060,97	230.828,64
Medium Wind	848,25	123.844,5
Low Wind	215,8	23.090,6
Σύνολο	-	377.763,74



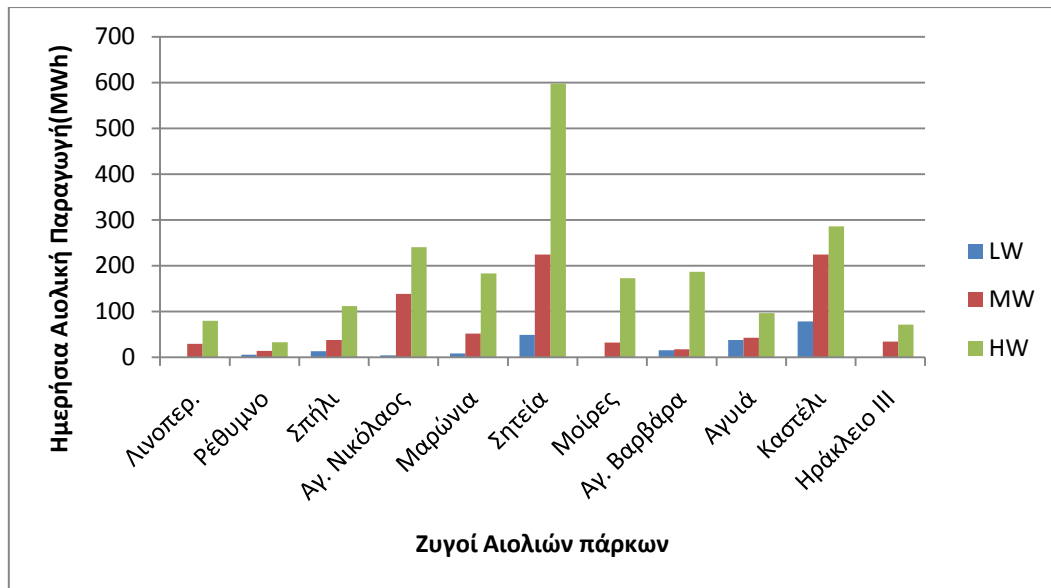
Εικόνα 5.3 Μηνιαία αιολική παραγωγή

Αναλύοντας το διάγραμμα της εικόνας 5.3, η μηνιαία παραγωγή των ανεμογεννητριών της Κρήτης για το έτος 2014, σύμφωνα με τα επιλεγμένα στοιχεία της προσομοίωσης κυμάνθηκε σε υψηλά επίπεδα. Εξαιρείται ο μήνας Φεβρουάριος, που η παραγωγή του δεν ξεπέρασε τις 15000 MWh, με τον Αύγουστο να αποτελεί τον μήνα με τις μεγαλύτερες τιμές ανέμου, ξεπερνώντας τις 45000 MWh αιολικής παραγωγής. Οι διακυμάνσεις του ανέμου στο νησί είναι έντονες στη διάρκεια του έτους, με «βροντερό» παράδειγμα η διαφορά παραγωγής μεταξύ των μηνών Φεβρουαρίου - Μαρτίου, που άγγιξε της 26000 MWh. Τα αιολικά πάρκα του πίνακα 5.10, είναι εκείνα που εγκαταστάθηκαν στο δίκτυο για τις ανάγκες τις εργασίας. Εκτός από την εγκατεστημένη ισχύ του εκάστοτε πάρκου, παρατίθενται επίσης το ποσοστό απορρόφησης και η δυνατότητα αιολικής αποκοπής στην τρίτη στήλη, δυνατότητα που δεν διαθέτουν όλες οι ανεμογεννήτριες. Το θέμα της αιολικής αποκοπής θα αναλυθεί παρακάτω. Στη συνέχεια, στην εικόνα 5.4, απεικονίζεται ένα

διάγραμμα με την ημερήσια παραγωγή αιολικής ενέργειας κάθε ζυγού, στους οποίους εγκαταστάθηκαν αιολικά πάρκα για κάθε σενάριο. Ο ζυγός της Σητείας στο νομό Λασιθίου στην ανατολική Κρήτη, διαθέτει με πολύ μεγάλη διαφορά, αιολικά πάρκα με την μεγαλύτερη ημερήσια παραγωγή, ιδίως σε ημέρες υψηλού αιολικού δυναμικού, επιβεβαιώνοντας τις ευνοϊκές συνθήκες για την εμφάνιση ισχυρών ανέμων στην περιοχή.

Πίνακας 5.10 Αιολικά πάρκα του ΣΗΕ της Κρήτης

ΟΝΟΜΑ	ΕΓΚ. ΙΣΧΥΣ (MW)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ.(%)	LOAD DISPATCH
ΤΟΠΛΟΥ	6,60	-	-
ΡΟΚΑΣ Ι	12,90	93,18	-
ΑΙΟΛΟΣ	9,90	93,08	-
ΙWECO ΜΟΙΡΩΝ	4,95	93,06	-
ΑΧΛΑΔΙΑ	10,00	93,03	-
ΚΡΥΑ	10,00	93,04	-
ΑΝΕΜΟΕΣΣΑ	5,00	93,00	-
ΔΕΗ ΞΗΡΟΛΙΜΝΗ Ι	10,20	93,06	-
ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ	11,90	92,98	-
WRE ΠΛΑΤΥΒΟΛΑ	3,00	93,06	-
ENERCON	2,50	93,01	-
ENEL ΒΟΣΚΕΡΟ	5,95	93,19	-
ΕΝΤΕΚΑ	2,70	93,03	-
ΥΔΡΟΑΙΟΛΙΚΗ	9,35	92,64	-
ΙWECO ΧΩΝΟΣ	4,50	93,15	-
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ	14,45	92,95	-
ΡΟΚΑΣ ΙΙ	4,80	78,89	YES
Α/Π ΜΟΙΡΩΝ	5,25	93,00	-
ΔΕΗ ΞΗΡΟΛΙΜΝΗ ΙΙ	3,00	93,35	-
ENVITEC ΒΑΡΔΙΑ	5,40	93,09	-
ENVITEC ΒΑΤΑΛΙ	5,40	92,94	-
ΔΙΕΘΝΗΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗΣ Α.Ε.	7,20	78,67	YES
ΡΟΚΑΣ ΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗΣ Α.Β.Ε.Ε.	3,60	79,25	YES
Ο.Α. ΣΗΤΕΙΑΣ Α.Ε.	0,50	-	-
Ο.Α. ΣΗΤΕΙΑΣ Α.Ε.	1,20	93,06	-
ΑΝΕΜΟΣ ΑΛΚΥΟΝΗΣ	6,30	78,30	YES
ΑΙΟΛΙΚΗ ΜΟΥΣΟΥΡΩΝ	2,55	79,24	YES
ΚΟΥΛΟΥΚΩΝΑΣ	4,80	80,94	YES
ΑΝΕΜΟΕΣΣΑ ΕΠΕΚΤ.	1,20	78,21	YES
ΑΧΛΑΔΙΑ ΕΠΕΚΤ.	1,20	78,21	YES
ΑΚΟΥΜΙΑ ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ	7,20	93,08	-
ΑΣΙΔΕΡΩΤΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΣΕ	2,40	80,19	YES
ΚΡΥΑ ΕΠΕΚΤ	1,20	-	YES
ΣΥΝΟΛΟ	187,10		-



Εικόνα 5.4 Ημερήσια αιολική παραγωγή κάθε σεναρίου, για κάθε ζυγό

5.4.2 Αποκοπή παραγωγής αιολικών πάρκων

Όπως αναφέρθηκε και νωρίτερα οι μονάδες μη εγγυημένης παραγωγής διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη μη διατήρηση της ασφάλειας ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Αφορά τις μονάδες ΑΠΕ, κυρίως τα αιολικά αλλά και φωτοβολταϊκά πάρκα, η παραγόμενη ισχύς των οποίων εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες που συχνά μεταβάλλονται. Οπότε η μεταβολή των καιρικών συνθηκών συνεπάγεται μεταβολή της παραγόμενης ισχύος, προξενώντας δύο είδη κινδύνων για ένα σύστημα. Σε περιπτώσεις όπου συμβαίνει απώλεια κάποιου μέρους της αιολικής παραγωγής, είτε λόγω πτώσης του αιολικού δυναμικού, είτε λόγω βλαβών σε ανεμογεννήτριες, υπάρχει κίνδυνος μη εξυπηρέτησης ενός μέρους της συνολικής ζήτησης, με αποτέλεσμα την αποσύνδεση ορισμένων ομάδων καταναλωτών.

Από την άλλη πλευρά, ο διαχειριστής του συστήματος καλείται να αντιμετωπίσει ακόμη ένα σημαντικό κίνδυνο που μπορεί να προκληθεί από τη διείσδυση του αιολικού δυναμικού. Σε χαρακτηριστικές μέρες με υψηλό άνεμο, η διείσδυση της αιολικής παραγωγής χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή. Μεγάλες διεισδύσεις του ανέμου μπορούν να προκαλέσουν διακυμάνσεις στην τάση των ζυγών και στη συχνότητα του δικτύου. Οι περιορισμοί της στρεφόμενης εφεδρείας και της ένταξης των μονάδων, είναι πιθανό να οδηγήσουν σε αποκοπή της παραγόμενης αιολικής ενέργειας, με στόχο τη μικρότερη αιολική διείσδυση, για την διατήρηση της ομαλής λειτουργίας του δικτύου. Είναι ένα φαινόμενο που παρατηρείται συχνά, κυρίως σε αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας όπως εκείνο της Κρήτης, σε συνθήκες υψηλού αιολικού δυναμικού, παράλληλα με σχετικά μικρή ζήτηση φορτίου. Σε μια τέτοια περίπτωση αν γινόταν δεχτή όλη η παραγόμενη αιολική ενέργεια, τότε θα υπήρχε παραβίαση των τεχνικών ελαχίστων των ενταγμένων μονάδων. Οπότε ο περιορισμός της διείσδυσης του ανέμου, αποτελεί μια «λύση ανάγκης» για την επαναφορά των ενταγμένων μονάδων σε φυσιολογικά επίπεδα λειτουργίας, πάντα με γνώμονα, η συνολική παραγωγή να συμπίπτει με την κατανάλωση.

Η εργασία αυτή κλήθηκε να αντιμετωπίσει το πρόβλημα που αναλύθηκε παραπάνω, σχετικά με την αποκοπή του αιολικού δυναμικού στη διείσδυση της συνολικής

παραγωγής. Η λογική που υιοθετήθηκε για την εξάλειψη του συγκεκριμένου προβλήματος, στην παρούσα προσομοίωση για το δίκτυο της Κρήτης, επικεντρώθηκε στην επαναφορά της λειτουργίας των μονάδων του Αθρινόλακκου, στο τεχνικό τους ελάχιστο. Δηλαδή το ποσό της ωριαίας αιολικής ενέργειας που αποκόπηκε σε κάθε περίπτωση, περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

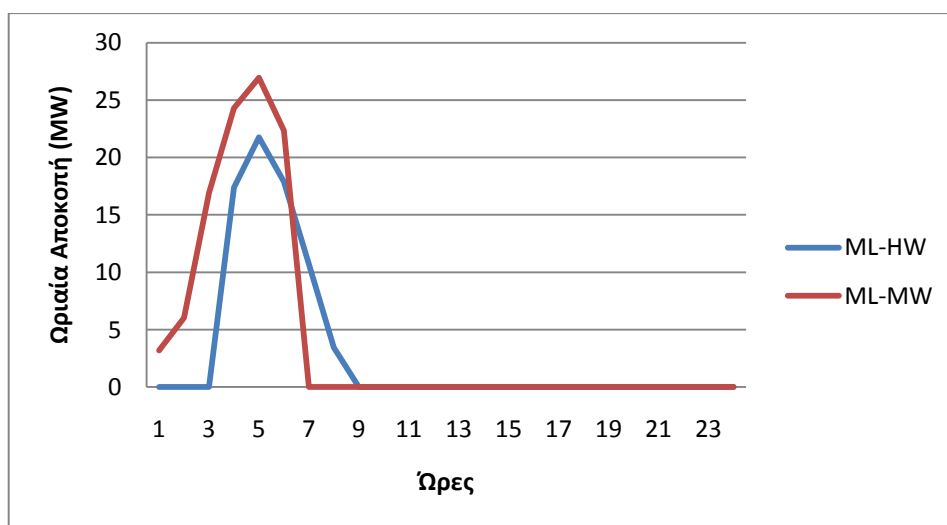
$$P_{cut} = \sum_{C(i)} (P_{i\min} - P_{ipr}) \quad (5.2)$$

όπου $C(i)$ είναι το σύνολο των ενταγμένων μονάδων του Αθρινόλακκου, $P_{i\min}$ το τεχνικό ελάχιστο της μονάδας i και P_{ipr} η ωριαία παραγωγή της μονάδας i , όπως προέκυψε από το μαθηματικό μοντέλο του PowerWorld για τη βέλτιστη ροή ισχύος. Πιο αναλυτικά, ο Αθρινόλακκος αποτελώντας τον ζυγό ταλάντωσης (slack bus), είναι υπεύθυνος για τη διατήρηση της ισορροπίας του συστήματος. Συνεπώς σε περιπτώσεις υψηλής, άνω του επιτρεπτού ορίου, διείσδυσης αιολικών οι ενταγμένες συμβατικές μονάδες του ζυγού του Αθρινόλακκου, είναι δυνατόν να ελαττώσουν σημαντικά την παραγωγή τους κάτω από το τεχνικό τους ελάχιστο. Η παρατήρηση έγινε αντιληπτή σε αντίστοιχες περιπτώσεις της επικείμενης προσομοίωσης, όπου η λύση της βέλτιστης ροής ισχύος του λογισμικού PowerWorld μείωσε σημαντικά την ωριαία παραγόμενη ισχύ των γεννητριών του ζυγού του Αθρινόλακκου, κάτω από το κατώτατο επιτρεπτό όριο. Σύμφωνα με το μαθηματικό μοντέλο που ακολουθεί το PowerWorld για τη βέλτιστη ροή ισχύος, η λύση αυτή αποτελεί σωστή αντιμετώπιση καθώς έτσι επιτυγχάνεται ισορροπία στο σύστημα. Κάτι τέτοιο όμως δεν αντιπροσωπεύει τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας του Κρητικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά και γενικότερα οποιοδήποτε συστήματος. Οι γεννήτριες λειτουργούν αποδοτικά όταν η παραγωγή τους κυμαίνεται μεταξύ συγκεκριμένων ορίων, τα οποία είναι απαραίτητο να ακολουθούνται πιστά. Για το σκοπό αυτό, εξασφαλίστηκε η λειτουργία των ενταγμένων μονάδων του Αθρινόλακκου αυστηρά στο τεχνικό τους ελάχιστο (και λίγο πιο πάνω, για βεβαιότητα), με την αποκοπή αιολικών να πραγματοποιείται στα ακόλουθα σενάρια: ML-HW, LL-HW, ML-MW, LL-MW.

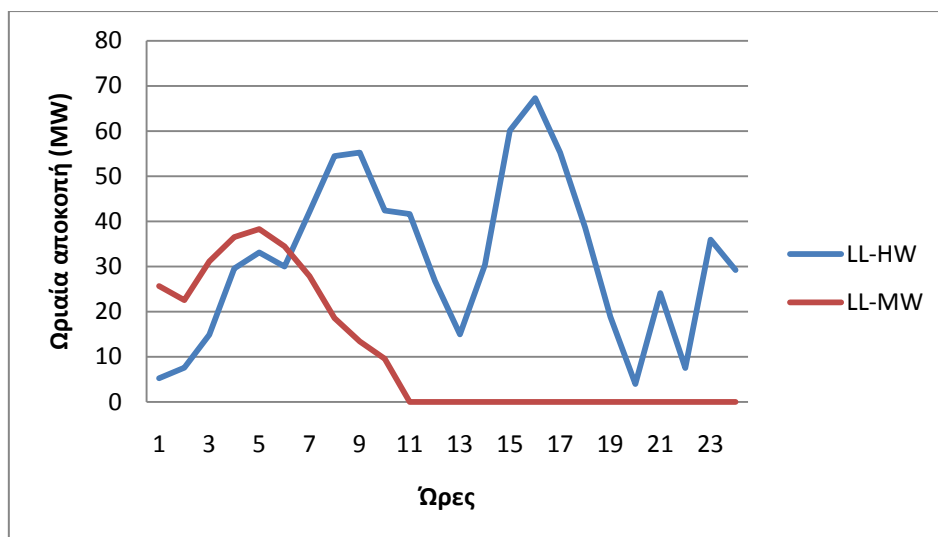
Πίνακας 5.11 Αποκοπή και διείσδυση αιολικής παραγωγής ανά σενάριο

Σενάρια	Ποσό ημερήσιας αποκοπής (MWh)	Συνολική ημερήσια διείσδυση (MWh)	Συνολική ετήσια διείσδυση (MWh)
HL-HW	0	2.060,97	47.402,31
HL-MW	0	848,25	26.295,75
HL-LW	0	215,80	1.510,60
ML-HW	71,19	1.989,78	13.3315,30
ML-MW	99,79	748,46	51.643,74
ML-LW	0	215,80	12.084,80
LL-HW	769,32	1.291,65	28.416,30
LL-MW	258,06	590,19	27.148,74
LL-LW	0	215,80	9.495,20
Σύνολο	-	-	337.312,7

Ο πίνακας 5.11 παρουσιάζει τα σενάρια με την αντίστοιχη ημερήσια αποκοπή αιολικής ενέργειας στο καθένα. Πρόκειται για μέρες με μέση και υψηλή ισχύς του ανέμου παράλληλα με χαμηλή και μέση ζήτηση ισχύος, όπου η διατήρηση των τεχνικών ελαχίστων των γεννητριών που έχουν προγραμματιστεί για λειτουργία, σε συνδυασμό με την αιολική παραγωγή υπερβαίνουν τη ζήτηση. Το ποσό της ημερήσιας αποκοπής είναι υψηλότερο στα σενάρια του χαμηλού φορτίου σε σχέση με τα σενάρια μέσης ζήτησης, ενώ η συνολική ημερήσια διείσδυση αιολικής παραγωγής είναι σαφώς μεγαλύτερη σε σενάρια υψηλού ανέμου, όπως φαίνεται και στον πίνακα 5.11. Στα σενάρια υψηλής ζήτησης (HL) δεν τίθεται το ζήτημα της αποκοπής καθώς το φορτίο είναι ιδιαίτερα υψηλό, επιτρέποντας την πλήρης απορρόφηση της αιολικής παραγωγής από το δίκτυο. Για τις περιπτώσεις χαμηλού ανέμου (LW), η απορρόφηση από το δίκτυο είναι επίσης πλήρης, και για τις τρεις περιπτώσεις της ζήτησης, καθώς οι εντάσεις του ανέμου δεν απειλούν την ασφάλεια του συστήματος. Παρατηρείται ότι στο σενάριο ML-MW το συνολικό ποσό αποκοπής αιολικής ενέργειας ξεπερνάει το αντίστοιχο του σεναρίου ML-HW παρόλο που το φορτίο είναι ίδιο και η αιολική παραγωγή μεγαλύτερη. Η εξήγηση έχει να κάνει με την έντονη δραστηριότητα του ανέμου τις μεταμεσονύχτιες ώρες στην περίπτωση της μεσαία αιολικής παραγωγής (MW), όπως εύκολα μπορεί να διακριθεί στην εικόνα 5.2. Εκείνες τις ώρες η ζήτηση γενικότερα είναι χαμηλή, με συνέπεια να παραβιάζονται τα τεχνικά ελάχιστα των ενταγμένων μονάδων, ενώ στις ώρες αιχμής η συνολική αιολική παραγωγή για το σενάριο αυτό είναι ιδιαίτερα χαμηλή, κάτι που επίσης εύκολα διακρίνεται στην εικόνα 5.2. Αντίστοιχα στο σενάριο HW οι τιμές του ανέμου παρουσιάζονται πιο ήπιες τις μεταμεσονύχτιες ώρες, ενώ ιδιαίτερα υψηλές είναι στις ώρες αιχμής. Στις ώρες αιχμής όμως, η αιολική παραγωγή απορροφάται όλη από το δίκτυο, καθώς η ζήτηση είναι υψηλή χωρίς την υποψία κινδύνου για την παραβίαση του κάτω ορίου των γεννητριών. Στη συνέχεια, ακολουθούν δύο διαγράμματα (εικόνα 5.5 και εικόνα 5.6) που παρουσιάζουν την αιολική αποκοπή για τα σενάρια ML-HW, ML-MW και LL-HW, LL-MW στη διάρκεια ενός 24ωρου. Στο διάγραμμα της εικόνας 5.5 παρατηρείται το φαινόμενο που αναλύθηκε παραπάνω. Ο περιορισμός της αιολικής παραγωγής είναι μεγαλύτερος για το σενάριο του μέσου ανέμου τα μεσάνυχτα σε σχέση με εκείνη του υψηλού ανέμου. Για το σενάριο LL-HW η αποκοπή διατηρείται μη μηδενική για όλη τη μέρα σύμφωνα με το διάγραμμα της εικόνας 5.6.



Εικόνα 5.5 Ωριαία αιολική αποκοπή για τα σενάρια μέσου φορτίου



Εικόνα 5.6 Ωριαία αιολική αποκοπή για τα σενάρια χαμηλού φορτίου

Για το τεχνικό μέρος σχετικά με την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου ζητήματος, υιοθετήθηκε μια συγκεκριμένη διαδικασία. Τα αιολικά πάρκα που φιλοξενούνται στο δίκτυο της Κρήτης, διαθέτουν ανεμογεννήτριες με συγκεκριμένα τεχνολογικά χαρακτηριστικά, ανάλογα με την χρονολογία της εγκατάστασης τους. Οι νέες ανεμογεννήτριες που έχουν εγκατασταθεί τα τελευταία χρόνια διαθέτουν την ικανότητα περιορισμού της παραγωγικής τους ικανότητας. Οπότε σε περιπτώσεις που ο περιορισμός της αιολικής παραγωγής κρίνεται απαραίτητος, η παραγωγή εκείνων των γεννητριών περιορίζεται σε πρώτο πλάνο. Ο πίνακας 5.10 που παρουσιάστηκε νωρίτερα, παρουσιάζει τα αιολικά πάρκα του νησιού με την εγκατεστημένη ισχύ και το ποσοστό απορρόφησης τους από το δίκτυο. Η τρίτη στήλη (LOAD DISPATCH) φανερώνει ποια από τα αιολικά πάρκα διαθέτουν τη δυνατότητα για τον περιορισμό του φορτίου παραγωγής τους. Η μέθοδος αυτή αποτυπώθηκε και στην παρούσα εργασία. Η αποκοπή έγινε με ποσοστιαία αποκοπή στην ωριαία παραγωγή του κάθε πάρκου, με το ποσοστό να ορίζεται ως το πηλίκο της απορριπτόμενης προς τη συνολική παραγόμενη αιολική ενέργεια των «LOAD DISPATCH» πάρκων. Σε περίπτωση που το ποσό που απορρίφθηκε δεν ήταν αρκετό για να επανέλθουν οι μονάδες του Αθρινόλακκου στο τεχνικό τους ελάχιστο, μόνο τότε εφαρμόστηκε η ίδια διαδικασία και για τα υπόλοιπα πάρκα.

