



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Τομέας Συστημάτων Παραγωγής

**ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ
ΣΕ ΑΠΟΜΟΝΩΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

της

ΜΑΡΙΝΑΣ Δ. ΣΚΑΝΔΑΛΑΚΗ

ΕΠΙΒΛΕΨΗ: ΚΑΝΕΛΛΟΣ ΦΩΤΙΟΣ, Επίκουρος Καθηγητής

Χανιά, Φεβρουάριος 2016

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διατριβή μου στα πλαίσια των μεταπτυχιακών σπουδών μου στο Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης του Πολυτεχνείου Κρήτης, στον τομέα των Συστημάτων Παραγωγής. Η εκπόνησή της ξεκίνησε τον Ιανουάριο του 2015 και ολοκληρώθηκε το Φεβρουάριο του 2016, υπό την επίβλεψη του Επίκουρου Καθηγητή κ. Κανέλλου Φώτιου.

Σε αυτό το σημείο, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλλαν στην επίτευξη αυτής της προσπάθειας. Αρχικά, οφείλω να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα Καθηγητή μου, τον κ. Κανέλλο Φώτιο, ο οποίος μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το αντικείμενο των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας. Η καθοδήγηση και οι συμβουλές του συνέβαλλαν στην ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Δε θα μπορούσα να παραλείψω τη συμβολή των υπόλοιπων μελών της εξεταστικής επιτροπής, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Ι. Νικολό για την ευκαιρία που μου παρείχε -μέσω του μαθήματος του- να «γνωρίσω» τους γενετικούς αλγορίθμους, και τον Καθηγητή κ. Β. Κουικόγλου για την άρτια συνεργασία μας τόσο στα πλαίσια του μαθήματος του, όσο και στα πλαίσια της συμμετοχής τους στην τριμελή εξεταστική επιτροπή. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω το συμφοιτητή και φίλο μου, Κουτσιανίτη Παναγιώτη, για τη βοήθεια του.

Το μεγαλύτερο κομμάτι της ευγνωμοσύνης μου, το οφείλω στην οικογένεια μου για την αμέριστη στήριξη της σε οποιαδήποτε επιλογή μου, και κυρίως στο σύζυγο μου, Μάνθο και στη μικρή μας κόρη, Μαρία για την υπομονή και την αγάπη με την οποία με οδήγησαν σε αυτό το αποτέλεσμα.

Μαρίνα Δ. Σκανδαλάκη

Χανιά, Φεβρουάριος 2016

Περίληψη

Η επέκταση των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), και ειδικότερα των Συστημάτων Μεταφοράς (ΣΜΗΕ) υπό συνθήκες υψηλής διείσδυσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ), αποτελεί σημαντικό ερευνητικό πεδίο, κυρίως λόγω της αλματώδους ανάπτυξης των ΑΠΕ. Το πρόβλημα το οποίο προκύπτει από την αυξημένη παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ και η επακόλουθη ενίσχυση του δικτύου, με στόχο την εκμετάλλευση της παραγόμενης ενέργειας αλλά και τη διατήρηση της αξιοπιστίας και της ασφάλειας του συστήματος, οδηγεί στην αναζήτηση μεθόδων ελαχιστοποίησης του κόστους επέκτασης του, υπό συγκεκριμένους περιορισμούς.

Η παρούσα Μεταπτυχιακή διατριβή στοχεύει στην παρουσίαση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και την επίδραση τους στο Σύστημα Μεταφοράς. Αρχικά, αναφέρονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της μεγάλης Διείσδυσης ΑΠΕ σε ΣΗΕ και οι μέθοδοι μοντελοποίησης παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ. Στη συνέχεια, περιγράφονται το πρόβλημα της επέκτασης του δικτύου μεταφοράς με ΑΠΕ, η μαθηματική του διατύπωση, καθώς και ο γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος αναπτύχθηκε για την ελαχιστοποίηση του κόστους και επομένως τη βελτιστοποίηση της επέκτασης του δικτύου, υπό συγκεκριμένες συνθήκες και γενικότερα περιορισμούς. Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε στο απομονωμένο σύστημα της Κρήτης, του οποίου η μοντελοποίηση και η προσομοίωση υλοποιήθηκε με τη βοήθεια των προγραμμάτων Matlab και Matpower.

Λέξεις – Κλειδιά

Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, Συστήματα μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας, υψηλή διείσδυση ΑΠΕ, επέκταση συστήματος μεταφοράς, σύστημα μεταφοράς ενέργειας Κρήτης, μοντελοποίηση συστήματος μεταφοράς, γενετικός αλγόριθμος, ελαχιστοποίηση - βελτιστοποίηση κόστους επέκτασης.

Abstract

The expansion of Power Systems and more specifically the problem of Transmission Expansion Planning (TEP) under conditions of high Renewable Energy Sources (RES) Penetration constitutes a major area of research interest mainly due to the rapid development of the RES. The problem arising from the increased RE production and the subsequent need for network strengthening in order to exploit the energy produced and maintain the system's reliability, is leading to the search of minimization methods of the expansion costs, under certain constraints.

This thesis presents the Renewable Energy Sources and their impact, in cases of high penetration in isolated Power Systems, specifically in the Transmission System. Firstly, it reviews the high RES Penetration advantages and disadvantages as well as the RES power modeling methods. It then describes the problem of the transmission network's expansion with RES along with its mathematical formulation and the genetic algorithm which was developed to minimize costs and thus optimize network expansion. The implementation of the algorithm targeted Crete's isolated system which was modeled and simulated with Matlab and Matpower.

Keywords

power system, transportation system, high RES penetration, transmission expansion planning, power transmission system of Crete, modeling transmission system, genetic algorithm, minimization - optimization expansion costs.

Περιεχόμενα

Πρόλογος.....	3
Περίληψη.....	5
Abstract	7
Περιεχόμενα.....	9
Συνοτομογραφίες	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
1.1 Εισαγωγή	13
1.2 Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας	15
1.3 Χαρακτηριστικά των ΣΗΕ.....	17
1.4 Γενικά στοιχεία ΑΠΕ	18
1.4.1 Ανάπτυξη ΑΠΕ σε Ευρωπαϊκό και Εθνικό επίπεδο	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	25
2.1 Μορφές των ΑΠΕ.....	25
2.1.1 Αιολική Ενέργεια	25
2.1.2 Ηλιακή ενέργεια	27
2.1.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια	29
2.1.4 Άλλες μορφές ΑΠΕ.....	32
2.2 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις από την αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ σε ΣΜΗΕ	32
2.3 Μέθοδοι μοντελοποίησης παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ.....	39
2.3.1 Η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ ως στοχαστική διαδικασία	40
2.4 Μέθοδοι αύξησης της διείσδυσης των ΑΠΕ	41
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	45
3.1 Εισαγωγή	45
3.2 Το πρόβλημα του σχεδιασμού επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	46
3.2.1 Περιγραφή του προβλήματος επέκτασης ΣΜΗΕ με ΑΠΕ.....	47
3.2.2 Περιορισμοί Διείσδυσης ΑΠΕ.....	47
3.3 Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος	50
3.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση	50
3.3.2 Συνάρτηση ποινής	52
3.4 Επίλυση με χρήση γενετικού αλγορίθμου	53

3.4.1 Προβλήματα βελτιστοποίησης.....	53
3.4.2 Γενετικοί αλγόριθμοι.....	54
3.4.3 Γενετικοί αλγόριθμοι με περιορισμούς	61
3.5 Matpower	62
3.5.1 Εκτέλεση Προσομοιώσεων.....	62
3.5.2 Μοντελοποίηση συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.....	63
3.5.3 Ροή Φορτίου.....	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ.....	71
4.1 Το ΣΗΕ Κρήτης	71
4.1.1 Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος της Κρήτης	74
4.1.2 Αιολικό δυναμικό της Κρήτης.....	76
4.2 Μοντελοποίηση συστήματος.....	80
4.3 Επίλυση προβλήματος.....	90
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΕΝΑΡΙΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	97
5.1 Εισαγωγή	97
5.2 Εξεταζόμενα σενάρια	97
5.2.1 Σενάριο 1	100
5.2.2 Σενάριο 2	104
5.2.3 Σενάριο 3	107
5.2.4 Σενάριο 4	110
5.2.5 Σενάριο 5	116
5.2.6 Σενάριο 6	122
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	125
Βιβλιογραφία.....	133

Συντομογραφίες

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΕΟΠ: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος

ΣΗΕ: Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΣΒΙΟ: Συμπαγωγή από Βιομάζα – Βιοαέριο

ΣΗΘΥΑ: Συμπαγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης

ΜΥΗΣ: Μικροί Υδροηλεκτρικοί Σταθμοί

ΣΠΗΕ: Σταθμός Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση

ΛΑΓΗΕ: Λειτουργός της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΔΕΣΜΗΕ: Διαχειριστής Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΥΠΕΚΑ: Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής

ΓΓΕΚΑ: Γενική Γραμματεία Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής

ΡΑΕ: Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας

ΔΕΗ: Δημόσια Επιχείρηση Ηλεκτρισμού

ΑΔΜΗΕ: Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

ΜΑΣΜ: Μελέτη Ανάπτυξης Συστήματος Μεταφοράς

Α/Γ: Ανεμογεννήτρια

Α/Π: Αιολικό Πάρκο

Φ/Β: Φωτοβολταϊκό

Υ/Η: Υδροηλεκτρικό

ΥΤ: Υψηλή Τάση

ΜΤ: Μέση Τάση

ΧΤ: Χαμηλή Τάση

Μ/Σ: Μετασχηματιστής

Γ.Μ. : Γραμμή μεταφοράς

Υ/Σ: Υποσταθμοί

ΔΠ: Διεσπαρμένη Παραγωγή

ΓΑ: Γενετικός Αλγόριθμος

EA: Εξελικτικός Αλγόριθμος

AC: Alternating Current (Εναλλασσόμενο ρεύμα)

DC: Direct Current (Συνεχές Ρεύμα)

TEP: Transmission Expansion Planning (Σχεδιασμός Επέκτασης Συστήματος Μεταφοράς)

PF: Power Flow (ΡΦ: Ροή Φορτίου)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια είναι σε τέτοιο βαθμό συνυφασμένη με την καθημερινή μας ζωή που μόνο η έλλειψή της καθιστά πρόδηλη την αναγκαιότητά της. Το σύνολο των ανθρώπινων δραστηριοτήτων δεσμεύει, παράγει, καταναλώνει, μετατρέπει, αποθηκεύει και υποβαθμίζει τεράστια ποσά ενέργειας.

Η αύξηση του πληθυσμού της γης, αλλά και η βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, έχουν οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, με τη μεγαλύτερη αυξητική τάση να παρατηρείται στις αναπτυσσόμενες χώρες (Ινδία, Κίνα, κ.λπ.). Οι συνεχώς αυξανόμενες καταναλωτικές ανάγκες έχουν ως αποτέλεσμα την αύξηση των εγκατεστημένων μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, που αξιοποιούν κυρίως ορυκτά καύσιμα με συμβατικές μεθόδους.

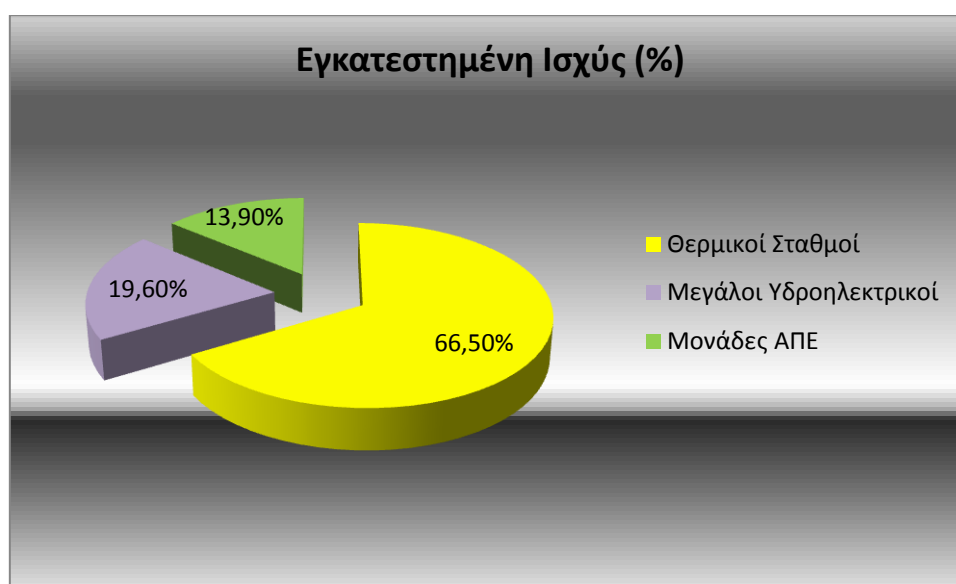
Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας επιτυγχάνεται με την εκμετάλλευση διαφόρων πρωτογενών πηγών ενέργειας και παρουσιάζει μεγάλες διαφοροποιήσεις από χώρα σε χώρα, ανάλογα με τους διαθέσιμους εγχώριους Ενεργειακούς Πόρους, την Ενεργειακή Πολιτική της χώρας, τις γεωλογικές, γεωφυσικές και κλιματολογικές ιδιαιτερότητες αυτής. Οι πηγές παραγωγής ενέργειας διακρίνονται στις *συμβατικές* που βασίζονται σε ορυκτά στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, ο άνθρακας (λιθάνθρακας και λιγνίτης), το φυσικό αέριο, στην πυρηνική ενέργεια και στις *ανανεώσιμες πηγές ενέργειας* (ΑΠΕ) που χρησιμοποιούν ανεξάντλητες πηγές (άνεμος, ήλιος, νερό κλπ) και δεν καταναλώνουν τα περιορισμένα ενεργειακά ορυκτά αποθέματα.

Το ποσοστό συμμετοχής του πετρελαίου στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ιδιαίτερα υψηλό, όπως είναι φυσικό, σε κάποιες αραβικές πετρελαιοπαραγωγικές χώρες (όπως σχεδόν 100% στην Υεμένη), αλλά γενικότερα στις άλλες χώρες το ποσοστό του πετρελαίου στην ηλεκτροπαραγωγή έχει περιοριστεί σημαντικά. Υψηλό ποσοστό συμμετοχής του φυσικού αερίου, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εμφανίζουν μεταξύ άλλων χωρών η Ολλανδία (60%) και η Ιρλανδία (50%).

Τα στατιστικά στοιχεία δείχνουν, ότι η χρήση του λιθάνθρακα κυριαρχεί στη Νότια Αφρική (93%) και στην Πολωνία (92%), ενώ διατηρεί υψηλό ποσοστό στη Δανία (54%), στη Μ. Βρετανία (37.5%), στην Κορέα (38%) και στις Ην. Πολιτείες (σχεδόν 50%). Ο λιγνίτης παίζει σημαντικό ρόλο στην Ελλάδα (55%) και στη Γερμανία (42%). Το ποσοστό της πυρηνικής ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλό στη Γαλλία (78%), στο Βέλγιο (54.5%), στην Ουγγαρία (37.5%), στη Σουηδία (47%), στη Νότια Κορέα (37%) και στην Ελβετία (43%). Τέλος, το ποσοστό της υδροηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζει υψηλές τιμές στη Νορβηγία (98,5%), στην Αυστρία (64%), στον Καναδά (58%), στην Ελβετία (51%), καθώς και σε πολλές αναπτυσσόμενες χώρες, με χαρακτηριστικότερα παραδείγματα την Γκάνα (67%), τη Βραζιλία (83%), την Κένυα (51%) και τη Βενεζουέλα (72%).

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα προέρχεται κυρίως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς. Στην Περιφέρεια Δυτικής Μακεδονίας παράγεται

περίπου το 50% της συνολικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η συγκέντρωση των θερμοηλεκτρικών σταθμών στο Βορρά της χώρας δημιουργεί αυξημένες απώλειες κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στα κέντρα κατανάλωσης και ανισορροπία στη λειτουργία. Ωστόσο ο σχεδιασμός τους βασίστηκε στην εγγύτητά τους στις περιοχές που υπάρχουν πλούσια κοιτάσματα λιγνίτη, ο οποίος αποτελεί την καύσιμη πρώτη ύλη για αυτούς τους σταθμούς. Στη χώρα μας υπάρχουν τέσσερις περιοχές με σημαντικά αποθέματα λιγνίτη, στη Δράμα, στη Δυτική Μακεδονία, στην Ελασσόνα και στη Μεγαλόπολη. Σύμφωνα με στοιχεία του 2011 για το Διασυνδεδεμένο Σύστημα (National Report PAE, 2012), το 66.5% της εγκατεστημένης ισχύος των ηλεκτροπαραγωγικών μονάδων είναι θερμοικοί σταθμοί, εκ των οποίων με λιγνίτη 4930 MW, με πετρέλαιο 730 MW και με φυσικό αέριο 4579 MW. Το 19.6% είναι μεγάλοι υδροηλεκτρικοί σταθμοί και το 13.9% είναι μονάδες ΑΠΕ (Εικόνα 1).

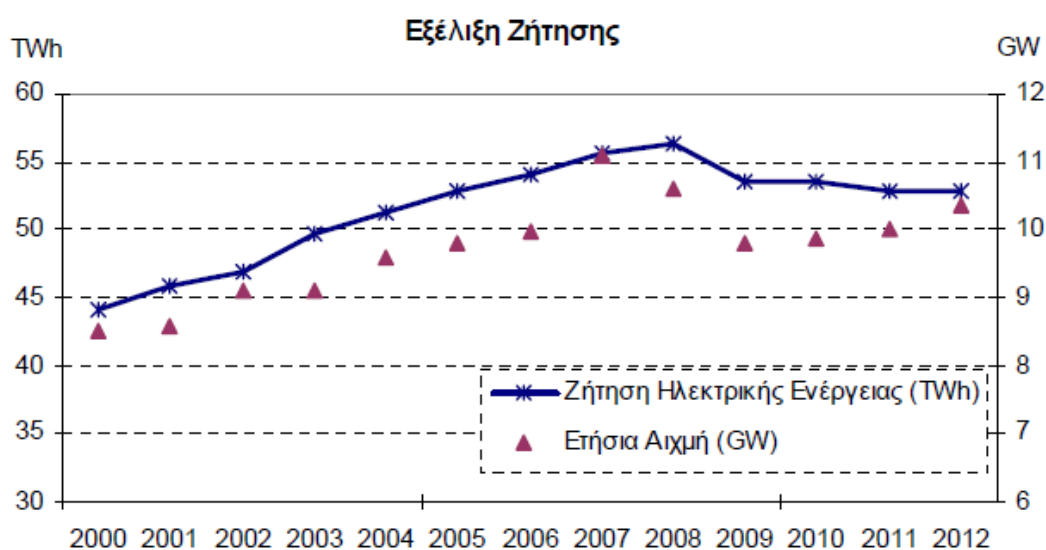


Εικόνα 1: Σύστημα Ηλεκτροπαραγωγής ανά Τεχνολογία, 2013 [1]

Ο λιγνίτης είναι η σημαντική εγχώρια ενεργειακή πηγή, συνεισφέροντας το 53.15% της εγχώριας παραγωγής για το 2011. Το φυσικό αέριο συνεισφέρει το 28.3%. Ταυτόχρονα η ανάδειξη της προστασίας του περιβάλλοντος ως στόχου υψηλής προτεραιότητας της ελληνικής πολιτείας, οδηγεί σε προώθηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, θέτοντας ως στόχο την αύξηση συμμετοχής τους στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο 34% μέχρι το 2020. Στο ίδιο πλαίσιο δίνεται έμφαση στην επιτάχυνση της διείσδυσης του φυσικού αερίου στο ενεργειακό ισοζύγιο. Επειδή η χρονική διάρκεια ζωής των ήδη γνωστών εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων λιγνίτη δεν υπερβαίνει τα 35 χρόνια, έχει διατυπωθεί η άποψη ότι θα πρέπει να μπου στο ελληνικό ισοζύγιο ηλεκτρισμού νέα καύσιμα, όπως ο λιθάνθρακας, ώστε να παραταθεί η διαθεσιμότητα και η χρήση του λιγνίτη σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου. Οι ανθρακικές μονάδες επιτυγχάνουν υψηλότερους βαθμούς απόδοσης από τις λιγνιτικές και κατά συνέπεια εκπέμπουν μικρότερες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά στις εκπομπές διοξειδίου του θείου, αυτές αντιμετωπίζονται με αντιρρυπαντικές εγκαταστάσεις όπως η αποθείωση καυσαερίων. Επιπλέον ανάμεσα στα πλεονεκτήματα του άνθρακα είναι ότι, ενώ το φυσικό αέριο θα είναι διαθέσιμο για

τα επόμενα 50 – 60 χρόνια, ο άνθρακας θα είναι διαθέσιμος τουλάχιστον για 200 χρόνια ακόμη. Ωστόσο η μελλοντική αξιοποίηση του άνθρακα θα εξαρτηθεί από τη δυνατότητα των ηλεκτροπαραγωγών μονάδων άνθρακα να υιοθετήσουν με χαμηλό κόστος καθαρές και αποδοτικές τεχνολογίες καύσης, ώστε να προσαρμοστούν στο αυστηρό πλαίσιο των περιβαλλοντικών απαιτήσεων του «Πρωτοκόλλου του Κιότο» και των αυστηρών Ευρωπαϊκών προδιαγραφών για νέες εγκαταστάσεις καύσης [2].

Στην Εικόνα 2 απεικονίζεται η εξέλιξη της Συνολικής Καθαρής Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας του Ελληνικού Συστήματος (έχει αφαιρεθεί το φορτίο άντλησης, συμπεριλαμβάνεται όμως η διεσπαρμένη παραγωγή) από το 2000 και μετά. Την περίοδο 2000 – 2008 υπήρξε συνεχής αύξηση της συνολικής καθαρής ζήτησης. Την τετραετία 2008-2012, ως επακόλουθο της οικονομικής κρίσης, παρατηρείται συνεχής μείωση.



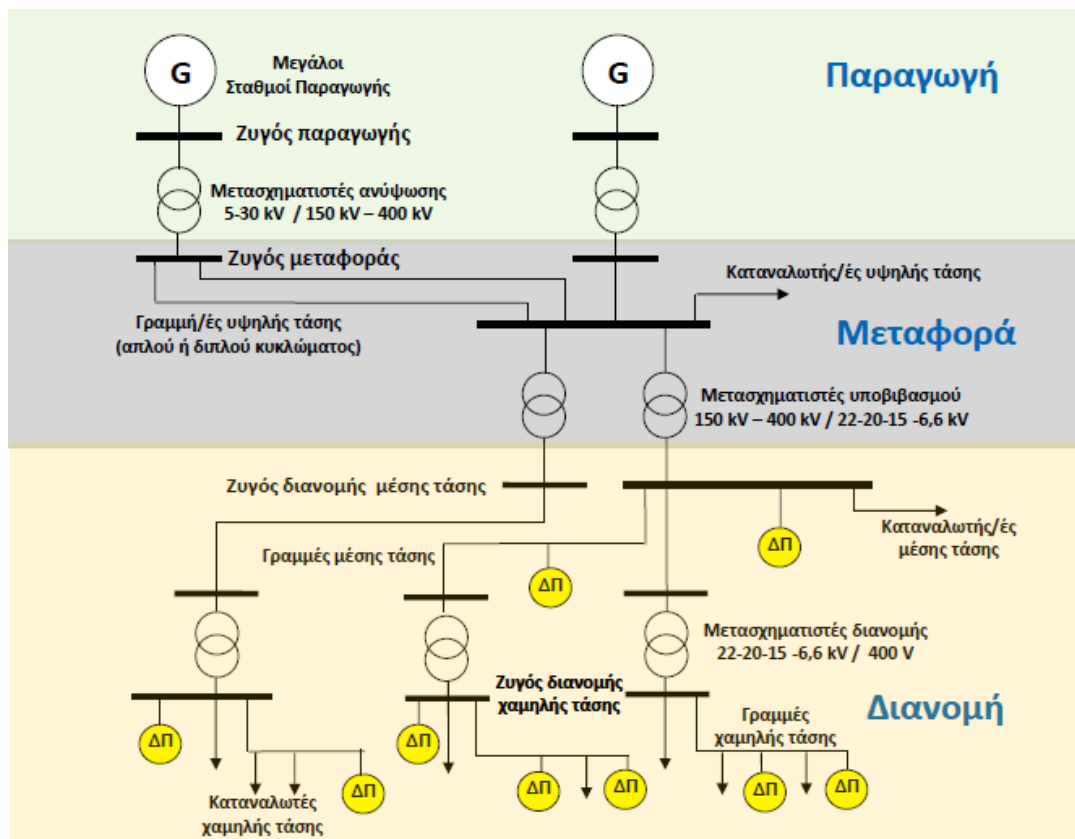
Εικόνα 2: Εξέλιξη της Συνολικής Καθαρής Ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας (συμπεριλαμβανομένης και της διεσπαρμένης παραγωγής) κατά την περίοδο 2000 – 2012 [1]

1.2 Ελληνικό Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ονομάζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων, τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο προορισμός ενός τέτοιου συστήματος είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε εξυπηρετούμενη περιοχή κατανάλωσης [3,4].

Βασικό χαρακτηριστικό των ΣΗΕ είναι ότι –κατά κύριο λόγο– αδυνατεί να «αποθηκεύσει» ηλεκτρική ενέργεια, με συνέπεια την ανάγκη άμεσης κατανάλωσης της ενέργειας που παράγεται και τη συνεχή ροή της από το σημείο παραγωγής σε αυτό της ζήτησης. Κάθε ΣΗΕ αποτελείται από τρία (3) υποσυστήματα (Εικόνα 3):

- Το «Σύστημα Παραγωγής»,
- το «Σύστημα Μεταφοράς» και
- το «Σύστημα Διανομής».

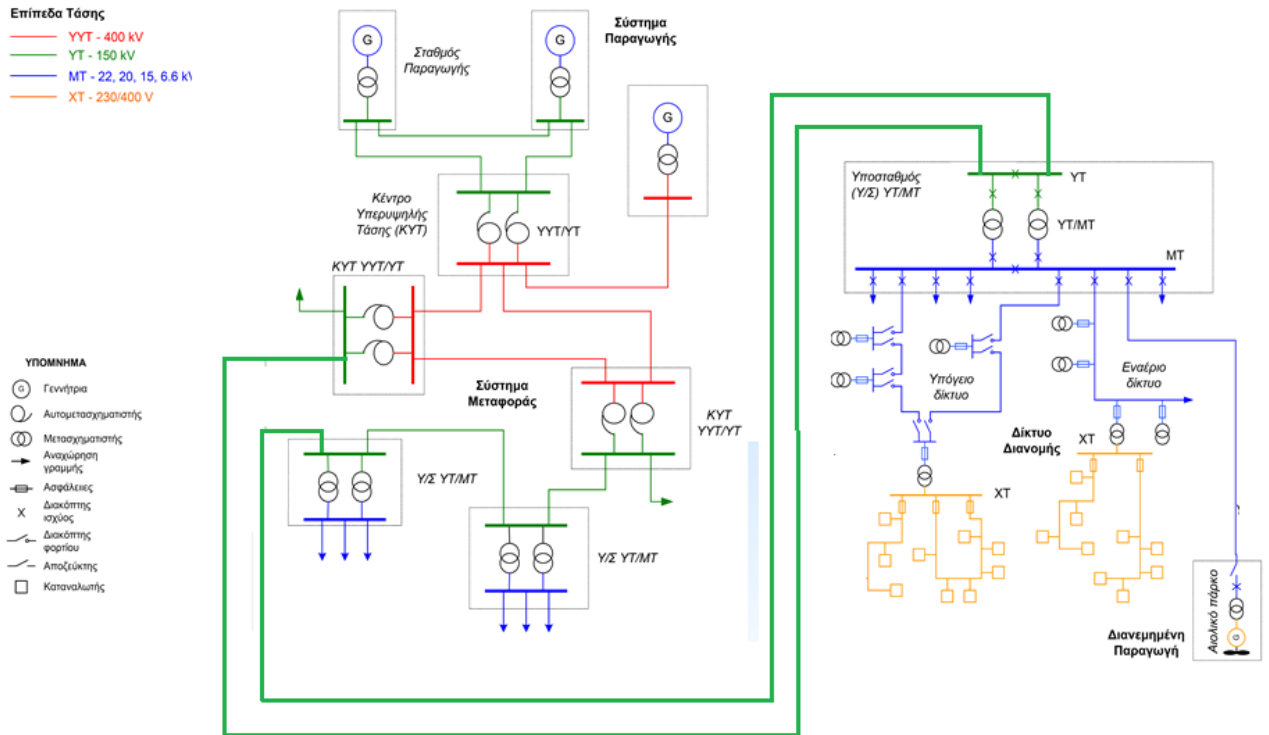


Εικόνα 3: Υποσυστήματα ενός ΣΗΕ [5]

Το Σύστημα Παραγωγής αποτελείται από τους σταθμούς παραγωγής ενέργειας (Σ.Π.Η.Ε.), όπου παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα είτε από συμβατικές, είτε από ανανεώσιμες πηγές και από τους Μετασχηματιστές Ανύψωσης Τάσης, όπου η τάση του ρεύματος αυξάνεται (5-30kV/150-400kV) για να επιτευχθεί η μεταφορά του, υπό υψηλή τάση.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες από τα εργοστάσια παραγωγής προς τις περιοχές κατανάλωσης γίνεται μέσω του Συστήματος Μεταφοράς, το οποίο αποτελείται από τους ζυγούς μεταφοράς, τις γραμμές υψηλής και υπερυψηλής τάσης. Με αυτόν τον τρόπο, μεταφέρεται η ηλεκτρική ενέργεια -υπό υψηλή τάση ώστε να μειώνονται οι απώλειες ισχύος, καθώς η μεταφορά πραγματοποιείται σε μεγάλες αποστάσεις- σε κεντρικά σημεία του δικτύου, όπου με τη βοήθεια των Μ/Σ υποβιβασμού μετατρέπεται (150-400kV/22-20-15-6,6kV) σε μέση τάση για να τροφοδοτηθεί το δίκτυο διανομής.

Τέλος, μέσω του Συστήματος Διανομής, το οποίο περιλαμβάνει τους υποσταθμούς διανομής και τις γραμμές χαμηλής τάσης, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται στους τελικούς καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης. Οι πελάτες που είναι συνδεδεμένοι στα δίκτυα υψηλής και μέσης τάσης είναι στην πλειονότητά τους βιομηχανικοί καταναλωτές, ενώ στα δίκτυα χαμηλής τάσης συνδέονται πελάτες οικιακής χρήσης και ένα μεγάλο μέρος των πελατών εμπορικής χρήσης. Αναλυτικά η δομή ενός ΣΗΕ, και συγκεκριμένα του ελληνικού συστήματος παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.



Εικόνα 4: Ελληνικό ΣΗΕ [6]

1.3 Χαρακτηριστικά των ΣΗΕ

Παρόλο που συναντάμε διάφορα μεγέθη ηλεκτρικών δικτύων, διαφορετικής ποιότητας και δομής, υπάρχουν κοινά χαρακτηριστικά ανάμεσα στα ΣΗΕ και κυρίως πρέπει να εξασφαλίζονται ειδικές συνθήκες κατά τη λειτουργία τους. Συγκεκριμένα, τα χαρακτηριστικά τους είναι:

- Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60 Hz, ενώ σε κάποιες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται και συστήματα συνεχούς ρεύματος, για τη μεταφορά ενέργειας.
- Τα τριφασικά συστήματα ρευμάτων είναι συμμετρικά, με ίσα μεγέθη των τριών φάσεων, ενώ οι γωνιακές τους αποκλίσεις είναι 120° .
- Η ονομαστική τάση λειτουργίας παραμένει σταθερή.
- Οι γραμμές μεταφοράς μέσης τάσης έχουν τρεις (3) αγωγούς φάσεων, ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης διαθέτουν επίσης και τον ουδέτερο αγωγό.
- Η ροή είναι συνεχής και κάνει τη λειτουργία τους ομαλή και αποδοτική.