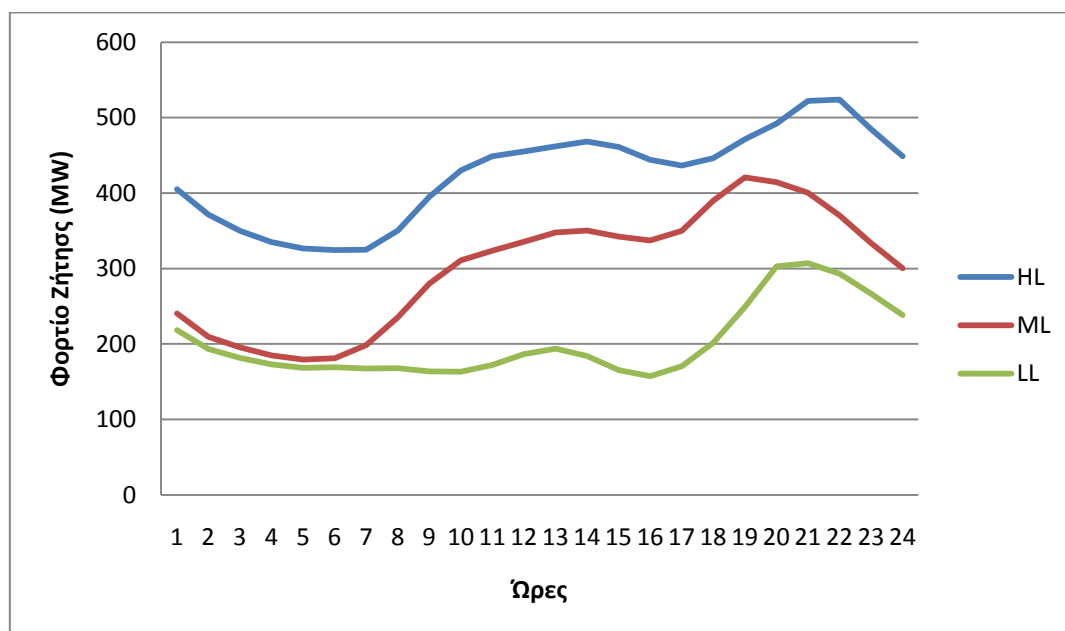
5.5 Διαχείριση φωτοβολταϊκών συστημάτων

Η εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πάρκων, δεν έχει συμπεριληφθεί στη συγκεκριμένη εργασία. Τα στοιχεία ζήτησης ισχύος που χρησιμοποιήθηκαν, αφορούν μετρήσεις για το έτος 2014, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν σε επίπεδο υψηλής τάσης. Ως γνωστόν τα Φ/Β πάρκα βρίσκονται εγκατεστημένα σε ζυγούς μέσης και τα μικρότερα, σε ζυγούς χαμηλής τάσης. Αυτό συνεπάγεται ότι στα δεδομένα των φορτίων για τη ζήτηση ισχύος, έχει συνυπολογιστεί και η ωριαία παραγωγή των φωτοβολταϊκών πάρκων, η οποία ουσιαστικά έχει αφαιρεθεί από την συνολική ωριαία ζήτηση. Εξάλλου και στην πραγματικότητα ο διαχειριστής επιτρέπει την πλήρη διείσδυσης της φωτοβολταϊκής παραγωγής στο δίκτυο καθώς η συμβολή της, στο σύνολο της παραγωγής είναι χαμηλή και

οι ιδιοκτήτες των πάρκων είναι ιδιώτες, γεγονότα που περιπλέκουν την διαδικασία. Συνεπώς σε καταστάσεις ανάγκης, ο διαχειριστής προβαίνει σε περιορισμό της αιολικής παραγωγής, εκτός από ειδικές περιπτώσεις.

5.6 Διαχείριση φορτίων - Ζήτηση Ισχύος

Για τις ανάγκες της εργασίας επιλέχθηκαν τρία σενάρια ζήτησης ισχύος που αντιστοιχούν σε τρεις αντίστοιχες τυπικές μέρες ενός έτους, υψηλής, μεσαίας και χαμηλής (HL, ML, LL). Πρόκειται για ρεαλιστικά στοιχεία βασισμένα στα δεδομένα ζήτησης φορτίου στο δίκτυο της Κρήτης για το έτος 2014. Το διάγραμμα της εικόνας 5.7 που ακολουθεί απεικονίζει την ημερήσια ζήτηση για τα τρία επιλεγμένα σενάρια, σε ωριαία βάση. Η καμπύλη HL αντιπροσωπεύει τις υψηλές φορτίσεις που παρατηρούνται κυρίως τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ η μέση (ML) και χαμηλή ζήτηση (LL), συναντώνται σε πιο συχνή βάση στη διάρκεια του έτους. Και οι τρεις καμπύλες φανερώνουν τη συμπεριφορά του φορτίου στο δίκτυο της Κρήτης. Χαμηλές φορτίσεις διατηρούνται τις μεταμεσονύχτιες ώρες, με την ζήτηση να αυξάνεται τις πρωινές έως τις μεσημεριανές ώρες. Εύκολα διακρίνονται οι ώρες αιχμής όπου η καμπύλη παρουσιάζει αύξηση και στις τρεις περιπτώσεις. Στον πίνακα 5.12 παρουσιάζονται τα σημαντικότερα ωριαία στοιχεία για τα τρία σενάρια φορτίου. Η ελάχιστη ζήτηση για το υψηλό και μέσο φορτίο καταγράφηκε κατά τις μεταμεσονύχτιες ώρες, 05:00 και 04:00 αντίστοιχα, ενώ για το χαμηλό φορτίο στις 15:00 το μεσημέρι. Αντίστοιχα και στα τρία σενάρια, η μέγιστη ζήτηση εμφανίστηκε σε ώρες αιχμής, τις ώρες 21:00, 18:00 και 20:00 για υψηλή, μέση και χαμηλή ζήτηση αντίστοιχα.



Εικόνα 5.7 Ημερήσια χρονοσειρά για τα τρία επιλεγμένα σενάρια φορτίου

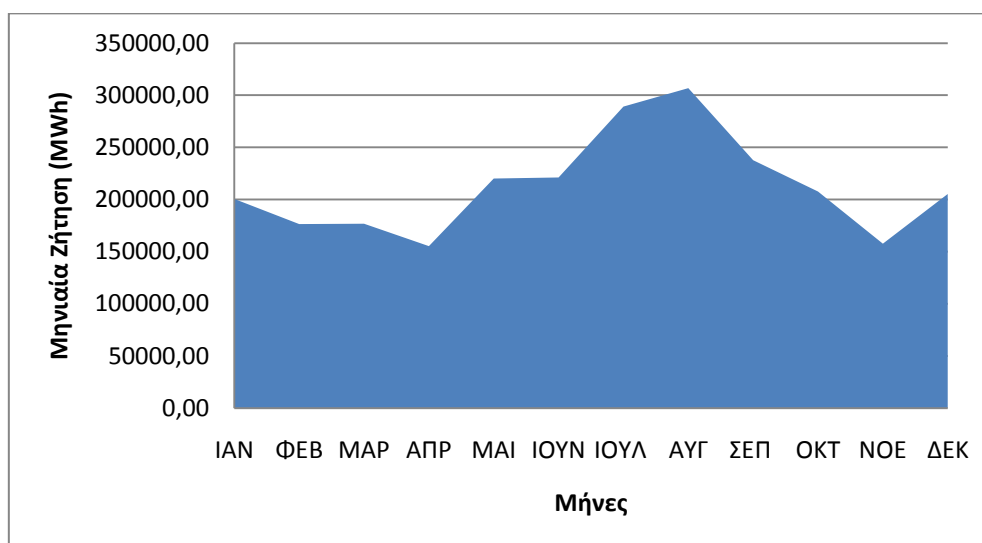
Πίνακας 5.12 Στοιχεία ωριαίας ζήτησης για τα επιλεγμένα σενάρια φορτίου

Σενάρια	Ελάχιστη ζήτηση (MW)	Μέγιστη ζήτηση (MW)	Μέση ωριαία ζήτηση (MW)
High Load	324,44	524,03	424,079
Medium Load	179,30	420,99	301,33
Low Load	157,48	307,27	202,32

Πίνακας 5.13 Ημερήσια και ετήσια ζήτηση των σεναρίων φορτίου

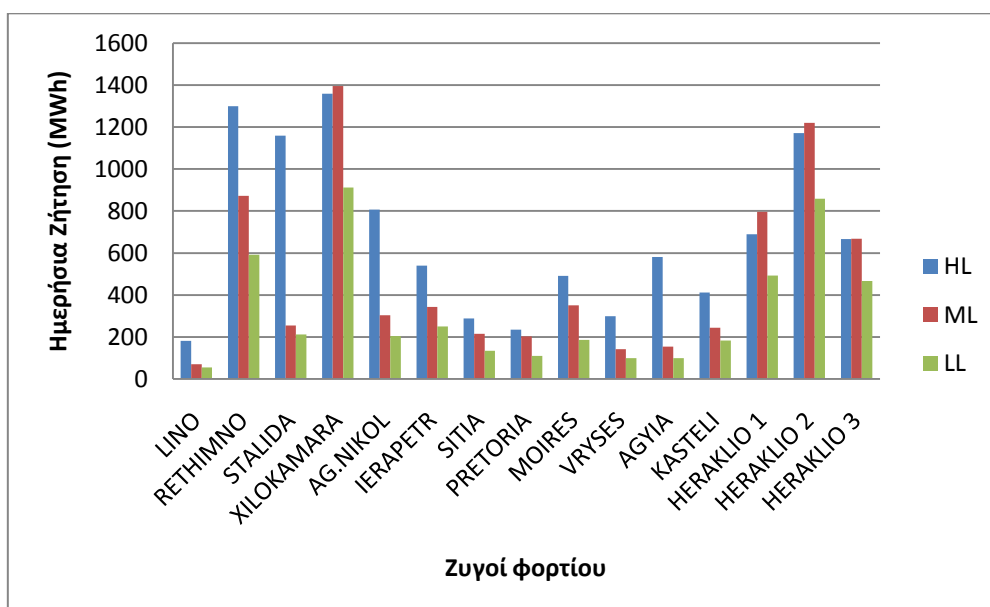
Σενάρια	Ημερήσια ζήτηση (MWh)	Ετήσια Ζήτηση (MWh)
High Load	10.177,89	620.851,29
Medium Load	7.231,87	1.388.519,04
Low Load	4.855,65	543.832,8
Σύνολο	-	2.553.203,13

Ο πίνακας 5.13 παρουσιάζει την ημερήσια και ετήσια ζήτηση ισχύος για κάθε σενάριο, καθώς και τη συνολική ζήτηση, σε ετήσια βάση. Η ετήσια ζήτηση ισχύος της παρούσας προσομοίωσης, υπολογίστηκε με τη βοήθεια της συχνότητας εμφάνισης του εκάστοτε σεναρίου, στη διάρκεια των 365 ημερών του έτους (πίνακας 5.4). Το ετήσιο φορτίο για το «Medium Load» είναι με διαφορά υψηλότερο καθώς είναι και εκείνο με τη μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συνολική ετήσια ζήτηση της προσομοίωσης υπολογίστηκε στις 2.553.203,13 MWh με την πραγματική ετήσια ζήτηση του δικτύου της Κρήτης, σύμφωνα με την ετήσια έκθεση της ΔΕΗ για το 2014 να φτάνει τις 2.736.646,2 MWh. Μια αρκετά κοντινή προσέγγιση του πραγματικού φορτίου με απόκλιση περίπου ίση με 6,7%. Το διάγραμμα που ακολουθεί παρουσιάζει τη μηνιαία ζήτηση ισχύος σύμφωνα με τα στοιχεία της προσομοίωσης. Σύμφωνα με την εικόνα 5.8, η πορεία της ζήτησης κατά το πέρασμα των μηνών είναι πολύ κοντά στην πραγματικότητα. Ο μήνας Αύγουστος είναι με διαφορά ο μήνας με τη μεγαλύτερη ζήτηση, ξεπερνώντας τις 300.000 MWh, ενώ ο Απρίλιος και ο Νοέμβριος παρουσιάζουν το χαμηλότερο φορτίο, με 155.174,4 MWh και 157.550,6 MWh αντίστοιχα.



Εικόνα 5.8 Μηνιαία ζήτηση ισχύος

Σχετικά με τη μοντελοποίηση του συστήματος, δεκαπέντε φορτία εγκαταστάθηκαν σε ισάριθμους ζυγούς υψηλής τάσης (150 kV), των οποίων τα στοιχεία εισήχθησαν σε ωριαία βάση για ένα εικοσιτετράωρο. Η διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε και για τα τρία διαφορετικά σενάρια φορτίου, για κάθε ένα από τους εννέα διαφορετικούς συνδυασμούς ζήτησης - αιολικής παραγωγής. Η εικόνα 5.9, παρουσιάζει τους ζυγούς στους οποίους πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση φορτίου με την συνολική ημερήσια ζήτηση ανά ζυγό, για κάθε σενάριο. Η ζήτηση ισχύος είναι σταθερά υψηλότερη σε περιοχές - πόλεις που διαθέτουν μεγάλο αριθμό κατοίκων (Χανιά, Ρέθυμνο, Ηράκλειο), ή γενικότερα όπου παρατηρείται έντονη ανθρώπινη δραστηριότητα. Για το υψηλό και μέσο φορτίο, η κατανάλωση παρουσιάζει μια σχετική σταθερότητα ενώ σε τουριστικές περιοχές η διαφορά των δύο είναι ιδιαίτερα αισθητή. Εξετάζοντας τον ζυγό της Σταλίδας που εδρεύει σε μια τουριστική περιοχή με έντονη δραστηριότητα τους καλοκαιρινούς μήνες, καταγράφεται δικαιολογημένα, μια έντονη διαφορά στην ημερήσια κατανάλωση, μεταξύ υψηλού και μέσου φορτίου, που ξεπερνάει τις 900 MWh.



Εικόνα 5.9 Ημερήσια ζήτηση ενέργειας κάθε σεναρίου, για κάθε ζυγό

5.7 Διαχείριση συμβατικών μονάδων

Οι γεννήτριες που χρησιμοποιήθηκαν στην συγκεκριμένη εργασία είναι 26 συμβατικές μονάδες που καταναλώνουν δύο είδη καυσίμων, μαζούτ και ντίζελ, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους. Εγκαταστάθηκαν στους τρεις ζυγούς παραγωγής του νησιού, τα Λινοπεράματα στο νομό Ηρακλείου, στην Ξυλοκαμάρα του νομού Χανίων και στον Αθερινόλακκο του νομού Λασιθίου, που αποτέλεσε και τον ζυγό ταλάντωσης (slack bus) του συστήματος. Για την ακρίβεια στο ζυγό των Λινοπεραμάτων εγκαταστάθηκαν έξι ατμοηλεκτρικές μονάδες, τέσσερις μονάδες εσωτερικής καύσης (μονάδες Diesel) και πέντε αεριοστροβιλικές μονάδες. Στο ζυγό της Ξυλοκαμάρας εγκαταστάθηκε μία μονάδα

συνδυασμένου κύκλου και έξι αεριοστρόβιλοι, ενώ στο ζυγό του Αθερινόλακκου δύο μονάδες Diesel και δύο ατμοστρόβιλοι. Να σημειωθεί ότι ο συνδυασμένος κύκλος στο ζυγό της Ξυλοκαμάρας διαιρέθηκε σε δύο τμήματα, ως δύο ξεχωριστές μονάδες με ανεξάρτητη λειτουργία.

Τα τεχνικά όρια λειτουργίας των μονάδων, οι συντελεστές κόστους και το είδος καυσίμου, εισήχθησαν ως δεδομένα, σύμφωνα με την παρουσίαση που έγινε στο κεφάλαιο 4 για το PowerWorld simulator, χρησιμοποιώντας τα αντίστοιχα δεδομένα των προηγούμενων κεφαλαίων, για τα χαρακτηριστικά των γεννητριών και τις συναρτήσεις κόστους. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων για την παραγωγή των γεννητριών και το κόστος λειτουργίας τους, θα αναλυθεί λεπτομερώς σε επόμενο κεφάλαιο. Επιλέχθηκαν οι λειτουργίες «Available for AGC» και «Available for AVR» μέσα από το περιβάλλον του PowerWorld, που επιτρέπει στο ίδιο το πρόγραμμα την βέλτιστη κατανομή φορτίου παραγωγής στις μονάδες, με τον σεβασμό όμως των τεχνικών τους ορίων.

5.8 Διαχείριση πυκνωτών

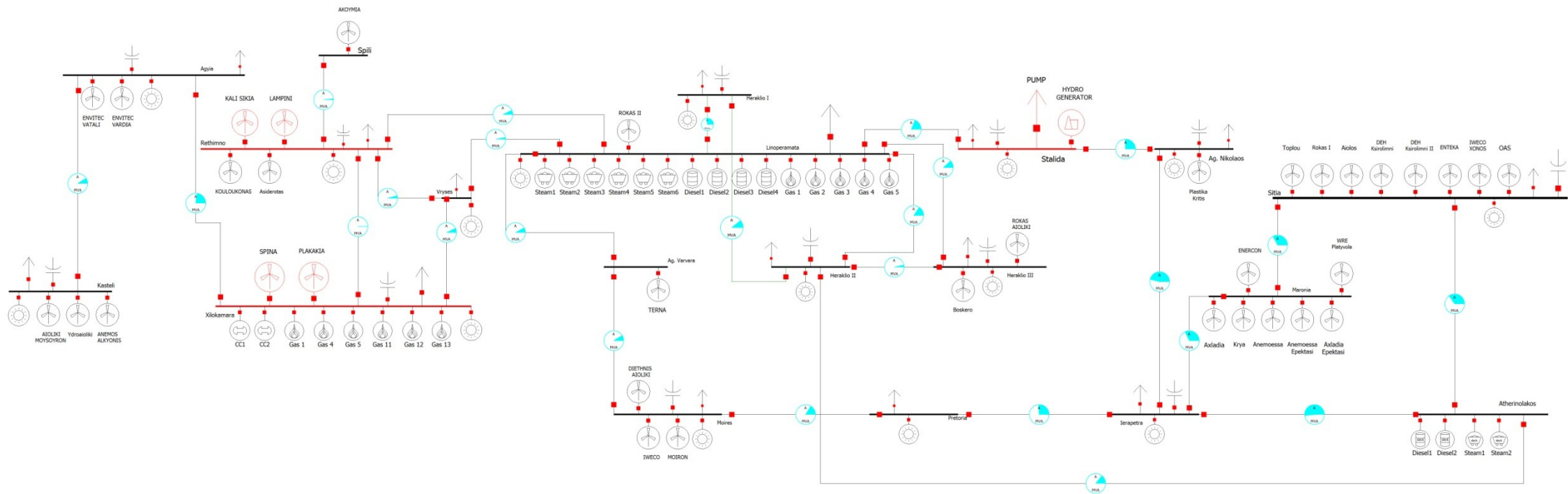
Στο πίνακα 5.14 παρατίθενται οι πυκνωτές του δικτύου της Κρήτης, όπως αυτοί βρίσκονται εγκατεστημένοι στους αντίστοιχους ζυγούς. Η τοποθέτηση τους έγινε στους ζυγούς υψηλής τάσης του σχεδιαζόμενου δικτύου, στο περιβάλλον του PowerWorld, πλησιάζοντας σημαντικά τις τιμές του παρακάτω πίνακα. Για την σωστή προσαρμογή τους στο δίκτυο, με επιδίωξη την όσο δυνατόν πλησιέστερη συμπεριφορά τους με την πραγματικότητα, ορίστηκαν ως «ομάδες πυκνωτών». Αυτό επετεύχθη με την επιλογή που προσφέρει το πρόγραμμα PowerWorld ορίζοντας τον πυκνωτή που εισάγεται ως «Discrete» δίνοντας του τον αριθμό των βημάτων - ομάδων και τα MVar κάθε βήματος. Στη συνέχεια το πρόγραμμα καθορίζει τη λειτουργία τους, με τρόπο ώστε η τάση των ζυγών να διατηρείται στα 150kV χωρίς σημαντικές διακυμάνσεις.

Πίνακας 5.14 Πυκνωτές δικτύου Κρήτης

Υποσταθμός	Πλήθος πρώτης ομάδας πυκνωτών	Ισχύς κάθε βαθμίδας πρώτης ομάδας πυκνωτών (MVar)
Άγιος Νικόλαος	1	5,04
Αγιά	1	7,50
Αγ. Βαρβάρα	1	3,00
Ηράκλειο 1	3	4,30
Ηράκλειο 1	3	4,30
Ηράκλειο 2	1	7,40
Ηράκλειο 2	1	13,00
Ηράκλειο 2	1	8,00
Ηράκλειο 3	1	3,05
Ηράκλειο 3	1	8,80
Ιεράπετρα	1	5,04
Ιεράπετρα	1	6,05
Καστέλι	1	6,00
Μοίρες	1	7,80
Μοίρες	1	7,25
Ρέθυμνο	3	4,33 4,33 3,25
Ρέθυμνο	1	4,03
Ρέθυμνο	3	4,44 4,44 3,44
Σητεία	1	10,10
Σπήλι	3	4,30
Σταλίδα	1	7,00
Σταλίδα	1	5,04
Χανιά	3	3,30
Χανιά	1	3,10
Χανιά	3	3,30

5.9 Μονογραμμικό διάγραμμα του ΣΗΕ της Κρήτης στο PowerWorld

Έχοντας περιγράψει τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του δικτύου της Κρήτης στο PowerWorld, κρίνεται απαραίτητη η απεικόνιση του, όπως φαίνεται στην εικόνα 5.10.



Εικόνα 5.10 Το ΣΗΕ Κρήτης όπως δημιουργήθηκε στο λογισμικό PowerWorld

5.10 Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα του συστήματος της Κρήτης στην αρχική του μορφή, πριν δηλαδή την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού, όπως εκείνα προέκυψαν από την προσομοίωση του συστήματος στο PowerWorld simulator. Η εργασία αυτή εξέτασε κυρίως τη λειτουργία των μονάδων καθώς και τις φορτίσεις των γραμμών μεταφοράς για τα εννέα διαφορετικά σενάρια, με γνώμονα την επίτευξη της συμπεριφοράς του συστήματος όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην πραγματική του λειτουργία. Δημιουργήθηκαν εννέα διαφορετικά αρχεία PowerWorld ένα για κάθε σενάριο, στο καθένα από τα οποία εισήχθησαν τα δεδομένα που αντιστοιχούν στην κάθε περίπτωση φορτίου και αιολικής παραγωγής. Τα στοιχεία των γεννητριών, των γραμμών μεταφοράς και σε μεγάλο βαθμό των πυκνωτών, όπως ήταν λογικό παρέμειναν σταθερά για τα διαφορετικά αρχεία.

5.10.1 Παραγωγή συμβατικών μονάδων

Αφού έγινε η εισαγωγή των δεδομένων, η λύση της βέλτιστης ροής ισχύος (OPF), λαμβάνοντας υπόψη τους διάφορους περιορισμούς, κατένειμε το φορτίο παραγωγής στις ενεργές γεννήτριες για κάθε ώρα (στη διάρκεια ενός 24ώρου). Ακολουθώντας τους συντελεστές κόστους για κάθε γεννήτρια, πραγματοποιήθηκε η οικονομική κατανομή της παραγωγής στις μονάδες. Ο πίνακας 5.16, παραθέτει την παραγωγή των θερμικών μονάδων του συστήματος για κάθε διαφορετικό σενάριο, ενώ ο πίνακας 5.15 που ακολουθεί, στοιχεία για την ελάχιστη και την μέγιστη ωριαία παραγωγή των ενταγμένων μονάδων.