Παράλληλα, ζωτικής σημασίας για κάθε ΣΗΕ είναι η εξασφάλιση των παρακάτω απαιτήσεων [5,7]:

- Πρέπει να παρέχεται ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση. Το σύστημα πρέπει να ικανοποιεί τις απαιτήσεις των πελατών του (ισχύς, ενέργεια) λαμβάνοντας υπόψη τις εξαναγκασμένες (τυχαίες) βλάβες και τις προγραμματισμένες διακοπές (συντηρήσεις) του εξοπλισμού του.
- Είναι απαραίτητη προϋπόθεση η ασφάλεια του, η ικανότητα δηλαδή του συστήματος να παραμένει σε λειτουργία μετά από περιπτώσεις έκτακτης

ανάγκης ή ξαφνικές διαταραχές που μπορεί να συμβούν (π.χ. βραχυκύκλωμα, απώλεια εξοπλισμού, κ.λπ.) και μπορεί να προέρχονται από οποιεσδήποτε ενέργειες, οι οποίες μπορούν να προκαλέσουν τέτοιες διαταραχές (θεομηνίες, ανθρώπινα σφάλματα, κ.λπ.)

- Η ζήτηση πραγματικής και άεργου ισχύος μεταβάλλεται με το χρόνο και το ΣΗΕ πρέπει να είναι σε θέση να ικανοποιεί συνεχώς τη μεταβαλλόμενη ζήτηση και να διατηρεί τα μέτρα τάσεως.
- Η παρεχόμενη ενέργεια πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας:
 - Σταθερή συχνότητα
 - Σταθερή τάση
 - Υψηλή αξιοπιστία τροφοδοτήσεως
- Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με το ελάχιστο οικονομικό και οικολογικό κόστος.
- Η παρακολούθηση των ροών ισχύος μέσω γραμμών και μετασχηματιστών χρειάζεται να είναι αδιάλειπτη, ούτως ώστε να μην υπερβούν τα θερμικά όρια κάθε στοιχείου.
- Πολύ σημαντική είναι η διατήρηση του συστήματος σε σταθερή κατάσταση, όπως και
- η διατήρηση ευστάθειας του συστήματος ακόμη και όταν αφαιρεθεί ένα οποιοδήποτε στοιχείο του (κριτήριο N-1).
- Τέλος, απαραίτητος είναι ο σχεδιασμός και μελέτες για τη λειτουργία και ανάπτυξη του συστήματος, υπό όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις.

Τελευταία, παρατηρούνται σε παγκόσμιο επίπεδο αλλαγές στη δομή, στα χαρακτηριστικά και στον τρόπο λειτουργίας των ΣΗΕ, εξαιτίας της διεξόδου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), οι οποίες εστιάζονται κυρίως στην εκμετάλλευση του αέρα και του ήλιου.

1.4 Γενικά στοιχεία ΑΠΕ

Η εντατικοποίηση της χρήσης συμβατικών καυσίμων όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας οδήγησαν σε ιδιαίτερα μεγάλη περιβαλλοντική επιβάρυνση, καθώς οι τομείς της ηλεκτροπαραγωγής και των μεταφορών θεωρούνται ιδιαίτερα επιβαρυντικοί για το περιβάλλον. Το γεγονός αυτό τονίστηκε στα πλαίσια διεθνών συνδιασκέψεων όπως αυτές του Ρίο, του Κιότο, της Χάγης και στην πιο πρόσφατη διάσκεψη του Παρισιού, κατά τη διάρκεια της οποίας υπερτονίστηκε η ανάγκη περιορισμού των ρύπων παγκοσμίως, καθώς μια διαφορετική τακτική θα επιφέρει άμεση αύξηση της θερμοκρασίας με τις αντίστοιχες επιβλαβείς επιπτώσεις στο περιβάλλον και στην καθημερινότητα. Για το λόγο αυτό, η διεθνής ερευνητική κοινότητα και η ενεργειακή βιομηχανία έχουν στρέψει το ενδιαφέρον τους, αφενός σε σύγχρονες "καθαρές" τεχνολογίες παραγωγής με βελτιωμένη ενεργειακά και περιβαλλοντικά απόδοση, όπως π.χ. οι "καθαρές" τεχνολογίες άνθρακα, και αφετέρου στην αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ).

Οι ανανεώσιμες μορφές ενέργειας (ΑΠΕ) ή ήπιες μορφές ενέργειας ή νέες πηγές ενέργειας ή πράσινη ενέργεια είναι μορφές εκμεταλλεύσιμης ενέργειας οι οποίες προέρχονται από διάφορες φυσικές διαδικασίες, όπως ο άνεμος, η γεωθερμία, η κυκλοφορία του νερού και άλλες. Συγκεκριμένα σύμφωνα με την οδηγία 2009/28/EK

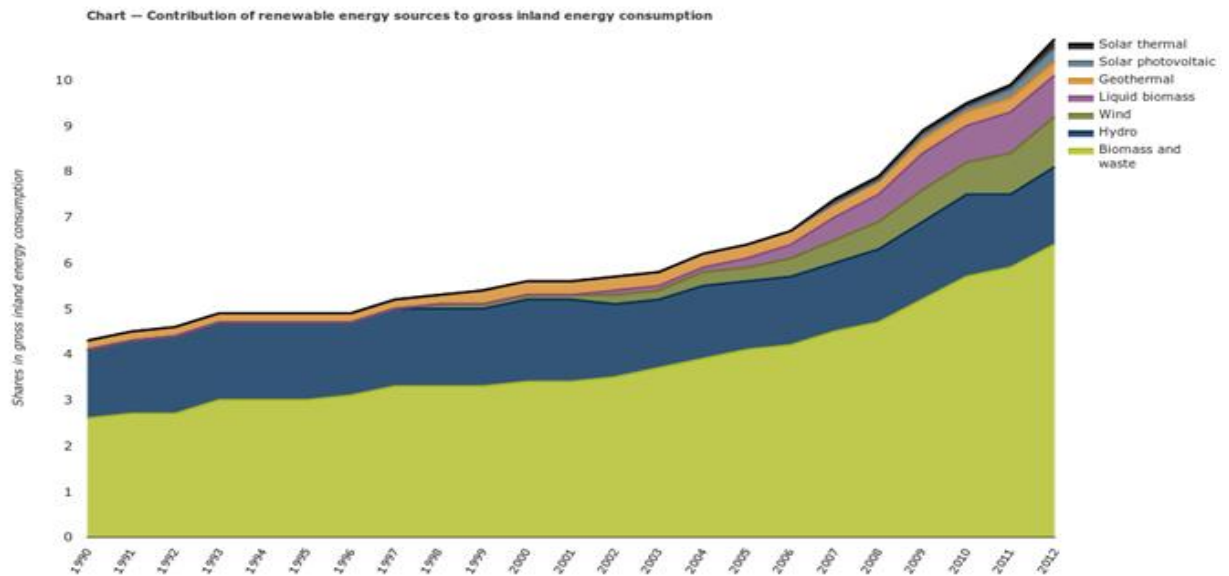
του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, ως ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές θεωρείται η αιολική, η ηλιακή, η γεωθερμική, η υδροθερμική και η ενέργεια των ωκεανών, η υδροηλεκτρική, η ενέργεια από βιομάζα, από τα εκλυόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από αέρια μονάδων επεξεργασίας λυμάτων και από βιοαέρια.

Ο όρος «ήπιες» αναφέρεται σε δυο βασικά χαρακτηριστικά τους. Καταρχάς, για την εκμετάλλευσή τους δεν απαιτείται κάποια ενεργητική παρέμβαση, όπως εξόρυξη, άντληση ή καύση, όπως με τις μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενες πηγές ενέργειας, χρειάζεται μόνο η εκμετάλλευση της ήδη υπάρχουσας ροής ενέργειας στη φύση. Δεύτερον, πρόκειται για «καθαρές» μορφές ενέργειας, πολύ «φιλικές» στο περιβάλλον, που δεν αποδεσμεύουν υδρογονάνθρακες, CO₂ ή τοξικά και ραδιενεργά απόβλητα, όπως οι υπόλοιπες πηγές ενέργειας που χρησιμοποιούνται σε μεγάλη κλίμακα. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι ΑΠΕ θεωρούνται από πολλούς μία αφετηρία για την επίλυση των οικολογικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η Γη.

Ως «ανανεώσιμες πηγές» θεωρούνται γενικά οι εναλλακτικές των παραδοσιακών πηγών ενέργειας (π.χ. του πετρελαίου ή του άνθρακα), όπως η ηλιακή και η αιολική. Ο χαρακτηρισμός «ανανεώσιμες» είναι κάπως καταχρηστικός, αφού ορισμένες από αυτές τις πηγές, όπως η γεωθερμική ενέργεια, δεν ανανεώνονται σε κλίμακα χιλιετιών. Σε κάθε περίπτωση οι ΑΠΕ έχουν μελετηθεί ως λύση στο πρόβλημα της αναμενόμενης εξάντλησης των (μη ανανεώσιμων) αποθεμάτων ορυκτών καυσίμων [8].

1.4.1 Ανάπτυξη ΑΠΕ σε Ευρωπαϊκό και Εθνικό επίπεδο

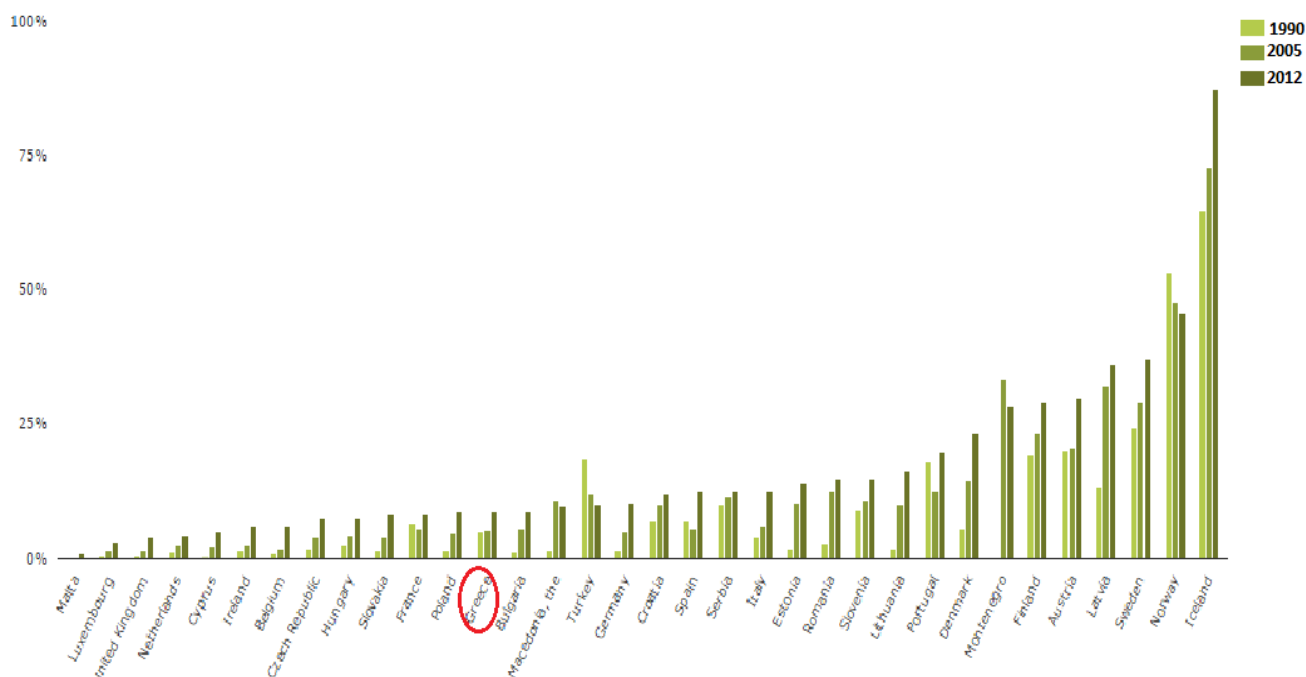
Η πορεία των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ευρώπη είναι ανοδική, συμβάλλοντας σε μεγάλο βαθμό στη μείωση των εκπομπών των βλαβερών για το κλίμα αερίων του θερμοκηπίου, αλλά υπολείπεται των απαιτήσεων για μια αποφασιστική στροφή με σκοπό την αποφυγή της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η αιολική και ηλιακή ενέργεια, η βιομάζα και οι υπόλοιπες ανανεώσιμες ενεργειακές τεχνολογίες αυξήθηκαν αξιοσημείωτα στην Ευρώπη, σύμφωνα με τα πιο πρόσφατα στοιχεία του Ευρωπαϊκού Οργανισμού Περιβάλλοντος (ΕΟΠ - Εικόνα 5). Στο διάστημα 2005-2012, η παραγόμενη από ΑΠΕ ηλεκτρική ενέργεια στην Ε.Ε. αυξάνεται με μέσο ετήσιο ρυθμό 7,1% (αρκετά υψηλότερο από το 4,1% της περιόδου 1990-2012). Η ανάπτυξη της «πράσινης ενέργειας», από το 2005 έως το 2012 συνέβαλε στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 7% στα τέλη του 2012, σύμφωνα με την έκθεση του ΕΟΠ «Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στην Ευρώπη – Προσέγγιση της πρόσφατης ανάπτυξής τους και των αλυσιδωτών συνεπειών τους». Η μείωση των εκπομπών προήλθε από αντικατάσταση ρυπογόνων καυσίμων από ΑΠΕ. Η μεγαλύτερη μείωση καταγράφηκε στον άνθρακα, του οποίου η κατανάλωση θα ήταν υψηλότερη κατά 13%. Με τον ίδιο τρόπο αποφεύχθηκε χρήση φυσικού αερίου σε ποσοστό 7%, γεγονός που εκτιμάται από τον ΕΟΠ ως ιδιαίτερα θετικό, σε μια εποχή που τα ευρωπαϊκά αποθέματα φυσικού αερίου φθίνουν.



Εικόνα 5: Συνεισφορά των ΑΠΕ στην ακαθάριστη εγχώρια κατανάλωση ενέργειας στο διάστημα 1990-2012 [9]

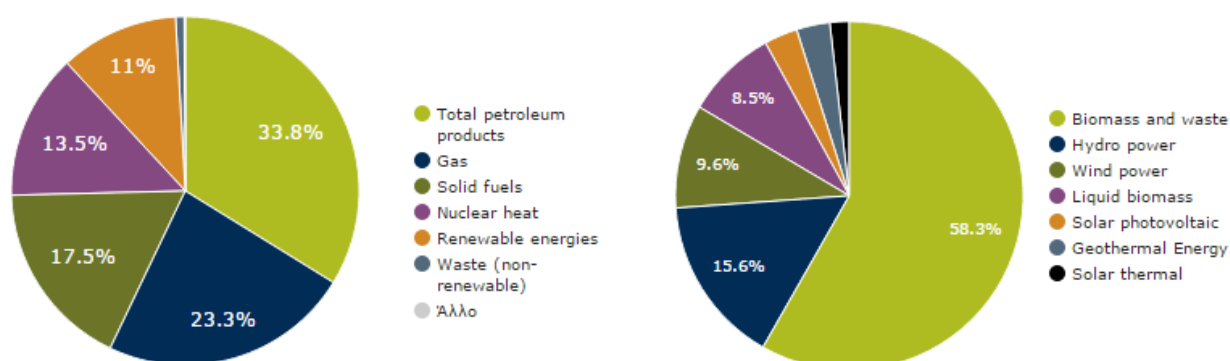
Το 2013, η ανάπτυξη των ΑΠΕ συνεχίστηκε. Σε επίπεδο Ε.Ε., το μερίδιο της πράσινης ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα έφτασε σχεδόν το 15%, ενώ ο στόχος της ευρωπαϊκής οδηγίας για τις ΑΠΕ ήταν 12%. Μέχρι το 2020, η Ε.Ε. στοχεύει να παράγει τουλάχιστον το 20% της ενέργειάς της χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, ποσοστό το οποίο πρέπει να αυξηθεί σε 27% έως το 2030. Παρόλα αυτά, το ποσοστό αυτό θεωρείται από τις περιβαλλοντικές οργανώσεις χαμηλό και ανεπαρκές συγκριτικά με την αποφασιστική ανάσχεση του φαινομένου της υπερθέρμανσης και της κλιματικής αλλαγής. Η Greenpeace, για παράδειγμα, είχε εισηγηθεί το Νοέμβριο του 2014, να τεθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ως στόχος το 45%, ως ποσοστό των ΑΠΕ, στην τελική κατανάλωση ενέργειας του 2030, ενώ ανάλογες θέσεις έχουν διατυπωθεί και από άλλες μεγάλες περιβαλλοντικές Μη Κυβερνητικές Οργανώσεις. Η Greenpeace εκτιμά ότι οι στόχοι που έθεσε η Κομισιόν, τελικά θα οδηγήσουν σε καθήλωση των ρυθμών ανάπτυξης των ΑΠΕ από το ζητούμενο 6%-7% το έτος, στο 1%-2% [10].

Σύμφωνα με τις περιβαλλοντικές οργανώσεις, η Ε.Ε. επιτυγχάνει τους στόχους της, αλλά η βάση των στόχων της θεωρείται χαμηλή. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στην επίτευξη των στόχων ανάμεσα στις ευρωπαϊκές χώρες. Υπάρχουν χώρες, όπως η Σουηδία, η Λετονία, η Φινλανδία και η Αυστρία, όπου οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καλύπτουν περισσότερο από το ένα τρίτο της τελικής κατανάλωσης ενέργειας. Στο άλλο άκρο της κλίμακας, η Μάλτα, το Λουξεμβούργο, η Ολλανδία και το Ηνωμένο Βασίλειο ήταν κάτω από 5%. Η Ελλάδα βρίσκεται σε ένα μέσο επίπεδο, λίγο κάτω από τον μέσο όρο, στο 12% (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Συγκριτική ανάπτυξη ΑΠΕ στις χώρες της Ε.Ε. τα έτη 1990, 2005, 2012 [9]

Το ποσοστό συμμετοχής των Ανανεώσιμων Πηγών στην παραγωγή ηλεκτρισμού το 2012 έφτασε το 11%, ενώ η κατανομή του ποσοστού ανάμεσα στις διάφορες μορφές πράσινης ενέργειας αποτυπώνεται στην Εικόνα 7β. Η κύρια μορφή πράσινης ενέργειας προέρχεται από τη βιομάζα, ενώ ακολουθούν τα υδροηλεκτρικά φράγματα με 15,6% και η αιολική ενέργεια με 9,6%. Οι υπόλοιπες μορφές ενέργειας μοιράζονται το εναπομείναν ποσοστό.



Εικόνα 7: α) Συμμετοχή των ΑΠΕ και συμβατικών μορφών παραγωγής ενέργειας στο ευρωπαϊκό μίγμα ηλεκτροπαραγωγής 2012 β) Συμμετοχή μορφών ΑΠΕ [9]

Στην Ελλάδα, υπάρχει η δυνατότητα σημαντικής αξιοποίησης των ΑΠΕ, καθώς έχουμε συχνή ηλιοφάνεια, υπάρχει το κατάλληλο αιολικό δυναμικό, ιδιαίτερα στα νησιά, αξιοποιήσιμο υδάτινο δυναμικό στις ορεινές περιοχές, σημαντικές ποσότητες βιομάζας σε όλη την επικράτεια που δεν αξιοποιούνται συστηματικά, και αρκετός αριθμός γεωθερμικών πεδίων, των οποίων η ενεργειακή αξιοποίηση δεν είναι αντίστοιχη της δυναμικότητάς τους.

Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στο σύνολο της χώρας παρουσίασε μέσο ετήσιο ρυθμό μεταβολής 25% την περίοδο 2007-2011 και ανήλθε σε 2.412 MW το 2011. Τα δεδομένα του Πίνακα 1 αποτελούν επεξεργασμένα στοιχεία από τον Λειτουργό της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ) και τη ΔΕΗ Α.Ε. και αφορούν τόσο το Διασυνδεδεμένο Σύστημα όσο και τα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά [11].

Πίνακας 1: Εγκατεστημένη Ισχύς Ηλεκτρικής Ενέργειας/ μορφή ΑΠΕ [12]

Έτος	Υ/Η (<15MW)	Α/Π (MW)	Φ/Β (MW)	ΣΒΙΟ (MW)	ΣΥΝΟΛΟ (MW)	ΜΕΤΑΒΟΛΗ (%)
2007	95	846	9	39	989	15,7
2008	158	1022	12	40	1232	24,6
2009	180	1140	37	41	1398	13,5
2010	197	1298	191	41	1727	23,5
2011	206	1640	522	45	2412	39,7
2014	300	4000	1500	200	6000	-
2020*	350	7500	2200	350	10400	-

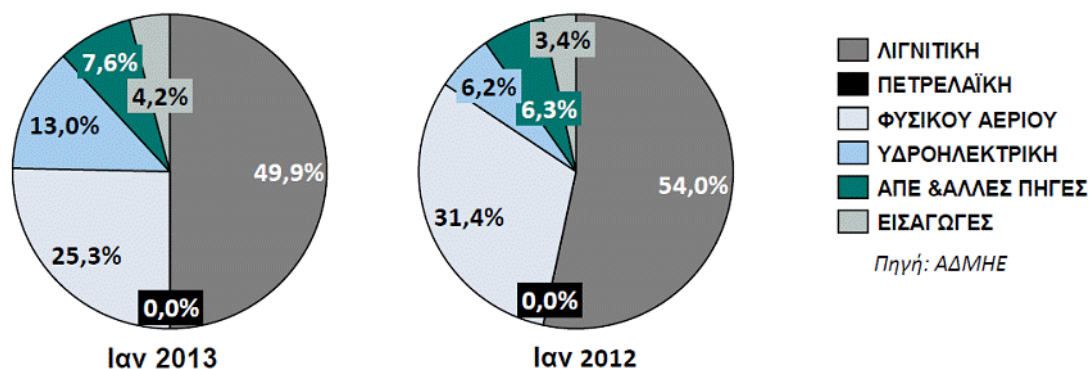
*πρόβλεψη ΛΑΓΗΕ

Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εξέλιξη της εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος (Πίνακας 2) από ΑΠΕ για την περίοδο 2000-2009, τόσο στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα όσο και στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά, σύμφωνα με τα αντίστοιχα στοιχεία των αρμόδιων Διαχειριστών (ΛΑΓΗΕ, ΔΕΗ). Η συνολική παραχθείσα ενέργεια από ΑΠΕ ακολούθησε ανοδική πορεία την πενταετία 2007-2011, με μέσο ετήσιο ρυθμό αύξησης της τάξης του 20% και διαμορφώθηκε σε 4.651 GWh το 2011. Η παραγόμενη ενέργεια από τα αιολικά πάρκα κάλυψε το 71,3% του συνόλου, ακολούθησαν οι μικροί υδροηλεκτρικοί σταθμοί με 12,5% και τα φωτοβολταϊκά πάρκα με 11,9%.

Πίνακας 2: Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύς μονάδων ΑΠΕ την τελευταία δεκαετία (MW) [12]

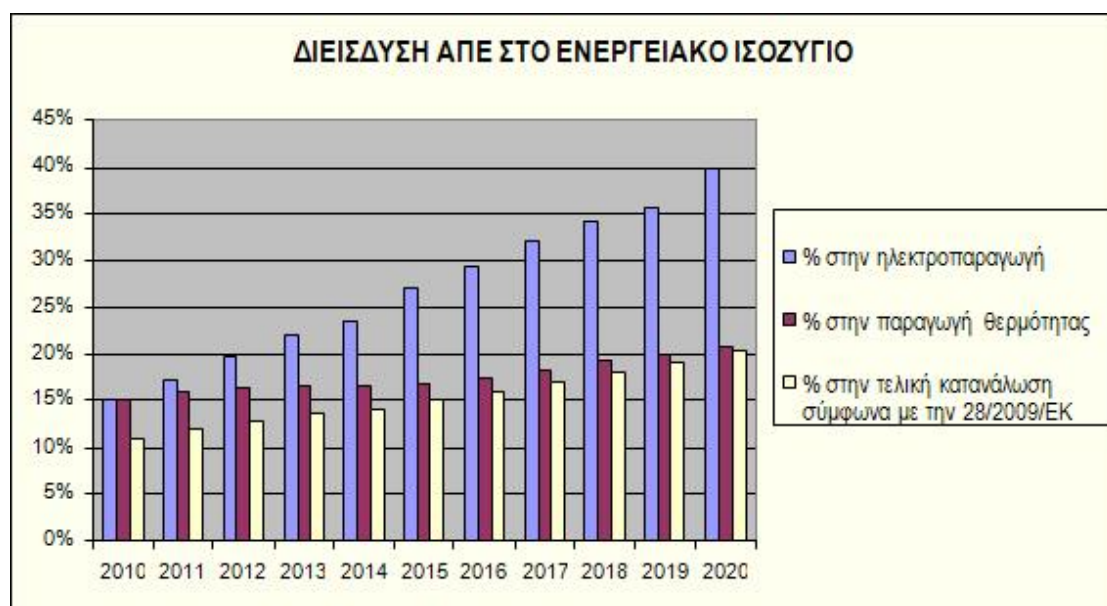
Έτος Τεχνολογία ΑΠΕ	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Α/Π	226	270	287	371	472	491	749	846	1022	1140
Φ/Β	0	1	1	1	1	1	5	9	12	37
ΜΥΗΣ	42	45	45	50	59	64	77	95	158	180
ΒΙΟΜΑΖΑ	1	22	22	22	24	24	24	39	40	41
ΣΥΝΟΛΟ	269	338	355	444	556	580	855	989	1232	1398

Κατά συνέπεια, η διείσδυση των ΑΠΕ στο εθνικό ενεργειακό ισοζύγιο αυξάνεται με αντίστοιχους ρυθμούς. Χαρακτηριστική είναι η αποτύπωση της ενίσχυσης της ενσωμάτωσης τους, η οποία παρουσιάζεται στα γραφήματα της Εικόνας 8, για τον Ιανουάριο του 2012 συγκριτικά με τον Ιανουάριο του 2013. Παράλληλα, καταγράφεται η μείωση της χρήσης του λιγνίτη και του φυσικού αερίου.



Εικόνα 8: Η συμμετοχή των ΑΠΕ στην συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας [12]

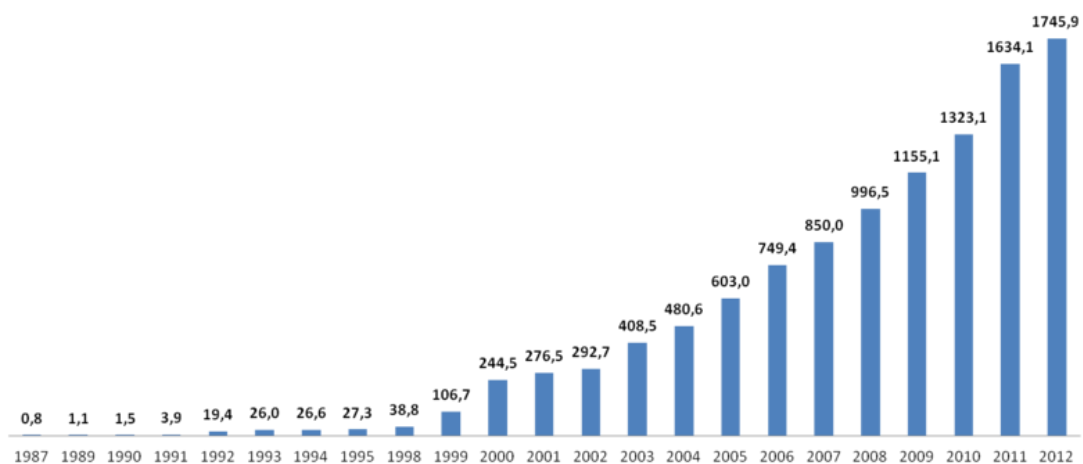
Σε αντίστοιχο κλίμα, κινούνται και οι εθνικοί στόχοι διείσδυσης των ΑΠΕ (Εικόνα 9), όπως είχαν καταγραφεί από το ΥΠΕΚΑ το 2009. Αν συγκρίνουμε μάλιστα το στόχο της ηλεκτροπαραγωγής των ετών 2012 (20%) και 2013 (22%), με την αντίστοιχη καταγεγραμμένη παραγωγή του Ιανουαρίου του 2012 (15,9%) και του Ιανουαρίου του 2013 (24,2%) παρατηρούμε ότι εκτός από την άνοδο της διείσδυσης των ΑΠΕ, προσεγγίζονται ικανοποιητικά και οι εθνικοί στόχοι.



Εικόνα 9: Εθνικοί δεσμευτικοί στόχοι & εκτίμηση διείσδυσης ΑΠΕ [13]

Εντυπωσιακή είναι η ανάπτυξη των αιολικών πάρκων στην Ελλάδα, ειδικά αν λάβουμε σαν έτος αναφοράς το 1987, κατά το οποίο η εγκατεστημένη αιολική ισχύς ήταν μόλις 0,8MW. Παρά το γεγονός ότι τις δεκαετίες του 1980-1990, η αύξηση των Α/Π ήταν στοιχειώδης, ξεκινώντας από το 1999 παρατηρείται αλματώδης εξέλιξη στις επενδύσεις σε αιολική ενέργεια, όπως διαπιστώνεται από το διάγραμμα της Εικόνας 10, σύμφωνα με το οποίο η συνολική εγκατεστημένη ισχύς έφτασε τα 1745,9MW το 2012.

Total installed MW per year



Εικόνα 10: Η συνολική εγκαταστημένη ισχύς των αιολικών πάρκων στην Ελλάδα ανά έτος [14]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

2.1 Μορφές των ΑΠΕ

Οι κύριες μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι οι ακόλουθες [15]:

Αιολική Ενέργεια: Είναι η κινητική ενέργεια που παράγεται από την δύναμη του ανέμου και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια.

Υδραυλική Ενέργεια: Είναι η ενέργεια που παράγεται από τις υδατοπτώσεις και αξιοποιείται από υδροηλεκτρικούς σταθμούς.

Βιομάζα: Είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας, που μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με μία σειρά διεργασιών των φυτικών οργανισμών χερσαίας ή υδρόβιας προέλευσης.

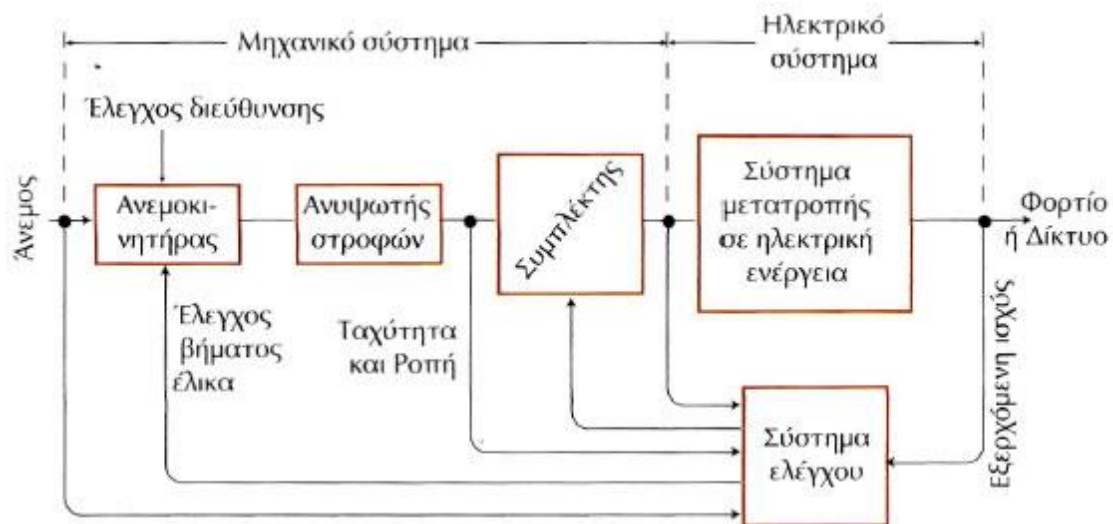
Γεωθερμία: Είναι η θερμική ενέργεια που προέρχεται από το εσωτερικό της γης και εμπεριέχεται σε φυσικούς ατμούς, σε επιφανειακά ή υπόγεια θερμά νερά και σε θερμά ξηρά πετρώματα.

Κυματική ενέργεια: Είναι η ενέργεια από την παλίρροια, τα θαλάσσια ρεύματα και τους ωκεανούς.

Ηλιακή Ενέργεια: Είναι η ενέργεια που παράγεται από την αξιοποίηση των τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται την θερμότητα και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα του ήλιου.

2.1.1 Αιολική Ενέργεια

Αιολική ενέργεια ονομάζεται η κινητική ενέργεια του ανέμου που οφείλεται κυρίως στην ανομοιόμορφη θέρμανση της επιφάνειας της γης από την ηλιακή ακτινοβολία, η οποία προκαλεί την μετακίνηση μεγάλων μαζών αέρα από μια περιοχή σε μια άλλη δημιουργώντας έτσι τους ανέμους [16]. Ο άνεμος είναι μια ανεξάντλητη πρωτογενής πηγή ενέργειας ενώ οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιδράσεις που απορρέουν από τη χρήση ανεμογεννητριών είναι περιορισμένες. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Α/Γ διαφοροποιείται σημαντικά από τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής. Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ένα σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο φαίνονται στην παρακάτω εικόνα [17].



Εικόνα 11: Διάταξη εκμετάλλευσης αιολικής ενέργειας [18]

Συγκεκριμένα, η εκμετάλλευση της κινητικής ενέργειας του ανέμου γίνεται μέσω μιας αεροδυναμικής διάταξης, του ανεμοκινητήρα, που τη μετατρέπει σε ωφέλιμη μηχανική ενέργεια. Στη συνέχεια μέσω ενός συστήματος μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στην έξοδο της γεννήτριας, τροφοδοτείται στο δίκτυο, μέσω της χρησιμοποιούμενης συσκευής συνδέσεώς της με αυτό (Εικόνα 11).

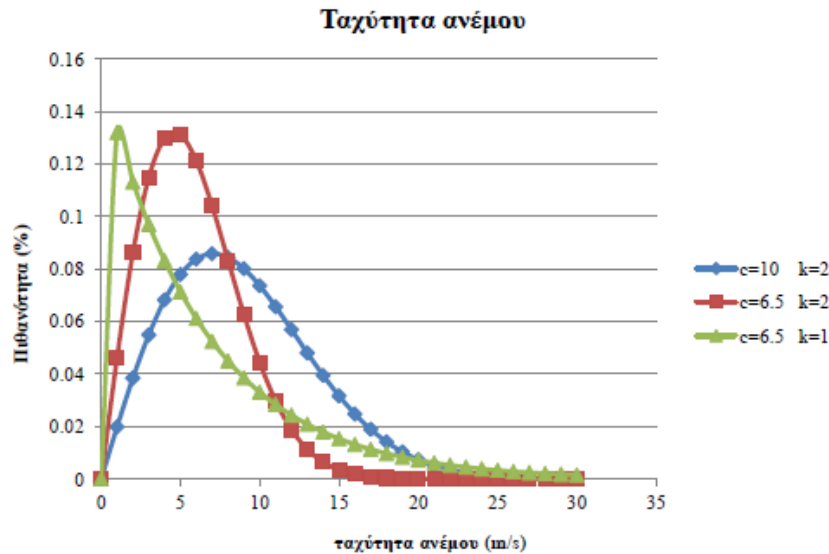
Οι χαρακτηριστικές παράμετροι του ανέμου, οι οποίες επηρεάζουν την απόδοση και την παραγωγή ισχύος είναι:

- Ταχύτητα ανέμου (μέση και στιγμιαία)
- Διεύθυνση ανέμου
- Επικρατούσα ανατάραξη ανέμου
- Στροβιλισμός ανέμου
- Κατανομή ανέμου

Ενώ για την μεταβλητότητα του ανέμου απαιτούνται οι εξής υπολογισμοί [19]:

- Υπολογισμός μέσων ετήσιων ταχυτήτων ανέμου
- Υπολογισμός μέσων μηνιαίων ταχυτήτων ανέμου
- Υπολογισμός μέσων ωριαίων ταχυτήτων ανέμου

Η μαθηματική ανάλυση των πειραματικών ανεμολογικών δεδομένων γίνεται με χρήση της κατανομής Weibull. Η κατανομή Weibull $P(v)dv$ εκφράζει την πιθανότητα να φυσάει άνεμος στην περιοχή, ταχύτητας μεταξύ $v+dv/2$ και $v-dv/2$ (Εικόνα 12). Κάθε κατανομή έχει μια συγκεκριμένη παράμετρο σχήματος c (shape parameter), με $1 < c < 3$ και ένα συντελεστή κλίμακας k .



Εικόνα 12: Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας- Weibull [20]

Οι μεγάλες διακυμάνσεις της ταχύτητας του ανέμου με το χρόνο, οδηγούν σε ασυμφωνία μεταξύ ζήτησης και παραγωγής ενέργειας. Λύση στο πρόβλημα αυτό μπορεί να δοθεί με την χρήση συσκευών αποθήκευσης ενέργειας. Η αποθηκευμένη ενέργεια καλύπτει το ενεργειακό έλλειμμα, όταν η ισχύς της ανεμογεννήτριας πέφτει κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο [17].

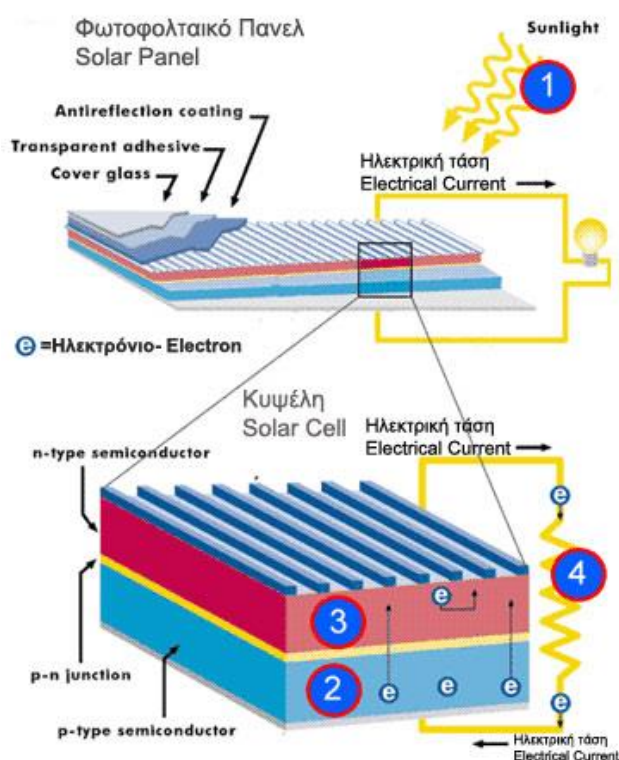
2.1.2 Ηλιακή ενεργεία

Η ηλιακή ενέργεια είναι ανεξάντλητη και ανανεώσιμη. Η εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας είναι αρκετά διαδεδομένη κυρίως με εφαρμογές φωτοβολταϊκών συστημάτων (Φ/Β). Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για εκμετάλλευση της ηλιακής ενέργειας, διακρίνονται σε:

- *Ενεργητικά Ηλιακά Συστήματα:* μετατρέπουν την ηλιακή ακτινοβολία σε θερμότητα.
- *Παθητικά Ηλιακά και Υβριδικά Συστήματα:* αφορούν κατάλληλες αρχιτεκτονικές λύσεις και χρήση δομικών υλικών για τη μεγιστοποίηση της απ' ευθείας εκμετάλλευσης της ηλιακής ενέργειας για θέρμανση, κλιματισμό ή φωτισμό.
- *Φωτοβολταϊκά Ηλιακά Συστήματα:* μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια άμεσα σε ηλεκτρική. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα βασίζονται στο φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή στην άμεση μετατροπή της ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρισμό, με τη χρήση τεχνολογίας ημιαγώγιμων υλικών τα οποία ενεργοποιούνται στο φάσμα του ηλιακού φωτός. Τέτοια συστήματα χαρακτηρίζονται ως ηλιακοί συσσωρευτές και η λειτουργία τους είναι φιλική προς το περιβάλλον, ενώ η διάρκεια ζωής τους φθάνει τα 25 χρόνια [21].

Δομή, λειτουργία και απόδοση των φωτοβολταϊκών στοιχείων

Η δομή και η λειτουργία των φωτοβολταϊκών στοιχείων ή ηλιακών κυψελών (cells) βασίζεται στους ημιαγωγούς, οι οποίοι συνδέονται σε ζεύγη αρνητικής και θετικής φόρτισης (p-n), ώστε να διαμορφώσουν μεγάλης επιφάνειας ηλεκτροδιόδους. Η ορθή κατασκευή της ηλεκτροδιόδου αποτελεί βασική προϋπόθεση της επιτυχούς λειτουργίας της φωτοβολταϊκής κυψέλης ως ημιαγωγού. Οι κυψέλες συνδέονται μεταξύ τους σε ομάδες, συνιστώντας φωτοβολταϊκά πλαίσια (modules). Με τη σύνδεση σε σειρά (το οπίσθιο ηλεκτρόδιο της μιας κυψέλης συνδέεται με το εμπρόσθιο της επόμενης) επιτυγχάνεται αύξηση της τάσης, ενώ η ισχύς του πλαισίου ισούται με την ισχύ της κυψέλης. Αντίθετα, με την παράλληλη σύνδεση (το εμπρόσθιο ηλεκτρόδιο της μιας συνδέεται με το εμπρόσθιο της επόμενης και αντίστοιχα το οπίσθιο ηλεκτρόδιο της μιας με το οπίσθιο της επόμενης) η ισχύς του πλαισίου αποτελεί άθροισμα της ισχύος των κυψελών, ενώ η τάση του ρεύματος ισούται με την τάση της μιας κυψέλης.



Εικόνα 13: Φωτοβολταϊκό πάνελ [21]

Ανάλογα με τις ανάγκες είναι δυνατό να εφαρμοστούν διάφοροι συνδυασμοί των δυο τύπων σύνδεσης, τόσο μέσα στο ίδιο φωτοβολταϊκό πλαίσιο, όσο και μεταξύ των πλαισίων. Το μέγεθος και η μορφή του πλαισίου εξαρτώνται από διάφορες παραμέτρους, όπως η θέση και ο τρόπος εγκατάστασης και η μεταφορά.

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από συστοιχίες φωτοβολταϊκών πλαισίων (modules) με τις μεταλλικές βάσεις τους, καθώς και αντιστροφείς (inverter) που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο. Η μέγιστη ισχύς που αποδίδει ένα φωτοβολταϊκό πλαίσιο σε καθορισμένες συνθήκες ηλιακής ακτινοβολίας και θερμοκρασίας (πρότυπες συνθήκες), αποτελεί ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του και ονομάζεται ισχύς αιχμής (W_p).

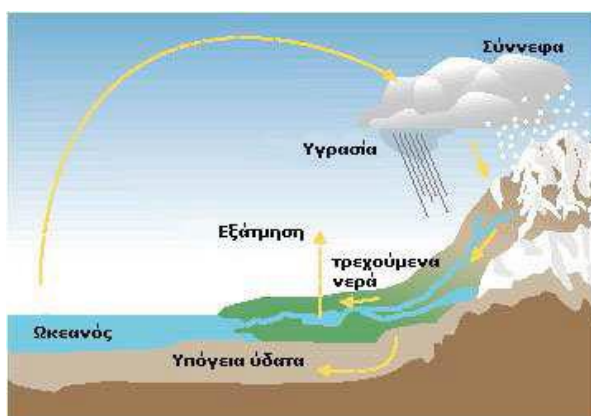
Ορισμένοι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι [22]:

- η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας
- η θερμοκρασία
- η ταχύτητα και η κατεύθυνση του ανέμου
- η ρύπανση
- η γήρανση του συστήματος
- η σκίαση
- οι απώλειες φωτοβολταϊκού συστήματος

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές μικρής και μεγάλης κλίμακας, από μικρές ηλεκτρονικές συσκευές μέχρι την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από φωτοβολταϊκά πάρκα.

2.1.3 Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ή υδραυλική ενέργεια θεωρείται μία από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, καθώς είναι η ηλιακή ενέργεια η οποία με την εξάτμιση του νερού, κινεί τον υδρολογικό κύκλο. Κάθε μέρα ο πλανήτης αποβάλλει μια μικρή ποσότητα νερού καθώς η υπεριώδης ακτινοβολία διασπά τα μόρια του νερού σε ιόντα. Ταυτόχρονα νέες ποσότητες νερού εμφανίζονται λόγω της ηφαιστειακής δραστηριότητας, έτσι ώστε η συνολική ποσότητα του νερού να διατηρείται περίπου σταθερή [8].



Εικόνα 14: Υδρολογικός κύκλος [16]

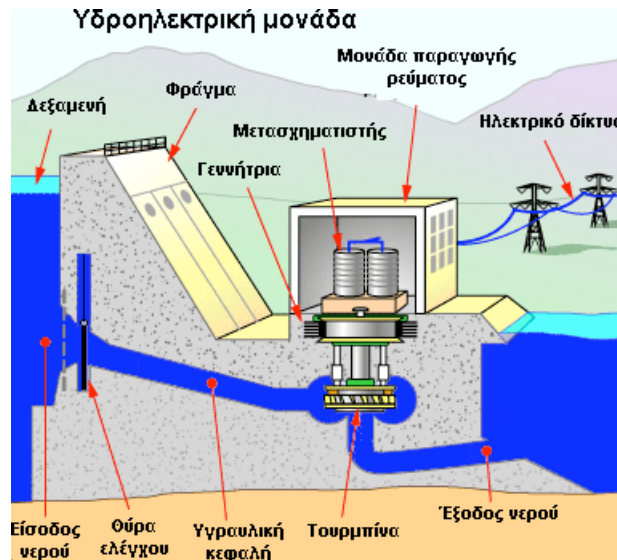
Η υδροηλεκτρική ενέργεια προέρχεται από την μετατροπή της δυναμικής ενέργειας του νερού σε κινητική και στην συνέχεια σε ηλεκτρισμό. Αυτό γίνεται: με την εκμετάλλευση της ροής του νερού σε υδάτινο αγωγό με φυσική κλίση, με αποθήκευση του νερού σε τεχνητή λίμνη ώστε να αυξηθεί το υδραυλικό ύψος, ή με ένα συνδυασμό των παραπάνω. Απαιτείται συνεπώς ένα σημαντικό δυναμικό βαρυτικού ύψους και μια ικανή ποσότητα ροής, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα υδροηλεκτρικής παραγωγής. Η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι μια απόδειξη ότι η ηλιακή ενέργεια μπορεί να αναπτυχθεί κατά οικονομικό τρόπο σε μεγάλη κλίμακα. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι κατά κανόνα πιο οικονομική από την ηλεκτρική ενέργεια που έχει παραχθεί από καύση υδρογονανθράκων ή από πυρηνικά καύσιμα στους συμβατικούς θερμικούς σταθμούς [23].

Η μετατροπή της ενέργειας των υδατοπτώσεων με τη χρήση υδραυλικών τουρμπίνων παράγει την υδροηλεκτρική ενέργεια. Η ενέργεια αυτή ταξινομείται σε:

- υδροηλεκτρική ενέργεια μεγάλης κλίμακας και
- υδροηλεκτρική ενέργεια μικρής κλίμακας.

Η υδροηλεκτρική ενέργεια μικρής κλίμακας διαφέρει σημαντικά από αυτή της μεγάλης σε ότι αφορά στις επιπτώσεις της κάθε μιας στο περιβάλλον. Οι υδροηλεκτρικές μονάδες μεγάλης κλίμακας απαιτούν τη δημιουργία μεγάλων φραγμάτων και τεράστιων δεξαμενών για να αποθηκευτούν οι τεράστιες ποσότητες νερού που απαιτούνται από το σύστημα. Ενώ η παραγωγή ενέργειας από το νερό έχει τα οφέλη της από την άποψη των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και της ατμοσφαιρικής ρύπανσης, έχει επίσης σημαντικές αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι εγκαταστάσεις υδροηλεκτρικής ενέργειας έχουν μια καταστρεπτική επίδραση στις ροές των ποταμών και στις παροχές νερού. Για την κατασκευή μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικών έργων χρειάζεται συνήθως να πλημμυρίσουν μεγάλες εκτάσεις εδάφους, οδηγώντας στη μετατόπιση των ανθρώπων που ζουν στην περιοχή, και στις αρνητικές επιδράσεις στην τοπική πανίδα και χλωρίδα.

Τα συστήματα μικρής κλίμακας τοποθετούνται δίπλα σε ποτάμια και κανάλια με αποτέλεσμα να έχουν λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον. Υδροηλεκτρικές μονάδες μικρότερης δυναμικότητας των 30 MW, χαρακτηρίζονται μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά έργα και θεωρούνται ανανεώσιμες πηγές. Κατά τη λειτουργία τους, μέρος της ροής ενός ποταμού οδηγείται σε στρόβιλο για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας και συνακόλουθα ηλεκτρικής μέσω της γεννήτριας. Η χρησιμοποιούμενη ποσότητα νερού κατόπιν επιστρέφει στο φυσικό ταμιευτήρα ακολουθώντας τη φυσική της ροή. Μια γεννήτρια μετατρέπει αυτή την ενέργεια σε ηλεκτρική. Σε αντίθεση με το ότι συμβαίνει με τα ορυκτά καύσιμα, το νερό δεν αχρηστεύεται κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς [2]. Τα μικρής κλίμακας υδροηλεκτρικά συστήματα είναι κατάλληλα ως μακρινές παροχές ηλεκτρικού ρεύματος για τις αγροτικές και απομονωμένες κοινότητες, ως οικονομική εναλλακτική λύση στην επέκταση ή αναβάθμιση του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας. Τα συστήματα αυτά παρέχουν μια πηγή φτηνής, ανεξάρτητης και συνεχούς ενέργειας, χωρίς υποβάθμιση του περιβάλλοντος.



Εικόνα 15: Υδροηλεκτρική μονάδα [16]

Οι μονάδες υδροηλεκτρικής ενέργειας με βάση την ισχύ που μπορούν να παράγουν, μπορούν να ταξινομηθούν και στις ακόλουθες κατηγορίες του Πίνακα 3.

Πίνακας 3: Κατηγορίες εγκαταστάσεων Υδροηλεκτρικής Ενέργειας

Κατηγορίες Υ/Η μονάδων	Ισχύς (MW)
Μεγάλες υδροηλεκτρικές μονάδες	> 100 MW, συνήθως τροφοδοτούν μεγάλο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας
Μεσαίες υδροηλεκτρικές μονάδες	15 - 100 MW, συνήθως ενισχύουν ένα δίκτυο
Μικρές υδροηλεκτρικές μονάδες	1 - 15 MW, συνήθως ενισχύουν ένα δίκτυο
Μίνι υδροηλεκτρικές μονάδες	<1 MW και > 100 kW, αυτόνομες μονάδες ή συχνότερα ενισχύουν ένα δίκτυο
Μίκρο υδροηλεκτρικές μονάδες	>5 KW και < 100 KW, συνήθως παρέχουν ενέργεια σε μικρές κοινοτικές ή αγροτικές σε απομακρυσμένες από το δίκτυο περιοχές
Pico υδροηλεκτρικές μονάδες	< 5 KW

Η λειτουργία των υδροηλεκτρικών μονάδων βασίζεται στην κίνηση του νερού που περιστρέφει μια τουρμπίνα η οποία θέτει σε λειτουργία μια γεννήτρια. Οι περισσότερες υδροηλεκτρικές μονάδες χρησιμοποιούν ένα φράγμα το οποίο συγκρατεί μια μεγάλη ποσότητα νερού δημιουργώντας έτσι μια μεγάλη δεξαμενή. Κάποιες θύρες στο φράγμα ανοίγουν και λόγω της βαρύτητας το νερό περνάει σε έναν αγωγό ο οποίος το οδηγεί σε μια τουρμπίνα. Καθώς αυτό περνάει από τον αγωγό δημιουργεί μεγάλη πίεση. Το νερό πέφτει πάνω στις φτερωτές μιας τουρμπίνας και την περιστρέφει. Η περιστροφική αυτή κίνηση μεταφέρεται στην γεννήτρια η οποία είναι συνδεδεμένη με την τουρμπίνα με ένα άξονα. Καθώς οι φτερωτές της τουρμπίνας περιστρέφονται, περιστρέφουν τους μαγνήτες της

γεννήτριας γύρω από ένα πηνίο θέτοντας σε κίνηση ηλεκτρόνια και δημιουργώντας έτσι εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (Εικόνα 15).

2.1.4 Άλλες μορφές ΑΠΕ

Οι υπόλοιπες μορφές «πράσινης» ενέργειας παρουσιάζονται συνοπτικά, καθώς η ανάπτυξη τους, ειδικά στην Ελλάδα και στην Κρήτη, είναι ελάχιστη έως μηδενική.

Βιομάζα: Χρησιμοποιεί τους υδατάνθρακες των φυτών (κυρίως αποβλήτων της βιομηχανίας ξύλου, τροφίμων και ζωοτροφών και της βιομηχανίας ζάχαρης) με σκοπό την αποδέσμευση της ενέργειας που δεσμεύτηκε απ' το φυτό με τη φωτοσύνθεση. Ακόμα μπορούν να χρησιμοποιηθούν αστικά απόβλητα και απορρίμματα. Μπορεί να δώσει βιοαιθανόλη και βιοαέριο, που είναι καύσιμα πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα παραδοσιακά. Είναι μια πηγή ενέργειας με πολλές δυνατότητες και εφαρμογές που θα χρησιμοποιηθεί πλατιά στο μέλλον.

Γεωθερμική Ενέργεια: Προέρχεται από τη θερμότητα που παράγεται απ' τη ραδιενεργό αποσύνθεση των πετρωμάτων της γης. Είναι εκμεταλλεύσιμη εκεί όπου η θερμότητα αυτή ανεβαίνει με φυσικό τρόπο στην επιφάνεια, π.χ. στους θερμοπίδακες ή στις πηγές ζεστού νερού. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε απευθείας για θερμικές εφαρμογές είτε για την παραγωγή ηλεκτρισμού. Η Ισλανδία καλύπτει το 80-90% των ενεργειακών της αναγκών, όσον αφορά τη θέρμανση, και το 20%, όσον αφορά τον ηλεκτρισμό, με γεωθερμική ενέργεια.

Ενέργεια από Παλίρροιες: Εκμεταλλεύεται τη βαρύτητα του Ήλιου και της Σελήνης, που προκαλεί ανύψωση της στάθμης του νερού. Το νερό αποθηκεύεται καθώς ανεβαίνει και για να ξανακατέβει αναγκάζεται να περάσει μέσα από μια τουρμπίνα, παράγοντας ηλεκτρισμό. Έχει εφαρμοστεί στην Αγγλία, τη Γαλλία, τη Ρωσία και αλλού.

Ενέργεια από κύματα: Εκμεταλλεύεται την κινητική ενέργεια των κυμάτων της θάλασσας.

Ενέργεια από Ωκεανούς: Εκμεταλλεύεται τη διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στα στρώματα του ωκεανού, κάνοντας χρήση θερμικών κύκλων. Βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας [24].

2.2 Πλεονεκτήματα και προκλήσεις από την αυξημένη διείσδυση ΑΠΕ σε ΣΜΗΕ

Η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση μονάδων ΑΠΕ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εισάγει τόσο θετικές επιπτώσεις, όσο και σημαντικά προβλήματα στη λειτουργία των σύγχρονων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και στο τεχνικό επίπεδο διαχείρισης των ΣΗΕ. Παρακάτω γίνεται καταγραφή των κυριότερων πλεονεκτημάτων, αλλά και προκλήσεων που αντιμετωπίζουν πλέον οι Λειτουργοί των αγορών και οι Διαχειριστές των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας διεθνώς, λόγω των νέων συνθηκών διαχείρισης και λειτουργίας των ΣΗΕ, οι οποίες διαμορφώνονται από την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των μονάδων ΑΠΕ [25].

Αρχικά, τα πλεονεκτήματα της διείσδυσης των ΑΠΕ στα ΣΗΕ, και ένα παραπάνω της αυξημένης διείσδυσης τους, σχετίζονται με το γεγονός ότι εγκατάσταση και εκμετάλλευση των ΑΠΕ επιτυγχάνεται και μέσω Διεσπαρμένης Παραγωγής (ΔΠ). Ως *Διεσπαρμένη* ορίζεται η παραγωγή η οποία περιλαμβάνει μονάδες παραγωγής που έχουν εγκατασταθεί κοντά σε σημεία κατανάλωσης (φορτία), ενώ συνήθως πρόκειται για μονάδες παραγωγής μικρής κλίμακας, έως μερικές εκατοντάδες kW ή και ακόμα 100MW. Οι θετικές επιδράσεις της ενσωμάτωσης των ΑΠΕ στο ηλεκτρικό δίκτυο, συνοψίζονται στα παρακάτω [5], [16], [27]:

- Είναι ανεξάντλητες πηγές ενέργειας και συμβάλουν στη μείωση της εξάρτησης από τους άλλους συμβατικούς ενεργειακούς πόρους (κυρίως ορυκτά καύσιμα), οι οποίοι με το πέρασμα του χρόνου εξαντλούνται.
- Επειδή είναι διάσπαρτες γεωγραφικά οδηγούν στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος και δίνουν την δυνατότητα κάλυψης των ενεργειακών αναγκών σε τοπικό και περιφερειακό επίπεδο, ανακουφίζοντας έτσι τα συστήματα υποδομής και μειώνοντας τις απώλειες από τη μεταφορά ενέργειας.
- Έχουν αρκετά χαμηλό λειτουργικό κόστος, το οποίο δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις της διεθνούς οικονομίας και ειδικότερα των τιμών των συμβατικών καυσίμων.
- Επενδύοντας στις ΑΠΕ δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας, σε τοπικό κυρίως επίπεδο.
- Είναι φιλικές προς τον άνθρωπο και προς το περιβάλλον και η αξιοποίηση τους είναι γενικά αποδεκτή από όλους. Η ανάπτυξη ενεργειακά αποδοτικότερων και πιο φιλικών προς το περιβάλλον μονάδων παραγωγής επιβάλλεται από τις σύγχρονες κλιματολογικές συνθήκες και την ανάγκη μείωσης των ρύπων παγκοσμίως. Στο πλαίσιο –λοιπόν- της μετάβασης προς μια οικονομία με χαμηλές εκπομπές, το μείγμα τεχνολογιών που ελαχιστοποιεί το κόστος εμπεριέχει υψηλή διείσδυση ΑΠΕ.
- Η ανάπτυξη των ΑΠΕ συνδέεται άμεσα με την ενίσχυση των αιεφόρων μορφών τουρισμού, η οποία θα ωφελήσει οικονομικά τις περιοχές όπου θα αναπτυχθεί, αλλά και γενικότερα την Ελλάδα, στο πλαίσιο της διεθνούς προβολής της.
- Η ταχεία προώθηση των ΑΠΕ αποτελεί έναν από τους θεμελιώδεις άξονες πολιτικής της ΕΕ, μαζί με το δραστικό περιορισμό των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) και την εξοικονόμηση ενέργειας.
- Είναι εγχώριες πηγές ενέργειας και συμβάλουν, με αυτόν τον τρόπο, στην ενίσχυση της αυτάρκειας και της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού σε τοπικό, περιφερειακό και εθνικό επίπεδο.
- Προσφέρουν τη δυνατότητα ορθολογικής αξιοποίησης των ενεργειακών πόρων καλύπτοντας ένα ευρύ φάσμα των ενεργειακών αναγκών των χρηστών (π.χ. ηλιακή ηλεκτροπαραγωγή).
- Οι εγκαταστάσεις εκμετάλλευσης των Α.Π.Ε. έχουν σχεδιαστεί για να καλύπτουν τις ανάγκες των χρηστών και σε μικρή κλίμακα εφαρμογών ή σε μεγάλη κλίμακα αντίστοιχα, έχουν μικρή διάρκεια κατασκευής, επιτρέποντας έτσι τη γρήγορη ανταπόκριση της προσφοράς προς τη ζήτηση ενέργειας.

- Η ανάπτυξη στις τεχνολογίες ΑΠΕ είναι ραγδαία, καθώς η επιστημονική έρευνα έχει στραφεί προς αυτήν την κατεύθυνση.

Ειδικότερα, σε οικονομικό και τεχνικό επίπεδο, όταν αυξάνεται η διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο:

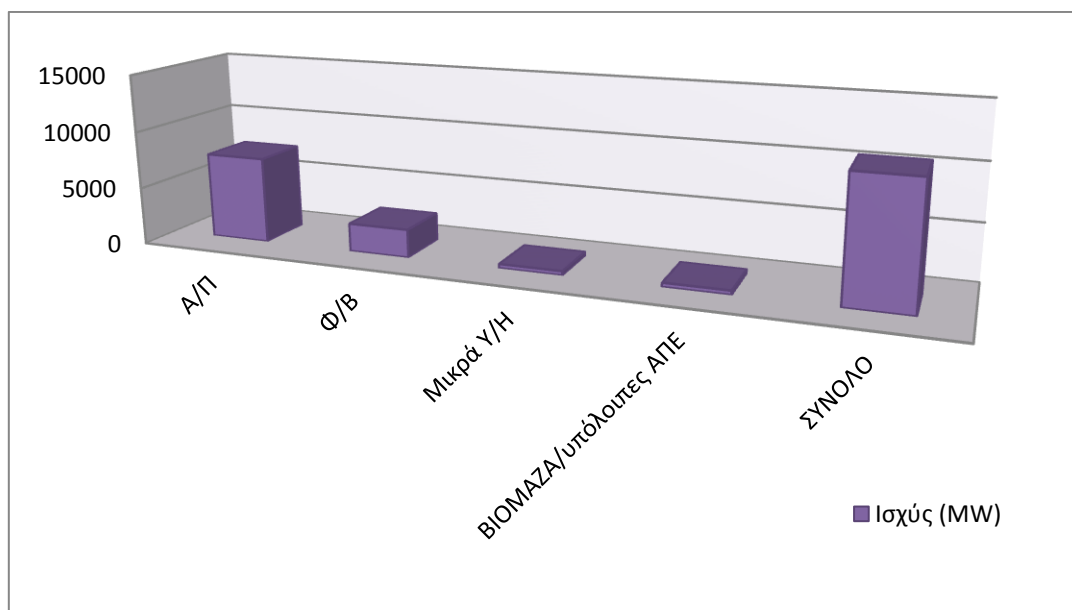
- Μειώνονται οι περιορισμοί στην κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς και η οι απώλειες μεταφοράς, καθώς η παραγωγή γίνεται τοπικά.
- Εξυπηρετούνται οι αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών τόσο σε ποσότητα, όσο και σε ποιότητα ισχύος και ενέργειας.
- Η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας δίνει τη δυνατότητα σε περισσότερους μικρούς παραγωγούς να εγκαθιστούν μονάδες παραγωγής στη μέση και στη χαμηλή τάση.
- Υπάρχει δυνατότητα παροχής εφεδρείας από τις ΑΠΕ σε περίπτωση διακοπής της τροφοδοσίας από το κεντρικό σύστημα παραγωγής.
- Εξίσου σημαντικό είναι το γεγονός της εύκολης εύρεσης θέσεων για την εγκατάσταση των ΑΠΕ.