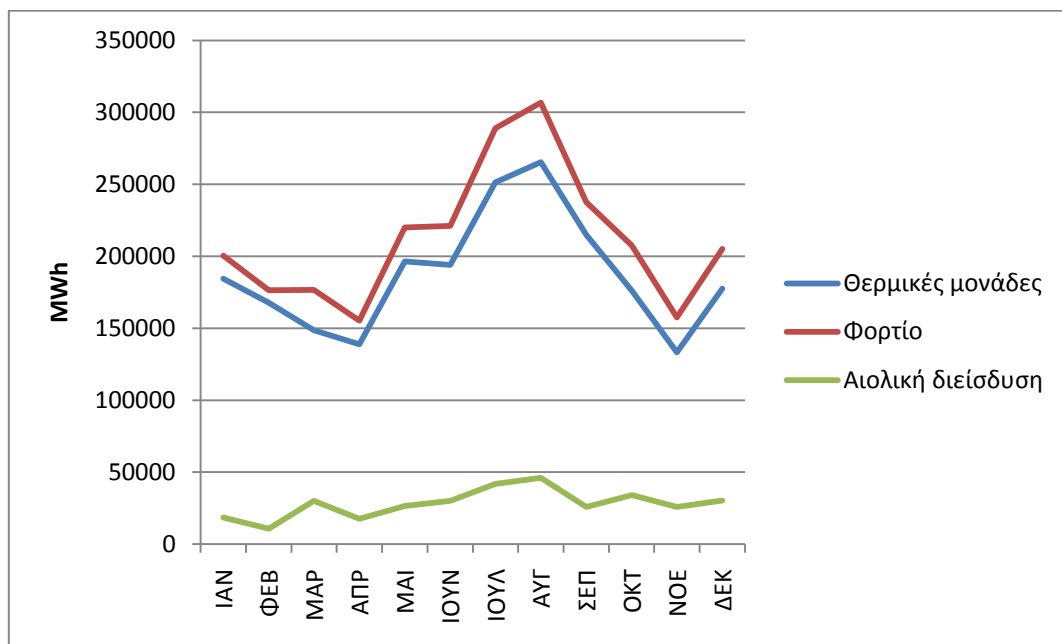
Πίνακας 5.15 Στοιχεία για την παραγόμενη ωριαία ισχύ των γεννητριών

Σενάριο	Ελάχιστη ωριαία παραγωγή γεννητριών (MW)	Μέγιστη ωριαία παραγωγή γεννητριών (MW)	Μέσος όρος ωριαίας παραγωγής γεννητριών (MW)
HL-HW	257,40	418,46	345,45
HL-MW	262,58	518,62	394,38
HL-LW	325,50	515,67	420,04
ML-HW	136,82	315,31	223,05
ML-MW	137,75	416,21	274,29
ML-LW	178,69	416,04	296,33
LL-HW	137,65	216,27	149,98
LL-MW	137,72	301,75	179,06
LL-LW	144,43	292,52	194,95

Πίνακας 5.16 Παραγόμενη ενέργεια γεννητριών για κάθε σενάριο

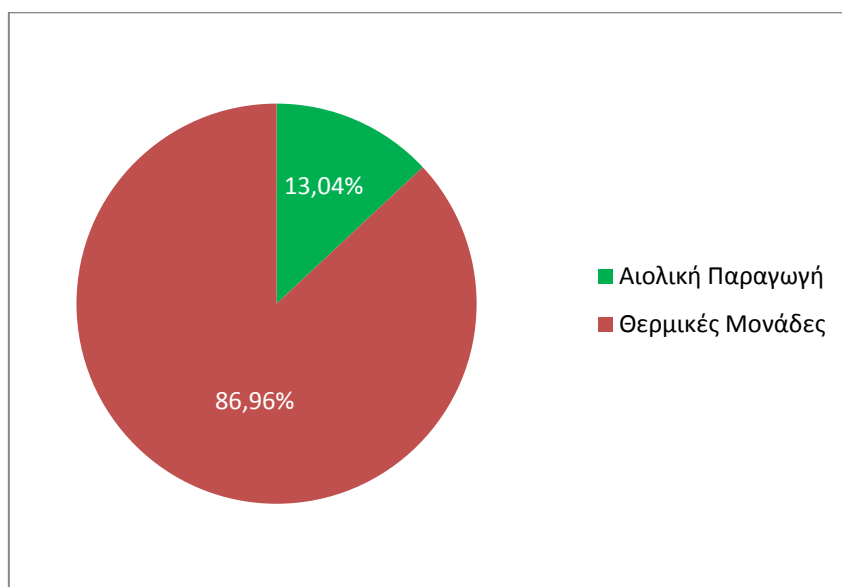
Σενάριο	Παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο (MWh)	Ετήσια παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο (MWh)
HL-HW	8.290,88	190.690,28
HL-MW	9.465,15	293.419,56
HL-LW	10.080,88	70.566,16
ML-HW	5.353,15	358.661,06
ML-MW	6.582,92	454.221,22
ML-LW	7.111,85	398.263,80
LL-HW	3.599,44	79.187,78
LL-MW	4.297,56	197.687,54
LL-LW	4.678,88	205.870,80
Σύνολο	-	2.248.568,20

Από τους δύο προαναφερθέντες πίνακες, εύκολα μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι όσο αυξάνεται η αιολική παραγωγή και ελαττώνεται η ζήτηση ενέργειας, τόσο μειώνεται και η παραγωγή ενέργειας από τις θερμικές μονάδες και αντίστροφα. Εξετάζοντας τον πίνακα 5.16, παρατηρείται ότι το σενάριο με την υψηλότερη παραγωγή ενέργειας από συμβατικές μονάδες είναι εκείνο του υψηλού φορτίου σε συνδυασμό με χαμηλή αιολική παραγωγή (HL-LW), ενώ εκείνο με την χαμηλότερη παραγωγή γεννητριών είναι το σενάριο χαμηλού φορτίου με υψηλή αιολική παραγωγή (LL-HW). Στην τρίτη στήλη του πίνακα έχει υπολογιστεί η συνεισφορά του κάθε σεναρίου στην συνολική ετήσια παραγωγή των γεννητριών. Η συχνότητα εμφάνισης του κάθε σεναρίου για όλο το έτος συνέβαλε στο τελικό αποτέλεσμα, με τη συνολική παραγωγή συμβατικών μονάδων να φτάνει τις 2.248.568,20 MWh.



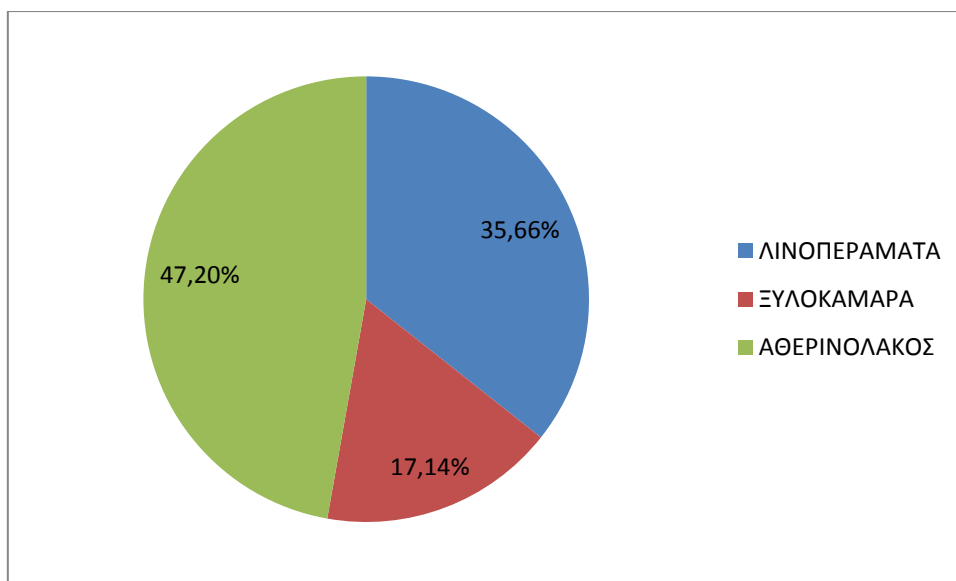
Εικόνα 5.11 Φορτίο ζήτησης και παραγωγή μονάδων - αιολικών κατά το πέρασμα των μηνών

Το διάγραμμα της εικόνας 5.11, προβάλλει την πορεία της παραγόμενης ενέργειας των συμβατικών μονάδων, κατά το πέρασμα των μηνών, στη διάρκεια του εξεταζόμενου έτους. Η καμπύλη της συμβατικής παραγωγής ακολουθεί την καμπύλη φορτίου με την μεγαλύτερη αύξηση να παρατηρείται τους καλοκαιρινούς μήνες, όπου και η ζήτηση φορτίου είναι ιδιαίτερα αυξημένη. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης η παραγωγή των θερμικών μονάδων εκπλήρωσε το 86,96% της συνολικής παραγωγής του συστήματος, ενώ η απορροφώμενη από το δίκτυο, αιολική ενέργεια, έφτασε το ποσοστό του 13,04% (εικόνα 5.12).

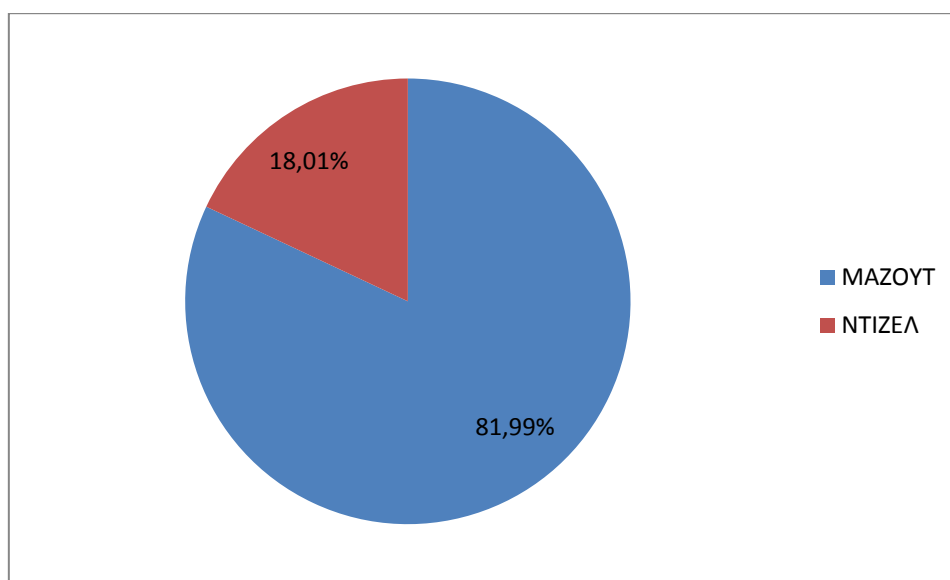


Εικόνα 5.12 Ποσοστό συμμετοχής των θερμικών μονάδων και των αιολικών πάρκων, στην ετήσια παραγωγή ενέργειας

Εξετάζοντας τώρα την συνεισφορά κάθε ζυγού παραγωγής, από την προσομοίωση προέκυψαν τα αποτελέσματα όπως απεικονίζονται στην εικόνα 5.13. Ο σταθμός του Αθερινόλακκου συνέβαλε τα περισσότερα σχετικά με την συνολική παραγόμενη ενέργεια των γεννητριών, με ποσοστό 47,2% και ετήσια παραγωγή ίση με 1.061.340,13 MWh. Ακολουθεί ο ζυγός των Λινοπεραμάτων με ποσοστό 35,66% και 801.774,13 MWh ετήσια συνεισφορά από θερμικές μονάδες και τέλος οι γεννήτριες της Ξυλοκαμάρας με 17,14% και 385.453,93 αντίστοιχα. Ο Αθερινόλακκος όντας ο βασικός σταθμός παραγωγής, ως ζυγός ταλάντωσης του συστήματος παράγει τη μεγαλύτερη ποσότητα ενέργεια στο σύνολο του έτους. Πρόκειται για ένα σταθμό παραγωγής που διαθέτει δύο μονάδες βάσης, τις δύο μονάδες ατμού, που έχουν οριστεί και ως must run units για το εξεταζόμενο ΣΗΕ της Κρήτης. Διαθέτει ακόμα δύο νέες, σχετικά με τις υπόλοιπες, ντιζελογεννήτριες, οι οποίες όπως παρουσιάστηκε νωρίτερα, στον πίνακα 5.7 βρίσκονται ψηλότερα στη λίστα προτεραιότητας από τις υπόλοιπες μονάδες diesel. Όλα αυτά σε συνδυασμό με το γεγονός ότι και οι τέσσερις μονάδες του σταθμού, είναι σχετικά οικονομικές, αναφορικά με το κόστος κατανάλωσης καυσίμου, εξηγούν ως ένα μεγάλο βαθμό την αιτία που ο Αθερινόλακκος κατέχει την πρωτιά σχετικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές μονάδες, σε σύγκριση με τους άλλους δύο σταθμούς.



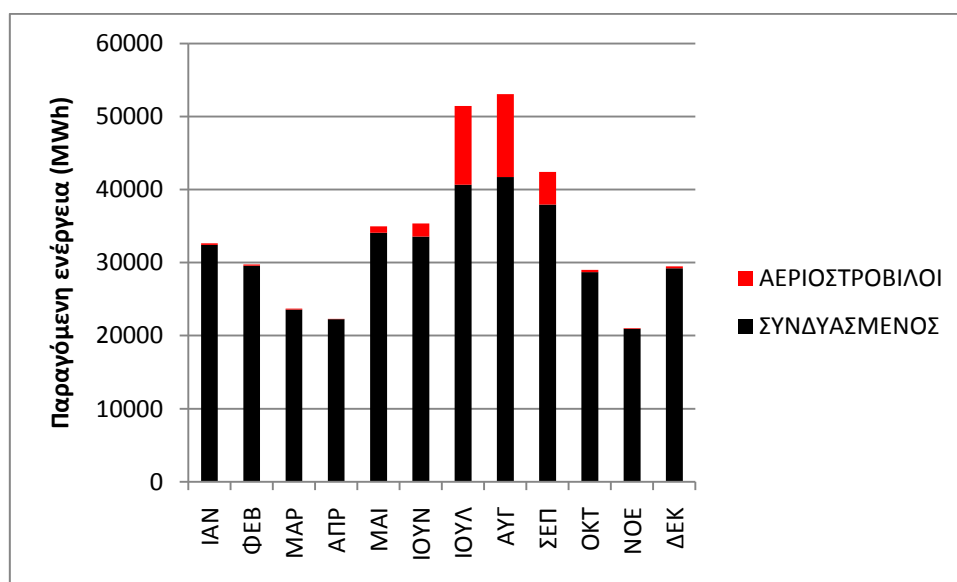
Εικόνα 5.13 Ποσοστό συμμετοχής κάθε σταθμού παραγωγής, στο σύνολο της ετήσιας παραγωγής



Εικόνα 5.14 Ποσοστό ετήσιας παραγωγής μονάδων καυσίμου ντίζελ και μαζούτ

Οι περισσότερες μονάδες του ΣΗΕ της Κρήτης, καταναλώνουν μαζούτ για την λειτουργία τους. Ο συνδυασμένος κύκλος και οι αεριοστροβλικές μονάδες των Χανίων και του Ηρακλείου στο ζυγό των Λινοπεραμάτων, χρησιμοποιούν Diesel ως καύσιμο. Οι μονάδες εσωτερικής καύσης χρησιμοποιούν και μια μικρή ποσότητα Diesel για τη λειτουργία τους, κάτι που δεν λήφθηκε όμως υπόψη στην παρούσα εργασία. Συνεπώς, είναι επόμενο η κατανάλωση μαζούτ να είναι μεγαλύτερη, με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης να δίνουν ένα ετήσιο ποσοστό παραγωγής 18,01% για τις μονάδες με Diesel καύσιμο κατανάλωσης και ένα 81,99% για τις αντίστοιχες με μαζούτ (εικόνα 5.14). Από τις μονάδες καυσίμου Diesel τη μεγαλύτερη συμμετοχή στην παραγωγή έχει ο συνδυασμένος κύκλος, ενώ μικρότερη κατέχουν οι αεριστρόβιλοι του συστήματος. Αποτελώντας μονάδες αιχμής, βρίσκονται χαμηλά στη λίστα προτεραιότητας για την ένταξη των μονάδων με την

ένταξή τους να πραγματοποιείται σε ώρες όπου οι απαιτήσεις ζήτησης είναι αυξημένες. Το διάγραμμα της εικόνας 5.15 απεικονίζει την παραγωγή των αεριοστροβιλικών μονάδων σε σύγκριση με εκείνη του συνδυασμένου κύκλου, το άθροισμα των οποίων αποτελεί τη συνολική παραγωγή μονάδων κατανάλωσης καυσίμου Diesel για όλους τους μήνες του έτους. Ως μονάδες αιχμής, οι αεριοστρόβιλοι εντάσσονται κατά κόρον την καλοκαιρινή περίοδο, ξεχωρίζοντας στους μήνες του Ιουλίου και του Αυγούστου. Λειτουργούν όλους τους μήνες του έτους με την εμφάνιση τους να γίνεται σε περιόδους υψηλής ζήτησης (Ιούλιος, Αύγουστος) παράλληλα με χαμηλές τιμές αιολικής ενέργειας. Στο σενάριο HL-LW το οποίο συνδυάζει την υψηλότερη ζήτηση ενέργειας και το χαμηλότερο αιολικό δυναμικό από τα υπόλοιπα, οι αεριοστροβιλικές μονάδες σημειώνουν το μεγαλύτερο φορτίο με 1.653,25 MWh παραγόμενη ενέργεια. Αντίθετα ο συνδυασμένος κύκλος της Ξυλοκαμάρας ακολουθεί μια πιο σταθερή πορεία ως προς την παραγωγή, ακολουθώντας τη συμπεριφορά των μονάδων κατανάλωσης μαζούτ που λειτουργούν σχεδόν σταθερά κατά τη διάρκεια ενός έτους. Έξαλλου για την παρούσα εργασία το ένα μέρος του συνδυασμένου κύκλου ορίστηκε ως must run unit.

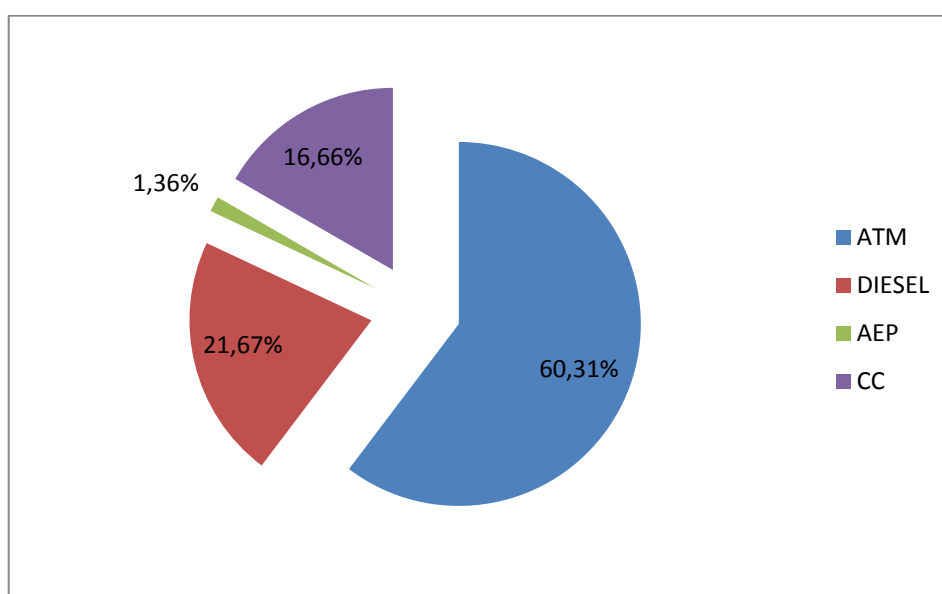


Εικόνα 5.15 Μηνιαία παραγόμενη ενέργεια των μονάδων καυσίμου ντίζελ

Η παρούσα εργασία υιοθέτησε ένα συγκεκριμένο μοτίβο σχετικά με την λειτουργία των μονάδων. Δεν ελέγχθηκαν περιπτώσεις συντήρησης μονάδων ούτε βγήκαν μονάδες εκτός λειτουργίας για περιπτώσεις βλαβών. Οι «must run» μονάδες, δηλαδή οι ατμοστρόβιλοι και το ένα μέρος του συνδυασμένου κύκλου, παρέμειναν σε μόνιμη λειτουργία για όλες τις ώρες του έτους, ενώ στην συνέχεια άρχισαν να εντάσσονται οι μονάδες ενδιάμεσου φορτίου (ντιζελογεννήτριες) και οι μονάδες αιχμής (αεριοστρόβιλοι). Στην πραγματικότητα οι γεννήτριες αργής εκκίνησης - απόκρισης, οι ατμοηλεκτρικές μονάδες, βγαίνουν εκτός λειτουργίας για μεγάλα διαστήματα του έτους. Δεν είναι μόνο θέμα βλαβών ή συντήρησης, αλλά και θέμα εξοικονόμησης και απόδοσης. Οι ατμοηλεκτρικές μονάδες αποτελούν συνήθως γεννήτριες παλιάς τεχνολογίας, με αργές μεταβολές στην παραγωγή τους, ενώ οι χρονολογικά παλιότερες μονάδες ατμού έχουν και σχετικά χαμηλή απόδοση. Για το λόγο αυτό θέτονται εκτός λειτουργίας για μεγάλα

διαστήματα και αντικαθίστανται από άλλες πιο αποδοτικές με γρηγορότερη απόκριση στις μεταβολές της ζήτησης (κυρίως ντιζελογεννήτριες). Κάτι τέτοιο δεν υιοθετήθηκε στην ιδέα της εργασίας, ακολουθώντας αυστηρά των κανόνα ένταξης μονάδων και πιο συγκεκριμένα την λίστα προτεραιότητας του πίνακα 5.7.

Το διάγραμμα πίτας της εικόνας 5.16 που ακολουθεί, παραθέτει το ποσοστό συνεισφοράς κάθε τεχνολογίας γεννητριών του ΣΗΕ Κρήτης στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι ατμοηλεκτρικές μονάδες κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό με 60,31%. Οι αεριοστροβιλικές μονάδες που εντάσσονται σε ώρες αιχμής και κυρίως την καλοκαιρινή περίοδο, συνέβαλαν με ποσοστό μόλις 1,36%. Οι αεριοστρόβιλοι καλούνται να καλύψουν μια μικρή ποσότητα ενέργειας κάτι που εξηγεί και την οικονομικά ασύμφορη λειτουργία τους. Η κοστοβόρα όμως, εγκατάσταση τόσων MW αεριοστρόβιλων, κρίνεται λειτουργικά απαραίτητη καθώς πρόκειται για μονάδες που καλύπτουν τις αιχμές φορτίου, όπως επίσης αντικαθιστούν άλλες μονάδες σε περιπτώσεις βλαβών, χάρη στη ταχύτατη απόκριση παραγωγής που διαθέτουν.



Εικόνα 5.16 Ποσοστό συμμετοχής των μονάδων στο σύνολο της παραγωγής

5.10.2 Κόστος κατανάλωσης καυσίμων συμβατικών μονάδων.

Στο σημείο αυτό αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν, σχετικά με το λειτουργικό κόστος κατανάλωσης καυσίμων των γεννητριών. Για τον υπολογισμό του κόστους χρησιμοποιήθηκε η τριτοβάθμια εξίσωση του κεφαλαίου 2 (2.1), οι συντελεστές κόστους της οποίας εισήχθησαν στο λογισμικό PowerWorld ως είσοδοι για κάθε γεννήτρια. Όπου a_i, b_i, c_i, d_i είναι οι συντελεστές κόστους της γεννήτριας i και P_i η ωριαία παραγωγή της. Οι συντελεστές κόστους που χρησιμοποιήθηκαν έχουν παρουσιαστεί στο κεφάλαιο 2, όπου λαμβάνει η χώρα η περιγραφή του ΣΗΕ της Κρήτης, και συγκεκριμένα στον πίνακα 2.1 στον οποίο καταγράφονται οι συντελεστές κόστους παραγωγής των γεννητριών. Ως *fuel_cost* - κόστος καυσίμου ορίστηκαν οι ακόλουθες τιμές του πίνακα 5.17, για τα δύο χρησιμοποιούμενα είδη καυσίμου κάθε παραγωγής:

Πίνακας 5.17 Τιμές καυσίμων για κάθε σταθμό παραγωγής

ΣΤΑΘΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ	ΤΙΜΗ ΜΑΖΟΥΤ (€/kg)	ΤΙΜΗ DIESEL (€/kg)
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	0,49964	0,94881
ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΟΣ	0,50451	-
ΞΥΛΟΚΑΜΑΡΑ	-	0,94511

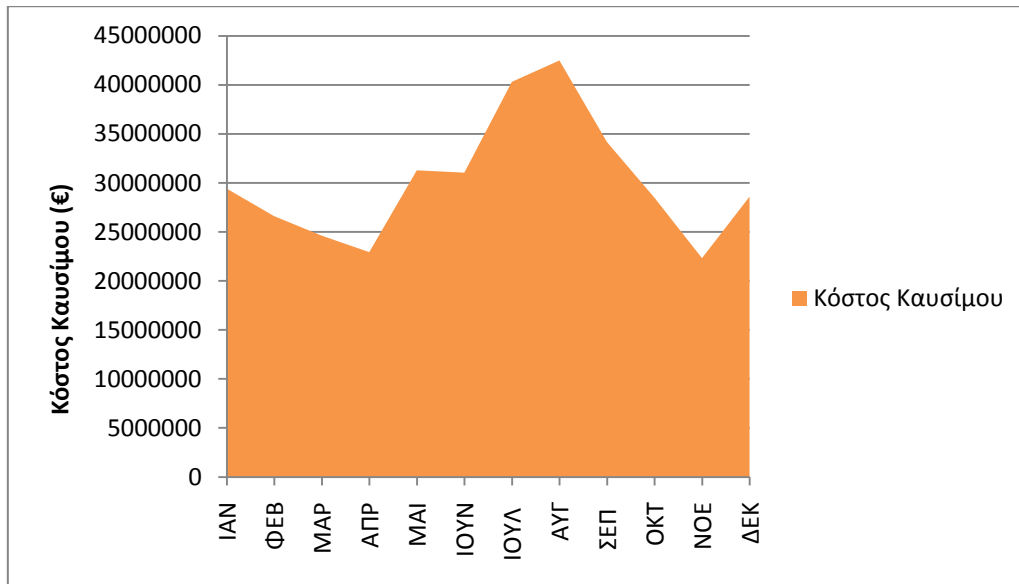
Τα αποτελέσματα σχετικά με το λειτουργικό κόστος καυσίμου των γεννητριών, συνελέχθησαν και παρατίθενται ανά σενάριο στον πίνακα 5.18. Η αύξηση της ζήτησης με ταυτόχρονη μείωση της αιολικής παραγωγής οδηγεί σε αύξηση της παραγωγής από συμβατικές μονάδες και άρα σε αύξηση του λειτουργικού κόστους. Το σενάριο υψηλού φορτίου με χαμηλό άνεμο, όπως είναι φυσικό, είναι το πιο δαπανηρό, όμως παρουσιάζει την πιο μικρή συχνότητα σε ολόκληρο το έτος με συνέπεια να κατέχει την μικρότερη συμβολή στη διαμόρφωση των ετήσιων δαπανών από καύσιμα με 11.226.712,37 €/έτος. Το συνολικό ετήσιο κόστος από καύσιμα ανήλθε στα 362.283.951,80 €/έτος.