Παράλληλα, ο στόχος σε ευρωπαϊκό επίπεδο έχει επιμεριστεί δεσμευτικά στα κράτη μέλη και η επίτευξή του συνοδεύεται από πρόσθετα οφέλη, όπως:

- Η βελτίωση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού.
- Η τόνωση της ευρωπαϊκής οικονομίας, η βιομηχανία της οποίας πρωτοπορεί τεχνολογικά στην κατασκευή του απαιτούμενου εξοπλισμού.
- Η αποφυγή μεγάλης έκτασης εξαγωγής συναλλάγματος για εισαγωγές συμβατικών καυσίμων από όλες τις χώρες μέλη της ΕΕ.
- Το Εθνικό Σχέδιο Δράσης ΑΠΕ προβλέπει 10,7 GW ισχύος (εκτός των μεγάλων Υ/Η) το 2020 έναντι 1,7 GW το 2010 (Πίνακας 4, Εικόνα 16)

Πίνακας 4: Εθνικό Σχέδιο Δράσης ΑΠΕ 2020

Τεχνολογία ΑΠΕ	Ισχύς (MW)
Α/Π	7.500
Φ/Β	2.450
Μικρά Υ/Η	350
Βιομάζα/ υπόλοιπες ΑΠΕ	350
ΣΥΝΟΛΟ	10.650



Εικόνα 16: Εθνικό Σχέδιο Δράσης ΑΠΕ 2020 [13]

Όπως προαναφέρθηκε, η συνεχώς αυξανόμενη διείσδυση μονάδων ΑΠΕ στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας εισάγει σημαντικά προβλήματα τόσο στη λειτουργία των σύγχρονων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και στο τεχνικό επίπεδο διαχείρισης των ΣΗΕ. Τα βασικότερα μειονεκτήματα των Α.Π.Ε. είναι τα ακόλουθα [16]:

- Το διεσπαρμένο δυναμικό τους είναι δύσκολο να συγκεντρωθεί σε μεγάλα μεγέθη ισχύος, ώστε να μεταφερθεί και να αποθηκευθεί.
- Έχουν χαμηλή πυκνότητα ισχύος και ενέργειας και συνεπώς για μεγάλη παραγωγή απαιτούνται συχνά εκτεταμένες εγκαταστάσεις.
- Παρουσιάζουν συχνά διακυμάνσεις στη διαθεσιμότητά τους, οι οποίες μπορεί να είναι μεγάλης διάρκειας, απαιτώντας την εφεδρεία άλλων ενεργειακών πηγών ή γενικά δαπανηρές μεθόδους αποθήκευσης.
- Η χαμηλή διαθεσιμότητά τους συνήθως οδηγεί σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης των εγκαταστάσεων εκμετάλλευσής τους.
- Το κόστος επένδυσης ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος σε σύγκριση με τις σημερινές τιμές των συμβατικών καυσίμων παραμένει ακόμη υψηλό.
- Η ανάπτυξη της εκμετάλλευσης του ανέμου ως φυσικού πόρου συναγωνίζεται άλλες χρήσεις της γης, οι οποίες πιθανώς χαίρουν μεγαλύτερης αποδοχής από ότι η παραγωγή ηλεκτρισμού.
- Αν και τα αιολικά πάρκα έχουν σχετικά μικρή επίπτωση στο περιβάλλον σε σύγκριση με τις συμβατικές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας, υπάρχει ένας προβληματισμός για τον θόρυβο που παράγεται από τις λεπίδες του ηλεκτρικού κινητήρα (ρότορα), για την αισθητική (οπτική) επίπτωση και για τα πουλιά που μερικές φορές έχουν σκοτωθεί καθώς πετούσαν προς τους ηλεκτρικούς κινητήρες. Η επίδραση των αιολικών πάρκων στο περιβάλλον

θεωρείται από κάποιες οργανώσεις και κατοίκους περιοχών –με μεγάλες εγκαταστάσεις Α/Γ- περισσότερο επιζήμια παρά ωφέλιμη. Τα περισσότερα από αυτά τα προβλήματα έχουν επιλυθεί ή έχουν σε σημαντικό βαθμό μειωθεί μέσω της τεχνολογικής ανάπτυξης ή μέσω της επιλογής κατάλληλων περιοχών για τη δημιουργία αιολικών πάρκων.

Οικονομικό επίπεδο

Σε οικονομικό επίπεδο, η αυξημένη έγχυση ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ αποδεικνύεται ότι έχει σημαντικές επιπτώσεις στη λειτουργία των σύγχρονων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας παγκοσμίως [25].

- Η υψηλή μεταβλητότητα της παραγωγής από μονάδες ΑΠΕ δημιουργεί αυξημένη αβεβαιότητα στο βραχυπρόθεσμο προγραμματισμό λειτουργίας της αγοράς (χονδρεμπορική αγορά επόμενης ημέρας).
- Η συνεχής μεταβολή της παραγωγής των συμβατικών μονάδων προκειμένου να αντισταθμίζουν συνεχώς την υψηλή μεταβλητότητα της έγχυσης ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ, οδηγεί σε λιγότερο αποδοτική λειτουργία και αυξημένη φθορά του αντίστοιχου εξοπλισμού [27].
- Σε περιπτώσεις όπου η ζήτηση ενέργειας είναι χαμηλή, ενώ η παραγωγή από μονάδες ΑΠΕ υψηλή, οι συμβατικές θερμικές μονάδες βάσης (π.χ. λιγνιτικές, ανθρακικές) λειτουργούν συχνά στα τεχνικά τους ελάχιστα, με αποτέλεσμα τη μείωση της απόδοσής τους και παράλληλα, την αύξηση των εκλυόμενων ρύπων. Αυτό το πρόβλημα εξετάστηκε στην εργασία [28], όπου διαπιστώθηκε ότι για 33% διείσδυση αιολικής και ηλιακής παραγωγής στο δυτικό διασυνδεδεμένο ΣΗΕ των ΗΠΑ, οι αναγκαστικές σβέσεις και εκκινήσεις μονάδων επιδρούσαν αρνητικά στη μείωση των εκπομπών ρύπων λόγω αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ.
- Εξίσου σημαντικό είναι ότι η μεταβλητότητα της αιολικής παραγωγής δεν αντιμετωπίζεται εξισορροπώντας τη μεταβλητότητα κάθε ανεμογεννήτριας μεμονωμένα, αλλά αντιμετωπίζεται συνολικά η αιολική παραγωγή σε μια περιοχή ελέγχου [29]. Η διασπορά των αιολικών πάρκων μειώνει τη συνολική μεταβλητότητα της παραγωγής, μέχρι ενός ορίου, πέραν του οποίου σταματά η θετική επίδραση της ΔΠ [30]. Κατ' αναλογία με τα αιολικά πάρκα, αντίστοιχη χωρική εξομάλυνση των διακυμάνσεων παραγωγής ισχύει και για τους Φ/Β σταθμούς.
- Συνέπεια της παραπάνω αυξημένης μεταβλητότητας της παραγωγής από μονάδες ΑΠΕ (κυρίως από αιολικά πάρκα) είναι η εμφάνιση σημαντικής μεταβλητότητας στις τιμές εκκαθάρισης (price volatility) της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας της επόμενης ημέρας (day-ahead market) [25].

Η Εικόνα 17 παρουσιάζει την σημαντική επίδραση που είχε η αλματώδης αύξηση της διείσδυσης μονάδων ΑΠΕ (κυρίως Φ/Β πάρκων) στην Οριακή Τιμή Συστήματος (ΟΤΣ) της Ελληνικής Χονδρεμπορικής Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΕΧΑΗΕ) κατά την τριετία 2010-2013. Όπως φαίνεται, για δύο αντίστοιχες εβδομάδες των μηνών Μαρτίου 2010 και Μαρτίου 2013, η συνεχής αύξηση της μη τιμολογούμενης έγχυσης ενέργειας από ΑΠΕ οδήγησε σε δραματική μείωση των τιμών εκκαθάρισης της αγοράς, προκαλώντας πολύ συχνά ακόμη και την εμφάνιση μηδενικών τιμών.



Εικόνα 17: Επίδραση παραγωγής από μονάδες ΑΠΕ στην ΟΤΣ της EXAHE [25]

Στο πλαίσιο της βραχυπρόθεσμης λειτουργίας της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και των ΣΗΕ, η αβεβαιότητα και η έντονη μεταβλητότητα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ απαιτούν τη διατήρηση υψηλότερων επιπέδων εφεδρειών ομαλής λειτουργίας, προκειμένου να διατηρείται σταθερό το ισοζύγιο παραγωγής-ζήτησης ισχύος σε πραγματικό χρόνο [25]. Αυτό επιτυγχάνεται – συνήθως – με τη συνεχή παροχή των απαιτούμενων εφεδρειών, των οποίων το κόστος μεταφέρεται στον τελικό καταναλωτή.

Σχετικά με τη μακροπρόθεσμη επίδραση της υψηλής διείσδυσης μονάδων ΑΠΕ, είναι σημαντική η αναφορά στη μεταβλητότητα της παραγωγής τους, αναφορικά με την ενδεχόμενη μόνιμη απόσυρση (decommissioning) συμβατικών σταθμών ενέργειας, καθώς απαιτείται η ύπαρξη συνεχούς εφεδρείας.

Τεχνικό επίπεδο διαχείρισης ΣΗΕ

Πέρα από τις έντονες επιπτώσεις της αυξημένης διείσδυσης μονάδων ΑΠΕ στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας, έχουν παρατηρηθεί σοβαρές επιπτώσεις σε τεχνικό επίπεδο. Παρακάτω παρουσιάζεται μία σύντομη καταγραφή των σημαντικότερων τεχνικών επιπτώσεων, κυρίως της επίδρασης της αυξημένης διείσδυσης αιολικής και φωτοβολταϊκής παραγωγής στη λειτουργία των ΣΗΕ [5], [25].

- Προξενούν αλλαγές τόσο στο επίπεδο, όσο και στην ποιότητα της τάσης των δικτύων, καθώς:
 1. Η υψηλή μεταβλητότητα της παραγωγής μεταφέρεται στην τάση.
 2. Η έγχυση αρμονικών (τάσεις και ρεύματα ανώτερης συχνότητας) από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς επηρεάζει την ποιότητα τάσης και ρεύματος.
- Παρατηρείται πιθανή μεταβολή των ρευμάτων από σφάλματα του δικτύου.
- Διαταράσσεται η ευστάθεια του συστήματος.
- Αναφορικά με την αιολική παραγωγή, οι ανεμογεννήτριες είναι εν γένει επαγωγικές μηχανές που απορροφάνε άεργο ισχύ από το δίκτυο κατά τη λειτουργία τους. Αυτό μπορεί να επηρεάσει την τάση στο δίκτυο, ενώ στην

περίπτωση που οι μηχανές είναι απευθείας συνδεδεμένες στο δίκτυο μπορεί να εμφανιστούν μη αποδεκτά φαινόμενα υψίσυχνων μεταβολών της τάσης (flickering) [31]. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια οι κατασκευαστές των ανεμογεννητριών αναπτύσσουν μηχανές που συνδέονται μέσω βαθμίδων ηλεκτρονικών ισχύος στο δίκτυο, οι οποίες, παρά το υψηλότερο κόστος τους από τις απλές επαγωγικές μηχανές, προσφέρουν πολλαπλά πλεονεκτήματα στον τρόπο διαχείρισής τους και την ποιότητα ισχύος στο Δίκτυο [31].

- Αναφορικά με την Φ/Β παραγωγή, οι συνέπειες θα μπορούσαν να διαχωριστούν σε αυτές των μεγάλων σχετικά Φ/Β εγκαταστάσεων (ενδεικτικά $> 500 \text{ kW}$ και σύνδεση στη ΜΤ) και σε αυτές των μικρότερης κλίμακας Φ/Β συστημάτων που συνδέονται κυρίως στη ΧΤ. Τα μεγάλα συστήματα δημιουργούν προβλήματα κυρίως στη διατήρηση του ισοζυγίου ενεργού ισχύος (λόγω των έντονων και γρήγορων μεταβολών της παραγόμενης ενέργειας), ενώ τα μικρότερα προκαλούν προβλήματα ποιότητας ισχύος στο δίκτυο διανομής.
- Μία άλλη σημαντική επίδραση της αυξημένης διείσδυσης διανεμημένης παραγωγής είναι η τροφοδότηση βραχυκυκλωμάτων από πολλαπλές πηγές τροφοδότησης, η οποία επηρεάζει τη στάθμη του ρεύματος βραχυκύκλωσης, [32].
- Τα ηλεκτρικά δίκτυα έχουν σχεδιαστεί για τη μεταφορά ενέργειας με μονοκατευθυντική ροή, δηλαδή από το Σύστημα Παραγωγής προς τους καταναλωτές, μέσω του δικτύου μεταφοράς και διανομής. Η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ μπορεί να αλλάξει την κατεύθυνση της ροής ισχύος στα δίκτυα, επηρεάζοντας ολόκληρη τη λειτουργία τους. Οπότε, η ροή ισχύος μπορεί πλέον να αντιστρέφεται και να κατευθύνεται από την κατανάλωση προς την παραγωγή. Υπό αυτή τη συνθήκη, το προφίλ της τάσης διαταράσσεται και από συνεχώς μειούμενο προς τη κατεύθυνση της κατανάλωσης μπορεί να εμφανίσει διακυμάνσεις κατά μήκος ενός κλάδου του δικτύου και σε ορισμένες περιπτώσεις να αυξηθεί σε μη αποδεκτά επίπεδα [33], [34].
- Επίσης, τα προστατευτικά μέσα που χρησιμοποιούνταν μέχρι σήμερα δεν έχουν τη δυνατότητα να αναγνωρίσουν τη κατεύθυνση των ρευμάτων βραχυκύκλωσης (θεωρούν δεδομένη την κατεύθυνση τους από την παραγωγή προς την κατανάλωση) παρά μόνο το μέγεθος. Το γεγονός αυτό δυσκολεύει την ανίχνευση της θέσης του σφάλματος στην περίπτωση της ΔΠ [35].

Υπό αυτές τις συνθήκες, είναι φανερό ότι η μεγάλη κλίμακας διείσδυση των ΑΠΕ επηρεάζει σημαντικά τη λειτουργία ενός συστήματος. Συγκεκριμένα, απαιτείται επανεξέταση [5], [26]:

- των αναγκών για επικουρικές υπηρεσίες,
- των απαιτήσεων εφεδρείας,
- του τρόπου λειτουργίας των θερμικών μονάδων,
- της προστασίας του δικτύου.
- Η ανάπτυξη έργων αντλησιοταμίευσης που λειτουργούν ως «αποθήκες» ενέργειας είναι απαραίτητη για την ενίσχυση του ηλεκτρικού συστήματος και την υποστήριξη της ανάπτυξης των ΑΠΕ.

- Τα ηλεκτρικά δίκτυα δεν έχουν σχεδιαστεί βασιζόμενα στη ΔΠ, αλλά μόνο στην κεντρική παραγωγή ενέργειας, κάνοντας την ενσωμάτωση των ΑΠΕ ακόμα πιο δύσκολη.
- Δημιουργείται η ανάγκη για τοπική ρύθμιση της τάσης και σε ορισμένες περιπτώσεις της παραγόμενης ισχύος.
- Πρέπει να περιοριστούν οι παραγόμενες αρμονικές στο δίκτυο, οι οποίες προέρχονται από τους ηλεκτρονικούς μετατροπείς ισχύος.
- Συνίσταται η ενίσχυση και επέκταση της υποδομής παροχής φυσικού αερίου για εξυπηρέτηση των απαιτήσεων λόγω μεγάλης ΔΠ.
- Απαιτούνται ρυθμιστικές παρεμβάσεις για:
 1. Την αποζημίωση των βοηθητικών υπηρεσιών από μονάδες ΔΠ.
 2. Την οργάνωση τους σε μικροδίκτυα (microgrids).
 3. Τη διαχείριση τους ως επιλέξιμους παραγωγούς στα πλαίσια της απελευθερωμένης αγοράς ενέργειας.
 4. Θέματα σχεδιασμού τεχνικών απαιτήσεων και ιδιοκτησίας.

2.3 Μέθοδοι μοντελοποίησης παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ

Η πρόβλεψη είναι απαραίτητη για την ενσωμάτωση της παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ τόσο για τους χειριστές ενός ηλεκτρικού δικτύου, όσο και για τη λειτουργία της αγοράς ενέργειας, δεδομένου ότι οι συμμετέχοντες θα πρέπει στη συνέχεια να λαμβάνουν αποφάσεις, ακόμη και πριν από την πρόβλεψη. Στην περίπτωση της συμβατικής ηλεκτροπαραγωγής, η πρόβλεψη της παραγωγής ισχύος είναι απλή, δεδομένου ότι, εκτός από τις απρόβλεπτες αποτυχίες μιας μονάδας, γενικά ελέγχεται η μελλοντική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε μια τέτοια περίπτωση, δημιουργούνται άμεσα πιθανά χρονοδιαγράμματα, τα οποία στη συνέχεια μεταφράζονται σε σωστή διαχείριση του δικτύου και σε προσφορές στην αγορά. Όταν πρόκειται για την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ, ο μόνος που μπορεί να προσδιορίσει το μελλοντικό χρονοδιάγραμμα των «εργοστασίων παραγωγής» ενέργειας είναι η φύση. Μόνο η υδροηλεκτρική ενέργεια είναι πιο προβλέψιμη, καθώς το νερό που προέρχεται από βροχοπτώσεις και τα χιόνια που λιώνουν μπορεί να αποθηκευτεί σε ταμιευτήρες. Η μη δυνατότητα αποθήκευσης άλλων τύπων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τουλάχιστον με ένα τεχνολογικά και οικονομικά αποδοτικό τρόπο σήμερα, μεγεθύνει την ανάγκη για κατάλληλες προβλέψεις στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Έτσι η ακριβής πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας συμβάλλει αποφασιστικά στην αξιόπιστη και μεγάλης κλίμακας ενσωμάτωση των ΑΠΕ στα ηλεκτρικά δίκτυα.

Παρακάτω, θα δοθεί έμφαση κυρίως στην αιολική ενέργεια, η οποία μέχρι σήμερα ήταν η κορυφαία πηγή ανανεώσιμης ενέργειας. Οι ιδέες και οι έννοιες που παρουσιάζονται θα μπορούσαν να επεκταθούν και στις υπόλοιπες ΑΠΕ, π.χ. στην ηλιακή και στην κυματική ενέργεια, δεδομένου ότι -από μαθηματική άποψη- η μοντελοποίηση και η πρόβλεψη αυτών των μορφών ενέργειας παρουσιάζουν υψηλό επίπεδο ομοιότητας. Η ηλιακή ενέργεια γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής σε ορισμένες χώρες, όπως η Ισπανία και η Γερμανία, μεταξύ άλλων. Η κυματική ενέργεια εμφανίζεται τελικά σαν ένα φυσικό συμπλήρωμα της αιολικής ενέργειας, στο

υπεράκτιο (offshore) ενεργειακό μείγμα, το οποίο συναντάται σήμερα για παράδειγμα, στο Ηνωμένο Βασίλειο και στην Πορτογαλία [36].

2.3.1 Η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ ως στοχαστική διαδικασία

Η πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές βασίζεται σε διεπιστημονική προσέγγιση, η οποία έχει ρίζες στα μαθηματικά, στη στατιστική, στη μετεωρολογία και στη μελέτη συστημάτων ηλεκτρικής ισχύος. Λόγω του συνδυασμού ενός μεγάλου αριθμού σύνθετων φυσικών διεργασιών, σε συνδυασμό με πρόσθετες αβεβαιότητες, πάντα θα υπάρχει ένα τυχαίο τμήμα στη γνώση μας για την παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ. Σαν αποτέλεσμα των παραπάνω παραγόντων, η παραγωγή θεωρείται στοχαστική διαδικασία, η οποία θα πρέπει να μοντελοποιηθεί.

Όπως προαναφέρθηκε, η κύρια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας στην οποία γίνεται αναφορά είναι η αιολική, καθώς αποτελεί την κυρίαρχη μορφή ΑΠΕ παγκοσμίως, αλλά είναι παράλληλα η μορφή με την οποία μοντελοποιείται το ΣΗΕ της Κρήτης στην παρούσα εργασία. Η πρόβλεψη του ανέμου κατηγοριοποιείται ανάλογα με τη χρονική κλίμακα της πρόβλεψης ή τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται. Στην πραγματικότητα, η ταξινόμηση της πρόβλεψης αιολικής παραγωγής όσον αφορά στο χρονοδιάγραμμα είναι ασαφής. Ωστόσο, κάνοντας αναφορά σε μια από τις πολλές μελέτες στον τομέα αυτό [37, 38], μπορεί να διαχωριστεί με βάση το χρονικό ορίζοντα πρόβλεψης σε τρεις κατηγορίες [39]:

- *Άμεση-βραχυπρόθεσμη* (8 ώρες νωρίτερα) πρόγνωση,
- *Βραχυπρόθεσμη* (1 ημέρα νωρίτερα) πρόγνωση,
- *Μακροχρόνια* (πολλές ημερών νωρίτερα) πρόγνωση

Όπως διαπιστώνεται και από τον Πίνακα 5, οι εφαρμογές των τριών ειδών προβλέψεων διαδραματίζουν διαφορετικό ρόλο στα ΣΗΕ.

Πίνακας 5: Κατηγοριοποίηση πρόβλεψης αιολικής παραγωγής ανάλογα με το χρόνο

Χρονικός Ορίζοντας	Χρονική έκταση	Εφαρμογή
Άμεση-βραχυπρόθεσμη	8 ώρες νωρίτερα	- Λειτουργία δικτύου σε πραγματικό χρόνο
Βραχυπρόθεσμη	1 ημέρα νωρίτερα	- Προγραμματισμός οικονομικής κατανομής φορτίου (Economic load dispatch planning) - Λειτουργία αγοράς ενέργειας
Μακροχρόνια	Πολλές ημέρες νωρίτερα	- Προγραμματισμός συντήρησης - Διαχείριση λειτουργίας δικτύου - Βέλτιστο λειτουργικό κόστος

Τα μοντέλα όμως των προβλέψεων διακρίνονται και σε δύο άλλες κατηγορίες, ανάλογα με τη μεθοδολογία που χρησιμοποιείται στην προσέγγιση τους. Συγκεκριμένα:

- *Φυσική ή ντετερμινιστική προσέγγιση*: βασίζεται στην κατώτερη ατμόσφαιρα ή στην πρόβλεψη καιρού (numerical weather prediction - NWP) χρησιμοποιώντας δεδομένα όπως: η θερμοκρασία, η πίεση, η επιφανειακή τραχύτητα (surface roughness). Σε γενικές γραμμές, η ταχύτητα του ανέμου που λαμβάνεται από την τοπική μετεωρολογική υπηρεσία και

μετασχηματίζεται στις ανεμογεννήτριες στο αιολικό πάρκο μετατρέπεται σε αιολική ενέργεια [60].

- *Στατιστική προσέγγιση*: βασίζεται σε τεράστιο όγκο ιστορικών δεδομένων χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις μετεωρολογικές συνθήκες. Συνήθως εμπλέκονται η τεχνητή νοημοσύνη (νευρωνικά δίκτυα, νευρο-ασαφή δίκτυα) και η ανάλυση χρονοσειρών [40], [41].
- *Υβριδική προσέγγιση*: συνδυάζει φυσικές και στατιστικές μεθόδους, ιδιαίτερα χρησιμοποιεί την πρόγνωση του καιρού και την ανάλυση χρονοσειρών.

Ειδικότερα, παρουσιάζονται συγκεκριμένες μέθοδοι πρόβλεψης της αιολικής ισχύος και ταχύτητας του ανέμου στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: Μέθοδοι πρόβλεψης της αιολικής ισχύος

Μοντέλο	Εταιρεία (Developer)	Χρονικός Ορίζοντας	Προσέγγιση
WPMS	ISET, Germany	Άμεση-βραχυπρόθεσμη	Στατιστική
WPPT	IMM & DTU	Βραχυπρόθεσμη	Στατιστική
Prediktor	Risø	Βραχυπρόθεσμη	Φυσική
Zephyr	Risø & IMM	Βραχυπρόθεσμη	Υβριδική
WPS Ver 1.0	Chinese Electric Power Science Institute	Βραχυπρόθεσμη	Υβριδική
ANEMOS	26 partners from 7 countries	Άμεση-βραχυπρόθεσμη	Υβριδική
ARMINES (AWPS)	European Commission	Άμεση-βραχυπρόθεσμη	Υβριδική
Ewind	AWS Truewind	Βραχυπρόθεσμη	Υβριδική
Sipreolico	University Carlos III & Red Eléctrica de España	Βραχυπρόθεσμη	Στατιστική
Previento	Oldenburg University	Μακροχρόνια	Υβριδική
LocalPred & RegioPred	CENER	Μακροχρόνια	Υβριδική
WEPROG	UCC	Μακροχρόνια	Υβριδική

2.4 Μέθοδοι αύξησης της διείσδυσης των ΑΠΕ

Η ουσιαστική αύξηση της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας σε δίκτυα ενέργειας, και ειδικότερα σε συστήματα νησιών μπορεί να επιτευχθεί με τρεις τρόπους:

1. με εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας, ώστε η ενέργεια που δύναται να παραχθεί από τις Α/Γ ή τις υπόλοιπες ΑΠΕ, αλλά δεν μπορεί να απορροφηθεί από το σύστημα, να αποθηκεύεται αντί να απορρίπτεται. Η ενέργεια αυτή ακολούθως ανακτάται σε χρονικές περιόδους, όπου η αιολική παραγωγή υπολείπεται της ζήτησης. Με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες η μόνη ρεαλιστική και βιώσιμη μέθοδος αποθήκευσης για νησιωτικά ηλεκτρικά συστήματα (ισχύος από λίγα έως εκατοντάδες MW) είναι τα αντλησιοταμιευτικά συστήματα. Οι εγκαταστάσεις αυτές αποθηκεύουν την πλεονάζουσα ενέργεια αντλώντας νερό σε ταμιευτήρα, το οποίο βρίσκεται σε κάποιο υψόμετρο, αποδίδοντας την στη συνέχεια στο σύστημα μέσω υδροστροβίλων, όταν αυτό επιτρέπεται [24].
2. με την σύνδεση των μη διασυνδεδεμένων δικτύων με το υπόλοιπο σύστημα μεταφοράς. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις διασύνδεσης συστημάτων, οι οποίες μελετώνται τα τελευταία χρόνια, είναι αυτή της Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα, της Κρήτης και του Νοτίου Αιγαίου. Ακόμα πιο

μεγαλόπνοα είναι τα σχέδια διασύνδεσης Κρήτης- Κύπρου, αλλά και άλλες διεθνείς διασυνδέσεις. Έχει ήδη επιτευχθεί η σύνδεση Ελλάδας - Ιταλίας, επομένως υπάρχει η εμπειρία από την επιτυχή εφαρμογή της, αλλά και από άλλες όπως αυτές μεταξύ Ιταλίας - Σαρδηνίας, Ισπανίας - Μαγιόρκα κ.α.. Ο κοινός στόχος όλων είναι η μείωση του κόστους παραγωγής ενέργειας των μη διασυνδεμένων συστημάτων, αλλά και η εκμετάλλευση του υψηλού αιολικού και ηλιακού δυναμικού, για παράδειγμα, των Ελληνικών νησιών, τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε μεγάλο πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας –σε συγκεκριμένες περιόδους- που στη συνέχεια μπορεί να διοχετεύεται στο διασυνδεδεμένο σύστημα. Δυστυχώς, το κόστος, ειδικά για την Ελλάδα, είναι ιδιαίτερα υψηλό, με αποτέλεσμα τη συνεχή αναβολή υλοποίησης τέτοιων έργων, παρά την εμφανή θετική επίδραση τους τόσο στη διαχείριση ενέργειας της χώρας, όσο και στη οικονομική ζωή της.

3. με τη χρήση υβριδικών σταθμών.

Υβριδικός σταθμός (ΥΒΣ) ή ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα αυτόνομου (μη διασυνδεδεμένου) δικτύου, είναι ο σταθμός ή το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιεί περισσότερες της μιας πηγές ενέργειας καθώς επίσης και σύστημα αποθήκευσης ενέργειας με στόχο τη μεγιστοποίηση διείσδυσης των ΑΠΕ στο σύστημα και όπου η παραγόμενη από ΑΠΕ ενέργεια χρησιμοποιείται κατά προτεραιότητα τόσο στην τροφοδότηση απ' ευθείας του δικτύου όσο και του συστήματος αποθήκευσης. Σύμφωνα με το Ν. 3468/2006 Υβριδικός Σταθμός είναι κάθε σταθμός παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που [24]:

- Χρησιμοποιεί μία, τουλάχιστον, μορφή Α.Π.Ε.
- Η συνολική ενέργεια που απορροφά από το Δίκτυο, σε ετήσια βάση, δεν υπερβαίνει το 30% της συνολικής ενέργειας που καταναλώνεται για την πλήρωση του συστήματος αποθήκευσης του σταθμού αυτού.
- Η μέγιστη ισχύς παραγωγής των μονάδων του σταθμού Α.Π.Ε. δεν μπορεί να υπερβαίνει την εγκατεστημένη ισχύ των μονάδων αποθήκευσης του σταθμού αυτού, προσαυξημένη κατά ποσοστό μέχρι 20%.

Ο ΥΒΣ αποτελείται από:

- Αιολικό Πάρκο, που αποτελεί μονάδα παραγωγής Ανανεώσιμης Πηγής Ενέργειας (μονάδα ΑΠΕ), χωροθετημένο σε περιοχή με τεκμηριωμένο αιολικό δυναμικό.
- Από δύο ταμειυτήρες (τον άνω και τον κάτω) με υψομετρική διαφορά, που συνδέονται με ένα ή περισσότερους αγωγούς.
- Από τις μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, αποτελούμενες από σύστημα αντλιών (Σύστημα Αντλησιοταμίευσης).
- Από τις ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τους υδροστροβίλους.

Το αιολικό πάρκο παράγει ηλεκτρική ενέργεια, η οποία χρησιμοποιείται για να ανυψωθεί ποσότητα νερού με τη χρήση αντλητικού συστήματος από τον κάτω στον άνω ταμειυτήρα. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται αποθήκευση ενέργειας (δυναμική

ενέργεια). Το όλο σύστημα ονομάζεται αντλησιοταμιευτικό (pumped storage system) ή αναστρέψιμο Υδροηλεκτρικό. Τις ώρες παραγωγής εγγυημένης ισχύος (ώρες αιχμών ζήτησης ισχύος) το νερό κατέρχεται και με τη λειτουργία υδροστροβίλου παράγεται εγγυημένη ενέργεια στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας. Στην περίπτωση που δεν έχουμε διαθέσιμη αιολική ισχύ (ασθενείς άνεμοι) το αντλησιοταμιευτικό σύστημα αποθηκεύει ενέργεια από τις συμβατικές μονάδες βάσης (δίκτυο) για την πλήρωση του άνω ταμιευτήρα, πάντα σύμφωνα με τους περιορισμούς που θέτει ο Ν. 3468/06.