Πίνακας 5.18 Κόστος καυσίμων για κάθε σενάριο

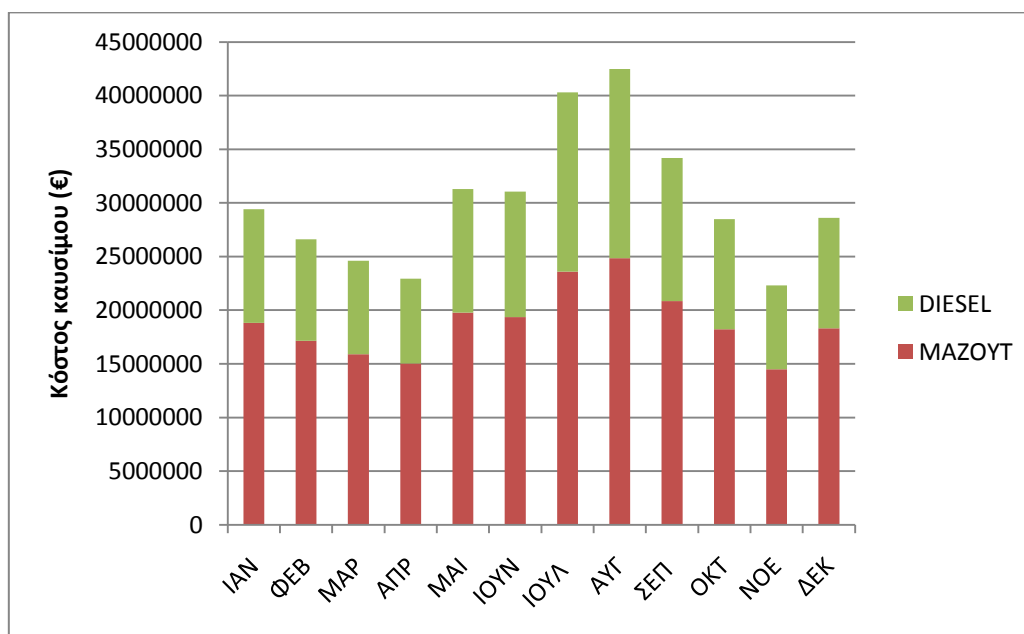
ΣΕΝΑΡΙΟ	ΚΟΣΤΟΣ ΣΕΝΑΡΙΟΥ (€)	ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΣΕΝΑΡΙΟΥ (€)
HL-HW	1.328.704,82	30.560.210,96
HL-MW	1.509.219,19	46.785.794,74
HL-LW	1.603.816,05	11.226.712,37
ML-HW	885.336,86	59.317.569,38
ML-MW	1.039.370,33	71.716.552,86
ML-LW	1.108.089,96	62.053.037,64
LL-HW	638.814,31	14.053.914,92
LL-MW	722.432,51	33.231.895,26
LL-LW	757.687,81	33.338.263,65
ΣΥΝΟΛΟ	-	362.283.951,80

Εξετάζοντας το λειτουργικό κόστος των γεννητριών για όλους τους μήνες του έτους, προέκυψε το διάγραμμα της εικόνας 5.17. Οι καλοκαιρινοί μήνες και σε μεγαλύτερο βαθμό ο Ιούλιος και ο Αύγουστος είναι οι μήνες με τις περισσότερες δαπάνες, λόγω της αυξημένης ζήτησης της εποχής. Η μεγαλύτερη κατανάλωση του καυσίμου Diesel εκείνη την περίοδο, εξαιτίας της συχνής ένταξης των αεριοστροβιλικών μονάδων, οφείλεται κυρίως για τις υψηλές τιμές κόστους. Οι αεριοστρόβιλοι αποτελούν γεννήτριες με ιδιαίτερη ακριβή λειτουργία, οι οποίες εντάσσονται συχνότερα, όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενο κεφάλαιο, κυρίως το καλοκαίρι. Η απόδειξη δίνεται από το γράφημα της εικόνας 5.18 όπου το καύσιμο Diesel παρουσιάζει σημαντική αύξηση εκείνη την περίοδο. Η μεγαλύτερη τιμή σημειώθηκε τον μήνα Αύγουστο, με το κόστος καυσίμου να ξεπερνάει τα 40.000.000 €, ενώ η χαμηλότερη το Νοέμβριο με τιμή ύψους, κάτω των 23.000.000 €. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από το λογισμικό PowerWorld για τις συνολικές δαπάνες του λειτουργικού κόστους των γεννητριών παρατίθενται στο διάγραμμα «πίτας» της εικόνας 5.19. Για την κατανάλωση του μαζούτ δαπανήθηκαν 226.397.424 €/έτος με ποσοστό 62,49% της συνολικής κατανάλωσης καυσίμου, έναντι 135.901.300 €/έτος με ποσοστό 37,51% για την κατανάλωση Diesel. Στο σημείο αυτό, αξίζει να σημειωθεί ότι ενώ η συνεισφορά των

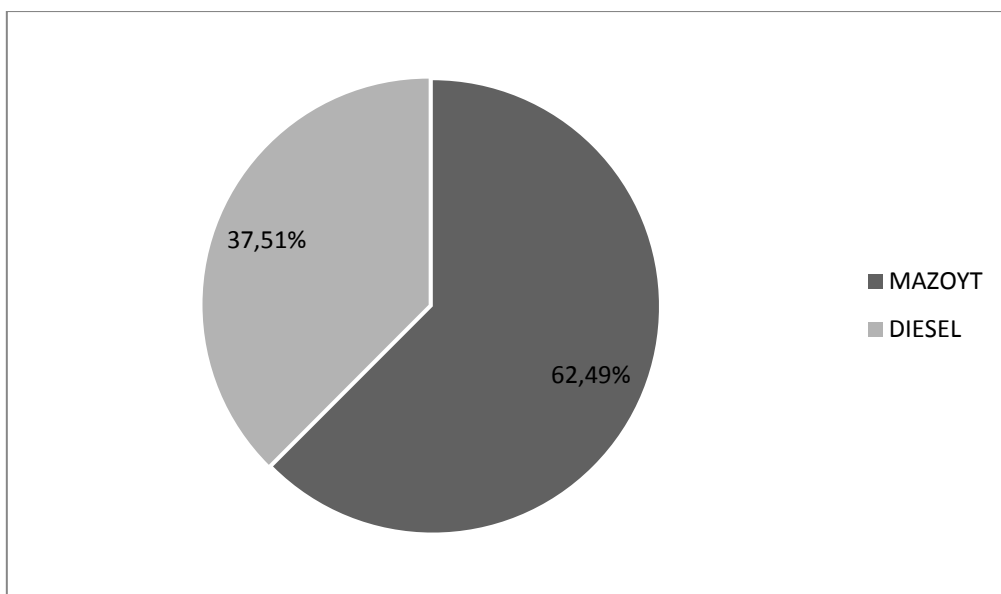
μονάδων καυσίμου Diesel στη συνολική παραγωγή κατέλαβε μόλις το 18,02%, στις συνολικές δαπάνες συνέβαλε με 37,51%. Αυτό αποδεικνύει το πόσο δαπανηρή είναι η λειτουργία των μονάδων αυτών και πόσο σημαντικά αυξάνονται τα χρηματικά έξοδα σε περίπτωση που αυξηθούν οι λειτουργικές ώρες τέτοιων μονάδων.



Εικόνα 5.17 Μηνιαίο λειτουργικό κόστος γεννητριών



Εικόνα 5.18 Μηνιαίο κόστος καυσίμου για μαζούτ και ντίζελ



Εικόνα 5.19 Ετήσιο ποσοστό κατανάλωσης καυσίμου

6 ΠΡΟΣΘΗΚΗ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΤΑΘΜΟΥ ΚΑΙ ΝΕΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Η συμμετοχή της νέα αυτής τεχνολογίας στο σύνολο της παραγωγής για το δίκτυο της Κρήτης προκαλεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Στο κεφάλαιο αυτό θα εξεταστεί η λειτουργία του υβριδικού σταθμού στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης. Πιο συγκεκριμένα θα περιγραφεί η εγκατάσταση του στο ζυγό της Σταλίδας, καθώς επίσης η συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του ίδιου του σταθμού αλλά και ολόκληρου του δικτύου. Η υπόθεση που έγινε για την εγκατάσταση των αιολικών πάρκων του υβριδικού σταθμού θα παρουσιαστεί, με τον υπολογισμό της παραγωγής τους για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια της προσομοίωσης. Επίσης θα παρατεθεί και η περιγραφή του αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε για τις δύο λειτουργίες του αντλησιοταμιετικού σταθμού (φόρτιση-αποφόρτιση).

6.1 Αλγόριθμος λειτουργίας του υβριδικού σταθμού με αντλησιοταμίευση

Για την εκπόνηση της παρούσας προσομοίωσης, χρησιμοποιήθηκε ένας αλγόριθμος με στόχο την εξαγωγή αποτελεσμάτων σχετικά με την ζήτηση και την παραγωγή του εξεταζόμενου υβριδικού σταθμού, οποίος εκτελέστηκε στο περιβάλλον του Matlab. Για το σκοπό αυτό ορίστηκε ο βαθμός απόδοσης της αντλίας ίσος με 0,8, του υδροστροβίλου με 0,9 με συνολικό βαθμό απόδοσης του σταθμού 0,72. Η ελάχιστη στάθμη δεξαμενής θεωρήθηκε 0MWh, με τη μέγιστη στάθμη δεξαμενής να φτάνει τις 1100MWh. Στη συνέχεια, ήταν απαραίτητο να ληφθούν υπ' όψιν σημαντικοί περιορισμοί σχετικά με την ωριαία και ημερήσια λειτουργία του υβριδικού σταθμού, σύμφωνα πάντα με τον κώδικα για τα μη διασυνδεδεμένα νησιά (κώδικας ΜΔΝ). Πιο συγκεκριμένα:

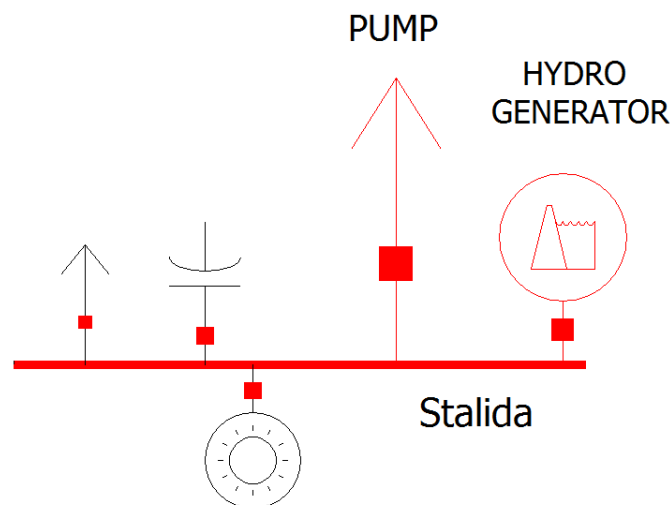
1. Η εκτίμηση της ημερήσιας ενέργειας που μπορεί να παράγει ο Υβριδικός Σταθμός σχετίζεται με τη διαθέσιμη ενέργεια από τα αιολικά πάρκα η οποία εξαρτάται από τα σενάρια της αιολικής παραγωγής (HW, MW, LW), τον τύπο του φορτίου ζήτησης (HL, ML, LL), καθώς και τους περιορισμούς του Υβριδικού σταθμού, που περιλαμβάνουν: α) τη μέγιστη ισχύ αντλιών (100MW) και υδροστροβίλου (75MW) και β) την υπέρβαση του άνω ή κάτω ορίου της δεξαμενής. Επιπλέον, λαμβάνεται υπ' όψιν ότι η ενέργεια που παράγει ο υβριδικός σταθμός το πρώτο δωδεκάωρο είναι μικρότερη (ή οριακά ίση) αυτής του δεύτερου δωδεκάωρου της ημέρας. Πρακτικά ο υβριδικός σταθμός δεν μπορεί να απορροφήσει ηλεκτρική ισχύ άνω των 100MW και να παράγει περισσότερα από 75MW κάθε ώρα, ποσότητες που αντιστοιχούν στην ονομαστική ισχύ της αντλίας και του υδροστροβίλου του υβριδικού σταθμού αντίστοιχα.
2. Το χρονοδιάγραμμα της ημερήσιας παραγωγής ορίζεται από το διαχειριστή με τέτοιο τρόπο ώστε να κόβονται οι αιχμές φορτίου.
3. Στη γενική περίπτωση απορρόφησης ενέργειας από το δίκτυο κάποιες συγκεκριμένες μέρες, διακρίνονται 2 περιπτώσεις:
 - α. Όταν η ημερήσια ζήτηση είναι μεγάλη, δηλαδή για το σενάριο HL. Σε αυτήν την περίπτωση ο υβριδικός σταθμός πρέπει να δώσει ως έξοδο (από τον υδροστροβίλο) τουλάχιστον την εγγυημένη του ενέργεια, που είναι ίση με

$75\text{MW} \cdot 8\text{h} = 600\text{MWh}$. Εάν τα αιολικά εκείνη την ημέρα παράγουν πολύ ενέργεια και ο υβριδικός σταθμός μπορεί να καλύψει περισσότερες από 600MWh , παράγει όσο μπορεί με μέγιστη ικανότητα, τη μέγιστη στάθμη της δεξαμενής. Σε διαφορετική περίπτωση χρειάζεται να απορροφήσει την υπόλοιπη ενέργεια που απαιτείται για να καλυφθούν οι 600MWh , την ενέργεια ουσιαστικά που δεν μπορούν να καλύψουν τα αιολικά.

- b. Η ελάχιστη ενέργεια που μπορεί να δώσει ο υβριδικός σταθμός ορίζεται από τον Κώδικα ΜΔΝ και είναι ίση με $75\text{MW} \cdot 2\text{h} = 150\text{MWh}$ και είναι πιθανόν να παρατηρείται σε μέρες με χαμηλή αιολική παραγωγή. Για λόγους απλότητας κάνουμε τη θεώρηση ότι ο υβριδικός σταθμός δουλεύει κάθε μέρα. Άρα αν μια μέρα φυσάει πολύ λίγο, θα πρέπει να απορροφηθεί κάποια ενέργεια από το δίκτυο για να καλυφθούν οι 150MWh .

6.2 Εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού

Ο υβριδικός σταθμός αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας με αιολικά πάρκα, αποτελεί μια τεχνολογία που μπορεί να επηρεάσει σε σημαντικό βαθμό ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στη συγκεκριμένη εργασία, ο σταθμός αυτός εγκαταστάθηκε στον ζυγό της Σταλίδας του νομού Ηρακλείου, στην ανατολική Κρήτη. Για την ακρίβεια, ο νέος υβριδικός σταθμός βρίσκεται στις θέσεις «Κουτρούλια & Άνω Λίμνη» του Δήμου Μαλίων του Νομού Ηρακλείου. Πρόκειται για μια τουριστική περιοχή με αρκετά υψηλές τιμές ζήτησης ενέργειας, ιδίως τις περιόδους του καλοκαιριού. Για τις ανάγκες της προσομοίωσης, ο σταθμός σχεδιάστηκε στο λογισμικό PowerWorld με ένα φορτίο το οποίο αντιπροσωπεύει την αντλία και έναν υδροστρόβιλο ο οποίος είναι υπεύθυνος για την παραγόμενη ενέργεια που διοχετεύεται στο δίκτυο (εικόνα 6.1). Θεωρήθηκε ότι το σύστημα αντλησιοταμίευσης διαθέτει διπλή σωλήνωση, έχοντας τη δυνατότητα για ταυτόχρονη φόρτιση και παραγωγή, με την αντίστοιχη άνοδο και κάθοδο του νερού από τις δύο διαφορετικές σωλήνες.

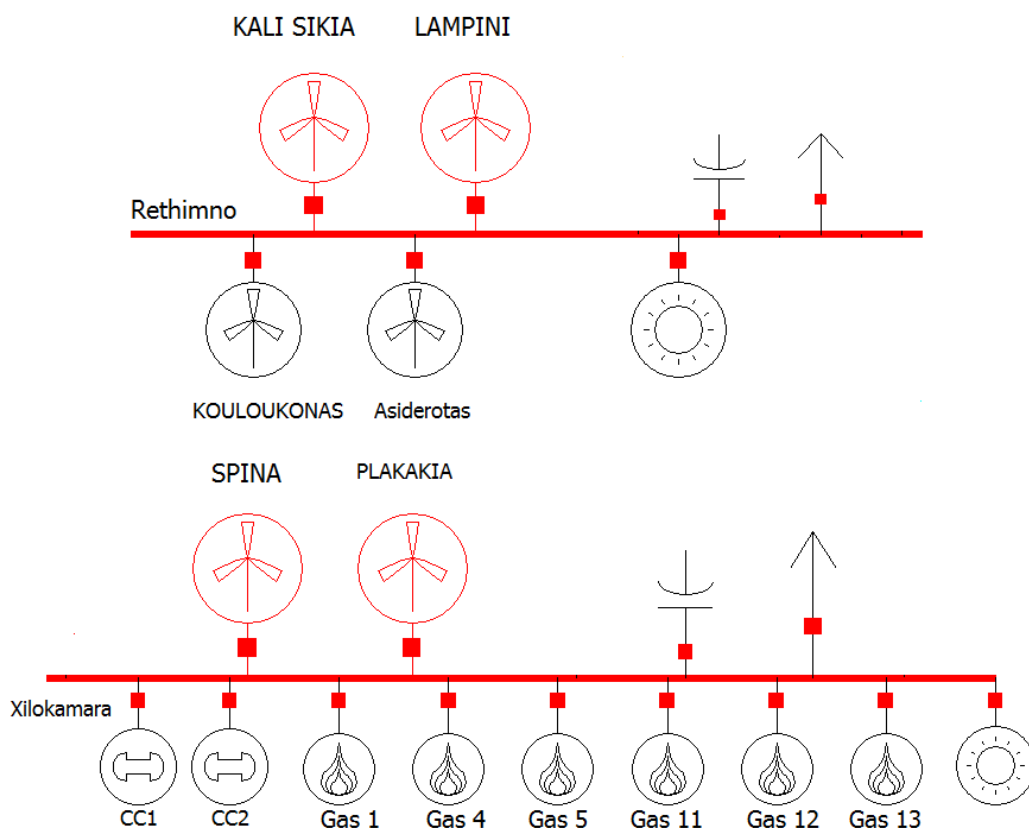


Εικόνα 6.1 Απεικόνιση υβριδικού σταθμού στο PowerWorld για το ζυγό της Σταλίδας

Για την φόρτιση του υβριδικού σταθμού, εγκαταστάθηκαν τέσσερα νέα αιολικά πάρκα των οποίων η εγκατεστημένη ισχύς είναι:

- Αιολικό πάρκο ισχύος 76MW στη θέση «Καλή Συκιά» του Δήμου Φοίνικα του Νομού Ρεθύμνου,
- Αιολικό πάρκο ισχύος 22.5MW στη θέση «Λαμπινή» του Δήμου Φοίνικα και Λάμπης του Νομού Ρεθύμνου,
- Αιολικό πάρκο ισχύος 22.5MW στη θέση «Σπίνα» του Δήμου Βουκολίων και Καντάνου του Νομού Χανίων,
- Αιολικό πάρκο ισχύος 45MW στη θέση «Πλακάκια» των Δήμων Βουκολίων, Πλατανιά και Μουσούρων του Νομού Χανίων.

Η συνολικής ισχύς των παραπάνω αιολικών πάρκων ανέρχεται στα 166 MW. Είναι μια εξαιρετικά μεγάλη ενίσχυση του αιολικού δυναμικού της Κρήτης, αν ληφθεί υπόψη ότι η εγκατεστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων του νησιού χωρίς τα τέσσερα παραπάνω, είναι 187,1 MW. Η εγκατάστασή τους έγινε στους ζυγούς των Χανίων και Ρεθύμνου (εικόνα 6.2), ενώ η ωριαία παραγωγή τους υπολογίστηκε υιοθετώντας τον συντελεστή χρησιμοποίησης γειτονικών πάρκων, γνωρίζοντας την ωριαία παραγωγή τους για όλο τον χρόνο. Η ισχύς των νέων αιολικών απορροφάται από τον υβριδικό σταθμό για την φόρτιση της διάταξης, εκτός από ειδικές περιπτώσεις όταν ο σταθμός είναι σε πλήρη φόρτιση, οπότε διοχετεύεται στο δίκτυο αν υπάρχουν περιθώρια απορρόφησης.



Εικόνα 6.2 Τα τέσσερα νέα αιολικά πάρκα του υβριδικού σταθμού

Στη συνέχεια ακολουθεί ο πίνακας 6.1 με την παραγωγή των αιολικών πάρκων (Καλή Συκιά, Λαμπινή, Σπίνα, Πλακάκια) για κάθε σενάριο. Δεν έχει συνυπολογιστεί η εξ' αρχής απορριπτόμενη ισχύς των αιολικών, η οποία αποκόπτεται λόγω υπέρβασης του άνω ορίου της παραγόμενης αιολικής ισχύος, $1,2 \times P_{pump}$, που σημειώθηκε μόνο στα σενάρια υψηλού ανέμου (HW). Η ετήσια παραγωγή των νέων ανεμογεννητριών έφτασε τις 501.675,77 MWh ξεπερνώντας την παραγωγή των παλιών κατά 123.912 MWh, ενώ η ετήσια αιολική ενέργεια που αποκόπηκε εξ' αρχής, είναι 5.257,04 MWh.

Πίνακας 6.1 Ημερήσια-Ετήσια παραγωγή των νέων αιολικών για κάθε σενάριο

Σενάριο	Ημερήσια παραγωγή (MWh)	Ετήσια παραγωγή (MWh)
LW	486,678	52.074,45
MW	1.182,97	172.712,36
HW	2.472,22	276.888,96
Σύνολο	-	501.675,77

6.3 Ένταξη μονάδων και εφεδρεία

Ο κανόνας που ακολουθήθηκε σε αυτό το σημείο, για τη στρεφόμενη εφεδρεία, δεν υπέστη κάποια αλλαγή και είναι ίδιος με την αρχική θεώρηση. Υπάρχει όμως μια διαφορά σχετικά με το φορτίο P_{Load} του κανόνα, το οποίο πλέον θεωρείται το συνολικό ωριαίο φορτίο από το οποίο έχει αφαιρεθεί η παραγωγή του υβριδικού σταθμού κάθε ώρα. Εξήγηση για αυτόν τον τρόπο διαχείρισης, αποτελεί το γεγονός ότι ο αντλησιοταμιευτικός σταθμός είναι μια μονάδα παραγωγής για το σύστημα που προσφέρει εγγυημένη παραγωγή ισχύος. Συνεπώς η λειτουργία του υβριδικού σταθμού καλύπτει ένα μέρος της ζήτησης ισχύος, το οποίο είναι ίσο με την παραγωγή ισχύος του και το υπόλοιπο καλύπτεται από τις θερμικές μονάδες, οι οποίες εντάσσονται μέσω της λίστας προτεραιότητας ανάλογα και με το φορτίο που δίνει ως αποτέλεσμα ο κανόνας της στρεφόμενης εφεδρείας, και τις μονάδες ΑΠΕ. Για τα νέα αιολικά πάρκα, θεωρήθηκε ότι εξυπηρετούν αποκλειστικά το φορτίο του υβριδικού σταθμού, οπότε δεν συμπεριλήφθηκαν στον κανόνα για τη στρεφόμενη εφεδρεία, παρά μόνο στην περίπτωση που υπάρχει δυνατότητα για επιπλέον προσφορά αιολικής ενέργειας στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή η ωριαία ισχύς των αιολικών που πρόκειται να διατεθεί στο δίκτυο, προστίθεται στην συνολική ωριαία ισχύ των αιολικών του ΣΗΕ P_{Air} , για τις ανάγκες του κανόνα της εφεδρείας.

6.4 Αποκοπή αιολικών πάρκων με την προσθήκη του υβριδικού σταθμού.

Αντικαθιστώντας τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από την εκτέλεση του αλγορίθμου για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων σχετικά με τα στοιχεία παραγωγής και ζήτησης του υβριδικού σταθμού, στο εργαλείο «Time Step» του λογισμικού «PowerWorld», προέκυψε η ανάγκη για εκ νέου απόρριψη αιολικού δυναμικού για τη διατήρηση της ασφάλειας του δικτύου. Η απόρριψη έγινε ξανά στα ίδια σενάρια (ML-HW, ML-MW, LL-HW,

LL-MW) με την ίδια ακριβώς λογική και μέθοδο, όπως στην αρχική περίπτωση που αναλύθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Η απορριπτόμενη αιολική ενέργεια είναι πλέον πολύ υψηλότερη στα σενάρια υψηλού ανέμου, καθώς η αντίστοιχη παραγόμενη είναι μεγαλύτερη της εγκαταστημένης ισχύς του υβριδικού με αποτέλεσμα το επιπλέον ποσό αυτό να οδηγείται στο δίκτυο για πρόσθετη απορρόφηση. Όπως είναι λογικό στα σενάρια LL-HW, ML-HW υπάρχουν περιορισμένα περιθώρια απορρόφησης με συνέπεια να αυξάνονται τα ποσά της απορριπτόμενης αιολικής ενέργειας, σε σύγκριση με την αρχική κατάσταση του δικτύου. Το σημαντικό είναι ότι στο σενάριο HL-HW η πρόσθετη αιολικής ισχύς που προσφέρεται στο δίκτυο, απορροφάται πλήρως αυξάνοντας σημαντικά την αιολική διείσδυση σε τέτοιες περιπτώσεις. Ο πίνακας 6.2 παραθέτει τα στοιχεία της αποκοπής αιολικής ενέργειας κατόπιν της εγκατάστασης του υβριδικού σταθμού.

Πίνακας 6.2 Αποκοπή αιολικών μετά την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού, ανά σενάριο

ΣΕΝΑΡΙΟ	Ποσό αποκοπής / σενάριο (MWh)	Ετήσια αποκοπή / σενάριο (MWh)
HL-HW	0	0
HL-MW	0	0
HL-LW	0	0
ML-HW	265,99	17.821,89
ML-MW	93,69	6.464,92
ML-LW	0	0
LL-HW	1.933,08	42.527,81
LL-MW	313,47	14.419,62
LL-LW	0	0
Σύνολο	-	81.234,24

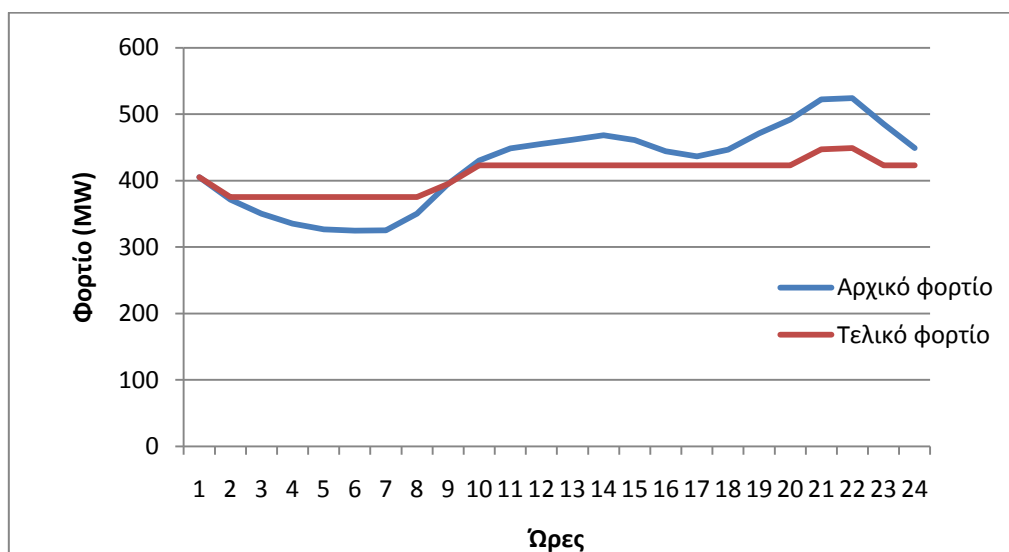
6.5 Στοιχεία ζήτησης του υβριδικού σταθμού.

Η ζήτηση ισχύος του υβριδικού σταθμού οφείλεται στη λειτουργία της αντλίας που έχει εγκατεστημένη ισχύ $P_{pump}=100\text{MW}$ με $\cos\varphi=0,85$, ενώ είναι άμεσα συνυφασμένη με την παραγωγή ισχύος των αιολικών πάρκων που τον εξυπηρετούν. Συνεπώς επιδιώκεται η «έντονη» φόρτιση του σταθμού σε σενάρια υψηλού ανέμου. Για το λόγο αυτόν η ζήτηση της αντλησιοταμειευτικής διάταξης είναι μεγαλύτερη σε περιόδους υψηλού ανέμου, όπως παρουσιάζει ο πίνακας 6.3. Η ζήτηση ισχύος της αντλίας είναι μη μηδενική για όλο το 24ωρο όλων των σεναρίων, απορροφώντας στο μέγιστο την αιολική ισχύ των πάρκων. Όπως αναλύθηκε και παραπάνω μόνο στο σενάρια υψηλού ανέμου (HW), η αντλία δεν μπορεί να εκμεταλλευθεί στο έπακρον την αιολική ισχύ, καθώς ξεπερνάει την εγκατεστημένη της ισχύ με αποτέλεσμα το πλεόνασμα αυτό να προσφέρεται στο δίκτυο για επιπλέον απορρόφηση.

Πίνακας 6.3 Φορτίο υβριδικού σταθμού για κάθε σενάριο

Σενάριο	Ημερήσια ζήτηση Υβριδικού / σενάριο (MWh)	Ετήσια ζήτηση Υβριδικού / σενάριο (MWh)
HL-HW	2.243,24	51.594,61
HL-MW	1.182,96	36.671,80
HL-LW	729,19	5.104,34
ML-HW	2.243,24	150.297,35
ML-MW	1.182,96	81.624,33
ML-LW	486,68	27.253,92
LL-HW	1.653,13	36.368,75
LL-MW	1.182,96	54.416,22
LL-LW	486,68	21.413,79
Σύνολο	-	464.745,11

Η ενέργεια που παράγεται από τα αιολικά πάρκα είναι επαρκής για την ικανοποίηση της ζήτησης από την αντλία. Εξάιρεση αποτελεί το σενάριο HL-LW στο οποίο η αιολική ενέργεια του σταθμού είναι σημαντικά χαμηλότερη από την απαιτούμενη ενέργεια. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται για τις 7 μεσημεσιονύχτιες ώρες του σεναρίου, 01:00 - 07:00, με αποτέλεσμα η κάλυψη της ζήτησης που προκύπτει από τη λειτουργία της αντλίας, να γίνεται από το δίκτυο. Η συνολική ημερήσια ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας του αντλησιοταμιευτικού σταθμού από το δίκτυο, για την ημέρα του HL-LW σεναρίου, είναι 242,51 MWh. Το διάγραμμα της εικόνας 6.3, τονίζει την διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων φορτίου, για το HL-LW σενάριο. Η μία περίπτωση (α) αφορά το συνολικό φορτίο του συστήματος για το εξεταζόμενο σενάριο, χωρίς την προσθήκη του υβριδικού σταθμού, ενώ η δεύτερη (β) το αντίστοιχο φορτίο με την λειτουργία του σταθμού. Εύκολα γίνονται αντιληπτές οι πρώτες πρωινές ώρες όπου η εξυπηρέτηση της αντλίας πραγματοποιείται από το δίκτυο, με την καμπύλη του φορτίου για την περίπτωση (β) να είναι πάνω από εκείνη της (α) για το συγκεκριμένο διάστημα. Στις υπόλοιπες περιπτώσεις οι τιμές ζήτησης της (β) είναι μικρότερες στην περίπτωση λειτουργίας του υδροστροβίλου, ή ίσες με εκείνες της (α), όταν εκείνος δεν λειτουργεί.



Εικόνα 6.3 Σύγκριση φορτίου για το σενάριο HL-LW, πριν και μετά τον υβριδικό σταθμό

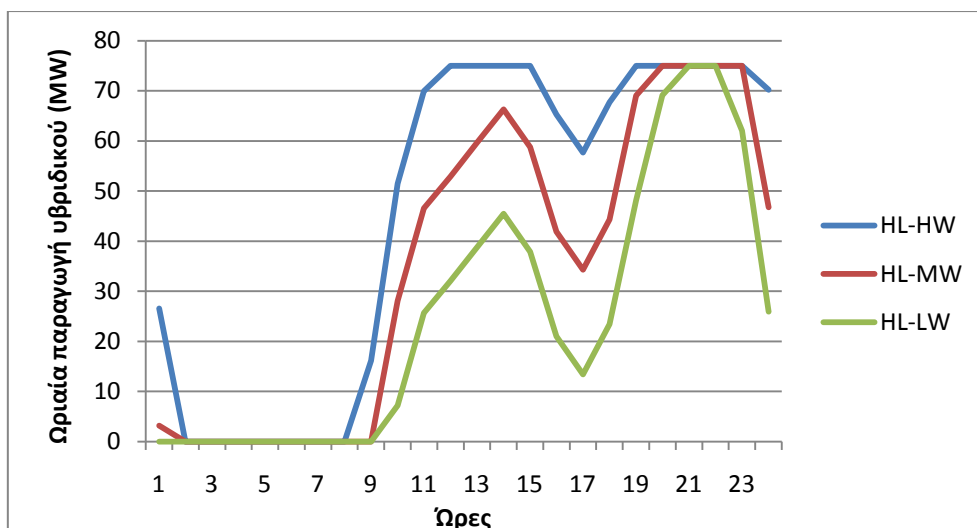
6.6 Στοιχεία παραγωγής του υβριδικού σταθμού.

Η παραγωγή του υβριδικού σταθμού οφείλεται στη λειτουργία του υδροστροβίλου. Το νερό κινούμενο από το ανώτερο προς το κατώτερο επίπεδο διαμέσου της ειδικής σωλήνωσης, αλληλεπιδρά με τον υδροστροβίλο, με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η εγκατεστημένη ισχύς του υδροστροβίλου είναι $P_{Hydro}=75$ MW, με τη χωρητικότητα της δεξαμενής να είναι 1100 MWh. Η λειτουργία του υδροστροβίλου ενδείκνυται για ώρες υψηλής ζήτησης όπου υπάρχει η δυνατότητα σημαντικής ελάττωσης του λειτουργικού κόστους, με το σβήσιμο «ακριβών» μονάδων, όπως είναι οι αεριοστροβιλικές μονάδες. Ενδεικτικό είναι και το γράφημα της εικόνας 6.3, όπου η μεγαλύτερη διαφορά μεταξύ των δύο περιπτώσεων φορτίου παρατηρείται τις ώρες αιχμής (21:00 - 22:00), τονίζοντας τη σημαντική συμβολή του υδροστροβίλου τις ώρες εκείνες. Η λειτουργία του τμήματος παραγωγής της αντλησιοταμιευτικής διάταξης έφτασε τις 5191 ώρες/έτος, με ετήσια συνολική παραγωγή ίση με 264.213,97 MWh. Ο πίνακας 6.4 παρουσιάζει την παραγωγή του υβριδικού σταθμού για όλα τα σενάρια.

Πίνακας 6.4 Παραγωγή υβριδικού σταθμού ανά σενάριο

ΣΕΝΑΡΙΟ	Παραγωγή σεναρίου (MWh)	Ετήσια παραγωγή σεναρίου (MWh)
HL-HW	1.100,00	25.300,00
HL-MW	851,73	26.403,70
HL-LW	600,00	4.200,00
ML-HW	1.100,00	73.700,00
ML-MW	851,73	58.769,52
ML-LW	350,41	19.622,82
LL-HW	600,00	13.200,00
LL-MW	600,00	27.600,00
LL-LW	350,41	15.417,93
Σύνολο	-	264.213,97

Το γράφημα της εικόνας 6.4 απεικονίζει την παραγωγή του υβριδικού σταθμού για τα τρία διαφορετικά σενάρια υψηλής ζήτησης. Όπως είναι φανερό, η παραγωγή του υδροστροβίλου αυξάνεται όσο μεγαλώνει η αιολική παραγωγή. Τα μεγαλύτερα ποσά αιολικής ενέργειας οδηγούν σε αύξηση της αποθηκευμένης ενέργειας στο σταθμό, με αποτέλεσμα την υψηλότερη παραγωγή του υδροστροβίλου στη διάρκεια της ημέρας. Το σημαντικό στοιχείο όμως εδώ, είναι ότι στις ώρες αιχμής ο υδροστροβίλος παρέχει στο δίκτυο ισχύ ίση με $P_{Hydro}=75$ MW, ανεξάρτητα από τα διαφορετικά ποσά αιολικής παραγωγής του κάθε σεναρίου. Συνεπώς, το χρήσιμο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί στο σημείο αυτό, είναι ότι ο σταθμός απορροφά την ενέργεια των αιολικών του, κατά την διάρκεια της ημέρας, με στόχο την προσφορά των μέγιστων στις ώρες αιχμής. Αν υπάρχει η δυνατότητα για επιπλέον προσφορά τις υπόλοιπες ώρες, τότε αυτό πραγματοποιείται πάντα ανάλογα με τη διαθεσιμότητα της ενέργειας του σταθμού.



Εικόνα 6.4 Ωριαία παραγωγή του υβριδικού σταθμού, για τα τρία σενάρια HL

6.7 Αξιολόγηση των αποτελεσμάτων

6.7.1 Παραγωγή συμβατικών μονάδων

Η ύπαρξη της αντλίας του υβριδικού σταθμού, οδηγεί στην αύξηση της συνολικής ζήτησης φορτίου και ως συνέπεια στην αύξηση της συνολικής παραγωγής του συστήματος. Η κάλυψη της ζήτησης της αντλίας από τα νέα αιολικά και η διείσδυση τους στα σενάρια υψηλού ανέμου, οδήγησαν σε περίπου 17,6% αύξηση της συνολικής παραγωγής του συστήματος. Απομονώνοντας τις θερμικές μονάδες από το υπόλοιπο σύστημα, παρατίθενται τα στοιχεία παραγωγής τους στους δύο πίνακες που ακολουθούν (πίνακες 6.5, 6.6). Υπάρχει σαφέστατη μείωση της παραγωγής για κάθε σενάριο, με τη μεγαλύτερη να παρατηρείται στα σενάρια υψηλού ανέμου, εκτός από το σενάριο LL-HW (κάτι που θα εξηγηθεί αργότερα). Υπολογίζοντας την ετήσια παραγωγή των συμβατικών μονάδων σύμφωνα με τον πίνακα 6.6, σημειώθηκε μια μείωση στην ετήσια παραγωγή των συμβατικών μονάδων ίση με 268,2 GWh και ποσοστό μείωσης της ετήσιας παραγωγής ίσο με 11,93%.

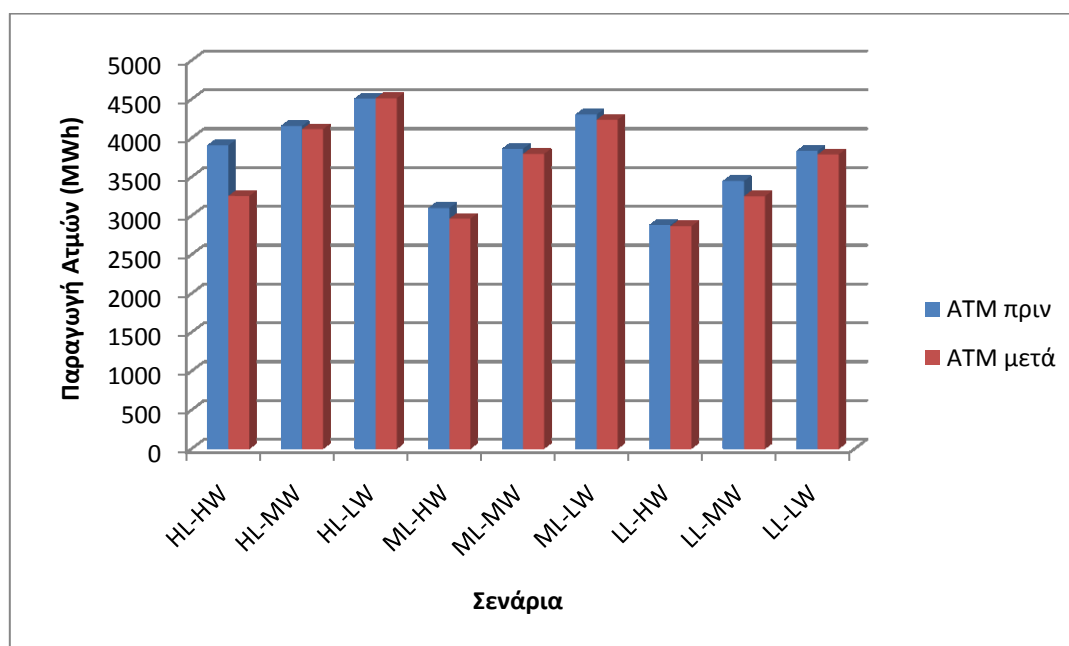
Πίνακας 6.5 Παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο

Σενάριο	Παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο χωρίς Υβριδικό (MWh)	Παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο με Υβριδικό (MWh)
HL-HW	8.290,88	6.905,97
HL-MW	9.465,15	8.607,92
HL-LW	10.080,88	9.727,94
ML-HW	5.353,15	4.161,49
ML-MW	6.582,92	5.699,92
ML-LW	7.111,85	6.758,25
LL-HW	3.599,44	3.337,77
LL-MW	4.297,56	3.748,92
LL-LW	4.678,88	4.320,90

Πίνακας 6.6 Ετήσια παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο

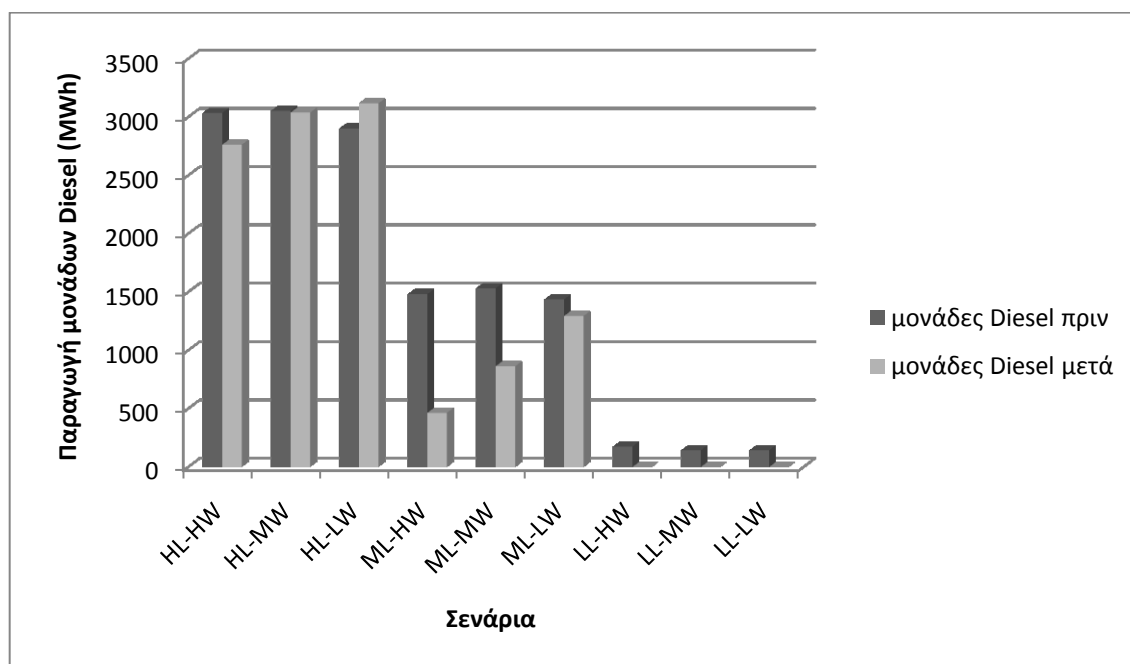
Σενάριο	Ετήσια παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο χωρίς Υβριδικό (MWh)	Ετήσια παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο με Υβριδικό (MWh)
HL-HW	190.690,28	158.837,39
HL-MW	293.419,56	266.845,62
HL-LW	70.566,16	68.095,58
ML-HW	358.661,06	278.820,13
ML-MW	454.221,22	393.294,21
ML-LW	398.263,80	378.461,91
LL-HW	79.187,78	73.430,97
LL-MW	197.687,54	172.450,22
LL-LW	205.870,80	190.119,51
Σύνολο	2.248.568,20	1.980.355,53

Στα γραφήματα που ακολουθούν, παρατίθενται τα αποτελέσματα σχετικά με την ημερήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε σενάριο ξεχωριστά, ανά τύπο συμβατικών μονάδων. Η παραγωγή των μονάδων ατμού, όπως διακρίνεται στην εικόνα 6.5, είναι σχετικά σταθερή πριν και μετά την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού. Με εξαίρεση το σενάριο HL-HW στο οποίο παρατηρείται μια σχετικά μεγάλη μείωση, λόγω και της αυξημένης διείσδυσης των τεσσάρων νέων αιολικών πάρκων, στα υπόλοιπα σενάρια η παραγωγή πριν και μετά τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού παραμένει σχεδόν σταθερή. Αυτό οφείλεται στην υπόθεση που έχει γίνει, ότι δηλαδή, οι μονάδες ατμού του νησιού (εκτός του ATM1 των Λινοπεραμάτων) είναι οι μονάδες βάσεις και έχουν θεωρηθεί ως «must run units». Λειτουργούν για όλο το 24ωρο κάθε σεναρίου, με συνέπεια να μην υπάρχουν σημαντικές διαφοροποιήσεις στην παραγωγή τους.



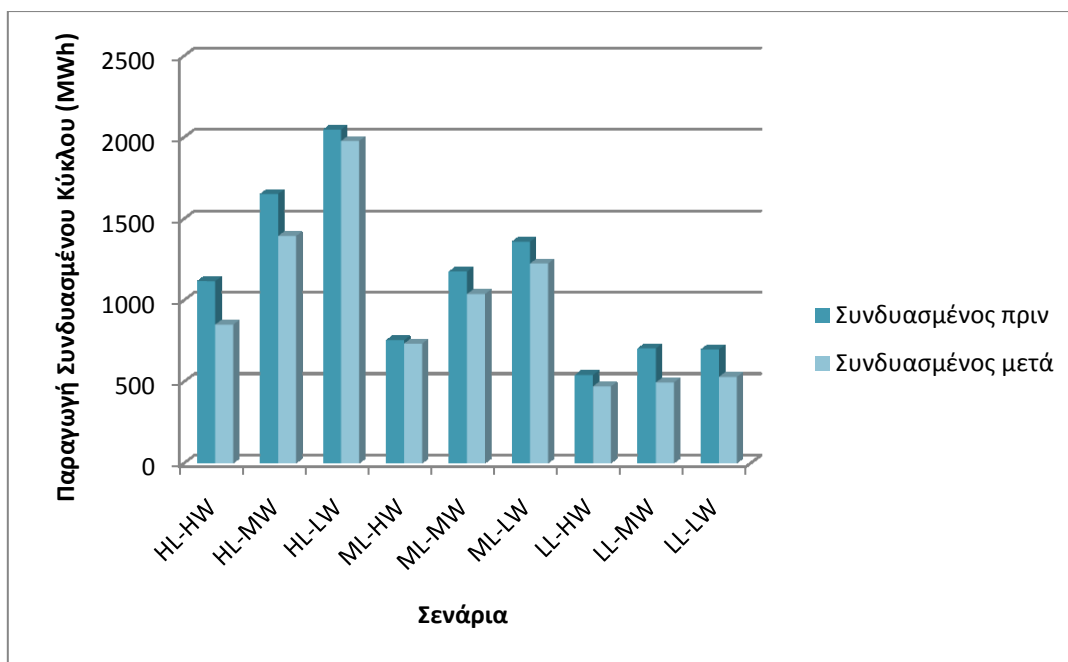
Εικόνα 6.5 Παραγωγή μονάδων ατμού ανά σενάριο, πριν και μετά τον υβριδικό σταθμό

Η εικόνα 6.6 απεικονίζει την ημερήσια παραγωγή των μονάδων Diesel για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια. Για την περίπτωση των σεναρίων υψηλής ζήτησης (HL) δεν υπάρχουν αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις και μάλιστα στο σενάριο HL-LW η εγκατάσταση του υδροστρόβιλου οδηγεί σε αύξηση της παραγωγή των συγκεκριμένων γεννητριών. Το γεγονός αυτό εξηγείται με την ζήτηση της αντλίας του υβριδικού σταθμού, η οποία εξυπηρετείται από το δίκτυο καθώς δεν αρκεί η παραγωγή των τεσσάρων νέων αιολικών. Η ζήτηση αυτή παρατηρείται τις πρώτες πρωινές ώρες, οπότε μέσω του κανόνα της εφεδρείας, ενεργοποιούνται έως και δύο ντιζελογεννήτριες επιπλέον. Για τα σενάρια μέσου φορτίου, η μείωση της παραγωγής των μονάδων ντίζελ, είναι ανάλογη της αιολικής παραγωγής. Για το σενάριο ML-HW στις ώρες αιχμής, η λειτουργία του υβριδικού σταθμού οδηγεί στην απενεργοποίηση έως και τεσσάρων ντιζελογεννητριών. Τέλος για τα σενάρια χαμηλού φορτίου δεν λειτουργούν πλέον μονάδες diesel, ούτε και στις ώρες αιχμής.