Τα πλεονεκτήματα των ΥΒΣ ειδικά για ένα μη διασυνδεδεμένο σύστημα είναι τα εξής [24]:

- Αύξηση της διείσδυσης της αιολικής παραγωγής.
- Αύξηση της διείσδυσης των ΑΠΕ, για την επίτευξη των εθνικών στόχων.
- Περιορισμός της παραγωγής ενέργειας από συμβατικούς σταθμούς.
- Μείωση των εκπομπών CO₂, προστασία του περιβάλλοντος.
- Ευστάθεια του δικτύου.
- Μείωση του ειδικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΕΠΕΚΤΑΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή

Το ενδιαφέρον για την ανάπτυξη των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας - διασυνδεδεμένων και μη- μεγαλώνει συνεχώς λόγω της αυξανόμενης κατανάλωσης και μεταφοράς ενέργειας, της αύξησης των τάσεων μεταφοράς σε εξαιρετικά υψηλές τιμές, καθώς και των διασυνδέσεων διαφόρων συστημάτων. Αρχικά, η επέκταση του δικτύου μεταφοράς δεν συμπεριλαμβανόταν στις μελέτες ανάπτυξης του συστήματος παραγωγής. Η συνήθης παραδοχή που γινόταν ήταν, ότι η ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς και διανομής θα ήταν τέτοια, ώστε να ανταποκρίνεται στην αντίστοιχη ανάπτυξη του συστήματος παραγωγής και στις απαιτήσεις των καταναλωτών. Η δεδομένη πολυπλοκότητα της ενίσχυσης ενός ΣΜΗΕ και οι περιορισμοί που τη συνοδεύουν ωθούσαν στην αποδοχή αυτής της σύμβασης. Η παραπάνω παραδοχή απέκλειε το γεγονός να αντιμετωπιστεί η ανάπτυξη του συστήματος μεταφοράς-διανομής ως εναλλακτική λύση για την αύξηση της παραγωγής. Πράγματι, η διεύρυνση ενός συστήματος μεταφοράς μπορεί να σημαίνει μείωση της ανάγκης για τη δημιουργία ενός απομακρυσμένου σταθμού παραγωγής ή να καθίσταται αναγκαία για να διευκολύνει την αγορά ισχύος από ένα γειτονικό σύστημα ενέργειας ή ακόμα και από ανεξάρτητους παραγωγούς. Η ολοένα και αυξανόμενη ανταγωνιστικότητα στο χώρο της ενέργειας καθιστά αναγκαία την ανάπτυξη του δικτύου μεταφοράς και διανομής με τέτοιο τρόπο ώστε να βοηθά την ύπαρξη υγιούς ανταγωνισμού ανάμεσα σε υποψήφιους παραγωγούς ενεργού και άεργου ισχύος [42]. Τέλος, η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ για όλους τους περιβαλλοντικούς, οικονομικούς και κοινωνικούς λόγους οι οποίοι περιγράφηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο, οδηγεί αναπόφευκτα στην ανάγκη μελέτης και σχεδιασμού της επέκτασης του συστήματος μεταφοράς.

Είναι αξιοσημείωτο ότι πολλές χώρες και ηλεκτρικές εταιρείες έχουν προγραμματίσει την κατασκευή νέων γραμμών μεταφοράς στην τρέχουσα δεκαετία για να διευκολύνουν τη μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ στο δίκτυο, όπως οι ΗΠΑ (37bn\$), το Ηνωμένο Βασίλειο (15bn GBP), η Ισπανία (2010-2014, 4bn€), η ΕΕ (το 2010: 0.91bn€ για διασυνδέσεις). Οι νέες επενδύσεις στα δίκτυα ίσως ξεπεράσουν την τρέχουσα αξία του συνόλου του δικτύου, όταν το κόστος για offshore εφαρμογές είναι 500€/kW. Παράλληλα απαιτούνται μεγάλες αλλαγές στο τεχνικό μέρος που αφορά στην πρόσβαση- σύνδεση στο δίκτυο των μονάδων ΑΠΕ, στη σχεδίαση και διαχείριση του δικτύου με εισαγωγή καινοτομιών και στο ρυθμιστικό πλαίσιο, καθώς και στο θεσμικό πλαίσιο εφαρμογών ΑΠΕ, με σημαντικές επιπτώσεις στα οικονομικά του ηλεκτρικού τομέα.

Όπως προαναφέρθηκε, σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/EC η Ελλάδα έχει δεσμευτικό στόχο 18% συμμετοχής των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας το 2020 (από 6.9% το 2005), αλλά στο Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις ΑΠΕ

το ΥΠΕΚΑ προεξοφλώντας την επίτευξή του έθεσε νέο πλέον φιλόδοξο εθνικό στόχο 20%. Ακόμη πιο φιλόδοξος στόχος είναι η συμμετοχή των ΑΠΕ με 40% στην ηλεκτροπαραγωγή το 2020, γεγονός που καθιστά σχεδόν αδύνατη την προσέγγισή του στο σημερινό περιβάλλον.

Για την επίτευξη του νέου στόχου έχει καθορισθεί ένα μίγμα των ΑΠΕ με συνολική ισχύ περίπου στα 15GW το 2020, από τα οποία πάνω από 10GW περίπου νέα ισχύς ΑΠΕ στο διάστημα 2011-2020 με κυρίαρχη συμμετοχή της αιολικής ενέργειας, ακολουθούμενη από τα φωτοβολταϊκά. Για να επιτευχθεί αυτός ο ρυθμός ανάπτυξης των ΑΠΕ χρειάζονται υψηλές ταχύτητες εφαρμογών -κατά μέσο όρο 1.000MW/έτος- με ευρύ πρόγραμμα κατασκευής νέων γραμμών μεταφοράς και υποσταθμών, αντλητικών σταθμών και ευέλικτων θερμικών μονάδων φυσικού αερίου, με το αντίστοιχο κόστος. Οι επενδύσεις για τα έργα αυτά θα ξεπεράσουν συνολικά τα $20 \cdot 10^6$ €, το οποίο μεταφράζεται σε ετήσιο κόστος $2 \cdot 10^6$ € κατά τη δεκαετία 2010-2020. Τόσο, ο φιλόδοξος στόχος του 40% ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή το 2020, όσο και το μίγμα των ΑΠΕ είναι πολιτικές αποφάσεις χωρίς το αναγκαίο τεχνικό και οικονομικό υπόβαθρο χωρίς το κατάλληλο θεσμικό πλαίσιο και τα εργαλεία σε μια τόσο δύσκολη περίοδο για την Ελλάδα.

Η αιολική ενέργεια αναμένεται να έχει μεγάλη διείσδυση στο δίκτυο (συνολικά 7.500MW το 2020), αλλά η κρίσιμη παράμετρος είναι οι *επεκτάσεις του δικτύου* και οι *νέοι υποσταθμοί* για τη σύνδεση των νέων αιολικών πάρκων. Η ιδέα της σύνδεσης των νησιών με το ηπειρωτικό σύστημα για την αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού τους και τη μεταφορά στην ηπειρωτική χώρα για κατανάλωση, χωρίς ακόμη να υπάρχουν ώριμες μελέτες, θα πρέπει να εξετασθεί με τη σοβαρότητα που απαιτείται. Η σύνδεση των νησιών με το διασυνδεδεμένο σύστημα πρέπει να γίνει, αφού μελετηθούν οι ενδεδειγμένες λύσεις για να καταργηθούν σταδιακά οι αυτόνομοι σταθμοί πετρελαίου στα νησιά και παράλληλα να αναπτυχθούν οι ΑΠΕ, κυρίως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια για να καλύψουν αρχικά τις ανάγκες τους. Η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού στην ηπειρωτική χώρα προσφέρει τις καλύτερες ευκαιρίες και προς την κατεύθυνση αυτή θα πρέπει να στραφούν οι σχετικές διαδικασίες [43].

Στο παρόν κεφάλαιο, εξετάζεται το πρόβλημα της επέκτασης του συστήματος μεταφοράς ενέργειας ενός ηλεκτρικού δικτύου, ειδικότερα όταν σε αυτό καταγράφεται ή είναι επιθυμητή υψηλή διείσδυση ΑΠΕ. Παρουσιάζεται η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος και στη συνέχεια η βελτιστοποίηση της επίλυσης του με τη χρήση γενετικού αλγόριθμου.

3.2 Το πρόβλημα του σχεδιασμού επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Το πρόβλημα του σχεδιασμού επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Transmission Expansion Planning Problem- TEPP) ανάγεται στο πρόβλημα του προσδιορισμού ενός βέλτιστου συστήματος μεταφοράς. Για τον καθορισμό ενός τέτοιου δικτύου αναφοράς απαιτείται η επίλυση ενός προβλήματος ροής ισχύος (power flow-PF) υπό περιορισμούς.

Στην απλούστερη μορφή του, το πρόβλημα υλοποιείται χρησιμοποιώντας τη συνεχή ροή φορτίου (dc power flow), ενώ αν επιθυμούμε να πλησιάσουμε στο πραγματικό

μοντέλο, χρησιμοποιούμε την εναλλασσόμενη ροή φορτίου (ac power flow), αυξάνοντας παράλληλα τους περιορισμούς και τη δυσκολία του προβλήματος. Σκοπός της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους επέκτασης του δικτύου –με την προσθήκη νέων γραμμών- υπό τους περιορισμούς των νόμων ρευμάτων και τάσεων Kirchhoff, καθώς και των ορίων λειτουργίας των μονάδων του συστήματος.

Ο αντικειμενικός στόχος του προβλήματος του σχεδιασμού της επέκτασης του συστήματος μεταφοράς, είναι η βελτιστοποίηση της τοπολογίας του δικτύου με την επιλογή των γραμμών μεταφοράς, οι οποίες πρέπει να προστεθούν στο υπάρχον δίκτυο ώστε να ελαχιστοποιηθεί το συνολικό κόστος παραγωγής και μεταφοράς. Η ελαχιστοποίηση υπόκειται στους περιορισμούς των μονάδων παραγωγής και του δικτύου μεταφοράς.

3.2.1 Περιγραφή του προβλήματος επέκτασης ΣΜΗΕ με ΑΠΕ

Ο βέλτιστος σχεδιασμός της επέκτασης του συστήματος μεταφοράς με διείσδυση ΑΠΕ στα δίκτυα γίνεται ακόμα πιο περίπλοκος, αν ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες που εισάγουν στα ΣΗΕ, οι οποίες αναφέρθηκαν αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Οι παράγοντες στοχαστικής φύσης, όπως η τυχαία αύξηση του φορτίου των ζυγών του δικτύου, η τυχαία ισχύς εξόδου των ΑΠΕ (ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών), η τυχαία αύξηση του κόστους των καυσίμων και η τυχαία αύξηση της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζουν άμεσα το σχεδιασμό του δικτύου.

Επομένως, οι σχεδιαστές του δικτύου καλούνται να μελετήσουν σωστά τις αβεβαιότητες που εισάγονται, ώστε να καλύψουν τις απαιτήσεις του δικτύου με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Λόγω της στοχαστικής φύσης παραγόντων, όπως η ταχύτητα του ανέμου, που επηρεάζει άμεσα την ισχύ εξόδου των Α/Γ και η ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας, από την οποία εξαρτάται η ισχύς εξόδου των Φ/Β, ο βέλτιστος σχεδιασμός πρέπει να γίνει με κάποιο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται εργαλεία στατιστικής και πιθανοτήτων για την άρτια διατύπωση των μαθηματικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των ΣΗΕ. Πλέον, δεν αρκεί μια απλή ροή φορτίου (ΡΦ) για την ανάλυση ενός ΣΗΕ, αλλά χρειάζεται η επίλυση πολλών απλών ΡΦ για διάφορους συνδυασμούς τιμών των στοχαστικών μεταβλητών, δηλαδή η ανάλυση με πιθανοτική ροή φορτίου (ΠΡΦ) [44].

Η αυξανόμενη διείσδυση της διεσπαρμένης παραγωγής στα ΣΗΕ και ιδίως η διείσδυση των ΑΠΕ, σε συνδυασμό με τη διαρκή ανάπτυξη της βιομηχανίας, καθιστούν αναγκαία τη μοντελοποίηση των αβεβαιοτήτων που εισάγουν.

3.2.2 Περιορισμοί Διείσδυσης ΑΠΕ

Στην περίπτωση αιολικών πάρκων που συνδέονται σε ηλεκτρικά συστήματα περιορισμένου μεγέθους, όπως αυτά των μη διασυνδεδεμένων νησιών, τότε το σύστημα και ειδικότερα οι συμβατικές μονάδες παραγωγής εισάγουν σημαντικούς

περιορισμούς στην λειτουργία των Α/Γ. Οι περιορισμοί αυτοί γνωστοί και ως περιορισμοί διείσδυσης, σχετίζονται με τα τεχνικά ελάχιστα των συμβατικών μονάδων και με τη δυναμική τους συμπεριφορά [26].

Τεχνικά Ελάχιστα των Συμβατικών Μονάδων Παραγωγής

Τα αυτόνομα νησιωτικά συστήματα τροφοδοτούνται κατά κανόνα από πετρελαϊκές μονάδες (ντιζελογεννήτριες) με καύσιμο μαζούτ ή ντίζελ, οι οποίες δεν είναι αποδεκτό να υποφορτίζονται κάτω από ένα συγκεκριμένο ποσοστό της ονομαστικής τους ισχύος (κυρίως για λόγους φθορών, αυξημένων αναγκών συντήρησης και αντιοικονομικής λειτουργίας των κινητήρων ντίζελ). Έτσι, σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας τίθεται ο ακόλουθος περιορισμός για κάθε συμβατική μονάδα παραγωγής

$$P_{Dmin} \leq P_D \leq P_{Dn} \quad (3.1)$$

$$P_{Dmin} = c_T P_{Dn} \quad (3.2)$$

Όπου, P_{Dmin} : το τεχνικό ελάχιστο της μονάδας

P_{Dn} : η ονομαστική ισχύς της μονάδας

P_D : η παραγόμενη ισχύς από τη μονάδα και

c_T : ο συντελεστής τεχνικού ελαχίστου, ως ποσοστό της ονομαστικής ισχύος της μονάδας.

Ο συντελεστής τεχνικού ελαχίστου εξαρτάται σημαντικά από το είδος και την παλαιότητα της μονάδας και καθορίζεται κατά περίπτωση. Οι τιμές που γενικά χρησιμοποιούνται είναι 40%-60%, με χαμηλότερες τιμές για μονάδες ελαφρού πετρελαίου και υψηλότερες σχετικά για μονάδες με καύσιμο μαζούτ

Εάν, P_L είναι η ισχύς του φορτίου, P_W η αιολική παραγωγή και P_D η παραγωγή των συμβατικών μονάδων, το ισοζύγιο ισχύος στο σύστημα επιβάλλει:

$$P_D = P_L - P_W \quad (3.3)$$

Οπότε, ο περιορισμός του τεχνικού ελαχίστου οδηγεί στον αντίστοιχο περιορισμό αιολικής διείσδυσης:

$$P_D \geq P_{Dmin} \Rightarrow P_W \leq P_L - c_T P_{Dn} = P_{Wmax,T} \quad (3.4)$$

Δηλαδή, η αιολική παραγωγή δεν μπορεί να υπερβαίνει την τιμή $P_{Wmax,T}$ προκειμένου να μην υποφορτίζονται οι συμβατικές μονάδες παραγωγής. Προφανώς, όσο υψηλότερα τα τεχνικά ελάχιστα (δηλαδή μεγαλύτερος ο συντελεστής c_T) και η ονομαστική ισχύς των εν λειτουργία συμβατικών μονάδων γεννητριών, τόσο χαμηλότερο το όριο διείσδυσης των ανεμογεννητριών.

Εάν ο σταθμός περιλαμβάνει μονάδες με διαφορετικούς συντελεστές τεχνικού ελαχίστου, η παραπάνω σχέση τροποποιείται ως εξής:

$$P_W \leq P_L - \sum c_T P_{Dn} = P_{Wmax,T} \quad (3.5)$$

Όπου η άθροιση γίνεται για το σύνολο των εν λειτουργία μονάδων του σταθμού.

Κατά τον προγραμματισμό της λειτουργίας των συμβατικών μονάδων παραγωγής τηρείται πάντοτε κάποια στρεφόμενη εφεδρεία, δηλαδή η ονομαστική ισχύς των εν λειτουργία ντιζελογεννητριών είναι μεγαλύτερη από την ισχύ εξόδου τους, ώστε να είναι σε θέση να αναλάβουν πρόσθετη ισχύ, αν αυτό απαιτηθεί. Η συνολική στρεφόμενη εφεδρεία καθορίζεται κατ' αρχήν από την εφεδρεία που τηρείται για την κάλυψη ενδεχόμενης απώλειας αιολικής παραγωγής σε χρόνους δευτερολέπτων ή λεπτών, εντός των οποίων δεν υπάρχει χρόνος για εκκίνηση νέας συμβατικής μονάδας. Στην πράξη τηρείται πλήρης εφεδρεία όσον αφορά την αιολική παραγωγή, δηλαδή οι εν λειτουργία μονάδες επαρκούν για την κάλυψη του φορτίου ακόμη και στο ενδεχόμενο πλήρους απώλειας της αιολικής ισχύος.

Δυναμικοί Περιορισμοί

Η έντονη διακύμανση της ισχύος εξόδου των ανεμογεννητριών σε κλίμακα χρόνου δευτερολέπτων, προκαλεί αντίστοιχες μεταβολές στην ισχύ που παράγεται από τις συμβατικές μονάδες, αφού η ισχύς του φορτίου $P_L = P_D + P_W$ είναι περίπου σταθερή. Όταν οι μεταβολές αυτές είναι μεγάλου μεγέθους προκαλούνται διακυμάνσεις στη συχνότητα των αυτόνομων συστημάτων, η οποία ρυθμίζεται από τους ρυθμιστές στροφών των συμβατικών μονάδων του σταθμού.

Ιδιαίτερα σημαντικές αποκλίσεις συχνότητας ή ακόμη και κίνδυνος για την ευστάθεια του συστήματος μπορεί να υπάρξει στην περίπτωση απότομης απώλειας της αιολικής παραγωγής, όταν αυτή καλύπτει σημαντικό ποσοστό του φορτίου. Το ενδεχόμενο αυτό μπορεί να προέλθει κυρίως εξαιτίας σφαλμάτων επί του δικτύου, αλλά δυναμικά και ως αποτέλεσμα υψηλών ταχυτήτων ανέμου που υπερβαίνουν την ταχύτητα αποσύνδεσης των Α/Γ.

Κατά αντιστοιχία με τους περιορισμούς τεχνικών ελαχίστων, οι δυναμικοί περιορισμοί διείσδυσης διατυπώνονται ως:

$$P_W \leq c_D P_{Dn} = P_{Wmax,D} \quad (3.6)$$

Όπου, c_D : ο συντελεστής μέγιστης διείσδυσης αιολικής ισχύος.

Το αποδεκτό όριο στιγμιαίας διείσδυσης της αιολικής ισχύος, c_D , εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά των συμβατικών μονάδων και των ρυθμιστών τους, το είδος και τη γεωγραφική διασπορά των αιολικών πάρκων και τις ιδιαίτερες συνθήκες λειτουργίας κάθε συστήματος και συνεπώς δεν υπάρχει κάποιο όριο γενικής εφαρμογής. Παρ' όλα αυτά, από τη μέχρι σήμερα εμπειρία γίνεται αποδεκτό ότι το μέγιστο στιγμιαίο όριο διείσδυσης δεν πρέπει αν υπερβαίνει το 25%-40% της ισχύος των εν λειτουργία

συμβατικών μονάδων, με τις χαμηλότερες τιμές να αφορούν συστήματα μεγαλύτερου μεγέθους.

Η τήρηση υψηλής στρεφόμενης εφεδρείας συμβατικών μονάδων οδηγεί σε χαλάρωση των δυναμικών περιορισμών διείσδυσης της αιολικής ισχύος.

Συνολικοί Περιορισμοί Διείσδυσης και Κατανομή τους στα Αιολικά Πάρκα

Ο συνολικός περιορισμός απορρόφησης αιολικής ισχύος προκύπτει από τις παραπάνω σχέσεις ως:

$$P_W \leq P_{W \max} = \min \{ P_{W \max, T}, P_{W \max, D} \} \quad (3.7)$$

δηλαδή υπερισχύει ο αυστηρότερος από τους δύο επιμέρους περιορισμούς. Στην περίπτωση που στο σύστημα λειτουργούν περισσότερα του ενός αιολικά πάρκα, το όριο $P_{W \max}$ επιμερίζεται στα επιμέρους πάρκα αναλογικά προς τη συμφωνημένη ισχύ τους. Έτσι, ο περιορισμός που τίθεται για την ισχύ εξόδου του αιολικού πάρκου είναι:

$$P_{Wk} \leq P_{W \max, k} = \left(\frac{P_{Wn, k}}{P_{Wn, tot}} \right) P_{W \max} \quad (3.8)$$

Όπου, $P_{Wn, tot} = \sum_j P_{Wn, j}$ η συνολική εγκατεστημένη ισχύς αιολικών στο σύστημα.

3.3 Μαθηματική διατύπωση του προβλήματος

Ο στόχος της παρούσας εργασίας είναι η επέκταση του δικτύου μεταφοράς ενέργειας της Κρήτης, με την προσθήκη νέων γραμμών ή την αύξηση παλαιών γραμμών, υπό συνθήκες μεγάλης διείσδυσης ΑΠΕ, και συγκεκριμένα αιολικής ενέργειας. Η βασική αρχή του σχεδιασμού επέκτασης του δικτύου μεταφοράς είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής των νέων κυκλωμάτων, ικανοποιώντας την απαίτηση για ασφαλή και αξιόπιστη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας στους παραλήπτες, δηλαδή τους περιορισμούς λειτουργίας του δικτύου. Το σύστημα, όπως και η αιολική διείσδυση μελετήθηκε σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, όπως για παράδειγμα τα μέγιστα και τα ελάχιστα φορτία κατανάλωσης συγκεκριμένων ετών.

3.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής των νέων γραμμών μεταφοράς ανάγεται στο πρόβλημα της ελαχιστοποίησης της παρακάτω αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία περιλαμβάνει τόσο το κόστος, όσο και τις ποινές από ανεπιθύμητες λύσεις που μπορεί να συμπεριλάβει ο αλγόριθμος.

$$\min C = \sum_{(i,j)} c_{ij} n_{ij} + penalty, \quad \mu\epsilon i, j \in \Omega \quad (3.9)$$

Όπου, C : το συνολικό κόστος

c_{ij} : το κόστος της γραμμής μεταφοράς ανάμεσα στον i και στο j ζυγό

n_{ij} : ο αριθμός των νέων γραμμών/ κυκλωμάτων που θα τοποθετηθούν ανάμεσα στους ζυγούς i και j .

penalty: ένα σύνολο συναρτήσεων τιμωρίας, μία για κάθε περιορισμό του προβλήματος

Ω : το σύνολο των ζυγών του συστήματος

Η συνάρτηση (3.9) υπόκειται στους περιορισμούς [61]:

$$Sf + g + r = d \quad (3.10)$$

$$f_{ij} - \gamma_{ij} (n_{ij}^0 + n_{ij}) (\theta_i - \theta_j) = 0 \quad (3.11)$$

$$|f_{ij}| \leq (n_{ij}^0 + n_{ij}) \overline{f_{ij}} \quad (3.12)$$

$$0 \leq g_k \leq \overline{g_k} \quad (3.13)$$

$$0 \leq n_{ij} \leq \overline{n_{ij}} \quad (3.14)$$

$$0.95 \leq V_i \leq 1.05 \quad (3.15)$$

$$real_loss \leq 0.05(aiolikh_paragwgh + \sum_{k=0}^K |g_k|) \quad (3.16)$$

$$\mu \varepsilon \ i, j \in \Omega$$

Όπου, g_k : παραγωγή κάθε γεννήτριας k ,

$\overline{g_k}$: η μέγιστη παραγωγή κάθε γεννήτριας (η ονομαστική ισχύς της),

K : ο αριθμός των γεννητριών,

r : οι απώλειες,

d : η ζήτηση ισχύος,

γ_{ij} : το φανταστικό μέρος της αγωγιμότητας των γραμμών μεταφοράς ,

n_{ij}^0 : ο αριθμός των υπάρχουσων γραμμών μεταφοράς,

n_{ij} : ο αριθμός των προστιθέμενων γραμμών μεταφοράς

$\overline{n_{ij}} = 2$: ο μέγιστος αριθμός γραμμών που μπορεί να προστεθεί από το ζυγό i στο ζυγό j ,

f_{ij} : η ροή ισχύος από το ζυγό i στο ζυγό j (για κάθε γραμμή μεταφοράς),

$\overline{f_{ij}}$: η μέγιστη ροή ισχύος από το ζυγό i στο ζυγό j (το θερμικό όριο της γραμμής μεταφοράς),

V_i : η κανονικοποιημένη (ως προς τη βάση του συστήματος V_{base}) τάση του ζυγού i ,

$real_loss$: το σύνολο των πραγματικών απωλειών,

$aiolikh_paragwgh$: το σύνολο της αιολικής παραγωγής.

Οι εξισώσεις 3.10-11 είναι οι ισοτικοί περιορισμοί του συστήματος, όπου η εξίσωση 3.10 αναφέρεται στη διατήρηση ενέργειας για κάθε κόμβο του συστήματος, δηλαδή στο ισοζύγιο ισχύος που πρέπει να τηρείται στο σύστημα, όπου η παραγωγή ισχύος και οι απώλειες πρέπει να είναι ίσες με τη ζήτηση ισχύος από τους καταναλωτές. Οι εξισώσεις 3.12-16 είναι οι ανισοτικοί περιορισμοί. Η εξίσωση 3.12 αφορά στο θερμικό όριο των γραμμών μεταφοράς, το οποίο δεν μπορεί να υπερβαίνεται, ενώ η 3.13 αναφέρεται στα όρια παραγωγής ισχύος από τις γεννήτριες. Η 3.14 περιορίζει την προσθήκη γραμμών μεταφοράς ανάμεσα σε δύο ζυγούς σε $\overline{n_{ij}}$. Η 3.15 περιορίζει την κανονικοποιημένη τάση κάθε ζυγού ανάμεσα στο 0,95 και το 1,05 και η τελευταία εξίσωση (3.16) περιορίζει το μέγεθος των απωλειών του συστήματος συγκριτικά με την αιολική παραγωγή και τη συμβατική ηλεκτροπαραγωγή του.

Επίσης, πρέπει να σημειωθεί το γεγονός ότι όταν χρησιμοποιούμε το DC μοντέλο, το πρόβλημα απλοποιείται και οι περιορισμοί οι οποίοι εφαρμόζονται είναι οι 3.10-3.14, ενώ όταν χρησιμοποιείται το AC μοντέλο επιβάλλονται όλοι οι περιορισμοί στο σύστημα. Οι περιορισμοί 3.15-16 χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας ως λογικοί τεχνικοί περιορισμοί για το σύστημα.

3.3.2 Συνάρτηση ποινής

Η συνάρτηση ποινής αποτελείται από 3 (τρεις) όρους, καθώς οι περιορισμοί του δικτύου αφορούν σε τρία διαφορετικά επίπεδα:

$$penalty(pp, vp, lp) = power_penalty + voltage_penalty + losses_penalty \quad (3.17)$$

Η συνάρτηση pp εκφράζει τον ανισοτικό περιορισμό 3.12 του θερμικού ορίου των γραμμών μεταφοράς:

$$pp = |f_{ij}| - (n_{ij}^0 + n_{ij}) * f_{ij}^{max} \leq 0 \quad (3.18)$$

Η ποινή για την παραβίαση των ορίων φόρτισης των γραμμών περιγράφεται από τον όρο:

$$power_penalty = w_1 * pp / f_{ij}^{max} * 10^7 \quad (3.19)$$

Η συνάρτηση vp εκφράζει τον ανισοτικό περιορισμό 3.15 αναφορικά με τις τάσεις των ζυγών. Η ποινή για την παραβίαση των ορίων τάσης των ζυγών περιγράφεται από τον όρο:

$$voltage_penalty = (voltage(i) - 1.05)/1.05 * w_2 * 10^7, \text{ όταν } V_i > 1.05$$

και

$$(3.20)$$

$$voltage_penalty = |(voltage(i) - 0.95)|/0.95 * w_2 * 10^7, \text{ όταν } V_i < 0.95$$

Η συνάρτηση lp εκφράζει τον ανισοτικό περιορισμό 3.16 αναφορικά με τον περιορισμό των απωλειών του συστήματος. Η ποινή για την παραβίαση του ορίου απώλειας του συστήματος περιγράφεται από τον όρο:

$$losses_penalty = [0.05(aiolikh_paragwgh + \sum_{k=0}^K |g_k|) - real_{loss}]/total * w_3 * 10^7$$

(3.21)

Όπου w_1, w_2, w_3 : οι συντελεστές των συναρτήσεων ποινής, οι οποίοι δίνουν το κατάλληλο βάρος ανάλογα με την απόκλιση του μεγέθους από το επιθυμητό όριο. Για παράδειγμα, στην περίπτωση του περιορισμού των ορίων φόρτισης (3.18-19) το w_1 παίρνει την τιμή 20, ώστε όταν π.χ. η ροή ισχύος ξεπερνά κατά 10% το όριο φόρτισης, η τιμή της ποινής διπλασιάζεται, όταν η ροή ισχύος ξεπερνά κατά 20% το όριο φόρτισης, η τιμή του ποινής τετραπλασιάζεται κτ.λ. Ο επιθυμητός στόχος για τους συντελεστές, ήταν όσο απομακρύνονται η ισχύς (w_1), η τάση (w_2) και οι απώλειες (w_3) από τα όρια τα οποία είχαν τεθεί, τόσο περισσότερο να μεγαλώνει η ποινή.

Ο προσδιορισμός των ποινών έγινε μετά από πολλές και διαφόρων ειδών δοκιμές, στα πλαίσια χρήσης τους εντός του γενετικού αλγορίθμου. Όπως διαπιστώνεται, οι συναρτήσεις τιμωρίας οι οποίες χρησιμοποιήθηκαν δεν έχουν αμιγώς ούτε αθροιστική μορφή, ούτε μορφή γινομένου. Ο σκοπός της συγκεκριμένης penalty function είναι να απομακρύνει τον αλγόριθμο από την ανεπιθύμητη περιοχή των λύσεων, δίνοντας μια υψηλή τιμή -καθώς επιδιώκουμε την ελαχιστοποίηση του κόστους- στην αντικειμενική συνάρτηση.

3.4 Επίλυση με χρήση γενετικού αλγορίθμου

Η επίλυση του προβλήματος επέκτασης ενός συστήματος μεταφοράς είναι όπως προαναφέρθηκε, πρόβλημα ροής φορτίου υπό περιορισμούς. Η εύρεση της βέλτιστης λύσης της επέκτασης, με την προσθήκη γραμμών μεταφοράς, υλοποιήθηκε με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Πριν γίνει η επίλυση του κύριου προβλήματος αυτής της εργασίας που αφορά την επέκταση του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας της Κρήτης, κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στις μαθηματικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται γενικά στα προβλήματα βελτιστοποίησης [45].