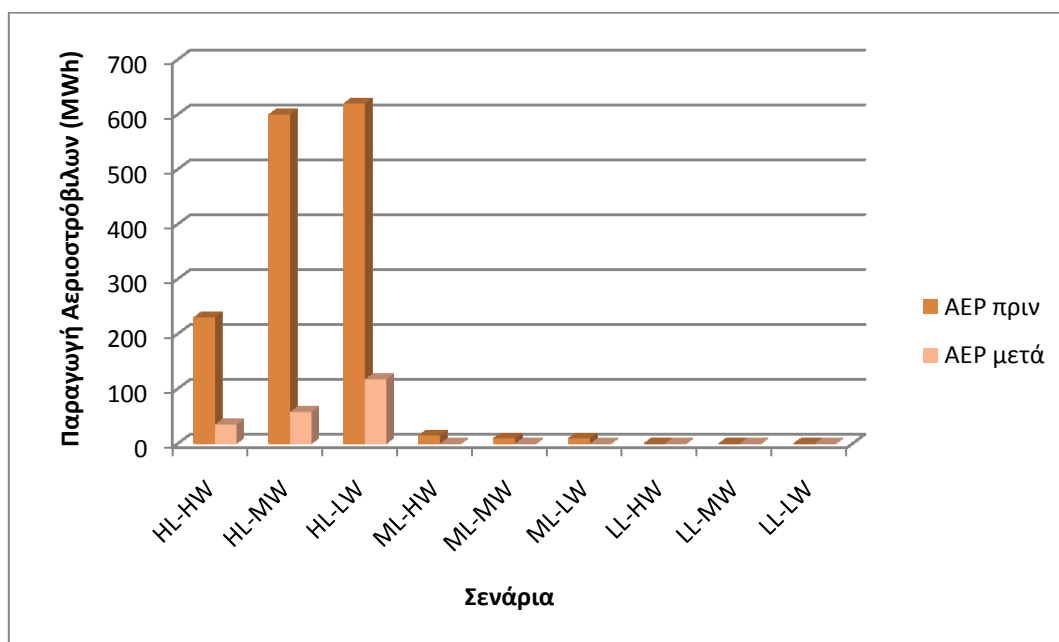


Εικόνα 6.6 Παραγωγή μονάδων Diesel ανά σενάριο, πριν και μετά τον υβριδικό σταθμό

Ο συνδυασμένος κύκλος στο ζυγό της Ξυλοκαμάρας, είναι μια σχετικά ακριβή μονάδα παραγωγής που έχει χωριστεί σε δύο διαφορετικά μέρη, ως δύο ανεξάρτητες μονάδες. Το πρώτο μέρος έχει οριστεί ως «must run unit» και βρίσκεται πάντα σε λειτουργία. Σύμφωνα με την εικόνα 6.7, η λειτουργία του υβριδικού σταθμού και των αιολικών του, επιφέρει μείωση της παραγωγής του για όλα τα σενάρια. Η μείωση αυτή οφείλεται ως ένα βαθμό, στη σημαντική μείωση της λειτουργίας του δεύτερου μέρους του συνδυασμένου κύκλου, που απενεργοποιείται για τις χαμηλότερες πλέον τιμές φορτίου.



Εικόνα 6.7 Παραγωγή συνδυασμένου κύκλου ανά σενάριο, πριν και μετά τον υβριδικό σταθμό

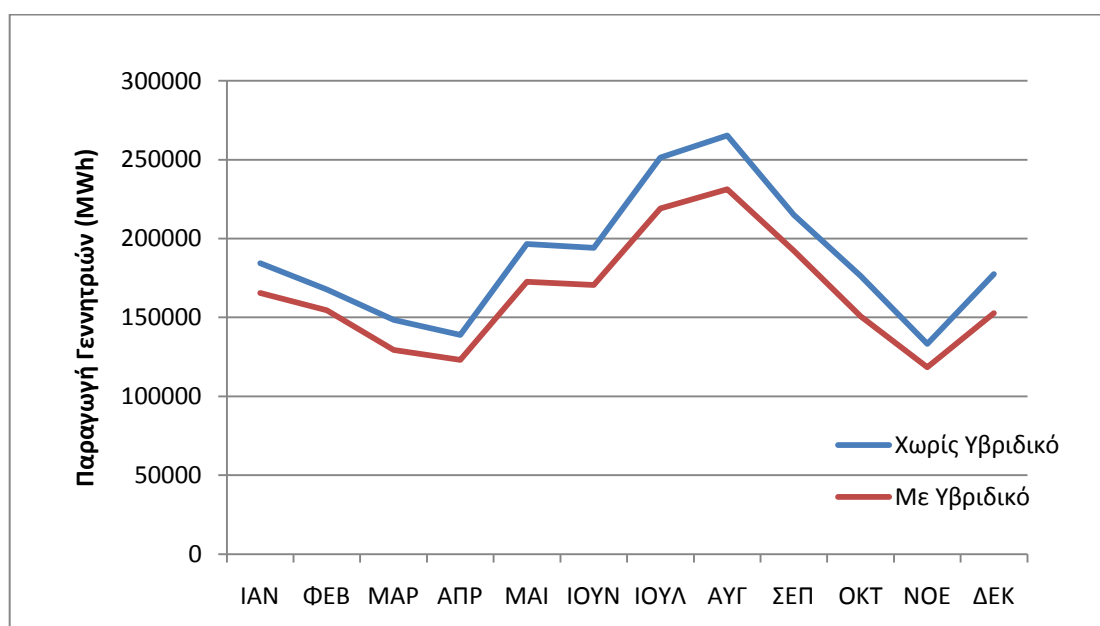


Εικόνα 6.8 Παραγωγή αεριοστρόβιλων ανά σενάριο, πριν και μετά τον υβριδικό σταθμό

Οι αεριοστροβιλικές μονάδες αποτελούν τις πιο ακριβές μονάδες του συστήματος και για το λόγο αυτό βρίσκονται στο τέλος της λίστας προτεραιότητας για την ένταξη των μονάδων. Πριν την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού η παραγωγή των μονάδων αυτών στα σενάρια HL-MW και HL-LW είναι αρκετά κοντά σε τιμή, ενώ αρκετά περιορισμένη για το σενάριο HL-HW. Υπενθυμίζεται ότι ο άνεμος στο σενάριο LW είναι αρκετά χαμηλός για όλες τις ώρες, ενώ για το σενάριο MW οι τιμές της αιολικής παραγωγής είναι υψηλές τις πρώτες πρωινές ώρες, που οι αεριοστρόβιλοι δεν είναι σε λειτουργία και χαμηλές τις ώρες αιχμής, όταν εκείνοι εντάσσονται. Αντίθετα στην περίπτωση υψηλού ανέμου (HW) οι τιμές αιολικής

ισχύος είναι υψηλές με αρκετά μεγάλες τιμές τις ώρες αιχμής, περιορίζοντας σημαντικά τη λειτουργία των αεριοστρόβιλων. Η εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού, σημειώνει σημαντικά πλεονεκτήματα σχετικά με την ακριβή λειτουργία των συγκεκριμένων μονάδων. Σύμφωνα με την εικόνα 6.8, στα σενάρια μέσου φορτίου, για όλες τις περιπτώσεις αιολικής παραγωγής, δεν υπάρχουν πλέον αεριοστρόβιλοι σε λειτουργία. Στα σενάρια υψηλής ζήτησης (HL) η μείωση της παραγόμενης ενέργειας τους είναι έντονα διακριτή. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι πλέον στις ώρες αιχμής, λειτουργούν το πολύ δύο αεριοστρόβιλοι (ένας τις περισσότερες ώρες) ενώ πριν την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού, εντάσσονταν έως και τέσσερις τέτοιες μονάδες αντίστοιχα. Συνεπώς στο σημείο αυτό, επιβεβαιώνεται ένας από τους στόχους της εγκατάστασης του αντλησιοταμιευτικού σταθμού, η ελάττωση δηλαδή μονάδων με αρκετά υψηλό κόστος λειτουργίας. Όμως εδώ το κέρδος είναι διπλό, καθώς πλέον αλλάζει και ο ρόλος των περισσότερων αεριοστροβίλων. Θεωρούνται ως μονάδες αιχμής, όμως η σπάνια πλέον ένταξη τους, τις καθιστά χρήσιμες μονάδες για περιπτώσεις βλαβών, σέρβις και γενικότερα για περιπτώσεις ανάγκης.

Ο συλλογισμός ότι η μεγαλύτερη μείωση της παραγωγής παρατηρείται στα σενάρια υψηλού ανέμου, επιβεβαιώνεται και από το ακόλουθο διάγραμμα. Το διάγραμμα της εικόνας 6.9 απεικονίζει την πορεία της μηνιαίας παραγωγής των θερμικών μονάδων, για τις περιπτώσεις του συστήματος πριν και μετά την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού. Η μείωση της παραγόμενης ενέργειας των γεννητριών είναι εμφανής για όλους τους μήνες του έτους, με τη διαφορά των δύο καμπυλών να είναι μεγαλύτερη κατά την καλοκαιρινή περίοδο. Αυτό οφείλεται στο αυξημένο αιολικό δυναμικό των τεσσάρων νέων αιολικών πάρκων του υβριδικού σταθμού. Υψηλή αιολική παραγωγή, σημαίνει μεγαλύτερες ποσότητες αποθήκευσης ενέργειας για τον υβριδικό σταθμό και συνεπώς μεγαλύτερη συμμετοχή του στο σύνολο της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε τέτοια σενάρια υψηλού ανέμου, υπάρχουν και περιπτώσεις διείσδυσης των νέων αιολικών πάρκων στο δίκτυο, που είναι πιθανόν να μειώνουν ακόμα περισσότερο την παραγωγή από συμβατικές μονάδες.



Εικόνα 6.9 Μηνιαία παραγωγή γεννητριών, πριν και μετά τον υβριδικό σταθμό

6.7.2 Κόστος κατανάλωσης καυσίμου συμβατικών μονάδων

Το κόστος κατανάλωσης καυσίμου των συμβατικών μονάδων, ακολουθεί την συμπεριφορά της παραγωγής, όπως αναλύθηκε παραπάνω. Αυτό σημαίνει ότι η μείωση του κόστους είναι φανερή για όλα τα εξεταζόμενα σενάρια, έπειτα από την τοποθέτηση του υβριδικού σταθμού. Η μεγαλύτερη εξοικονόμηση αναφορικά με την κατανάλωση καυσίμου, παρατηρείται στα σενάρια υψηλού ανέμου (πίνακας 6.7) με τα ετήσια οικονομικά οφέλη σύμφωνα με τον πίνακα 6.8, να αγγίζουν τα 40,1 εκατομμύρια ευρώ, με ποσοστό μείωσης του ετήσιου κόστους καυσίμου ίσο με 11,06%.

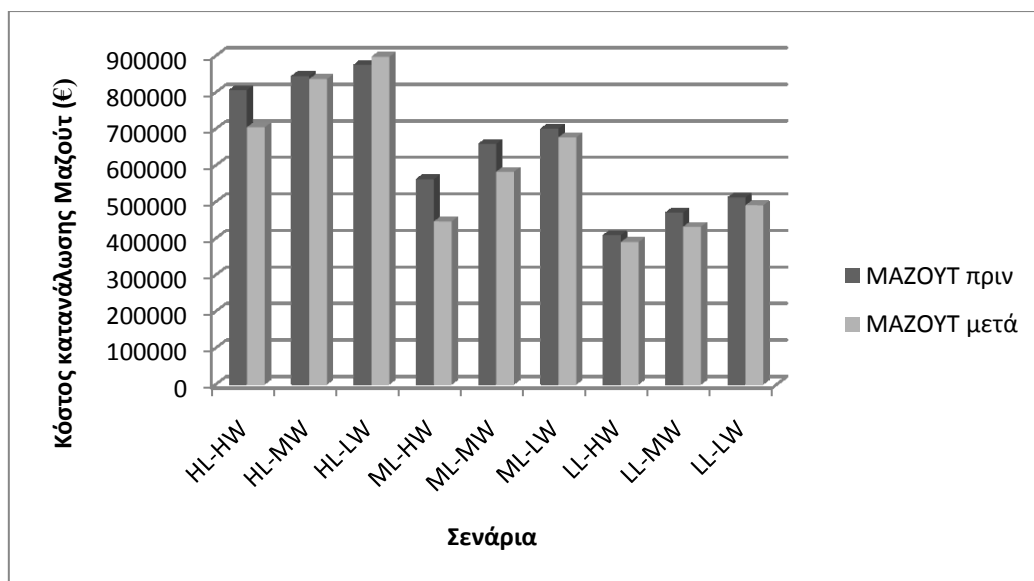
Πίνακας 6.7 Ημερήσιο κόστος παραγωγής γεννητριών ανά σενάριο

Σενάριο	Ημερήσιο κόστος Σεναρίου χωρίς Υβριδικό(€)	Ημερήσιο κόστος Σεναρίου με Υβριδικό (€)
HL-HW	1.328.704,82	1.082.694,04
HL-MW	1.509.219,19	1.292.810,07
HL-LW	1.603.816,05	1.484.051,65
ML-HW	885.336,86	757.706,74
ML-MW	1.039.370,33	935.000,67
ML-LW	1.108.089,96	1.055.953,29
LL-HW	638.814,31	589.960,83
LL-MW	722.432,51	629.901,46
LL-LW	757.687,81	692.994,09

Πίνακας 6.8 Ετήσιο κόστος παραγωγής γεννητριών

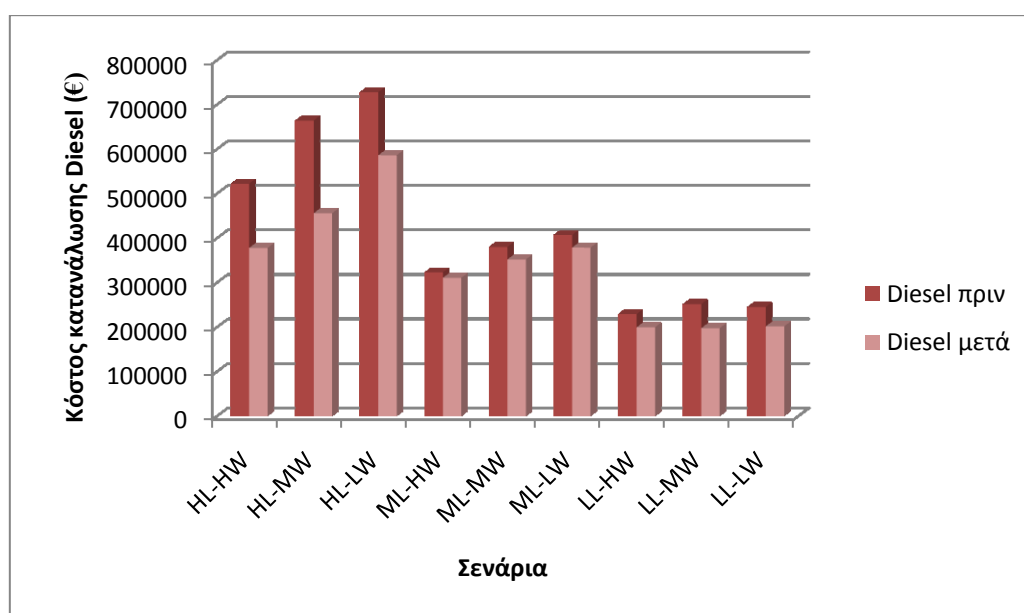
Σενάριο	Ετήσιος κόστος Σεναρίου χωρίς Υβριδικό (€)	Ετήσιος κόστος Σεναρίου με Υβριδικό (€)
HL-HW	30.560.210,96	24.901.962,81
HL-MW	46.785.794,74	40.077.112,23
HL-LW	11.226.712,37	10.388.361,52
ML-HW	59.317.569,38	50.766.351,55
ML-MW	71.716.552,86	64.515.046,37
ML-LW	62.053.037,64	59.133.384,24
LL-HW	14.053.914,92	12.979.138,33
LL-MW	33.231.895,26	28.975.467,24
LL-LW	33.338.263,65	30.491.740,17
ΣΥΝΟΛΟ	362.283.951,80	322.228.564,46

Τα δύο γραφήματα που ακολουθούν (εικόνες 6.10, 6.11), προβάλλουν την κατανάλωση καυσίμου μαζούτ και ντίζελ αντίστοιχα, για τα εννέα εξεταζόμενα σενάρια. Το κόστος καυσίμου των μονάδων που καταναλώνουν μαζούτ, των μονάδων ατμού και των ντιζελογεννητριών δηλαδή, εμφανίζεται ιδιαίτερα μειωμένο για όλα σχεδόν τα σενάρια, με ιδιαίτερη ελάττωση στις δύο περιπτώσεις υψηλού ανέμου, HL-HW και ML-HW. Αντίθετα, καταγράφεται μια μικρή αύξηση στο σενάριο HL-LW κάτι, που όπως αναλύθηκε και νωρίτερα, οφείλεται στην εξυπηρέτηση της ζήτησης της αντλίας για κάποιες ώρες, για τον αντλησιοταμειευτικό σταθμό, από το δίκτυο.



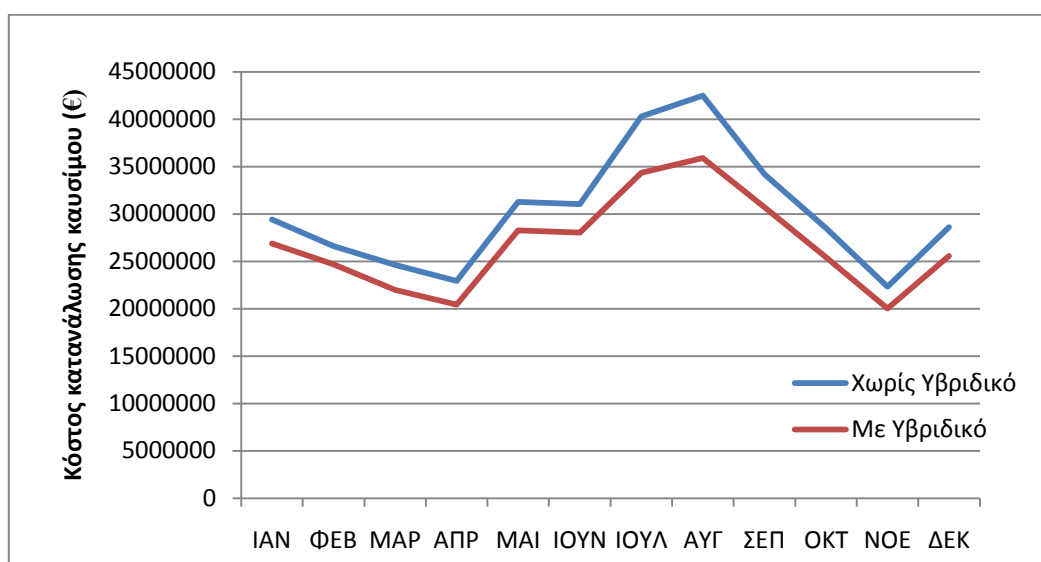
Εικόνα 6.10 Κόστος κατανάλωσης μαζούτ ανά σενάριο, πριν και μετά τον υβριδικό

Η κατανάλωση καυσίμου Diesel, αφορά τις αεριοστροβιλικές μονάδες και εκείνη του συνδυασμένου κύκλου. Σύμφωνα με το γράφημα της εικόνας 6.11 παρατηρούνται εξαιρετικά οικονομικά οφέλη σχετικά με το κόστος καυσίμου Diesel και για τα εννέα σενάρια, κυρίως για τα σενάρια υψηλής ζήτησης. Η μείωση της παραγωγής της μονάδας του συνδυασμένου κύκλου σε συνδυασμό με την μείωση παραγωγής των αεριοστροβίλων, ύστερα από την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού, προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση χρημάτων. Πιο συγκεκριμένα, η ημερήσια εξοικονόμηση καυσίμου Diesel για το σενάριο HL-MW έφτασε τα 208.231,3€. Συνεπώς, ενώ η παραγωγή των μονάδων που καταναλώνουν καύσιμο Diesel είναι σαφώς μικρότερη από την αντίστοιχη εκείνων με καύσιμο μαζούτ, το κόστος παραγωγής τους κρίνεται ιδιαίτερα υψηλό. Η εξαιρετική εξοικονόμηση που επιτυγχάνεται στο σημείο αυτό, αποτελεί αξιοσημείωτη επιτυχία για τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού αναφορικά με τις δαπάνες καυσίμου.



Εικόνα 6.11 Κόστος κατανάλωσης Diesel ανά σενάριο, πριν και μετά τον υβριδικό

Σύμφωνα με την εικόνα 6.12, το μηνιαίο κόστος καυσίμου για το ΣΗΕ της Κρήτης έχει την ίδια μορφή με εκείνο της μηνιαίας παραγωγής της εικόνας 6.9. Η διαφορά μεταξύ των δύο καμπυλών (μπλε - κόκκινη) που αντιπροσωπεύουν την μηνιαία κατανάλωση καυσίμου πριν και μετά την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού αντίστοιχα, είναι και πάλι μεγαλύτερη τους καλοκαιρινούς μήνες. Και για την ακρίβεια μεγαλύτερη και από εκείνη της εικόνας 6.9. Πέρα, λοιπόν, από το υψηλό αιολικό δυναμικό των τεσσάρων νέων αιολικών πάρκων του αντλησιοταμιευτικού σταθμού, υπάρχει και ένας επιπλέον σημαντικός παράγοντας. Η ζήτηση φορτίου την καλοκαιρινή περίοδο είναι ιδιαίτερα υψηλή. Συνεπώς, αρκετές από τις αεριοστροβιλικές μονάδες είναι σε λειτουργία εκείνη την περίοδο. Ο υβριδικός σταθμός όμως, ύστερα από την εγκατάσταση του, διαθέτει υψηλές τιμές παραγωγής εκείνη την περίοδο θέτοντας εκτός λειτουργίας τις περισσότερες από εκείνες τις ακριβές μονάδες παραγωγής. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια την σημαντικής αύξηση των οικονομικών οφελών σχετικά με το κόστος κατανάλωσης καυσίμου.



Εικόνα 6.12 Μηνιαίο κόστος γεννητριών, πριν και μετά τον υβριδικό σταθμό

6.7.3 Αιολική παραγωγή

Ένα ζήτημα που τίθεται με την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού, είναι η αύξηση της αιολικής διείσδυσης. Τα τέσσερα νέα αιολικά πάρκα έχουν εγκατεστημένη ισχύ 166 MW, συνεπώς, είναι φανερό ότι η αιολική διείσδυση θα αυξηθεί αισθητά. Σύμφωνα με την παρούσα έρευνα, η παραγωγή των νέων αιολικών πάρκων καλύπτουν τις ανάγκες της αντλίας του αντλησιοταμιευτικού σταθμού για όλα τα σενάρια, πλην κάποιων ωρών του σεναρίου HL-LW όπου το αιολικό δυναμικό δεν επαρκεί για τη φόρτιση του σταθμού, ζητώντας ισχύ από το δίκτυο για ορισμένες πρωινές ώρες. Μάλιστα στις περιπτώσεις υψηλού αιολικού δυναμικού (HW), υπάρχει περίσσεια αιολική ενέργεια, με μέγιστη ωριαία ισχύ ίση με 20 MW/hr για τα σενάρια HL-HW, ML-HW και 118 MW/hr για το σενάριο LL-HW, η οποία διατίθεται στο δίκτυο για επιπλέον απορρόφηση. Ο πίνακας 6.9 παραθέτει την διείσδυση των αιολικών πάρκων για κάθε σενάριο. Τονίζεται ότι στα στοιχεία αυτά δεν έχει υπολογιστεί η συνεισφορά των τεσσάρων αιολικών πάρκων για την κάλυψη των αναγκών ζήτησης της αντλίας. Αντίθετα, η επιπλέον αιολική ενέργεια που διατίθεται στο δίκτυο, έχει

συμπεριληφθεί κανονικά. Η ιδέα για το συλλογισμό αυτό, έχει άμεση σχέση με το γεγονός ότι σε περίπτωση που κριθεί απαραίτητη η αποκοπή αιολικής ενέργειας, θα πραγματοποιηθεί στα αιολικά πάρκα που συνεισφέρουν στο δίκτυο και σε καμία περίπτωση σε εκείνα που συμβάλλουν στην φόρτιση του υβριδικού σταθμού.