3.4.1 Προβλήματα βελτιστοποίησης

Ως *βελτιστοποίηση* ορίζεται η διαδικασία εύρεσης της καλύτερης δυνατής λύσης ενός προβλήματος, υπό συγκεκριμένες συνθήκες και περιορισμούς. Στόχος μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι είτε η ελαχιστοποίηση του κόστους ή της διεργασίας που πρέπει να καταβληθεί για μία προσπάθεια, είτε η μεγιστοποίηση της

ωφέλειας που μπορούμε να έχουμε από μία διαδικασία. Η απαιτούμενη προσπάθεια ή το επιθυμητό όφελος ενός έργου μπορεί να προσεγγισθεί από την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης τότε μπορεί να οριστεί ως η εύρεση του μέγιστου ή του ελάχιστου αυτής της συγκεκριμένης συνάρτησης που περιγράφει το πρόβλημα με κάποιες συγκεκριμένες μεταβλητές απόφασης.

Για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού, καθώς η εύρεση του ελάχιστου μίας συνάρτησης υπό κάποιους περιορισμούς απαιτεί μαθηματικές τεχνικές. Για προβλήματα βελτιστοποίησης με στοχαστικό χαρακτήρα χρησιμοποιούνται στοχαστικές ανελίξεις, όπως για παράδειγμα οι αλυσίδες Markov, ενώ οι στατιστικές μέθοδοι βοηθούν στην εύρεση εμπειρικών μοντέλων για πειραματικά και στατιστικά μεγέθη. Στη συγκεκριμένη περίπτωση επίλυσης του προβλήματος, επιλέχθηκαν συγκεκριμένα «στιγμιότυπα» του συστήματος μεταφοράς ενέργειας της Κρήτης και όχι η στοχαστική προσέγγιση της συμπεριφοράς των ΑΠΕ, όπως για παράδειγμα τα μέγιστα και τα ελάχιστα φορτία κατανάλωσης συγκεκριμένων ετών.

3.4.2 Γενετικοί αλγόριθμοι

Η βελτιστοποίηση του συστήματος πραγματοποιήθηκε με τη χρήση γενετικού αλγορίθμου. Ο αρχικός κώδικας είχε υλοποιηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού C, ενώ τελικά μεταφέρθηκε στη Matlab, ώστε να είναι πιο εύκολη η συνεργασία του μοντέλου του συστήματος, το οποίο δημιουργήθηκε στο Matpower, με το γενετικό αλγόριθμο. Παρακάτω, παρουσιάζονται τα βασικά χαρακτηριστικά και οι συναρτήσεις ενός γενετικού αλγορίθμου, σύμφωνα με το θεωρητικό πλαίσιο καθώς και ο τρόπος εισαγωγής περιορισμών [45].

Χαρακτηριστικά Γενετικού Αλγορίθμου ή Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms – EA) είναι μια κατηγορία μεθόδων βελτιστοποίησης που βασίζονται τη λειτουργία τους στη μίμηση των διαδικασιών της φυσικής εξέλιξης. Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι εμφανίζονται σε τρεις διαφορετικές μορφές, οι οποίες ακολουθούν διακριτή πορεία, αλλά με ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους: τους Γενετικούς Αλγόριθμους (Genetic Algorithms – GA), τον Εξελικτικό Προγραμματισμό (Evolutionary Programming – EP) και τις Εξελικτικές Στρατηγικές (Evolution Strategies –ES).

Η πρώτη εμφάνιση των Γενετικών Αλγορίθμων (ΓΑ) χρονολογείται στις αρχές του 1950, όταν διάφοροι επιστήμονες από το χώρο της βιολογίας αποφάσισαν να χρησιμοποιήσουν υπολογιστές στην προσπάθειά τους να προσομοιώσουν πολύπλοκα βιολογικά συστήματα. Η συστηματική τους ανάπτυξη όμως, που οδήγησε στην μορφή με την οποία είναι γνωστοί σήμερα, πραγματοποιήθηκε στις αρχές του 1970 από τον John Holland και τους συνεργάτες του στο Πανεπιστήμιο του Michigan.

Η βασική ιδέα της φυσικής επιλογής, που κρύβεται πίσω από τους Εξελικτικούς Αλγόριθμους περιγράφεται από τον Michalewicz με το ακόλουθο παράδειγμα που αναφέρεται ειδικότερα στους Γενετικούς Αλγορίθμους [46]:

«Ας υποθέσουμε ότι μελετάμε έναν πληθυσμό από κουνέλια. Κάποια από αυτά είναι γρηγορότερα και εξυπνότερα από τα υπόλοιπα. Αυτά τα ταχύτερα και ευφυέστερα κουνέλια είναι πολύ πιθανό να επιζήσουν σε μια επιδρομή από αλεπούδες και να μπορέσουν έτσι να συνεχίσουν το έργο που γνωρίζουν καλύτερα από κάθε άλλο: να κάνουν κουνέλια. Αντίθετα, τα πιο αργά και λιγότερο έξυπνα κουνέλια κατά πάσα πιθανότητα θα αφανιστούν ύστερα από μια τέτοια επιδρομή, χωρίς βέβαια να αποκλείσουμε και το ενδεχόμενο ότι ορισμένα από αυτά θα επιζήσουν καθαρά επειδή

στάθηκαν τυχερά. Ο πληθυσμός λοιπόν που θα επιζήσει της επιδρομής θα αρχίσει κάποτε να αναπαράγεται. Το γενετικό υλικό που θα χρησιμοποιηθεί για το νέο πληθυσμό κουνελιών θα προέρχεται από τη μείξη κάποιων αργών με κάποια γρήγορα κουνέλια, κάποιων γρήγορων με γρήγορα, κάποιων έξυπνων με κάποια χαζά κ.ο.κ. Και στην κορυφή αυτών, η φύση κατά καιρούς παράγει και κάποιο κουνέλι-φαινόμενο (γένους *Jerus*) μεταλλάσσοντας κατά κάποιο τρόπο το ήδη υπάρχον γενετικό υλικό. Είναι προφανές ότι οι απόγονοι θα είναι κατά μέσο όρο γρηγορότερα και έξυπνότερα κουνέλια από τα προηγούμενα.

Φυσικά το ίδιο συμβαίνει και για τις αλεπούδες, γιατί διαφορετικά τα κουνέλια θα γίνονταν κάποια στιγμή έξυπνότερα από τις αλεπούδες με αποτέλεσμα να χαλάσει ο βιολογικός κύκλος. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι ακολουθούν βήμα προς βήμα μια διαδικασία όμοια με της παραπάνω ιστορίας».

Οι Ε.Α. βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στη μίμηση της διαδικασίας της εξέλιξης, καθώς και στη διαδικασία της κληρονομικότητας στους ζωντανούς οργανισμούς. Ήταν συνεπώς, αναμενόμενο να δανειστούν την ορολογία της βιολογίας για πολλές διαδικασίες που προσομοιάζουν στις αντίστοιχες βιολογικές [47].

Οι Γ.Α. χρησιμοποιούν ορολογία δανεισμένη από το χώρο της Φυσικής Γενετικής. Αναφέρονται σε άτομα (individuals) ή γονότυπους (genotypes) μέσα σε ένα πληθυσμό. Κάθε άτομο ή γονότυπος αποτελείται από χρωμοσώματα (chromosomes). Στους Γ.Α. αναφερόμαστε συνήθως σε άτομα με ένα μόνο χρωμόσωμα. Τα χρωμοσώματα αποτελούνται από γονίδια (genes) που είναι διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Τα γονίδια που επηρεάζουν συγκεκριμένα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του ατόμου βρίσκονται και σε συγκεκριμένες θέσεις του χρωματοσώματος που καλούνται *loci*. Κάθε χαρακτηριστικό γνώρισμα του ατόμου (όπως για παράδειγμα το χρώμα μαλλιών) έχει τη δυνατότητα να εμφανιστεί με διάφορες μορφές, ανάλογα με την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το αντίστοιχο γονίδιο που το επηρεάζει. Οι διαφορετικές αυτές καταστάσεις που μπορεί να πάρει το γονίδιο καλούνται αλληλόμορφα (alleles).

Πολλοί οργανισμοί έχουν πολλαπλά χρωμοσώματα σε κάθε κύτταρο. Η συνολική συλλογή από γενετικό υλικό (όλα τα χρωμοσώματα μαζί) ονομάζεται γονιδίωμα (genome) του οργανισμού. Ο όρος γονότυπος (genotype) αναφέρεται στο συγκεκριμένο σύνολο γονιδίων που περιέχονται σε ένα γονιδίωμα. Και τέλος ο γονότυπος ύστερα από την εμβρυϊκή ανάπτυξη του οργανισμού δίνει τη θέση του στο φαινότυπο (phenotype), στα σωματικά και πνευματικά του χαρακτηριστικά, όπως χρώμα ματιών, ύψος, μέγεθος εγκεφάλου, ευφυΐα κ.λπ. Ο γονότυπος δηλαδή αναφέρεται στην κωδικοποίηση των εξωτερικών χαρακτηριστικών, ενώ ο φαινότυπος στα ίδια τα χαρακτηριστικά του οργανισμού. Η φυσική επιλογή επιδρά άμεσα στο φαινότυπο αφού τα εξωτερικά χαρακτηριστικά του οργανισμού αλληλεπιδρούν με το περιβάλλον. Στο γονότυπο επιδρά έμμεσα μέσω της επιβίωσης των καλύτερα προσαρμοσμένων ατόμων [47].

Τα χρωμοσώματα, αντίθετα με τα γονίδια δεν είναι μόνιμες δομές. Μπορούν να κατακερματιστούν και τα τμήματά τους να συνδυαστούν διαφορετικά, σε νέες ομάδες γονιδίων. Οι βασικές λειτουργίες που λαμβάνουν χώρα στους οργανισμούς είναι η αναπαραγωγή και η μετάλλαξη (mutation).

Στη διαδικασία της αναπαραγωγής δύο μέλη του οργανισμού ανταλλάσσουν γενετικό υλικό με στόχο την παραγωγή απογόνων. Η διαδικασία γίνεται με τον εξής τρόπο: τα χρωμοσώματα κόβονται σε διάφορα σημεία και αλλάζουν θέση από το ένα μέλος του

ζεύγους στο άλλο. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται διασταύρωση ή επιχιασμός (crossover). Σε κάθε γονέα ανταλλάσσονται γονίδια μεταξύ των ζευγαριών των χρωμοσωμάτων για να σχηματίσουν τον γαμέτη -ένα απλό χρωμόσωμα- και έπειτα οι γαμέτες των δύο γονέων ζευγαρώνουν και δημιουργούν ένα πλήρες σύνολο χρωματοσωμάτων (με χρωμοσώματα ανά ζεύγη) στους απογόνους τους. Οι απόγονοι που εμφανίζονται παίρνουν κάποια από τα χαρακτηριστικά των γονέων τους, ή ακόμα και χαρακτηριστικά από πιο περασμένες γενιές.

Η μετάλλαξη είναι σφάλμα στην αντιγραφή του γενετικού υλικού κατά τη διαδικασία της μίτωσης (της διαίρεσης και πολλαπλασιασμού των κυττάρων). Το σφάλμα αυτό αν συμβεί κατά τη φάση της αντιγραφής, (που ακολουθεί τον επιχιασμό), τότε το τροποποιημένο χρωμόσωμα μπορεί να περάσει στην επόμενη γενιά. Η μετάλλαξη στα είδη, λαμβάνει χώρα σε πολύ αραιά χρονικά διαστήματα και προκαλείται είτε από γενετικούς παράγοντες, είτε από παράγοντες του περιβάλλοντος.

Η βασική αρχή των γενετικών αλγορίθμων είναι η διατήρηση ενός πληθυσμού του προβλήματος με τη μορφή κωδικοποιημένης πληροφορίας και η εξέλιξη του πληθυσμού με την πάροδο του χρόνου. Η εξέλιξη των μελών του πληθυσμού βασίζεται στους νόμους της φυσικής επιλογής (επιβίωση του ισχυρότερου) και του ανασυνδυασμού του γενετικού υλικού μέσα στον πληθυσμό. Ο εξελισσόμενος πληθυσμός δειγματοληπτεί το χώρο αναζήτησης, συσσωρεύει πληροφορία σχετικά με τις περιοχές λύσεων καλής και κακής ποιότητας και ανταλλάσσοντας τμήματα πληροφορίας σχηματίζει λύσεις με βέλτιστη συμπεριφορά για το συγκεκριμένο πρόβλημα.

Έστω λοιπόν ότι έχουμε ένα σύστημα προς βελτιστοποίηση. Αρχικά πρέπει να γίνει η μοντελοποίηση του συστήματος. Το μοντέλο είναι μια απλουστευμένη απεικόνιση του συστήματος. Η απεικόνιση γίνεται με τη χρήση πεπερασμένου αριθμού παραμέτρων, των ανεξάρτητων μεταβλητών σχεδίασης (independent design variables). Οι μεταβλητές αυτές μπορεί να είναι σε δυαδική μορφή (κλασικοί γενετικοί αλγόριθμοι), σε μορφή ακεραίου ή σε μορφή πραγματικού αριθμού (υβριδικοί εξελικτικοί αλγόριθμοι). Όταν είναι σε δυαδική μορφή, κάθε ανεξάρτητη μεταβλητή σχεδίασης αποτελεί ένα γονίδιο και αποτελείται από ένα δυαδικό ψηφίο (0 ή 1) ή μια σειρά δυαδικών ψηφίων (1101010).

Κάθε πίνακας-γραμμή με τα κωδικοποιημένα γονίδια αποτελεί το χρωμόσωμα (chromosome). Όταν στο χρωμόσωμα οι ανεξάρτητες μεταβλητές σχεδίασης πάρουν συγκεκριμένες τιμές, τότε έχουμε μία υποψήφια λύση. Η κωδικοποίηση ενός συγκεκριμένου συστήματος στη μορφή του χρωμοσώματος αποτελεί τον γονότυπο, ενώ το σύστημα που προκύπτει εάν εφαρμοστεί ο συγκεκριμένος γονότυπος στο μοντέλο του συστήματος, αποτελεί τον φαινότυπο που είναι αυτός που τελικά αξιολογείται.

Το πόσο ισχυρό είναι ένα χρωμόσωμα ελέγχεται από την τιμή της συνάρτησης προσαρμογής (fitness function) η οποία εξαρτάται από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για το δεδομένο χρωμόσωμα. Τα ισχυρότερα χρωμοσώματα επιλέγονται για να συνδυαστούν με άλλα ισχυρά για τη δημιουργία απογόνου, ενώ τα άλλα σταδιακά απομακρύνονται από τον πληθυσμό. Η βελτιστοποίηση της συνάρτησης προσαρμογής αντιστοιχεί στην προσαρμογή του ατόμου στο περιβάλλον κατά τη διαδικασία της φυσικής επιλογής.

Ο επιχιασμός υλοποιείται με ανταλλαγή γενετικού υλικού ανάμεσα σε δύο απλοειδείς γονείς, δηλαδή ανάμεσα στα χρωμοσώματα δύο λύσεων της ίδιας γενιάς. Στην πιο

απλή του μορφή, τα δύο χρωμοσώματα κόβονται στην ίδια τυχαία θέση και το πρώτο τμήμα του πρώτου χρωμοσώματος ενώνεται με το δεύτερο τμήμα του δεύτερου και αντίστροφα, οπότε προκύπτουν δύο νέες λύσεις (δύο απόγονοι). Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με αλλαγή τιμής σε κάποιο γονίδιο σε μια τυχαία επιλεγμένη θέση του χρωμοσώματος.

Η νέα τιμή λαμβάνεται από τα αλληλόμορφα (τις διαφορετικές τιμές που μπορεί να πάρει ένα γονίδιο) του συγκεκριμένου γονιδίου. Έτσι αν η κωδικοποίηση γίνεται με δυαδικούς αριθμούς, το στοιχείο που επιλέχθηκε, αν έχει τιμή 0 μετατρέπεται σε 1, ενώ αν έχει τιμή 1 σε 0.

Ο τελεστής της επιλογής (selection) ωθεί την έρευνα σε περιοχές με καλύτερες προοπτικές, όσον αφορά στην αντικειμενική συνάρτηση.

Οι τελεστές της μετάλλαξης και του επιχιασμού εξερευνούν (explore) τον χώρο των λύσεων, ενώ ο τελεστής της επιλογής εκμεταλλεύεται (exploits) την πληροφορία που υπάρχει μέσα στον πληθυσμό. Οι πρώτοι τελεστές τείνουν να αυξήσουν τη διαφοροποίηση μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού, ενώ η επιλογή τείνει να την μειώσει, οδηγώντας σε μεγαλύτερη ομοιομορφία ατόμων με υψηλή τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Η ρύθμιση της ισορροπίας μεταξύ των δύο αντικρουόμενων λειτουργιών (exploration - exploitation) πραγματοποιείται με τον μηχανισμό της επιλογής. Ο όρος που εκφράζει την υπέρσχυση της exploitation σε βάρος της exploration ιδιότητας, ονομάζεται «πίεση επιλογής» (selective pressure). Με αύξηση της selective pressure – η οποία επιτυγχάνεται με την αλλαγή της μεταβλητής q- αυξάνεται η ταχύτητα σύγκλισης του ΕΑ, αλλά μερικές φορές αυξάνεται και η πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστα [46].

Η διαδικασία βελτιστοποίησης έχει ως εξής: αρχικά δημιουργείται τυχαία ένας αριθμός P λύσεων κωδικοποιημένων υπό τη μορφή συμβολοσειρών (συνήθως δυαδικών) που αναπαριστούν τα φυσικά χρωμοσώματα. Η έννοια του πληθυσμού δίνει στους γενετικούς αλγόριθμους μοναδικά χαρακτηριστικά: οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι μέθοδος στοχαστικής βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί πολλές υποψήφιες λύσεις (μεγάλο πληθυσμό υποψήφιων λύσεων) ταυτόχρονα.

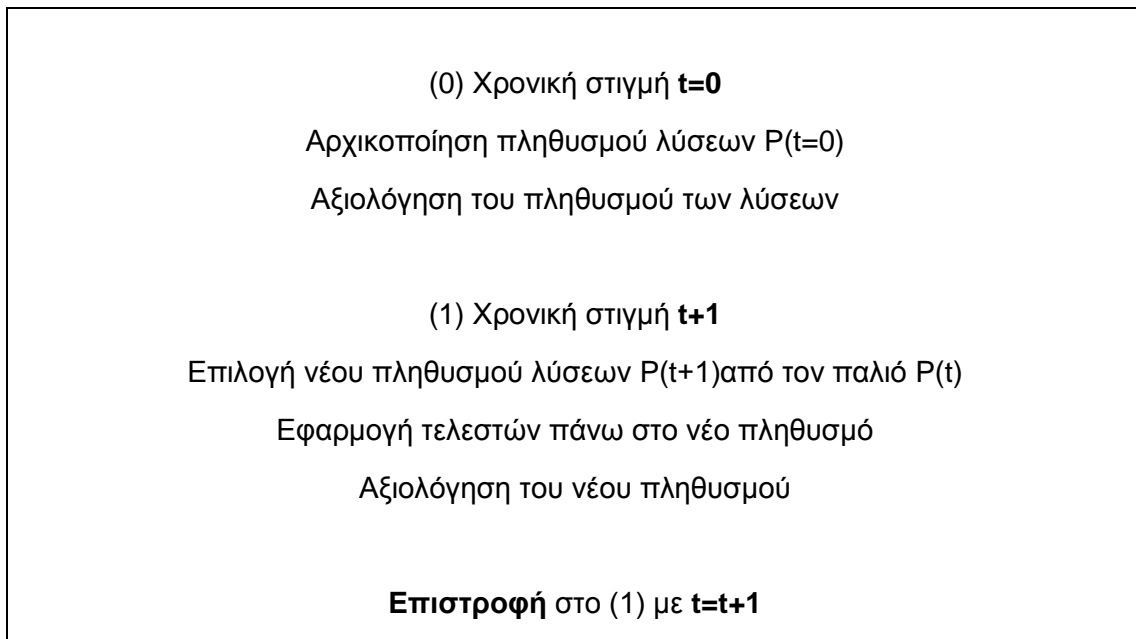
Μετά τη δημιουργία του αρχικού πληθυσμού, κάθε μέλος του πληθυσμού αποκωδικοποιείται σε μία υποψήφια λύση του προβλήματος και ανατίθεται σε αυτή τη λύση μία τιμή «καταλληλότητας», μέσω μίας συνάρτησης ποιότητας που δίνει ένα μέτρο της ποιότητας της κάθε λύσης. Στη συνέχεια επιλέγονται κατά ζεύγη μέλη του πληθυσμού για να αναπαραχθούν και να σχηματίσουν απογόνους (νέες λύσεις). Η επιλογή των ζευγών γίνεται πιθανοτικά, έτσι ώστε η πιθανότητα επιλογής της κάθε λύσης να είναι ανάλογη της «καταλληλότητάς» της. Αυτό εγγυάται ότι οι λύσεις υψηλής ποιότητας θα επιλεγούν πολλές φορές και θα αποτελέσουν τους “γονείς” για πολλές νέες λύσεις, ενώ οι λύσεις χαμηλής ποιότητας θα συνεισφέρουν λιγότερο στο νέο πληθυσμό, με την πιθανότητα να μην επιλεγούν για αναπαραγωγή [45].

Όταν επιλεγούν οι δύο λύσεις-γονείς, οι συμβολοσειρές τους συνδυάζονται ξανά για την παραγωγή μίας λύσης-απογόνου, με τη χρήση τελεστών, οι οποίοι προσομοιώνουν αντίστοιχους γενετικούς μηχανισμούς. Οι βασικοί γενετικοί τελεστές που χρησιμοποιούνται είναι η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Η διασταύρωση ανασυνδυάζει τις συμβολοσειρές των γονέων παράγοντας έναν απόγονο που κληρονομεί χαρακτηριστικά και των δύο γονέων. Η διασταύρωση, αν και αποτελεί το βασικό μηχανισμό αναζήτησης νέων λύσεων, δεν είναι σε θέση να παράγει πληροφορία που δεν υπάρχει ήδη μέσα στον πληθυσμό. Η μετάλλαξη καλύπτει αυτή

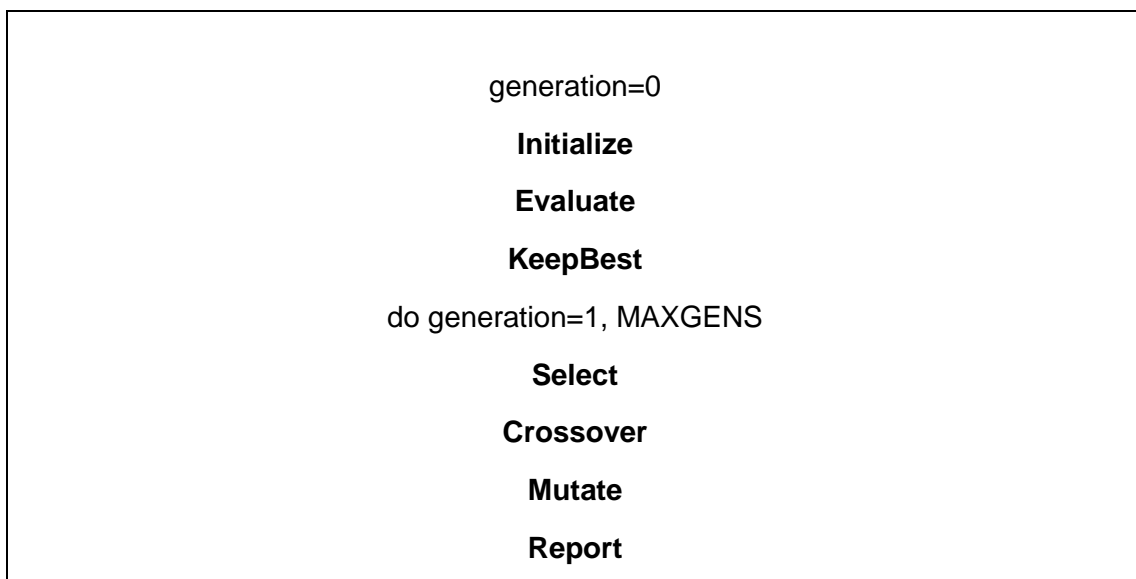
την ανάγκη εισάγοντας νέα πληροφορία στο νέο απόγονο. Η μετάλλαξη πραγματοποιείται με την τυχαία αλλαγή συμβόλων του νέου απογόνου. Γενικά, η μετάλλαξη θεωρείται ως δευτερεύων, αλλά χρήσιμος τελεστής, ο οποίος δίνει μία μη μηδενική πιθανότητα για έλεγχο και αξιολόγηση, σε κάθε δυνατή λύση.

Όταν παραχθούν M νέες λύσεις, θεωρούνται ως η νέα γενιά και αντικαθιστούν πλήρως τους “γονείς” ώστε να προχωρήσει η εξέλιξη. Πολλές γενιές απαιτούνται ώσπου ο πληθυσμός να συγκλίνει στη βέλτιστη ή σε κοντινή της λύση, με τον αριθμό των γενιών να αυξάνεται ανάλογα με τη δυσκολία του προβλήματος βελτιστοποίησης.

Η γενική μορφή των βημάτων ενός εξελικτικού αλγορίθμου δίνεται παρακάτω [45]:



Το βήμα 1 επαναλαμβάνεται, μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού με αποτέλεσμα, ο αλγόριθμος να δίνει μια βέλτιστη λύση που ικανοποιεί όλους τους περιορισμούς. Ο αλγόριθμος με τη μορφή ψευδοκώδικα έχει ως εξής:



<p style="text-align: center;">Evaluate</p> <p style="text-align: center;">Elitist</p> <p style="text-align: center;">enddo</p>

Οι συναρτήσεις του προγράμματος είναι οι εξής:

Initialize: παράγει τον αρχικό πληθυσμό, δίνοντας τυχαίες τιμές, με ομοιόμορφη πιθανότητα, στα γονίδια κάθε χρωμοσώματος του πληθυσμού, εντός των ορίων κάθε ανεξάρτητης μεταβλητής σχεδίασης.

Evaluate: υπολογίζει τη συνάρτηση προσαρμογής κάθε χρωμοσώματος. Είναι η συνάρτηση που αλλάζει ανάλογα με το πρόβλημα που επιλύεται.

KeepBest: φυλάσσει το καλύτερο άτομο κάθε γενιάς (χρωμόσωμα και συνάρτηση προσαρμογής του).

Select: επιλέγει τα χρωμοσώματα του ενδιαμέσου πληθυσμού, με χρήση της μεθόδου tournament selection.

Crossover: Επιλέγει τα ζεύγη για επιχiasμό. Σαρώνει όλα τα άτομα του πληθυσμού. Κάθε ένα επιλέγεται ως υποψήφιο για επιχiasμό με πιθανότητα $p_{crossover}$. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε «Random crossover B». Μόλις συμπληρωθεί το ζεύγος, καλείται η *Xover*.

Xover: πραγματοποιεί επιχiasμό μονού σημείου μεταξύ των δύο ατόμων του επιλεγμένου ζεύγους χρωμοσωμάτων. Το σημείο τομής επιλέγεται με ομοιόμορφη πιθανότητα.

Mutate: από το σύνολο του πληθυσμού και το σύνολο των γονιδίων κάθε χρωμοσώματος επιλέγονται (με ομοιόμορφη πιθανότητα) τα γονίδια που θα μεταλλαχθούν. Η νέα τιμή καθενός, προκύπτει με ομοιόμορφη πιθανότητα, από το διάστημα ορισμού της αντίστοιχης μεταβλητής σχεδίασης. Στην εργασία χρησιμοποιήθηκε «Random uniform mutation», ο οποίος στη συνέχεια αντικαταστάθηκε από το «Random non-uniform mutation I» όπου διαπιστώθηκε βελτιωμένη σύγκλιση.

Report: υπολογίζει στατιστικά στοιχεία του πληθυσμού σε κάθε γενιά και τα εξάγει στο αρχείο εξόδου.

Elitist: εάν το καλύτερο άτομο της παρούσης γενιάς είναι χειρότερο από το καλύτερο της προηγούμενης, το τελευταίο αντικαθιστά το χειρότερο άτομο της παρούσης γενιάς.

Οι παράμετροι ελέγχου ενός γενετικού αλγορίθμου (Control Parameters) είναι οι παρακάτω [61]:

- Αριθμός μεταβλητών (NVARs)
- Αριθμός χρωμοσωμάτων (POPSIZE)
- Αριθμός γενεών (MAXGENS)
- Πιθανότητα επιχιασμού ή διασταύρωσης (PXOVER)
- Πιθανότητα μετάλλαξης (PMUTATION)
- Τελεστής επιλογής (q)

Η επιλογή των τιμών των παραμέτρων ελέγχου κατέχει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στην απόδοση του γενετικού αλγορίθμου και μόνο μέσω των δοκιμών μπορούμε να βγάλουμε συμπεράσματα για τις κατάλληλες τιμές για κάθε πρόβλημα.

Γενικά για την επιλογή των παραμέτρων αυτών ισχύουν τα παρακάτω:

Ο αριθμός χρωμοσωμάτων δηλ. το μέγεθος του πληθυσμού (*POPSIZE*) όσο μεγαλύτερο είναι, αυξάνει την ποσότητα των παραλλαγών που παρουσιάζονται στον αρχικό πληθυσμό σε βάρος των περισσότερων υπολογισμών της καταλληλότητας. Το μέγεθος του πληθυσμού εξαρτάται από το μήκος του χρωμοσώματος και το πρόβλημα. Ένας καλός πληθυσμός περιλαμβάνει μια ποικιλόμορφη επιλογή των ενδεχόμενων δομικών μονάδων, οδηγώντας σε καλύτερη αναζήτηση. Αν ο πληθυσμός χάσει την ποικιλομορφία του τότε λέμε ότι ο αλγόριθμος έχει πρόωρη σύγκλιση και γίνεται μικρή αναζήτηση. Όταν έχουμε μεγάλο μέγεθος χρωμοσώματος και για σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης απαιτούνται μεγαλύτερα μεγέθη πληθυσμών. Τα μεγέθη που προτείνονται από πολλούς ερευνητές για το μέγεθος του πληθυσμού είναι από 25 ως 200 χρωμοσώματα.

Ο αριθμός γενεών (*MAXGENS*) είναι το κριτήριο τερματισμού του γενετικού και εξαρτάται από τη σύγκλιση του, συνήθως ο αριθμός κυμαίνεται από 5 ως 100 γενεές, ανάλογα με το πρόβλημα.

Η πιθανότητα επιχiasμού (*PXOVER*) αναφέρεται στη διαδικασία του επιχiasμού (επιχιασμός μονού σημείου στην προκειμένη περίπτωση) ως εξής: μόλις επιλεγούν τα δύο χρωμοσώματα για να διασταυρωθούν, επιλέγεται ένας τυχαίος αριθμός από το διάστημα [0-1]. Αν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος από την πιθανότητα επιχιασμού *PXOVER* τότε πραγματοποιείται ο επιχιασμός (διασταύρωση). Συνήθως επιλέγεται πιθανότητα από 0.5 ως 1.

Η πιθανότητα μετάλλαξης (*PMUTATION*) προσδιορίζει την πιθανότητα που έχει ένα γονίδιο του χρωμοσώματος να αλλάξει τιμή από 0 σε 1 ή αντίστροφα. Η μετάλλαξη αποκαθιστά μέρος της ποικιλίας του γενετικού υλικού το οποίο έχει καταστραφεί από τις διαδικασίες επιλογής και επιχιασμού. (Μπορούμε να πούμε ότι ενώ η επιλογή και ο επιχιασμός τείνουν να ομογενοποιήσουν τον πληθυσμό βασισμένα στην αρχή της επιβίωσης του ισχυρότερου, η μετάλλαξη επαναφέρει μέρος των γονιδίων που έχουν εξαλειφτεί κατά τη διαδικασία και που μπορεί να είναι απαραίτητα για την αποφυγή τοπικών λύσεων).

Πρακτικά έχει διαπιστωθεί ότι στο πρόβλημα της βέλτιστης επέκτασης συστήματος μεταφοράς η τιμή για την πιθανότητα μετάλλαξης πρέπει να είναι μεγαλύτερη από αυτή που χρησιμοποιείται σε άλλες εφαρμογές γενετικών αλγορίθμων. Οι τιμές συνήθως κυμαίνονται από 0.001 ως 0.15.

Ο τελεστής επιλογής (*q*) είναι η παράμετρος που ρυθμίζει την «πίεση επιλογής» - selective pressure, η οποία εκφράζει την υπερίσχυση της exploitation σε βάρος της exploration ιδιότητας. Με αύξηση της selective pressure αυξάνεται η ταχύτητα σύγκλισης του ΓΑ, αλλά μερικές φορές αυξάνεται και η πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστα. Στον αλγόριθμό μας χρησιμοποιούμε την tournament selection στην οποία για να επιλέξουμε ένα νέο μέλος του ενδιαμέσου πληθυσμού, με ομοιόμορφη πιθανότητα επιλέγουμε *q* μέλη του πληθυσμού, με $q \geq 1$. Συνήθως $q=2$ ή $q=3$. Από τα *q* αυτά μέλη επιλέγουμε το καλύτερο για να πάει στον ενδιαμέσο πληθυσμό. Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία μέχρι να συμπληρωθεί ο αριθμός των ατόμων του ενδιαμέσου πληθυσμού.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι με τους οποίους μπορεί να βελτιωθεί η απόδοση του γενετικού αλγορίθμου αν κατά το αρχικό στάδιο της εφαρμογής του δεν δίνει ικανοποιητικά αποτελέσματα. Ένας τρόπος είναι μεταβάλλοντας τις τιμές των παραπάνω παραμέτρων. Αυτή η μέθοδος δοκιμής-λάθους μπορεί να είναι χρονοβόρα αλλά έχει ως αποτέλεσμα τη βελτίωση της απόδοσης. Αν η αλλαγή των παραμέτρων δεν έχει επίδραση, τότε μπορεί να χρειάζεται αλλαγή της κωδικοποίησης. Σε κάποιες εφαρμογές χρειάζεται δυαδική κωδικοποίηση, ενώ σε άλλες πραγματική [48].

3.4.3 Γενετικοί αλγόριθμοι με περιορισμούς

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να διακριθούν με βάση διάφορα κριτήρια σε διάφορες κατηγορίες, με κυριότερες:

- *Προβλήματα με περιορισμούς ή χωρίς:* Ανάλογα αν υπάρχουν ή όχι περιορισμοί στις μεταβλητές απόφασης.
- *Προβλήματα στατικής ή δυναμικής βελτιστοποίησης:* Τα πρώτα αρκούνται στην εύρεση τιμών για τις μεταβλητές απόφασης, ενώ τα δεύτερα προσπαθούν να εκφράσουν τις μεταβλητές απόφασης συναρτήσει μιας τρίτης παραμέτρου ως προς την οποία γίνεται η βελτιστοποίηση.
- *Προβλήματα βέλτιστου ελέγχου ή μη βέλτιστου ελέγχου:* Στα πρώτα, το πρόβλημα αποτελείται από στάδια τα οποία προκύπτουν το ένα από το άλλο με καθορισμένο τρόπο. Οι μεταβλητές απόφασης διαχωρίζονται σε μεταβλητές ελέγχου, που καθορίζουν τη ροή από το ένα στάδιο στο άλλο και σε μεταβλητές κατάστασης που περιγράφουν την κατάσταση σε οποιαδήποτε στάδιο.

Έτσι, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης θεμελιώνεται ως η εύρεση ενός διανύσματος που θα ελαχιστοποιεί ή θα μεγιστοποιεί αντίστοιχα την αντικειμενική συνάρτηση $F(x)$ του προβλήματος. Και αν είναι πρόβλημα με περιορισμούς, να ικανοποιεί και τους περιορισμούς του προβλήματος.

$$\min_{\vec{x}} F(\vec{x}) \quad \text{ή} \quad \max_{\vec{x}} F(\vec{x}),$$

$$\text{με } \vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (\text{Αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης})$$

Υπό τους περιορισμούς:

$$g_i(\vec{x}) \leq 0, \quad \text{με } i = 1, 2, 3, \dots, m \quad (\text{Ανισοτικοί περιορισμοί})$$

$$i_j(\vec{x}) = 0, \quad \text{με } j = 1, 2, 3, \dots, p \quad (\text{Περιορισμοί ισότητας})$$

Το διάνυσμα X αποτελεί τις μεταβλητές απόφασης, η συνάρτηση $F(x)$ την αντικειμενική συνάρτηση, οι συναρτήσεις $g_i(x)$ τους περιορισμούς ανισότητας και οι συναρτήσεις $i_j(x)$ τους περιορισμούς ισότητας.

Στη γενική περίπτωση μη κυρτού χώρου λύσεων με μη γραμμικούς περιορισμούς οι περισσότερες μέθοδοι που έχουν προταθεί για ΕΑ, βασίζονται στην αρχή των συναρτήσεων τιμωρίας (penalty functions). Μια μέθοδος ποινής μπορεί να

μετατρέψει ένα πρόβλημα με περιορισμούς σε ένα πρόβλημα χωρίς περιορισμούς, με δυο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος χρησιμοποιεί την αθροιστική μορφή:

$$eval(x) = \begin{cases} f(x), & \text{if } x \text{ is feasible} \\ f(x) + penalty(x), & \text{otherwise} \end{cases}$$

όπου το $penalty(x)$ συμβολίζει τη συνάρτηση της ποινής και F την περιοχή εφικτών λύσεων. Αν δεν υπάρχουν παραβιάσεις το $penalty(x)$ θα είναι μηδέν, αλλιώς θα είναι θετικό. Πλέον η συνάρτηση $eval(x)$ θα είναι η κυρίως αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος.

Ο δεύτερος τρόπος χρησιμοποιεί την μορφή γινομένου:

$$eval(\vec{x}) = \begin{cases} f(\vec{x}), & \vec{x} \in F \\ f(\vec{x})p(\vec{x}), & \text{otherwise} \end{cases}$$

Στις περισσότερες μεθόδους χρησιμοποιείται ένα σύνολο συναρτήσεων τιμωρίας, μία για κάθε περιορισμό του προβλήματος. Κάθε μία συνάρτηση μετρά το βαθμό μη ικανοποίησης του περιορισμού και προσθέτει κάποιο ποσό στην αντικειμενική συνάρτηση ($penalty$). Αν δεν υπάρχουν παραβιάσεις το $p(x)$ θα είναι ένα, αλλιώς θα είναι μεγαλύτερο από ένα.

3.5 Matpower

Η μοντελοποίηση του συστήματος μεταφοράς της Κρήτης, αλλά και η υλοποίηση του γενετικού αλγορίθμου πραγματοποιήθηκαν με τη βοήθεια του προγράμματος Matpower του Matlab, της εταιρείας Mathworks. Το Matpower [49] είναι ένα πρόγραμμα το οποίο αποτελείται από M-files του Matlab και χρησιμοποιείται κυρίως για την επίλυση προβλημάτων Ροής Φορτίου και Βέλτιστης Ροής Φορτίου.

Το Matpower αναπτύχθηκε από τους Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sánchez και Deqiang Gan του PSERC στο πανεπιστήμιο Cornell υπό την επίβλεψη του Robert J. Thomas. Η ανάγκη για συγκεκριμένο κώδικα ροής φορτίου και βέλτιστης ροής φορτίου σε Matlab δημιουργήθηκε από τις υπολογιστικές απαιτήσεις του ερευνητικού έργου PowerWeb. Η έκδοση που χρησιμοποιήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας Εργασίας είναι το Matpower 5.0 της MatlabR2014b.

3.5.1 Εκτέλεση Προσομοιώσεων

Η βασική λειτουργία του Matpower είναι η επίλυση προβλημάτων Απλής Ροής Φορτίου (Power Flow - PF) και Βέλτιστης Ροής Φορτίου (Optimal Power Flow – OPF). Η διαδικασία αυτή απαιτεί την εισαγωγή των δεδομένων και των σχετικών παραμέτρων του συστήματος, την κλήση της συνάρτησης που εκτελεί την προσομοίωση και την εμφάνιση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων.

Η εκτέλεση των προσομοιώσεων πραγματοποιείται με τη χρήση βασικών συναρτήσεων, όπως η `runpf` (εκτέλεση Απλής Ροής Φορτίου) ή η `runopf` (εκτέλεση Βέλτιστης Ροής Φορτίου). Για να εκτελεστεί μια απλή ροή φορτίου με τη μέθοδο Newton-Raphson, π.χ. για το σύστημα 5 ζυγών που συναντάμε στα αποθηκευμένα

αρχεία του Matpower με το όνομα case5.m, αρκεί να πληκτρολογηθεί στο παράθυρο εντολών η εντολή: `runpf('case5')` .

Η εντολή `runpf('case...')` υπολογίζει αυτόματα την απλή AC ροή φορτίου. Αν επιθυμούμε τον υπολογισμό του απλούστερου μοντέλου DC του συστήματος, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν οι εντολές:

```
opt = mproption('PF_DC',1,'OUT_ALL',1);
```

```
results = runpf(case5,opt);
```

3.5.2 Μοντελοποίηση συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας

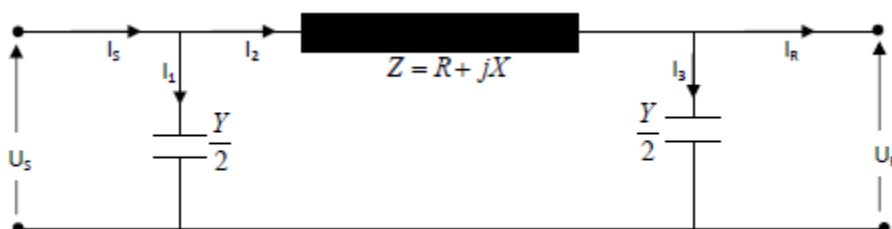
Το Matpower χρησιμοποιεί όλα τα καθιερωμένα μοντέλα Μόνιμης Κατάστασης Λειτουργίας που εφαρμόζονται για τη Ροή Φορτίου. Στις προσομοιώσεις του δικτύου της Κρήτης χρησιμοποιήθηκε αρχικά το DC μοντέλο, ενώ στη συνέχεια το AC μοντέλο με αυξημένους περιορισμούς, ώστε να πλησιάσει περισσότερο στην πραγματική απεικόνιση του συστήματος. Παρακάτω, παρουσιάζονται και τα δύο είδη μοντέλων. Εσωτερικά, τα μεγέθη των τιμών είναι εκφρασμένα ανά μονάδα (α.μ. / p.u.) και οι γωνίες των μιγαδικών αριθμών σε rad.

AC Μοντέλο

Τα αρχεία δεδομένων 'case' (π.χ. case5.m, case9.m, case14.m κ.τ.λ.) τα οποία χρησιμοποιούνται από το Matpower είναι αρχεία M-files ή MAT-files του Matlab, τα οποία ορίζουν ή επιστρέφουν μία δομή *mpc*, η οποία αναφέρεται σαν «Δομή του Matpower case». Οι μεταβλητές της δομής *mpc* είναι οι baseMVA, bus, branch, gen και (προαιρετικά) gencost. Η μεταβλητή baseMVA είναι βαθμωτή, ενώ οι υπόλοιπες είναι διανύσματα (πίνακες). Κάθε γραμμή του πίνακα αντιστοιχεί σε ένα ζυγό (bus), κλάδο (branch) ή γεννήτρια (generator). Η μορφή των δεδομένων είναι όμοια με αυτή των πρότυπων των IEEE και PTI. Οι αριθμοί των σειρών που αντιστοιχούν στις μεταβλητές bus, branch και gen είναι n_b , n_l και n_g αντίστοιχα.

Κλάδοι

Κάθε κλάδος, είτε πρόκειται για γραμμή μεταφοράς μεσαίου μεγέθους, είτε για μετασχηματιστή μοντελοποιείται ως μια γραμμή μεταφοράς του πρότυπου Π-μοντέλου (Εικόνα 18), με αντίσταση σειράς R , επαγωγική αντίδραση σειράς X και συνολική χωρητικότητα φορτίου γραμμής B , σε σειρά με έναν ιδανικό μετασχηματιστή φάσης.



Εικόνα 18: Π-ισοδύναμο γραμμής μεταφοράς μεσαίου μήκους

$$V_S = \left(\frac{Z*Y_S}{2} + 1 \right) * V_R + I_R * Z \quad (3.22)$$

$$I_S = V_R * Y_S \left(\frac{Z*Y_S}{4} + 1 \right) + \left(\frac{Z*Y_S}{2} + 1 \right) * I_R \quad (3.23)$$

Ο μετασχηματιστής, του οποίου ο λόγος tap (tap ratio) έχει τιμή τ και ολίσθηση φάσης θ , είναι τοποθετημένος στο άκρο *from* του ζυγού. Οι τάσεις κλάδων και τα ρεύματα στα άκρα *from* (V_S) και *to* (V_R) του κλάδου σχετίζονται με τον πίνακα αγωγιμοτήτων κλάδου Y_{br} ως εξής [50]:

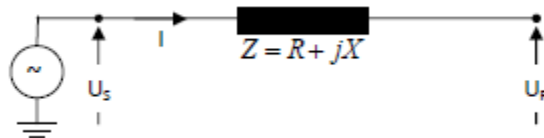
$$\begin{pmatrix} I_S \\ I_R \end{pmatrix} = Y_{br} \begin{pmatrix} V_S \\ V_R \end{pmatrix} \quad (3.24)$$

Όπου:

$$Y_{br} = \begin{pmatrix} (Y_S + \frac{jB}{2})^{\frac{1}{\tau}} & -Y_S \frac{1}{\tau e^{-j\theta}} \\ -Y_S \frac{1}{\tau e^{j\theta}} & Y_S + \frac{jB}{2} \end{pmatrix} \quad (3.25)$$

και $Y_S = \frac{1}{R+jX}$

Εάν πρόκειται για γραμμή μεταφοράς μικρού μήκους, η μοντελοποίηση είναι απλούστερη, καθώς η επίδραση της χωρητικότητας είναι αμελητέα. Το ισοδύναμο κύκλωμα λοιπόν θα περιλαμβάνει μόνο την αντίσταση και την επαγωγική αντίδραση της γραμμής (Εικόνα 19).



Εικόνα 19: Ισοδύναμο γραμμής μεταφοράς μικρού μήκους

Ενώ αν πρόκειται για γραμμή μεταφοράς μεγάλου μήκους, δεν μπορεί να αναπαρασταθεί με τη χρήση συγκεντρωμένων παραμέτρων. Πρέπει να ληφθεί υπόψη το γεγονός ότι κάθε στοιχειώδες τμήμα της γραμμής παρουσιάζει αντίσταση, επαγωγική και χωρητική αντίδραση.

Γεννήτριες

Η Γεννήτρια μοντελοποιείται σαν μια μιγαδική έγχυση ισχύος σε ένα συγκεκριμένο ζυγό. Για τη Γεννήτρια i , η έγχυση ισχύος είναι:

$$S_g^i = P_g^i + jQ_g^i \quad (3.26)$$

Ορίζουμε τον πίνακα $S_g = P_g + jQ_g$ ως τον πίνακα με διαστάσεις $n_g \times 1$, ο οποίος αντιστοιχεί στις εγχύσεις των Γεννητριών. Τα ισοδύναμα μεγέθη σε MW και MVA_r (πριν γίνει η μετατροπή σε ανά μονάδα) των P_g^i και Q_g^i προσδιορίζονται στις στήλες 2 και 3 αντίστοιχα, μεγέθη τα οποία αντιστοιχούν στη γραμμή i του πίνακα mpc.gen. Ορίζουμε έναν $n_b \times n_g$ πίνακα C_g στον οποίον το (i,j) στοιχείο του είναι 1 εάν η γεννήτρια j βρίσκεται στο ζυγό i , αλλιώς το στοιχείο αυτό είναι 0. Το $n_b \times 1$ διάνυσμα όλων των παραγωγών μπορεί να εκφραστεί ως:

$$S_{g,bus} = C_g * S_g \quad (3.27)$$

Φορτία

Τα Φορτία σταθερής ισχύος μοντελοποιούνται σαν μια συγκεκριμένη ποσότητα ενεργής και άεργης ισχύος που καταναλώνεται σε ένα ζυγό. Για το ζυγό i το φορτίο είναι:

$$S_d^i = P_d^i + jQ_d^i \quad (3.28)$$

Όπου, ο πίνακας $S_d = P_d + jQ_d$ έχει διαστάσεις $n_b \times 1$ και αντιστοιχεί στα φορτία των ζυγών. Τα ισοδύναμα μεγέθη σε MW και MVA_r (πριν γίνει η μετατροπή σε ανά μονάδα) των P_d^i και Q_d^i προσδιορίζονται στις στήλες 3 και 4 αντίστοιχα, μεγέθη τα οποία αντιστοιχούν στη γραμμή i του πίνακα mpc.bus. Η παραγωγή των A/Π μοντελοποιείται σαν αρνητικό φορτίο, επομένως υπολογίζεται και αφαιρείται κάθε φορά από το φορτίο του ζυγού.

Εξισώσεις Δικτύου

Σε ένα δίκτυο n_b ζυγών, τα στοιχεία των πινάκων αγωγιμοτήτων κλάδων και των πινάκων αγωγιμοτήτων ζυγών συνδυάζονται από το Matpower, για να διαμορφώσουν ένα σύνθετο πίνακα αγωγιμοτήτων ζυγών Y_{bus} , διαστάσεων $n_b \times n_b$, συσχετίζοντας το διάνυσμα της σύνθετης τάσης ζυγού V_{bus} με το διάνυσμα του σύνθετου ρεύματος ζυγού I_{bus} :

$$I_{bus} = Y_{bus} * V_{bus} \quad (3.29)$$

Με παρόμοιο τρόπο, σε ένα δίκτυο με n_l κλάδους, οι $n_l \times n_b$ πίνακες αγωγιμοτήτων Y_S και Y_R διαμορφώνονται για να υπολογίσουν το διάνυσμα των συνθέτων εγχύσεων ρεύματος στα άκρα *from* και *to* της κάθε γραμμής, με δοσμένες τις τάσεις ζυγών V_{bus}

$$I_S = Y_S * V_{bus} \quad (3.30)$$

$$I_R = Y_R * V_{bus} \quad (3.31)$$

Τα διανύσματα των σύνθετων εγχύσεων ισχύος ζυγών και κλάδων μπορούν να εκφραστούν ως:

$$S_{bus} = I_{bus}^* * diag(V_{bus}) \quad (3.32)$$

$$S_S = I_S^* * diag(V_S) \quad (3.33)$$

$$S_R = I_R^* * diag(V_R) \quad (3.34)$$

όπου V_S και V_R είναι τα διανύσματα των συνθέτων τάσεων των ζυγών στα άκρα *from* και *to*, αντίστοιχα, όλων των κλάδων, και το *diag()* μετατρέπει ένα διάνυσμα σε ένα διαγώνιο πίνακα με το καθορισμένο διάνυσμα στη διαγώνιο.

Στους Πίνακες 7, 8, 9 που ακολουθούν, δίνονται οι δείκτες, τα ονόματα και η σημασία τους για κάθε στήλη των πινάκων *mrc.bus*, *mrc.gen*, *mrc.branch*.

Πίνακας 7: Διάταξη των Δεδομένων του πίνακα *mrc.bus*

Δείκτης	Όνομα	Σημασία
1	bus_i	αριθμός του ζυγού (1 ως 29997)
2	type	τύπος ζυγού
		PQ ζυγός = 1 (φορτίο)
		PV ζυγός = 2 (γεννήτρια)
		ζυγός αναφοράς = 3
		απομονωμένος ζυγός = 4
3	P _d	ζήτηση ενεργού ισχύος (MW)
4	Q _d	ζήτηση άεργου ισχύος (MVar)
5	G _s	εγκάρσια αγωγιμότητα (MW ζητούμενη σε V = 1.0 p.u.)
6	B _s	εγκάρσια επιδεκτικότητα (MVar εγχυόμενη σε V = 1.0 p.u.)
7	area	αριθμός περιοχής, 1-100
8	V _m	μέτρο τάσης (p.u.)
9	V _a	γωνία τάσης (degrees)
10	basekV	βασική τιμή τάσης (kV)
11	Zone	ζώνη απωλειών (1-999)
12	V _{max}	μέγιστο μέτρο τάσης (p.u.)
13	V _{min}	ελάχιστο μέτρο τάσης (p.u.)

Πίνακας 8: Διάταξη των Δεδομένων του πίνακα *mrc.generator*

Δείκτης	Όνομα	Σημασία
1	Bus	αριθμός ζυγού (0-9, A-Z)
2	P _g	έξοδος ενεργού ισχύος (MW)
3	Q _g	έξοδος άεργου ισχύος (MVar)
4	Q _{max}	μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος (MVar)
5	Q _{min}	ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος (MVar)
6	V _g	δεδομένο μέτρο τάσης (p.u.)
7	mBase	συνολική βασική ισχύς MVA, καθορίζεται στην τιμή της baseMVA
8	status	κατάσταση μηχανής: >0 : μηχανή σε λειτουργία ≤ 0 : μηχανή εκτός λειτουργίας
9	P _{max}	μέγιστη έξοδος ενεργού ισχύος (MW)
10	P _{min}	ελάχιστη έξοδος ενεργού ισχύος (MW)
11	P _{c1}	κατώτερη έξοδος ενεργού ισχύος της PQ καμπύλης ικανότητας (MW)
12	P _{c2}	ανώτερη έξοδος ενεργού ισχύος της PQ καμπύλης ικανότητας (MW)
13	Q _{c1min}	ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος στο P _{c1} (MVar)
14	Q _{c1max}	μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος στο P _{c1} (MVar)
15	Q _{c2min}	ελάχιστη έξοδος άεργου ισχύος στο P _{c2} (MVar)
16	Q _{c2max}	μέγιστη έξοδος άεργου ισχύος στο P _{c2} (MVar)
17	ramp_agc	κλίση ράμπας για το επόμενο φορτίο/AGC (MW/min)
18	ramp_10	κλίση ράμπας για 10 λεπτά εφεδρείας (MW)
19	ramp_30	κλίση ράμπας για 30 λεπτά εφεδρείας (MW)
20	ramp_q	κλίση ράμπας για άεργο ισχύ (MVar/min)
21	apf	κλίση ράμπας για άεργο ισχύ (MVar/min)

Πίνακας 9: Διάταξη των Δεδομένων του πίνακα `mprc.branch`

Δείκτης	Όνομα	Σημασία
1	fbus	αριθμός ζυγού αναχώρησης (from)
2	tbus	αριθμός ζυγού άφιξης (to)
3	r	αντίσταση γραμμής/κλάδου (p.u.)
4	x	αντίδραση γραμμής/κλάδου (p.u.)
5	b	συνολική επιδεκτικότητα φορτίου γραμμής (p.u.)
6	rateA	μέγιστο θερμικό όριο γραμμής/κλάδου (MVA)
7	rateB	μεσαίο θερμικό όριο γραμμής/κλάδου (MVA)
8	rateC	χαμηλό θερμικό όριο γραμμής/κλάδου (MVA)
9	ratio	λόγος M/Σ (= 0 για τις γραμμές)
10	angle	φασική γωνία μετατόπισης M/Σ (μοίρες), θετική => καθυστέρηση
11	status	αρχική κατάσταση κλάδου: 1 – σε λειτουργία 0 – εκτός λειτουργίας
12	angmin	ελάχιστη διαφορά φάσης, angle(Vf) - angle(Vt) (μοίρες)
13	angmax	μέγιστη διαφορά φάσης, angle(Vf) - angle(Vt) (μοίρες)

DC Μοντέλο

Για την DC διατύπωση του εκάστοτε μοντέλου, χρησιμοποιούνται οι ίδιες παράμετροι ενώ γίνονται οι παρακάτω παραδοχές:

- Οι αντιδράσεις κλάδων x και οι χωρητικότητες φορτίου b θεωρούνται αμελητέες.
- Όλα τα πλάτη των τάσεων των ζυγών είναι κοντά στην τιμή 1 p.u.
- Οι διαφορές των γωνιών τάσης είναι αρκετά μικρές, τέτοιες ώστε να ισχύει $\sin \theta \cong \theta$.

Συνδυάζοντας αυτές τα παραδοχές και την εξίσωση $\begin{pmatrix} I_S \\ I_R \end{pmatrix} = Y_{br} \begin{pmatrix} V_S \\ V_R \end{pmatrix}$ με το γεγονός ότι $S = VI^*$, η σχέση μεταξύ των ρών πραγματικής ισχύος και των γωνιών τάσης για έναν ξεχωριστό κλάδο μπορεί να γραφεί ως:

$$\begin{bmatrix} P_S \\ P_R \end{bmatrix} = B_{br} \begin{bmatrix} \theta_S \\ \theta_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P_{S,shift} \\ P_{R,shift} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

όπου: $B_{br} = \frac{1}{x\tau} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} P_{S,shift} \\ P_{R,shift} \end{bmatrix} = \frac{\theta_{shift}}{x\tau} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$

Τα στοιχεία των εγχύσεων αλλαγής κλάδου και οι πίνακες B_{br} συνδυάζονται από το *Matpower* για να μορφοποιήσουν έναν πίνακα ζυγού B_{bus} και ένα διάνυσμα έγχυσης αλλαγής $P_{bus,shift}$, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό εγχύσεων ζυγών ενεργού ισχύος από τις γωνίες τάσης των ζυγών:

$$P_{bus} = B_{bus} * \theta_{bus} + P_{bus,shift} \quad (3.36)$$

Με παρόμοιο τρόπο, το Matpower κατασκευάζει τον πίνακα B_s και το διάνυσμα P_{Rshift} που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό των διανυσμάτων P_s και P_R των εγχύσεων κλάδου ενεργού ισχύος:

$$P_s = B_s * \theta_s + P_{s,shift} \quad (3.37)$$

$$P_s = -P_R \quad (3.38)$$

3.5.3 Ροή Φορτίου

Το πρόβλημα της ροής φορτίου αφορά στην εύρεση ενός συνόλου τάσεων και ροών ισχύος ανάμεσα στους ζυγούς σε ένα δίκτυο, οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένα φορτία και παραγωγές. Το Matpower λύνει τα προβλήματα AC και DC ροής φορτίου, μέσω της επίλυσης ενός συνόλου εξισώσεων της μορφής

$$g(x) = 0 \quad (3.39)$$

οι οποίες δημιουργούνται εκφράζοντας ένα υποσύνολο των εξισώσεων του ισοζυγίου ισχύος σε ένα κόμβο, ως εξισώσεις που έχουν ως άγνωστες μεταβλητές τις τάσεις.

AC Ροή Φορτίου

Στο Matpower, κατά σύμβαση, επιλέγουμε ένα ζυγό παραγωγής ως ζυγό αναφοράς (reference / slack bus: 3), στον οποίο είναι γνωστή η γωνία της τάσεως, αλλά η παραγωγή ενεργού ισχύος έχει άγνωστη τιμή, ώστε να αποφεύγεται ο υπερπροσδιορισμός του προβλήματος. Οι υπόλοιποι ζυγοί στους οποίους «παράγεται» ισχύς κατηγοριοποιούνται ως PV ζυγοί (2), με γνωστά μεγέθη τις τιμές των τάσεων και την παραγωγή ενεργού ισχύος. Αφού δίνονται και οι τιμές των φορτίων P_d και Q_d , όλοι οι ζυγοί στους οποίους δεν υπάρχει παραγωγή κατηγοριοποιούνται ως PQ ζυγοί (1), με προσδιορισμένες τις τιμές ενεργού και άεργου ισχύος. Ορίζουμε ως I_{ref} , I_{PV} και I_{PQ} τους δείκτες των ζυγών αναφοράς, ζυγών PV και ζυγών PQ αντίστοιχα.

Στην κλασική διατύπωση ενός προβλήματος AC ροής φορτίου, η εξίσωση του ισοζυγίου ισχύος χωρίζεται σε ενεργά και άεργα μέρη τα οποία εκφράζονται ως συναρτήσεις της γωνίας τάσεως θ , του μέτρου της τάσεως V_m και των παραγωγών P_g και Q_g , ενώ υποθέτουμε ότι τα φορτία έχουν σταθερές και δεδομένες τιμές.

$$g_P(\theta, V_m, P_g) = P_{bus}(\theta, V_m) + P_d - C_g P_g = 0 \quad (3.40)$$

$$g_Q(\theta, V_m, P_g) = Q_{bus}(\theta, V_m) + Q_d - C_g Q_g = 0 \quad (3.41)$$

Για το πρόβλημα της AC ροής φορτίου, η συνάρτηση $g(x)$ από τη σχέση (3.39) μετασχηματίζεται παίρνοντας το αριστερό μέρος των εξισώσεων του ισοζυγίου ενεργού ισχύος (3.40), για όλους τους ζυγούς που δεν είναι αναφοράς και των εξισώσεων του ισοζυγίου άεργου ισχύος (3.41), για όλους τους PQ ζυγούς και

εισάγοντας τη γωνία αναφοράς, τα φορτία, τις γνωστές παραγωγές ισχύος και τα γνωστά μέτρα των τάσεων:

$$g(x) = \begin{bmatrix} g_P^{\{i\}}(\theta, V_m, P_g) \\ g_Q^{\{j\}}(\theta, V_m, P_g) \end{bmatrix}, \quad \forall i \in I_{PV} \cup I_{PQ}, \quad \forall j \in I_{PQ} \quad (3.42)$$

Το διάνυσμα αποτελείται από τις γωνίες των τάσεων όλων των ζυγών που δεν είναι ζυγοί αναφοράς και τα μέτρα των τάσεων στους ζυγούς PQ:

$$x = \begin{pmatrix} \theta_{\{i\}} \\ v_m^{\{j\}} \end{pmatrix}, \quad \forall i \notin I_{ref}, \quad \forall j \notin I_{PQ} \quad (3.43)$$

Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτει ένα σύστημα μη γραμμικών εξισώσεων με $n_{pv} + 2n_{pq}$ εξισώσεις και αγνώστους, όπου n_{pv} και n_{pq} οι αριθμοί των PV και PQ ζυγών αντίστοιχα.

Μετά την επίλυση ως προς x , οι υπόλοιπες εξισώσεις του ισοζυγίου ενεργού ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της παραγωγής ενεργού ισχύος στο ζυγό αναφοράς. Ομοίως, από τις εναπομείναντες $n_{pv} + 1$ εξισώσεις του ισοζυγίου άεργου ισχύος, υπολογίζεται η παραγωγή άεργου ισχύος.