Πίνακας 6.9 Αιολική διείσδυση ανά σενάριο πριν και μετά τον υβριδικό σταθμό

Σενάρια	Αιολική διείσδυση χωρίς Υβριδικό (MWh)	Αιολική διείσδυση με Υβριδικό (MWh)
HL-HW	2.060,97	2.289,95
HL-MW	848,25	848,25
HL-LW	215,80	215,80
ML-HW	1.989,78	2.023,95
ML-MW	748,53	754,55
ML-LW	215,80	215,80
LL-HW	1.291,65	946,99
LL-MW	590,19	534,78
LL-LW	215,80	215,80

Εξετάζοντας τα στοιχεία του παραπάνω πίνακα 6.9, προκύπτουν τα εξής αποτελέσματα: Όντας αναμενόμενο, η αιολική διείσδυση στα δύο διαφορετικά σενάρια υψηλού αιολικού δυναμικού HL-HW, ML-HW, είναι αρκετά αυξημένη, με το δίκτυο να αφομοιώνει επιπλέον αιολική ενέργεια. Η πρόσθετη αυτή ενέργεια των νέων πάρκων του υβριδικού σταθμού, απορροφάται πλήρως από το δίκτυο στο σενάριο HL-HW, ενώ υπόκειται σε αποκοπή, για το σενάριο ML-HW με κύριο σκοπό τη διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος. Αποκοπή συμβαίνει και στο σενάριο LL-HW, που όπως διακρίνεται από τον πίνακα 6.9 η διείσδυση του ανέμου, είναι σαφώς μικρότερη σε σχέση με την αρχική κατάσταση του ΣΗΕ της Κρήτης για το σενάριο αυτό, πριν την εγκατάσταση του αντλησιοταμιευτικού σταθμού. Το ίδιο φαινόμενο παρατηρείται και για το σενάριο LL-MW. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην αρχική θεώρηση που υιοθετήθηκε για την παρούσα έρευνα και αφορά τις «must run» μονάδες του δικτύου. Η λειτουργία του υβριδικού σταθμού, με 75 MW εγκατεστημένη ισχύ, παρέχει πλέον εγγυημένη ισχύ στο δίκτυο. Οπότε αφαιρώντας από την ωριαία ζήτηση φορτίου, την ωριαία παραγωγή του υδροστροβίλου του υβριδικού σταθμού, υπολογίζεται το φορτίο που καλούνται, πλέον να εξυπηρετήσουν οι συμβατικές μονάδες και οι μονάδες ΑΠΕ. Σε μέρες όμως με χαμηλή ζήτηση (LL), οι συμβατικές μονάδες του συστήματος, καλούνται να εξυπηρετήσουν μειωμένη ωριαία ζήτηση, από την οποία σε αυτό το σημείο, προκύπτει ότι οι μονάδες που πρόκειται να ενταχθούν είναι λιγότερες σε αριθμό, για αρκετές ώρες, από τις «must run units» που έχουν οριστεί. Ως εκ τούτου, δεν είναι λογικό και συγχρόνως πρακτικά ορθό, να εμποδίζεται η αύξηση της αιολικής διείσδυσης και συνεπώς η μείωση της παραγωγής και του κόστους των συμβατικών μονάδων, από μια υπόθεση που έγινε αρχικά, δίχως τον συνυπολογισμό μιας επιπλέον μονάδας. Ο νέος σταθμός της αντλησιοταμίευσης, αποτελεί μια νέα γεννήτρια παροχής εγγυημένης ισχύος, οπότε θεωρείται αναγκαία η αναπροσαρμογή της αρχικής θεώρησης για τις «must run units».

6.8 Αναπροσαρμογή του κανόνα για τις «must run units»

Η προσπάθεια, λοιπόν, αλλαγής της συγκεκριμένης αρχικής θεώρησης δημιούργησε κάποιους προβληματισμούς. Όπως για παράδειγμα, αν θα χρειαστεί να απενεργοποιηθεί κάποια μονάδα, ποια θα είναι και με ποιον τρόπο θα πραγματοποιηθεί μια τέτοια διαδικασία. Ξεπερνώντας αυτούς τους προβληματισμούς, αποφασίστηκε ότι θα τεθούν εκτός λειτουργίας οι δύο μονάδες ατμού 5 και 6 του σταθμού των Λινοπεραμάτων. Η επιλογή αυτή ήταν αναγκαστική και ο λόγος θα εξηγηθεί ευθύς αμέσως. Αρχικά, όπως μπορεί να διακριθεί από τον πίνακα 6.10, σε αυτή την περίπτωση, ο σταθμός των Λινοπεραμάτων έχει σε λειτουργία πέντε γεννήτριες, ο σταθμός του Αθερινόλακκου δύο ενώ της Ξυλοκαμάρας μόλις το πρώτο μέρος του συνδυασμένου κύκλου. Είναι φανερό ότι δεν γίνεται να απενεργοποιηθεί η μονάδα του συνδυασμένου κύκλου, αφήνοντας τον σταθμό της Ξυλοκαμάρας χωρίς ενεργή μονάδα. Επιπροσθέτως, εξαιτίας του ότι στην περιοχή της Σητείας στην ανατολική Κρήτη είναι εγκατεστημένα πολλά αιολικά πάρκα, δεν θα ήταν ασφαλές να μείνει η περιοχή χωρίς την απαραίτητη υποστήριξη από συμβατικές θερμικές μονάδες. Ακόμη, οι δύο μονάδες ατμού που είναι εγκατεστημένοι στο σταθμό του Αθερινόλακκου, είναι νεότερης τεχνολογίας και φθηνότεροι σε κατανάλωση καυσίμου από εκείνους των Λινοπεραμάτων, προσφέροντας επιπλέον ένα κίνητρο για τη διατήρηση της λειτουργίας τους. Συνεπώς, αυτά ήταν τα βασικά κριτήρια για τον συγκεκριμένο προβληματισμό, επιλέγοντας τις δύο τελευταίες μονάδες ατμού των Λινοπεραμάτων, σύμφωνα με τη λίστα προτεραιότητας.

Πίνακας 6.10 Must run units

Must Run Units	Λίστα Προτεραιότητας	P_{\min} (MW)	P_{\max} (MW)
ATM 2 Λινοπεράματα	1	8	14
ATM 3 Λινοπεράματα	2	8	14
ATM 4 Λινοπεράματα	3	18	24
ATM 5 Λινοπεράματα	4	18	24
ATM 6 Λινοπεράματα	5	18	24
ΣΚ 1 Ξυλοκαμάρα	6	17,5	63
ATM 1 Αθερινόλακκος	7	22	43
ATM 2 Αθερινόλακκος	8	22	43

Όπως είναι γνωστό, οι ατμοστρόβιλοι είναι γεννήτριες που δεν εκκινούν αλλά ούτε σβήνουν με ευκολία. Όταν μια τέτοια μονάδα τεθεί εκτός λειτουργίας μένει για αρκετό διάστημα εκτός. Δεδομένου ότι η εργασία αυτή, προσομοίωσε τη λειτουργία του ΣΗΕ της Κρήτης με εννέα διαφορετικά σενάρια που αντιστοιχούν σε εννέα τυπικές μέρες, έγινε προσπάθεια για την όσο δυνατή καλύτερη αντιμετώπιση αυτού του προβληματισμού. Τα σενάρια χαμηλής και μέσης ζήτησης (LL, ML) εναλλάσσονται με μεγάλη συχνότητα στη διάρκεια του έτους. Αυτό αποτρέπει το σβήσιμο των ατμοστρόβιλων μόνο για τα σενάρια χαμηλής ζήτησης καθώς, στις εναλλαγές των δύο αυτών περιπτώσεων ζήτησης, οι μονάδες ατμού θα άνοιγαν και θα έκλειναν σε καθημερινή βάση. Για το περιορισμό του ανεπιθύμητου αυτού φαινομένου οι ατμοστρόβιλοι 5 και 6 των Λινοπεραμάτων παρέμειναν εκτός λειτουργίας για όλα τα σενάρια χαμηλής (LL) και μέσης ζήτησης φορτίου

(ML), ενώ λειτούργησαν κανονικά για τα σενάρια υψηλής ζήτησης (HL). Τα σενάρια υψηλού φορτίου είναι κυρίως συσσωρευμένα την καλοκαιρινή περίοδο για ένα τυπικό έτος στο νησί της Κρήτης. Ως εκ τούτου ο προβληματισμός αυτός, περιορίζεται σε μέγιστο βαθμό, ακυρώνοντας συγχρόνως την αρχική υπόθεση για τις «must run» μονάδες. Στην παρούσα φάση, τίθεται και ένα επιπλέον ζήτημα που αφορά την απενεργοποίηση των ατμοστρόβιλων 5 και 6 και στα σενάρια υψηλής ζήτησης. Η απάντηση σχετίζεται κυρίως με την εξοικονόμηση των χρημάτων. Εάν παρέμεναν εκτός λειτουργίας και για τα HL σενάρια, εξαιτίας του ότι η ζήτηση παρουσιάζεται ιδιαίτερα υψηλή εκείνες τις μέρες, το φορτίο που θα αντιστοιχούσε σε εκείνες, θα έπρεπε να εξυπηρετηθεί από μονάδες με πολύ πιο ακριβή λειτουργία, τους αεριοστρόβιλους, αυξάνοντας ραγδαία το κόστος κατανάλωσης καυσίμου. Επομένως δεν τίθεται ζήτημα για την απενεργοποίηση τους για τη διάρκεια όλου του έτους.

Ολόκληρη η ανάλυση που προηγήθηκε, αφορά τις ώρες όπου οι μονάδες που πρόκειται να ενταχθούν είναι «κάτω» από τις must run μονάδες. Όμως, στις υπόλοιπες περιπτώσεις όπου η ένταξη των μονάδων είναι σε κανονικό επίπεδο, το φορτίο που θα κάλυπταν οι δύο μονάδες που απενεργοποιήθηκαν, πρέπει να εξυπηρετηθεί από άλλες γεννήτριες του συστήματος. Και για την διαδικασία αυτή ακολουθήθηκε η λίστα προτεραιότητας για την ένταξη των γεννητριών σε κάθε περίπτωση. Κατά συνέπεια, ορίστηκαν οι ακόλουθες καταστάσεις:

- Πρώτη επιλογή αποτελεί η μονάδα Diesel 1 του Αθερινόλακκου, που είναι κοντά σε τεχνικά χαρακτηριστικά με το σύνολο των δύο απενεργοποιημένων γεννητριών.
- Εάν εκείνες τις ώρες η μονάδα Diesel 1 του Αθερινόλακκου είναι σε λειτουργία, επιλέγεται η δεύτερη ντιζελογεννήτρια του σταθμού (Diesel 2).
- Σε περίπτωση που και αυτή έχει ενταχθεί, επιλέγονται οι τέσσερις μονάδες Diesel των Λινοπεραμάτων που στο σύνολο τους, μπορούν να προσφέρουν αντίστοιχο φορτίο με τους ατμοστρόβιλους που είναι εκτός λειτουργίας.

6.9 Αποτελέσματα έπειτα από την αναπροσαρμογή του κανόνα

Στον πίνακα 6.11, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την αιολική διείσδυση, ύστερα από την απενεργοποίηση των μονάδων ατμού 5 και 6 των Λινοπεραμάτων και την κατάλληλη διαχείριση των μονάδων του συστήματος, έπειτα από αυτή την ενέργεια. Τονίζεται και στο σημείο αυτό ότι δεν έχει συνυπολογιστεί η παραγωγή των αιολικών πάρκων, που εξυπηρετούν τη ζήτηση της αντλίας του υβριδικού σταθμού. Τα σενάρια υψηλής ζήτησης παραμένουν αμετάβλητα, καθώς όπως εξηγήθηκε νωρίτερα, δεν έγινε για εκείνα κάποια ενέργεια σχετικά με την διαφοροποίηση του κανόνα για την ένταξη των μονάδων. Αντίθετα, στα σενάρια LL-HW και LL-MW, επετεύχθη αύξηση της αιολικής διείσδυσης που ήταν και ο κύριος λόγος αυτής της διαδικασίας. Λιγότερη αιολική ενέργεια αποκόπτεται πλέον, με αρκετά μικρή αύξηση της αιολικής διείσδυσης στο σενάριο ML-MW ενώ αισθητά αυξημένη παρουσιάστηκε στο σενάριο ML-HW. Μάλιστα, για την τυπική μέρα ML-HW οι δύο μονάδες ατμού που τέθηκαν εκτός, αντικαταστάθηκαν από άλλες, σύμφωνα με την διαδικασία που περιγράφηκε παραπάνω, ανάλογα με τις ανάγκες της κάθε ώρας. Για κάποιες ώρες το πρόσθετο φορτίο ανέλαβε η Diesel 1 του Αθερινόλακκου, κάποιες άλλες η Diesel 2 καθώς η πρώτη ήταν ήδη ενταγμένη ενώ ορισμένες ώρες λειτούργησαν και οι τέσσερις μονάδες Diesel των Λινοπεραμάτων, επειδή και οι δύο προηγούμενες είχαν ήδη ενταχθεί. Επειδή όμως το τεχνικό ελάχιστο όριο λειτουργίας της μονάδας Diesel 2 του

Αθρινόλακκου (25 MW) και των μονάδων Diesel των Λινοπεραμάτων (15 MW) είναι αρκετά πιο χαμηλό από εκείνων των Ατμοστρόβιλων που τέθηκαν εκτός (36 MW), επιτρέπεται περισσότερη προσφορά αιολικής ενέργειας στο δίκτυο. Γεγονός που εξηγεί την αυξημένη αιολική διείσδυση για το σενάριο ML-HW.

Πίνακας 6.11 Αιολική διείσδυση ανά σενάριο, πριν και μετά την αναπροσαρμογή του κανόνα

Σενάρια	Αιολική διείσδυση με Υβριδικό (MWh)	Αιολική διείσδυση με Υβριδικό, μετά την αναπροσαρμογή (MWh)
HL-HW	2.289,95	2.289,95
HL-MW	848,25	848,25
HL-LW	215,80	215,80
ML-HW	2.023,95	2.157,79
ML-MW	754,55	762,32
ML-LW	215,80	215,80
LL-HW	946,99	1.262,00
LL-MW	534,78	734,07
LL-LW	215,80	215,80

Πίνακας 6.12 Παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο, πριν και μετά την αναπροσαρμογή του κανόνα

Σενάριο	Παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο με Υβριδικό (MWh)	Παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο με Υβριδικό, μετά την αναπροσαρμογή (MWh)
HL-HW	6.905,97	6.905,97
HL-MW	8.607,92	8.607,92
HL-LW	9.727,94	9.727,94
ML-HW	4.161,49	4.081,74
ML-MW	5.699,92	5.736,08
ML-LW	6.758,25	6.775,34
LL-HW	3.337,77	3.024,74
LL-MW	3.748,92	3.481,90
LL-LW	4.320,90	4.345,06

Ο πίνακας 6.12 παραθέτει τη νέα παραγωγή των μονάδων του συστήματος. Όπως ήταν αναμενόμενο, εξαιτίας της σημαντικής αύξησης της αιολικής διείσδυσης, η παραγωγή των γεννητριών μειώθηκε για τα σενάρια ML-HW, LL-HW και LL-MW. Δε συνέβη όμως κάτι ανάλογο και για τις περιπτώσεις των ML-MW, ML-LW και LL-LW. Τα μεγάλα φορτία του δικτύου, βρίσκονται μακριά από τον ζυγό του Αθρινόλακκου. Όμως, ο Αθρινόλακκος είναι ο πιο «νέος» σταθμός του νησιού διαθέτοντας οικονομικότερες μονάδες σε κόστος κατανάλωσης καυσίμου. Έτσι το λογισμικό PowerWorld, επιλέγει να «φορτώσει» τις μονάδες αυτές επιφέροντας όμως μεγαλύτερες απώλειες ισχύος από τις γραμμές μεταφοράς, καθώς οι νέες γεννήτριες βρίσκονται μακριά από τα μεγάλα φορτία. Κάτι τέτοιο είναι πολύ λογικό, αν συνυπολογιστεί ότι βγαίνουν εκτός δύο μονάδες βάσης που βρίσκονται κοντά στα μεγάλα φορτία ζήτησης, και αντικαθίστανται για τις περισσότερες ώρες από μονάδες που βρίσκονται, αντίστοιχα αρκετά μακριά (μονάδες Αθρινόλακκου).

Σύμφωνα όμως με τον πίνακα 6.13 που παρουσιάζει την ετήσια παραγωγή των γεννητριών, σημειώνεται ετήσια μείωση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από συμβατικές μονάδες σχεδόν 20 GWh λιγότερες από την προηγούμενη περίπτωση με τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού, χωρίς την αναπροσαρμογή στην ένταξη των μονάδων.

Πίνακας 6.13 Ετήσια παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο, πριν και μετά την αναπροσαρμογή του κανόνα

Σενάριο	Ετήσια παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο με Υβριδικό (MWh)	Ετήσια παραγωγή γεννητριών ανά σενάριο με Υβριδικό, μετά την αναπροσαρμογή (MWh)
HL-HW	158.837,39	158.837,39
HL-MW	266.845,62	266.845,62
HL-LW	68.095,58	68.095,58
ML-HW	278.820,13	273.476,36
ML-MW	393.294,21	395.789,39
ML-LW	378.461,91	379.419,19
LL-HW	73.430,97	66.544,29
LL-MW	172.450,22	160.167,58
LL-LW	190.119,51	191.182,65
Σύνολο	1.980.355,53	1.960.358,02

Το συλλογισμό ότι οι μονάδες που αντικαθιστούν τους ατμοστρόβιλους που απενεργοποιούνται, είναι οικονομικότερες σε κόστος κατανάλωσης καυσίμου, έρχεται να επιβεβαιώσει ο πίνακας 6.14. Είναι φανερό ότι παρόλο που σε κάποια σενάρια η ποσότητα της παραγωγής είναι λίγο μεγαλύτερη από πριν, το κόστος που προκύπτει από την κατανάλωση καυσίμου είναι σημαντικά μειωμένο για όλα τα σενάρια στα οποία πραγματοποιήθηκαν αλλαγές. Μάλιστα σύμφωνα με τον πίνακα 6.15, όπου καταγράφονται τα ετήσια οικονομικά στοιχεία της παραγωγής των γεννητριών, σημειώθηκε μείωση του κόστους από την προηγούμενη περίπτωση, περίπου ίσο με 8,6 εκατομμύρια ευρώ. Συγκρίνοντας την περίπτωση αυτή με την αρχική λειτουργία του ΣΗΕ της Κρήτης, η ετήσια εξοικονόμηση των χρημάτων ξεπερνάει τα 48,5 εκατομμύρια ευρώ με ποσοστό εξοικονόμησης ίσο με 13,44%.

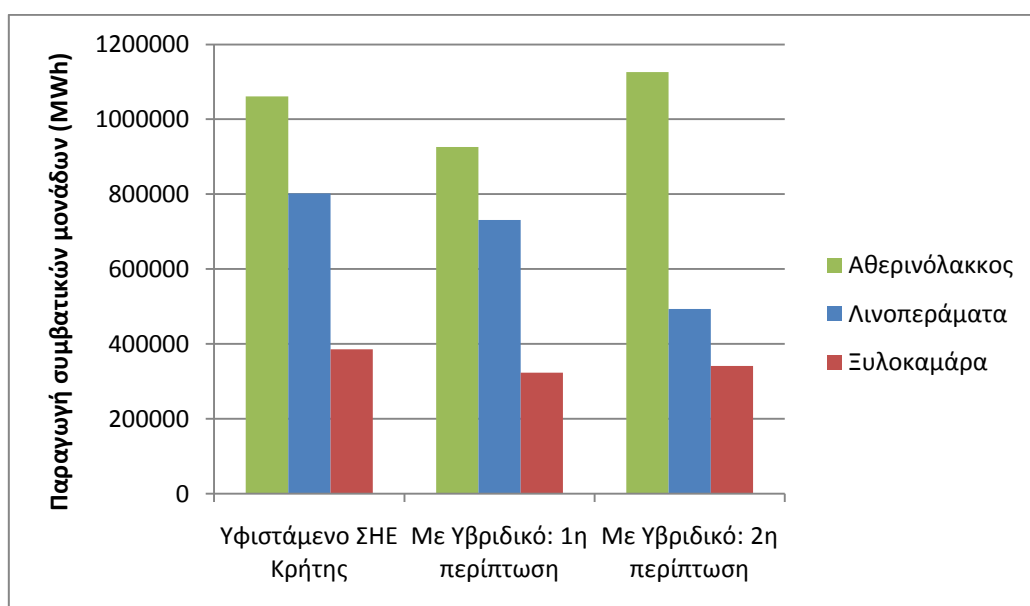
Πίνακας 6.14 Κόστος παραγωγής γεννητριών ανά σενάριο, πριν και μετά την αναπροσαρμογή του κανόνα

Σενάριο	Κόστος Σεναρίου με Υβριδικό(€)	Κόστος Σεναρίου με Υβριδικό, μετά την αναπροσαρμογή (€)
HL-HW	1.082.694,04	1.082.694,04
HL-MW	1.292.810,07	1.292.810,07
HL-LW	1.484.051,65	1.484.051,65
ML-HW	757.706,74	725.237,20
ML-MW	935.000,67	912.359,81
ML-LW	1.055.953,29	1.034.502,79
LL-HW	589.960,83	534.824,39
LL-MW	629.901,46	585.619,62
LL-LW	692.994,09	682.609,69

Πίνακας 6.15 Ετήσιο κόστος παραγωγής γεννητριών, πριν και μετά την αναπροσαρμογή του κανόνα

Σενάριο	Ετήσιο κόστος σεναρίου με Υβριδικό (€)	Ετήσιος κόστος σεναρίου με Υβριδικό, μετά την αναπροσαρμογή (€)
HL-HW	24.901.962,81	24.901.962,81
HL-MW	40.077.112,23	40.077.112,23
HL-LW	10.388.361,52	10.388.361,52
ML-HW	50.766.351,55	48.590.892,59
ML-MW	64.515.046,37	62.952.826,65
ML-LW	59.133.384,24	57.932.156,30
LL-HW	12.979.138,33	11.766.136,48
LL-MW	28.975.467,24	26.938.502,49
LL-LW	30.491.740,17	30.034.826,47
ΣΥΝΟΛΟ	322.228.564,46	313.582.775,66

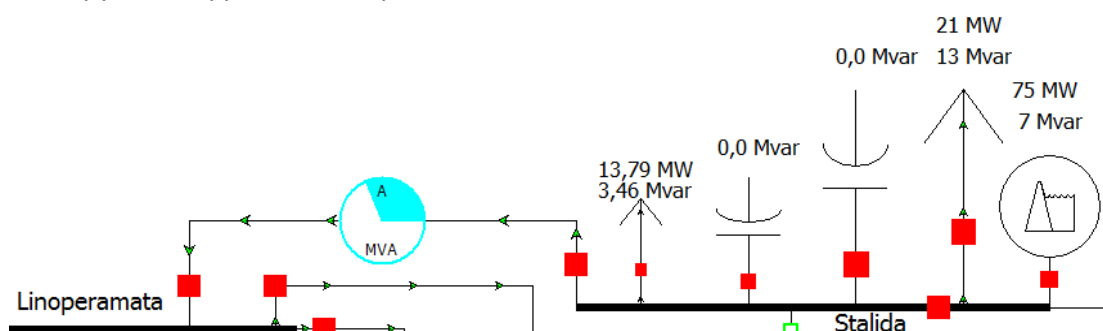
Κλείνοντας το κεφάλαιο σχετικά με την αναπροσαρμογή του κανόνα, το γράφημα της εικόνας 6.13 παρουσιάζει την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανά σταθμό παραγωγής, για τις τρεις διαφορετικές περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Είναι φανερό πως η συμβολή του Αθερινόλακκου στο σύνολο της ετήσιας παραγωγής, για την περίπτωση της αναπροσαρμογής του κανόνα της ένταξης των μονάδων, με την ύπαρξη του υβριδικού σταθμού, είναι μεγαλύτερη και από τις δύο άλλες περιπτώσεις. Η παραγωγή του ξεπερνάει τις 1.125,8 GWh/έτος, ενώ η παραγωγή του σταθμού των Λινοπεραμάτων δεν φτάνει πλέον τις 500 GWh/έτος. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, καθώς πλέον οι δύο μονάδες ατμού των Λινοπεραμάτων που απενεργοποιήθηκαν, αντικαταστάθηκαν ως επί το πλείστον από τις δύο ντιζελογεννήτριες του Αθερινόλακκου. Αντίθετα, η παραγωγή του σταθμού της Ξυλοκαμάρας παραμένει σχετικά σταθερή, χωρίς μεγάλες διακυμάνσεις. Αυτό οφείλεται κυρίως στις κοστοβόρες μονάδες που διαθέτει, με αποτέλεσμα να προτιμώνται οι πιο οικονομικές των άλλων δύο σταθμών.



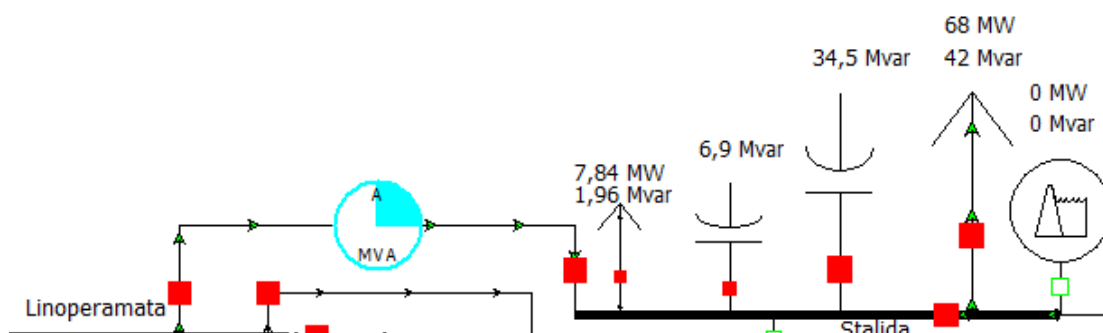
Εικόνα 6.13 Ετήσια παραγωγή ενέργειας ανά σταθμό για τις τρεις εξεταζόμενες περιπτώσεις

6.10 Φορτίσεις και απώλειες γραμμών

Η μελέτη της συμπεριφοράς των γραμμών μεταφοράς του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, οδήγησε στη καταγραφή σημαντικών αποτελεσμάτων. Αρχικά, η λειτουργία του υβριδικού σταθμού στο Δήμο Μαλίων του νομού Ηρακλείου δεν παραβίασε, για την ακρίβεια ούτε καν πλησίασε τα όρια φόρτισης καμίας εκ των γραμμών μεταφοράς του δικτύου. Συνεπώς δεν προέκυψε η ανάγκη για την ενσωμάτωση νέας γραμμής υψηλής τάσης σε κάποιο σημείο του δικτύου. Πλέον, ο ζυγός της Σταλίδας όπου έχει εγκατασταθεί η αντλησιοταμιευτική διάταξη, καλείται να διαχειριστεί ένα μεγάλο φορτίο παραγωγής και ένα μεγάλο φορτίο ζήτησης, του υδροστροβίλου και της αντλίας αντίστοιχα. Επομένως, είναι λογικό η γραμμή «Λινοπεράματα - Σταλίδα» να παρουσιάζει αυξημένη φόρτιση, με μέγιστες συνολικές φορτίσεις γύρω στο 40%. Όπως διακρίνεται στις παρακάτω δύο εικόνες η φορά της συγκεκριμένης γραμμής αλλάζει κατεύθυνση ανάλογα με τις ανάγκες ζήτησης και την παραγωγή του ζυγού της Σταλίδας. Η εικόνα 6.14 παρουσιάζει την περίπτωση, όπου η παραγωγή του υδροστροβίλου είναι στα μέγιστα της (75 MW) ενώ το φορτίο της αντλίας σημειώνει μια σχετικά μικρή τιμή στα 21 MW. Η φορά λοιπόν της γραμμής έχει κατεύθυνση προς το ζυγό των Λινοπεραμάτων. Παρατηρώντας προσεχτικά την εικόνα 6.15, είναι φανερό ότι η φορά της γραμμής τώρα αντιστρέφεται. Ο υδροστροβίλος του υβριδικού σταθμού, έχει μηδενική παραγωγή, ενώ η αντλία ζητάει 68 MW φορτίο με τον σταθμό των Λινοπεραμάτων να καλύπτει ένα μέρος της υψηλής αυτής ζήτησης. Συνεπώς, η συμπεριφορά της εξεταζόμενης γραμμής εξαρτάται πλέον από τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού.



Εικόνα 6.14 Φόρτιση της γραμμής μεταφοράς " ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ - ΣΤΑΛΙΔΑ"



Εικόνα 6.15 Φόρτιση της γραμμής μεταφοράς " ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ - ΣΤΑΛΙΔΑ", με αντίθετη φορά

Γενικότερα, η φόρτιση των γραμμών της ανατολικής Κρήτης και κυρίως εκείνων που εμπλέκονται με το ζυγό της Σταλίδας, δηλαδή των γραμμών «Αθερινόλακκος - Ιεράπετρα», «Άγιος Νικόλαος - Ιεράπετρα» και «Σταλίδα - Άγιος Νικόλαος» επηρεάζεται σε σημαντικό βαθμό από την λειτουργία του υβριδικού σταθμού. Υπάρχουν ώρες κατά τις οποίες η φόρτιση εκείνων των γραμμών σημειώνει μια μικρή μείωση εξαιτίας της σημαντικής συμβολής του υδροστροβίλου στο σύνολο της παραγωγής. Πρόκειται κυρίως για ώρες αιχμής στις οποίες ο υδροστροβίλος της αντλησιοταμιευτικής διάταξης είναι σε λειτουργία. Η μεγάλη παραγωγική ικανότητα του υδροστροβίλου, που σε ώρες αιχμής φτάνει την μέγιστη ισχύ (75 MW), είναι ικανή να οδηγήσει τις γραμμές «Αθερινόλακκος - Ιεράπετρα» και «Άγιος Νικόλαος - Ιεράπετρα» σε μείωση των φορτίσεων του. Παρατηρήθηκαν λοιπόν μειώσεις έως 12% και 15% αντίστοιχα για τις δύο γραμμές για τις περιπτώσεις που αναφέρθηκαν. Καταγράφηκαν όμως και σημαντικές αυξήσεις οι οποίες οφείλονται στην αυξημένη ζήτηση ισχύος λόγω του φορτίου της αντλίας που εγκαταστάθηκε στο ζυγό της Σταλίδας. Μάλιστα η σημαντική αύξηση στις φορτίσεις των παραπάνω γραμμών, παρατηρείται κυρίως τις μεταμεσονύχτιες και πρώτες πρωινές ώρες, με το αιολικό δυναμικό να είναι ιδιαίτερα αυξημένο. Συνήθως στο δίκτυο της Κρήτης, πριν την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού παραγωγής, η ζήτηση ισχύος εκείνες της ώρες είναι ιδιαίτερα χαμηλή. Η εγκατάσταση του όμως, επιφέρει μια αύξηση φορτίου έως και 100 MW, κάτι που εξηγεί και την επικείμενη σημαντική φόρτιση των γραμμών της ανατολικής Κρήτης. Αξίζει να σημειωθεί ότι σε τέτοιες περιπτώσεις φόρτισης του σταθμού αντλησιοταμίευσης, η φορά της γραμμής «Λινοπεράματα - Σταλίδα» έχει φορά προς το ζυγό Σταλίδα, εξυπηρετώντας με την σειρά της ένα σημαντικό μέρος του υψηλού αυτού φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα η αύξηση της φόρτισης των γραμμών από τον Αθερινόλακκο έως το ζυγό της Σταλίδας, να μην ξεπερνάει το 12% κρατώντας τη σε φυσιολογικά επίπεδα, καθώς το λογισμικό PowerWorld Simulator επιλέγει να «τονώσει» μια γραμμή με χαμηλή σχετικά φόρτιση, την γραμμή «Λινοπεράματα - Σταλίδα» και όχι να επιβαρύνει γραμμές που έχουν ήδη υψηλή φόρτιση. Τέλος, σε ώρες όπου η ζήτηση του νησιού είναι υψηλή και παρατηρείται ταυτόχρονα αυξημένη ζήτηση του υβριδικού σταθμού η εξυπηρέτηση του από τον σταθμό των Λινοπεραμάτων μέσω της γραμμής «Λινοπεράματα - Σταλίδα» φαντάζει αναγκαία λύση. Και αυτό γιατί, η παραγωγή του σταθμού του Αθερινόλακκου είναι ήδη κοντά στα μέγιστα της, με αποτέλεσμα να μην υπάρχει η δυνατότητα παραγωγής επιπλέον ενέργειας για την εξυπηρέτηση της αντλίας.

Περνώντας στην άλλη μεριά της Κρήτης, την δυτική προκύπτει ένα σημαντικό συμπέρασμα αναφορικά με τις γραμμές της περιοχής. Τα τέσσερα νέα αιολικά πάρκα που εξυπηρετούν τον υβριδικό σταθμό, έχουν εγκατασταθεί στους ζυγούς των Ρεθύμνου και Χανίων. Είναι γνωστό ότι στις δύο αυτές περιοχές του νησιού παρατηρείται υψηλή ζήτηση φορτίου. Συνεπώς το φορτίο αυτό εξυπηρετείται πλέον από τα νέα αυτά αιολικά πάρκα, τα οποία έχουν εγκατεστημένη ισχύ 166 MW. Οπότε, οι δύο γραμμές που ενώνουν τα Λινοπεράματα με την δυτική Κρήτη, «Ρέθυμνο - Λινοπεράματα» και «Βρύσες - Λινοπεράματα» σημειώνουν τεράστια μείωση στη φόρτιση τους, ειδικότερα σε ώρες με υψηλό αιολικό δυναμικό.

Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου θα αναφερθούν και οι κυριότερες παρατηρήσεις σχετικά με τις συνολικές ετήσιες απώλειες των γραμμών μεταφοράς. Για να γίνει αυτό, πραγματοποιήθηκε σύγκριση μεταξύ των τριών εξεταζόμενων περιπτώσεων για τη λειτουργία του ΣΗΕ της Κρήτης. Ο πίνακας 6.16 παρουσιάζει τις ετήσιες απώλειες για κάθε

περίπτωση. Συγκρίνοντας την αρχική λειτουργία του συστήματος χωρίς την εγκατάσταση του υβριδικού σταθμού με εκείνη έπειτα από την ενσωμάτωση του, παρατηρήθηκε μια μείωση στις ετήσιες απώλειες ισχύος γραμμών υψηλής τάσης ίση με 24,2%. Η μείωση αυτή οφείλεται κυρίως στις χαμηλές φορτίσεις των γραμμών της δυτικής Κρήτης λόγω της εγκατάστασης των νέων αιολικών πάρκων, αλλά και στις χαμηλότερες φορτίσεις που παρατηρούνται στις γραμμές της ανατολικής Κρήτης τις ώρες αιχμής, λόγω της λειτουργίας του υβριδικού σταθμού, όπως αναλύθηκε και πιο πάνω. Δεν μπορεί να ισχυρισθεί κάτι ανάλογο και για την τρίτη περίπτωση, όπου συνέβη η αναπροσαρμογή σχετικά με την ένταση των μονάδων. Οι ετήσιες απώλειες, κυμάνθηκαν μόλις 1,2% κάτω από την αρχική περίπτωση, μια μείωση που κάθε άλλο από αξιοσημείωτη μπορεί να χαρακτηριστεί. Και ο προβληματισμός στο συγκεκριμένο σημείο σχετίζεται με το λόγο για τον οποίο υπάρχει μια μεγάλη διαφορά σχετικά με τις απώλειες μεταξύ των δύο περιπτώσεων, συμπεριλαμβανομένου της λειτουργίας του υβριδικού σταθμού. Οι αυξημένες απώλειες στην τρίτη περίπτωση, οφείλονται αποκλειστικά στις υψηλές φορτίσεις των γραμμών από τον Αθερινόλακκο έως το ζυγό της Σταλίδας για τα σενάρια μέσου και χαμηλού φορτίου. Όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι γεννήτριες Diesel του Αθερινόλακκου είναι εκείνες που ως επί το πλείστον αντικατέστησαν τις δύο μονάδες ατμού των Λινοπεραμάτων που τέθηκαν εκτός. Συνεπώς οι αυξημένες πλέον ποσότητες παραγωγής ενέργειας του σταθμού του Αθερινόλακκου, προκαλούν αυξημένες φορτίσεις κυρίως των γραμμών «Αθερινόλακκος - Ιεράπετρα» , «Άγιος Νικόλαος - Ιεράπετρα» και «Σταλίδα - Άγιος Νικόλαος » με αποτέλεσμα τις σημαντικές απώλειες ισχύος.

Πίνακας 6.16 Ετήσιες απώλειες γραμμών μεταφοράς για κάθε περίπτωση

Περιπτώσεις	Ετήσιες απώλειες γραμμών μεταφοράς (MWh)
Υφιστάμενο ΣΗΕ	32.847,03
Με Υβριδικό: 1η περίπτωση	24.898,44
Με Υβριδικό: 2η περίπτωση	32.443,35

7 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Το ΣΗΕ της Κρήτης είναι ένα πολύπλοκο ηλεκτρικό σύστημα, η μελέτη του οποίου σημείωσε ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Είναι το μεγαλύτερο αυτόνομο σύστημα στον ελληνικό χώρο με αξιοσημείωτα στοιχεία να το συγκροτούν. Διαθέτει ένα μεγάλο δίκτυο μεταφοράς που διασχίζει όλο το νησί, με τις συμβατικές μονάδες να συγκεντρώνονται σε τρεις σταθμούς παραγωγής, σε τρία διαφορετικά σημεία κατά μήκος του νησιού. Οι μονάδες των σταθμών αυτών διακρίνονται σε ομάδες, ανάλογα με τη τεχνολογία που διαθέτουν, με την κάθε γεννήτρια να προσαρμόζεται και να εντάσσεται ανάλογα με τη ζήτηση φορτίου. Το φορτίο ζήτησης αποτελεί ένα επιπλέον ενδιαφέρων παράγοντα του δικτύου, το οποίο μεταβάλλεται ανάλογα με τις εποχές, με αισθητές αυξομειώσεις στη διάρκεια του έτους. Επιπροσθέτως, οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην Κρήτη διευκολύνουν τη παραγωγή από ΑΠΕ. Ο μεγάλος αριθμός αιολικών και φωτοβολταϊκών κατά μήκος του νησιού, συμβάλλουν σε μεγάλο ποσοστό στη συνολική παραγωγή του συστήματος. Παράλληλα, η εργασία αυτή επιδίωξε να επεκτείνει την διείσδυση των ΑΠΕ με την κατασκευή ενός υβριδικού σταθμού, που αποτελεί νέα καινοτομία για το δίκτυο του νησιού.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία μελέτησε τη λειτουργία του δικτύου της Κρήτης σε δύο φάσεις. Αρχικά επιδίωξε να προσεγγίσει σε σημαντικό βαθμό την πραγματική λειτουργία του ΣΗΕ της Κρήτης, ενώ στη συνέχεια εξέτασε τη συμπεριφορά του, κατόπιν της εγκατάστασης του υβριδικού σταθμού αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή των αιολικών πάρκων καθώς και τα φορτία ζήτησης ισχύος για τον κάθε ζυγό του δικτύου, προέρχονται από πραγματικές μετρήσεις στο δίκτυο της Κρήτης που έλαβαν χώρα το έτος 2014. Μελετώντας τα στοιχεία αυτά προέκυψαν εννέα διαφορετικά σενάρια ζήτησης και αιολικής παραγωγής με στόχο την μελέτη του δικτύου σε διαφορετικές συνθήκες, αλλά και την καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας σε ετήσια βάση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα που προέκυψαν και παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 5, είναι φανερό πως ο σκοπός αυτός επιτεύχθηκε. Η ετήσια παραγωγή από συμβατικές μονάδες, το κόστος κατανάλωσης καυσίμου καθώς και το σύνολο παραγωγής του συστήματος πλησίασαν αρκετά τις αντίστοιχες μετρήσεις του υφιστάμενου συστήματος για το 2014.

Η προσομοίωση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο υψηλής τάσης χωρίς να συμπεριληφθεί το σύστημα της διανομής, δηλαδή τα επίπεδα μέσης και χαμηλής τάσης. Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για τον σχεδιασμό και την προσομοίωση του δικτύου είναι το PowerWorld simulator. Κρίθηκε αρκετά εύχρηστο με πληθώρα επιλογών σε διάφορα σχεδιαστικά και τεχνικά θέματα, που συντέλεσαν σε μεγάλο βαθμό για την επιτυχή ανάλυση του συστήματος. Η δυνατότητα επεξεργασίας των στοιχείων εισόδου αλλά και των αποτελεσμάτων, σε φύλλα “excel” διευκόλυνε την εισαγωγή και τη συλλογή δεδομένων. Επίσης η επίλυση της ροής ισχύος στο δίκτυο, με την Βέλτιστη ροή ισχύος (OPF) κρίθηκε αποτελεσματική χωρίς την δημιουργία προβλημάτων ή παράξενων αποτελεσμάτων.

Περνώντας στο θέμα του υβριδικού σταθμού αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, η συμπεριφορά του δικτύου της Κρήτης έπεται από την εγκατάστασή του, αλλά και η ίδια η μελέτη για την εγκατάστασή του, σημείωσαν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Η εγκατάσταση του πραγματοποιήθηκε στο ζυγό της Σταλίδας στην ανατολική Κρήτη, ενώ παράλληλα για την εξυπηρέτηση του τοποθετήθηκαν τέσσερα νέα αιολικά πάρκα στις περιοχές του νομού

Χανίων και Ρεθύμνης. Ο ρόλος των ΑΠΕ στα συμβατικά συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, είναι να περιορίσουν την χρήση των θερμικών μονάδων παραγωγής και όχι να τις αντικαταστήσουν. Όμως, ο υβριδικός σταθμός αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας όπως αναλύθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, επιδιώκει την ένταξη μια νέας μονάδας ΑΠΕ εγγυημένης ενέργειας. Η μονάδα αυτή συνυπάρχει με τις συμβατικές μονάδες του νησιού, περιορίζοντας σε σημαντικό βαθμό τη παραγωγή τους.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την ανάλυση της λειτουργίας του υβριδικού σταθμού στο αυτόνομο ΣΗΕ της Κρήτης, είναι άκρως ενθαρρυντικά. Η αύξηση της αιολικής διείσδυσης στο δίκτυο, είναι η βασική ιδέα για την εγκατάσταση ενός τέτοιου έργου, και επιτεύχθηκε σε μεγάλο βαθμό. Για την ακρίβεια δεν αυξήθηκε απλά η αιολική διείσδυση αλλά πραγματοποιήθηκε η εγκατάσταση τεσσάρων νέων αιολικών πάρκων συνολικής ονομαστικής ισχύος, μόλις 21 MW λιγότερων από την αντίστοιχη των ήδη εγκατεστημένων. Πρόκειται για μεγάλες τιμές αιολικής παραγωγής που σε καμία περίπτωση χωρίς τη λειτουργία του υβριδικού σταθμού, δεν θα μπορούσαν να απορροφηθούν από το υπάρχων δίκτυο. Έτσι ο εξεταζόμενος υβριδικός σταθμός με αντλησιοταμίευση, καταφέρνει να περιορίσει σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργία μονάδων, ακόμα και να απενεργοποιήσει σημαντικό αριθμό γεννητριών που υπό κανονικές συνθήκες θα ήταν ενταγμένες.

Η ετήσια εξοικονόμηση σχετικά με το κόστος καυσίμου ξεπερνάει το 11% για την πρώτη περίπτωση, ενώ αγγίζει το 13,5% στην περίπτωση όπου αναπροσαρμόστηκε ο κανόνας της ένταξης των μονάδων. Βέβαια οι απώλειες των γραμμών μεταφοράς στην τελευταία είναι υψηλότερες όμως και πάλι σε φυσιολογικά επίπεδα. Έτσι η λειτουργία του υβριδικού αντλησιοταμιευτικού σταθμού προσέφερε σημαντικά οφέλη, ενώ παράλληλα δεν επηρέασε σε καμία περίπτωση αρνητικά τη συμπεριφορά του δικτύου και δεν δημιούργησε τεχνικά ζητήματα.

Η εργασία αυτή, αναφορικά με το κεντρικό θέμα μελέτης της, την εγκατάσταση δηλαδή του υβριδικού σταθμού, έχει τη δυνατότητα να επεκταθεί και να εξελιχθεί. Η διερεύνηση της οικονομικής βιωσιμότητας του υβριδικού σταθμού, είναι ένα θέμα που κατά κύριο λόγο θα μπορούσε να αναδείξει τα συνολικά οικονομικά του οφέλη, καθώς και την χρονική διάρκεια έως την οικονομική απόσβεση που μπορεί να προσφέρει. Επέκταση της μελέτης αυτής αποτελεί και η διερεύνηση της λειτουργίας του ΣΗΕ όταν υπάρχει απώλεια κάποιων γραμμών μεταφοράς. Ακόμη ιδιαίτερο ενδιαφέρον θα είχε και η μελέτη της λειτουργίας του ΣΗΕ της Κρήτης με την προσθήκη επιπλέον υβριδικών σταθμών. Ένα άλλο φλέγον ζήτημα για το δίκτυο της Κρήτης είναι η μικρή και η μεγάλη διασύνδεση του νησιού, που βρίσκονται υπό μελέτη. Συνεπώς, θα ήταν χρήσιμη μια σχετική έρευνα για τη λειτουργία των συστημάτων αντλησιοταμίευσης, κατά τη μικρή και μεγάλη διασύνδεση.

8 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] J. Duncan Glover, Mulukuta S. Sarma and Thomas J. Overbye. *POWER SYSTEM ANALYSIS & DESIGN*.
- [2] Γαβριήλ Β. Γιαννακόπουλος, Νικόλαος Α. Βοβός. *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. 2008.
- [3] Δημήτρης Αλ. Κατσαπρακάκης. *Σύνθεση Ενεργειακών Συστημάτων*. 2015.
- [4] Κ. Βουρνάς και Γ. Κονταξής. *ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ*. 2010.
- [5] (ΔΕΔΔΗΕ), ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. *Ετήσιο Δελτίο Εκμετάλλευσης Συστήματος Κρήτης*. 2014
- [6] (ΡΑΕ), ΡΥΘΜΙΣΤΙΚΗ ΑΡΧΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ. *ΚΩΔΙΚΑΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΗ ΔΙΑΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΩΝ ΝΗΣΙΩΝ, ΕΚΔΟΣΗ 1*. 2014.
- [7] E. Karapidakis, P. Georgilakis, A. G. Tsikalakis, Y. A. Katsigiannis and M. Moschakis. «Dynamic performance assessment of wind energy pump storage units in Crete's power system.» *Materials Science Forum*, 2014: vol. 792, pp. 305-310.
- [8] Harprit kaur, Y S. Brar and Jaswinder Singh Randhawa. «OPTIMAL POWER FLOW USING POWERWORLD SIMULATOR.» *IEEE Electrical Power & Energy Conference*, 2010.
- [9] Y. A. Katsigiannis and E. S. Karapidakis, «The Effect of Pumped Hydro Storage Units Installation on the Operation of the Autonomous Cretan Power System.» *Trivent Publishing*, 2016.
- [10] S. V. Papaefthymiou, E. G. Karamanou, S. A. Papathanassiou and M. P. Papadopoulos. «A wind-hydro-pumped storage station leading to high RES penetration in the autonomous island system of Ikaria.» *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2010: vol. 1, no 3, pp. 163-172.
- [11] Y. A. Katsigiannis, E. S. Karapidakis, A. G. Tsikalakis and A. Katsamaki. «A review of the proposed large-scale energy storage applications on the autonomous power system of Crete.» *Proc. Recent Advances in Energy, Environment, Economics and Technological Innovation*, 2013: pp. 45-54.
- [12] ΑΓΓΕΛΟΣ Γ. ΒΑΤΙΚΑΛΟΣ. «Βραχυπρόθεσμος Υδροθερμικός Προγραμματισμός και Μελέτη μη Διασυνδεδεμένου ΣΗΕ με Μεγάλη Διείσδυση ΑΠΕ και Αντλησιοταμίευση Χωρίς Άντληση από το Δίκτυο σε Συνθήκες Βέλτιστης Ροής Φορτίου.» Διπλωματική εργασία, 2009.

- [13]Αντωνίου, Αντώνης. «Επιπτώσεις στην Οικονομική Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας Κρήτης και Κύπρου λόγω της διασύνδεσής τους.» Διπλωματική Εργασία, 2013.
- [14]Γεώργιος Μιχ. Βισκαδούρος. «Συγκριτική Ανάλυση Μεθόδων Επίλυσης του Προβλήματος Βέλτιστης Ροής Φορτίου για Μεγάλα Διασυνδεδεμένα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας. Εφαρμογή στο Διασυνδεδεμένο Ηλεκτρικό Σύστημα των Βαλκανίων.» Διπλωματική Εργασία.
- [15]Λιγνός, Χρυσοβαλάντης. «Επιπτώσεις από την Διασύνδεση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας Θήρας και Κρήτης.» Διπλωματική Εργασία, 2013.
- [16]Στέφανος Β. Παπαευθυμίου. «Συμβολή στην Ανάλυση Υβριδικών Αιολικών - Αντλησιοταμιευτικών Σταθμών Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας.» Διδακτορική Διατριβή, 2012.
- [17]*PowerWorld Simulator, version 18 GSO*. <https://www.powerworld.com/>.
- [18](ΑΔΜΗΕ) *Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας*. <http://www.admie.gr/>.
- [19](ΔΕΔΔΗΕ) *Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*. <https://www.deddie.gr/>.
- [20](ΡΑΕ) *Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας*. <http://www.rae.gr/>.