Το Matpower περιλαμβάνει 4 διαφορετικούς αλγόριθμους για την επίλυση της AC ροής φορτίου. Ο προκαθορισμένος αλγόριθμος βασίζεται σε μία μέθοδο του Newton, χρησιμοποιώντας την πολική μορφή των τιμών και έναν Ιακωβιανό πίνακα, ο οποίος ανανεώνεται σε κάθε επανάληψη. Επίσης χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι οι οποίοι βασίζονται σε παραλλαγές της ταχείας αποζευγμένης μεθόδου. Αυτές οι δύο μέθοδοι μειώνουν τους υπολογισμούς που απαιτούνται σε κάθε επανάληψη, αλλά οδηγούν σε μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων. Ο τέταρτος αλγόριθμος είναι η μέθοδος Gauss - Seidel, η οποία έχει αρκετά μειονεκτήματα σε σχέση με τις προηγούμενες και περιλαμβάνεται για ακαδημαϊκούς λόγους.

Από προεπιλογή, η τεχνική επίλυσης της AC ροής φορτίου αγνοεί τους περιορισμούς που μπορεί να υπάρχουν στις ροές ισχύος, στην παραγωγή των γεννητριών, στις τάσεις των ζυγών κ.τ.λ. Υπάρχει η επιλογή `enforce_q_lims`, η οποία τεθεί αν ίση με 1 (η προκαθορισμένη τιμή είναι 0), λαμβάνονται υπόψη τα όρια άεργου ισχύος των γεννητριών, βασιζόμενοι στις τιμές των Q_{max} , Q_{min} του πίνακα `mpc.generator`. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, οι υπόλοιποι περιορισμοί θα πρέπει να προστεθούν με διαφορετικό τρόπο, εφόσον μας ενδιαφέρει η τήρηση τους.

DC Ροή Φορτίου

Όσον αφορά στη DC ροή φορτίου, το διάνυσμα x αποτελείται από ένα σύνολο γωνιών τάσεων των ζυγών PQ και PV, δηλαδή αυτών που δεν είναι ζυγοί αναφοράς.

$$x = [\theta_{\{i\}}], \quad \forall i \notin I_{ref} \quad (3.44)$$

Και η $g(x)=0$ παίρνει τη μορφή:

$$B_{dc}x - P_{dc} = 0 \quad (3.45)$$

όπου, το B_{dc} είναι ένας $(n_b - 1) \times (n_b - 1)$ πίνακας, ο οποίος παράγεται εξαλείφοντας τη γραμμή και τη στήλη, που αντιστοιχούν στο ζυγό αναφοράς και στη γωνία του, από τον B_{bus} , αντίστοιχα. Η ισχύς P_{dc} μπορεί να υπολογιστεί δεδομένων των εγχύσεων ισχύος P_g , οι οποίες είναι γνωστές για όλες τις γεννήτριες εκτός από τη γεννήτρια-ζυγό αναφοράς. Οι γωνίες της εξίσωσης $x = [\theta_{ij}]$ υπολογίζονται ένα σύνολο γραμμικών εξισώσεων. Στη συνέχεια, υπολογίζονται οι ροές ισχύος ανάμεσα στους ζυγούς και η ισχύς του ζυγού αναφοράς με τη βοήθεια των γωνιών τάσης των ζυγών.

Επίλυση Ροής Ισχύος

Όπως προαναφέρθηκε, η επίλυση της ροής ισχύος (AC ή DC) επιτυγχάνεται με την κλήση της «runpf» σε συνδυασμό με μια δομή τύπου case ή ένα όνομα αρχείου δομής (casedata). Τα αποτελέσματα εμφανίζονται στην οθόνη προαιρετικά, αλλά μπορούν αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν ξανά μέσω μιας δομής αποτελεσμάτων (results struct).

```
>> results = runpf(casedata);
```

Η δομή αποτελεσμάτων είναι ένα υπερσύνολο δεδομένων των mpc πινάκων, σε συνδυασμό με νέα πεδία. Τα δεδομένα τα οποία προκύπτουν από τη επίλυση παρουσιάζονται στον Πίνακα 10.

Πίνακας 10: Πεδία δομής results

Πεδίο	Περιγραφή
results.success	1=επιτυχής επίλυση, 0=ανεπιτυχής επίλυση
results.et	χρόνος επίλυσης
results.bus(:, VM)†	οι τάσεις των ζυγών
results.bus(:, VA)	οι γωνίες των τάσεων των ζυγών
results.gen(:, PG)	οι εγχύσεις πραγματικής ισχύος των γεννητριών
results.gen(:, QG)†	οι εγχύσεις άεργου ισχύος των γεννητριών
results.branch(:, PF)	οι εγχύσεις πραγματικής ισχύος στο «from» άκρο των κλάδων
results.branch(:, PT)	οι εγχύσεις πραγματικής ισχύος στο «to» άκρο των κλάδων
results.branch(:, QF)†	οι εγχύσεις άεργου ισχύος στο «from» άκρο των κλάδων
results.branch(:, QT)†	οι εγχύσεις άεργου ισχύος στο «to» άκρο των κλάδων

† μόνο στην AC ροή ισχύος

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΕΠΕΚΤΑΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΤΗΣ ΚΡΗΤΗΣ ΜΕ ΜΕΓΑΛΗ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗ ΑΠΕ

4.1 Το ΣΗΕ Κρήτης

Το ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης αποτελεί το μεγαλύτερο μη διασυνδεδεμένο σύστημα της Ελλάδας. Το μέγεθος του συστήματος αυτού οφείλεται στο μέγεθος του ίδιου του νησιού, όπου και εγκαθίσταται, το οποίο αποτελεί το μεγαλύτερο νησί της χώρας. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστεί το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής της Κρήτης, στοιχεία για την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας του νησιού, καθώς και τωρινά και μελλοντικά δεδομένα αιολικής παραγωγής του.

Οι ενεργειακές ανάγκες του νησιού, καθιστούν το ηλεκτρικό του σύστημα το μεγαλύτερο μεταξύ των *μη διασυνδεδεμένων συστημάτων* της Ελλάδας. Η Κρήτη λόγω της γεωγραφικής της θέσης δεν είναι ηλεκτρικά διασυνδεδεμένη με το υπόλοιπο ηλεκτρικό σύστημα της Ελλάδας. Είναι, δηλαδή, ηλεκτρικά αυτόνομη, γεγονός που δημιουργεί πρόσφορο έδαφος για την εμφάνιση προβλημάτων στην οικονομική λειτουργία του συστήματος. Κατά τις τελευταίες δεκαετίες, τα προβλήματα που δημιουργούνται στο ενεργειακό σύστημα της Κρήτης οφείλονται στην οριακή κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια του νησιού κατά τους θερινούς μήνες και στο ιδιαίτερα υψηλό κόστος παραγωγής των μονάδων του νησιού, οι οποίες χρησιμοποιούν ως καύσιμο μαζούτ και diesel, ενώ οι περισσότερες από αυτές είναι παλαιές μονάδες με χαμηλό βαθμό απόδοσης, μειωμένη διαθεσιμότητα και σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως οι εκπομπές αερίων ρύπων [51].

Εκτός αυτού, οι ενεργειακές ανάγκες του νησιού αυξάνονται με την πάροδο των χρόνων (Πίνακας 11), γεγονός που συνδέεται με την ανάπτυξη και την αλλαγή του τρόπου ζωής των ανθρώπων γενικότερα. Οι κύριοι παράγοντες που επιδρούν στη διαμόρφωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στη χώρα σε μεσο-μακροπρόθεσμη βάση είναι:

- α) η οικονομική ανάπτυξη της χώρας (με δείκτη μέτρησης το ΑΕΠ),
- β) οι αλλαγές στις καταναλωτικές συνήθειες (κλιματισμός, χρήση ηλεκτρισμού στις μεταφορές, χρήση ηλεκτρονικών υπολογιστών, κ.λπ.) λόγω βελτίωσης βιοτικού επιπέδου, αλλά και η βελτίωση των συνθηκών διαβίωσης συγκεκριμένων πληθυσμιακών ομάδων (π.χ. οικονομικοί μετανάστες),
- γ) η γενικότερη κατάσταση του ενεργειακού τομέα και της αγοράς ηλεκτρισμού (επίπεδο τιμών kWh, ανταγωνισμός με Φυσικό Αέριο, κ.λπ.),

δ) ειδικές συνθήκες (π.χ. υλοποίηση έργων Κοινοτικού Πλαισίου Στήριξης),

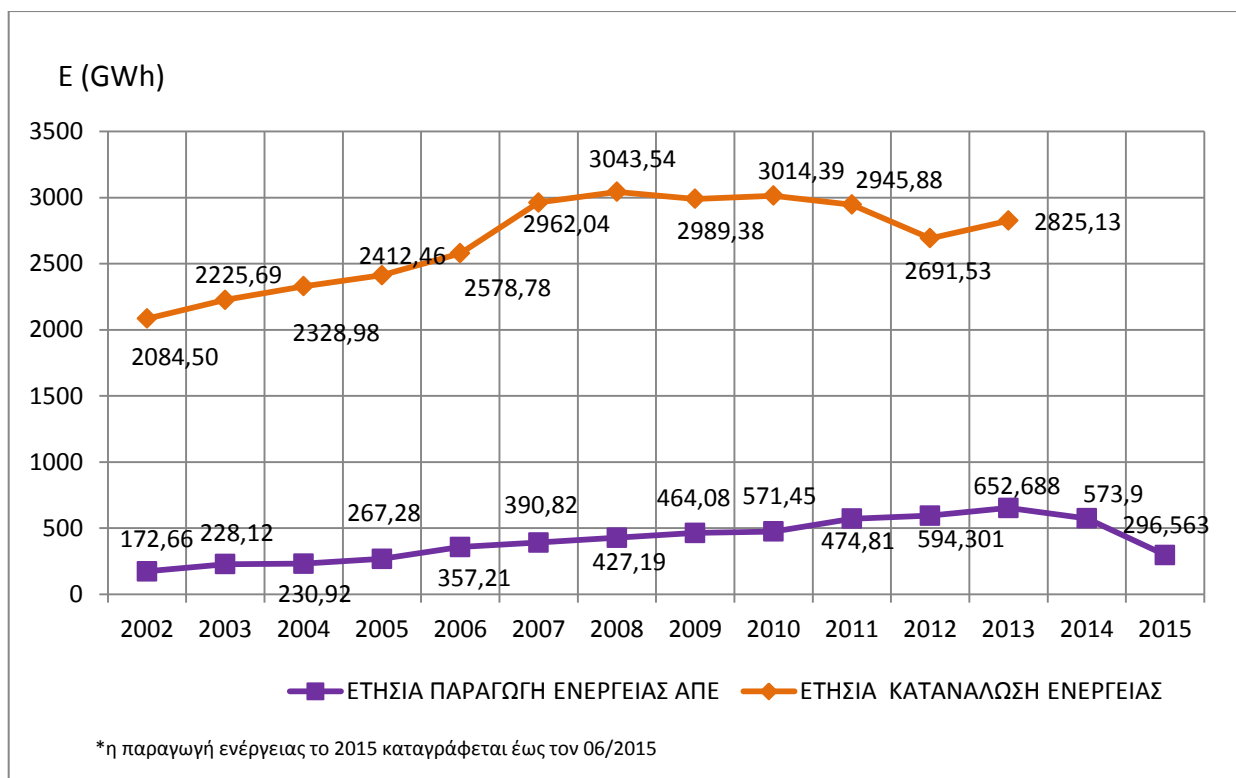
ε) διάφορα μέτρα εξειδίκευσης (όπως εξοικονόμηση ενέργειας, περιβαλλοντικοί περιορισμοί), κ.λπ.

Παρόλα αυτά, παρατηρείται μια μείωση στην κατανάλωση ενέργειας μετά το 2009, το οποίο συνδέεται άμεσα με την οικονομική κρίση που διανύει η χώρα μας τα τελευταία χρόνια. Αντίστοιχα, η διείσδυση των ΑΠΕ στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής του νησιού είναι αρκετά ικανοποιητική, καθώς αυξάνεται κάθε χρόνο (Πίνακας 11).

Πίνακας 11: Ετήσια παραγωγή ενέργειας (GWh)/ Ετήσια μεταβολή παραγωγής ΑΠΕ στην Κρήτη [2], [13], [52]

Έτος	Ετήσια παραγωγή ενέργειας ΑΠΕ (GWh)	Ετήσια μεταβολή παράγωγης ενέργειας από ΑΠΕ (%)	Σωρευτική μεταβολή (%)	Συμμετοχή ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της Κρήτης (%)	Ετήσια συμβατική παράγωγή ενέργειας (GWh)	Ετήσια συνολική παραγωγή ενέργειας (GWh)
2002	172,66			8,28%	1911,84	2084,50
2003	228,12	32,12%	32,12%	10,25%	1997,57	2225,69
2004	230,92	1,23%	33,74%	9,92%	2098,06	2328,98
2005	267,28	15,75%	54,80%	11,08%	2145,18	2412,46
2006	357,21	33,65%	106,89%	13,85%	2221,57	2579
2007	390,82	9,41%	126,35%	13,19%	2571,22	2962,04
2008	427,19	9,31%	147,42%	14,04%	2616,35	3043,54
2009	464,08	8,64%	168,78%	15,52%	2525,30	2989,38
2010	474,81	2,31%	175,00%	15,75%	2539,58	3014,39
2011	571,45	20,35%	230,97%	19,40%	2374,43	2945,88
2012	594,301	4,00%	244,20%	22,08%	2097,23	2691,53
2013	652,688	9,82%	278,02%	23,10%	2172,44	2825,13
2014	573,9	-12,07%	232,39%		-573,90	

Για το έτος 2013, η μέση ωριαία διείσδυση των ΑΠΕ ανέρχεται σε ποσοστό 23,1% σύμφωνα τα στοιχεία που παρουσιάζει ο Δ.Ε.Δ.Δ.Η.Ε. Η περιοχή της Κρήτης προσφέρεται για εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα φωτοβολταϊκών και αιολικών μονάδων, λόγω του πλούσιου αιολικού και ηλιακού δυναμικού της καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Ιδιαίτερα, το αιολικό δυναμικό της Κρήτης αποτελεί σημαντική συνιστώσα του αιολικού δυναμικού ολόκληρης της χώρας. Αναμένεται, λοιπόν, το παραπάνω ποσοστό διείσδυσης να αυξηθεί, καθώς μεγάλο μέρος των μελλοντικών Α/Π πρόκειται να εγκατασταθεί στο ανεμικό πεδίο της Κρήτης, αξιοποιώντας το προσφερόμενο αυτό δυναμικό με σκοπό την επίτευξη των εθνικών στόχων που έχουν θεσπιστεί για την ενσωμάτωση μονάδων ΑΠΕ.



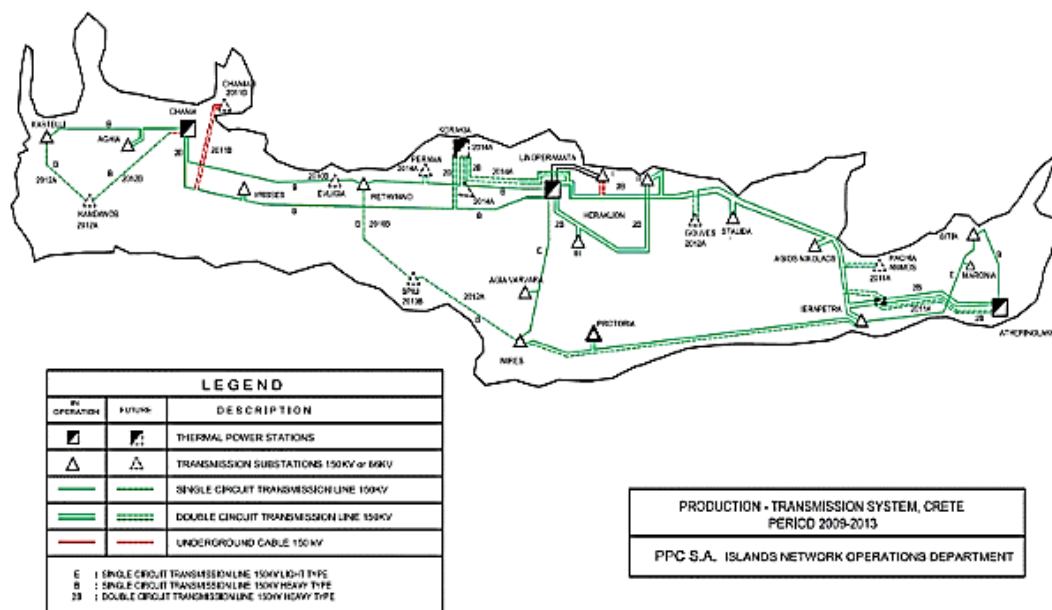
Εικόνα 20: Ετήσια συνολική παραγωγή ενέργειας (GWh)/ από ΑΠΕ στην Κρήτη [52]

Η υψηλή, όμως, διείσδυση των μονάδων ΑΠΕ μπορεί να δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα ευστάθειας σε ένα απομονωμένο σύστημα, όπως αυτό της Κρήτης. Χαρακτηριστικά είναι τα μειονεκτήματα που επιφέρει η μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ, τα οποία αναφέρθηκαν σε προηγούμενο κεφάλαιο. Έτσι, αυξάνεται η ανάγκη του συστήματος για μεγαλύτερη ευελιξία, ώστε να εξασφαλίζεται η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία του και η ικανότητα ανταπόκρισης στις ταχείες μεταβολές της ζήτησης λόγω της στοχαστικότητας των ΑΠΕ [53].

Κατά καιρούς, έχει συζητηθεί η ηλεκτρική διασύνδεση του μεγαλύτερου νησιού της Ελλάδας με το ηπειρωτικό σύστημα της χώρας, ώστε να αποφευχθούν όλα τα παραπάνω λειτουργικά προβλήματα της Κρήτης. Μέχρι τώρα, η διασύνδεσή της δεν έχει γίνει εφικτή για τεχνικούς και οικονομικούς –κυρίως- λόγους. Ωστόσο, η συνεχής ωρίμανση των νέων τεχνολογιών, κυρίως των DC συνδέσμων, η αποκτηθείσα εμπειρία από την επιτυχή εφαρμογή τους στη διασύνδεση Ελλάδας-Ιταλίας, αλλά και η συνεχώς αυξανόμενη σχετική δραστηριότητα που σημειώνεται τα τελευταία χρόνια σε παγκόσμια κλίμακα, με τον σχεδιασμό και την κατασκευή αρκετών σημαντικών διασυνδέσεων με DC συνδέσμους, μεταξύ ηλεκτρικών συστημάτων χωρών αλλά και τη διασύνδεση απομακρυσμένων νησιών (διασύνδεση Ιταλίας-Σαρδηνίας, Ισπανίας-Μαγιόρκα κ.α.) και αιολικών σταθμών με τα ηπειρωτικά συστήματα, επανέφεραν στο προσκήνιο το θέμα των διασυνδέσεων αυτόνομων νησιών με το ηπειρωτικό σύστημα και δημιούργησαν τις προϋποθέσεις για μια επιτυχημένη ολοκλήρωση παρόμοιων έργων και στην Ελλάδα [51].

4.1.1 Μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος της Κρήτης

Το ηλεκτρικό σύστημα της Κρήτης διαθέτει τρεις θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΠΗΕ). Ο πρώτος σταθμός είναι εγκαταστημένος στην πόλη των Χανίων, ο δεύτερος στο χωριό Λινοπεράματα στο νομό Ηρακλείου, και ο τρίτος στην περιοχή του Αθρινόλακκου του νομού Λασιθίου, στα νοτιοανατολικά του νησιού. Η συνολική ονομαστική εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος ανέρχεται σε 823,12 MW, ενώ η αποδιδόμενη ισχύς προσεγγίζει τα 721,44 MW και παρέχεται από 26 θερμικές μονάδες.



Εικόνα 21: Ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης

Η ενέργεια προέρχεται από σταθμούς τεσσάρων ειδών τεχνολογίας παραγωγής:

- ατμοηλεκτρικές μονάδες (μονάδες βάσης),
- μηχανές εσωτερικής καύσης (μονάδες βάσης, μεσαίου φορτίου),
- αεριοστροβιλικές μονάδες (μονάδες φορτίου αιχμής) και
- μία μονάδα συνδυασμένου κύκλου (μονάδες βάσης, μεσαίου φορτίου),

οι οποίοι χρησιμοποιούν ως καύσιμο το μαζούτ και το ντίζελ. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα στοιχεία των θερμικών μονάδων που ανήκουν σε κάθε σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 12: Θερμοηλεκτρικές μονάδες παραγωγής [2]

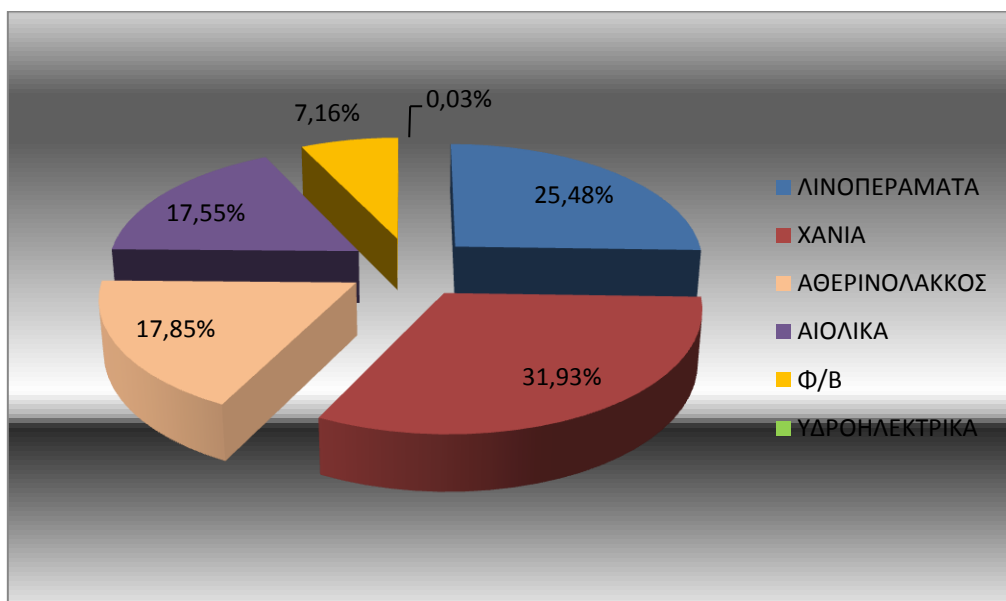
ΑΝΑΓΝΩΡΙΣΤΙΚΟ ΜΟΝΑΔΑΣ	ΚΑΥΣΙΜΟ	ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΑΠΟΔΙΔΟΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΤΕΧΝΙΚΟ ΕΛΑΧΙΣΤΟ (MW)
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ				
ΑΤΜΟΗΛ. 1	MAZOYT	6	6	4
ΑΤΜΟΗΛ. 2 (JOHN BROWN)	MAZOYT	15	12,8	8
ΑΤΜΟΗΛ. 3 (JOHN BROWN)	MAZOYT	15	12,8	8
ΑΤΜΟΗΛ. 4 (RAFACO-JUGOTURBINA)	MAZOYT	25	22,5	18
ΑΤΜΟΗΛ. 5 (BREDACNR)	MAZOYT	25	23	18
ΑΤΜΟΗΛ. 6 (BREDACNR)	MAZOYT	25	23	18
DIESEL 1 (CEGIELSKI B&W RTA58)	MAZOYT	12,28	10,1	3
DIESEL 2 (CEGIELSKI B&W RTA58)	MAZOYT	12,28	10,1	3
DIESEL 3 (CEGIELSKI B&W RTA58)	MAZOYT	12,28	10,1	3
DIESEL 4 (CEGIELSKI B&W RTA58)	MAZOYT	12,28	10,1	3
A/Σ 1 (WAGNER-BIRO-SIEMENS)	DIESEL	16,25	13,2	3
A/Σ 2 (WAGNER-BIRO-SIEMENS)	DIESEL	16,25	13,2	3
A/Σ 3 (GE LM6000)	DIESEL	43,3	40	5
A/Σ 4 (ABB GT35)	DIESEL	14,72	12,8	3
A/Σ 5 (GE LM2500+)	DIESEL	28	27	5
ΣΥΝΟΛΟ		278,64	246,7	
ΧΑΝΙΑ				
A/Σ 1 (BBC)	DIESEL	16,2	13,2	3
A/Σ 4 (THOMASEN)	DIESEL	24	12,8	3
A/Σ 5 (FIAT)	DIESEL	30	27	5
A/Σ 11 (ANSALDO)	DIESEL	59,37	52	10
A/Σ 12 (ANSALDO)	DIESEL	59,37	52	10
GE LM2500+	DIESEL	28	27	5
ΣΥΝΔΥΑΣΜΕΝΟΣ ΚΥΚΛΟΣ (3 ABB)	DIESEL	132,3	105	35
ΣΥΝΟΛΟ		349,24	289	
ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ				
DIESEL 1 (MAN B&W 12K90)	MAZOYT	51,12	49,67	35
DIESEL 2 (MAN B&W 12K90)	MAZOYT	51,12	49,67	25
ΑΤΜΟΗΛ. 1 (FOSTER WHEELER-SCODA)	MAZOYT	46,5	43,2	22
ΑΤΜΟΗΛ. 2 (FOSTER WHEELER-SCODA)	MAZOYT	46,5	43,2	22
ΣΥΝΟΛΟ		195,24	185,74	
ΓΕΝΙΚΟ ΣΥΝΟΛΟ		823,12	721,44	

Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας στην Κρήτη στηρίζεται κατά κύριο λόγο στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς της ΔΕΗ και ένα μικρό τμήμα της προέρχεται από ΑΠΕ, κυρίως αιολικά πάρκα και φωτοβολταϊκές μονάδες, σύμφωνα με στοιχεία της ΡΑΕ και της ΔΕΗ, του Ιουνίου 2015 (Πίνακας 13).

Πίνακας 13: Εγκατεστημένη ονομαστική ισχύς/τύπο παραγωγής ενέργειας Κρήτης, 2015 [52]

ΠΑΡΑΓΩΓΗ	Ρον (MW)
Χανιά	278,64
Λινοπεράματα	349,24
Αθρινόλακκος	195,24
Α/Π	191,96
Φ/Β	78,3
Υ/Η	0,3
ΣΥΝΟΛΟ	1093,68

Ενώ το ποσοστό εγκατεστημένης ονομαστικής ισχύος που αντιστοιχεί σε κάθε μορφή παραγόμενης ενέργειας αποτυπώνεται στην Εικόνα 22.

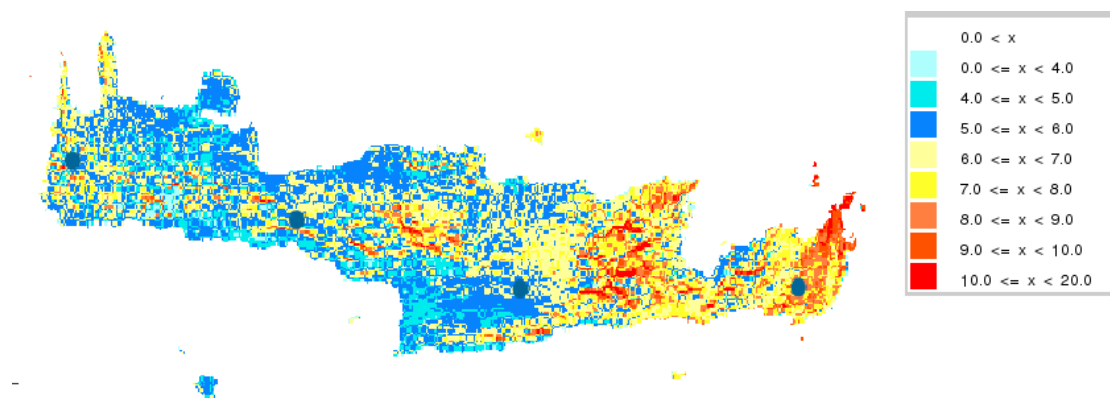


Εικόνα 22: Μίγμα εγκατεστημένης ισχύος Κρήτης, 2015 [52]

Η εκμετάλλευση των ΑΠΕ γίνεται τόσο από τη ΔΕΗ, όσο και από ιδιώτες.

4.1.2 Αιολικό δυναμικό της Κρήτης

Όπως παρατηρείται και στο χάρτη αιολικού δυναμικού της Κρήτης, στην Εικόνα 23, το αιολικό δυναμικό του νησιού είναι αξιόλογο. Το ζήτημα της μειωμένης εκμετάλλευσής του εναπόκειται τόσο σε έλλειψη επενδύσεων, όσο και στα τεχνικά ζητήματα που προκαλεί η αυξημένη ενσωμάτωση του στο ηλεκτρικό δίκτυο.



Εικόνα 23: Χάρτης αιολικού δυναμικού Κρήτης [2]

Παρόλα αυτά, υπάρχει ήδη ένα σχετικά υψηλό ποσό εγκατεστημένης «αιολικής» ισχύος (195,1 MW) αλλά το σημαντικότερο είναι η προοπτική ανάπτυξης των Α/Π (συνολικά τουλάχιστον 1955 MW), η οποία παρουσιάζεται παρακάτω. Στους Πίνακες 14-17, καταγράφονται αναλυτικά τα εγκατεστημένα αιολικά πάρκα στο νησί της Κρήτης, καθώς αυτά είναι που συμμετέχουν στην προσομοίωση του συστήματος στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Πίνακας 14: Εγκατεστημένα Αιολικά Πάρκα Ν. Λασιθίου [52]

ΕΠΩΝΥΜΙΑ	ΝΟΜΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΠΡΩΤΗΣ ΑΔΕΙΑΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)
ΑΝΕΜΟΕΣΣΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	5
ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΡΥΩΝ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	10
ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΑΧΛΑΔΙΩΝ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	10
ΑΕΟΛΟΣ Α.Ε.	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	9,9
Χ.ΡΟΚΑΣ ΑΝΩΝΥΜΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	10,2
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΗΤΕΙΑΣ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	0,5
Χ.ΡΟΚΑΣ ΑΝΩΝΥΜΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	3
ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ ΑΒΕΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	7,65
ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΣΗΤΕΙΑΣ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	1,2
ΙWECO ΧΩΝΟΣ ΚΡΗΤΗΣ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	4,5
ΕΝ.ΤΕ.ΚΑ ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΡΗΤΗΣ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	2,7
ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	3
ENERCON ΕΛΛΑΣ Α.Ε.	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	2,5
WRE HELLAS SA	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	3
ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΚΡΥΩΝ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	1,2
Χ.ΡΟΚΑΣ ΑΝΩΝΥΜΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	4,8
ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	5,1

ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	1
ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	4,8
ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΑΕ	ΛΑΣΙΘΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	5,4
		ΣΥΝΟΛΟ	95,45

Πίνακας 15: Εγκατεστημένα Αιολικά Πάρκα Ν. Χανίων [52]

ΕΠΩΝΥΜΙΑ	ΝΟΜΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΠΡΩΤΗΣ ΑΔΕΙΑΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)
ENVITEC ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΑΕ	ΧΑΝΙΩΝ	Άδεια Παραγωγής	5,4
ENVITEC ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΕ	ΧΑΝΙΩΝ	Άδεια Παραγωγής	5,4
ΑΙΟΛΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ Α.Ε.	ΧΑΝΙΩΝ	Άδεια Παραγωγής	9,35
ΑΝΕΜΟΣ ΑΛΚΥΟΝΗΣ Α.Ε.Ε.	ΧΑΝΙΩΝ	Άδεια Παραγωγής	6,3
ΑΙΟΛΙΚΗ ΜΟΥΣΟΥΡΩΝ ΑΕ	ΧΑΝΙΩΝ	Άδεια Παραγωγής	2,55
ΜΑΝΟΥΣΕΛΗΣ - ΠΡΩΤΟΠΑΠΑΔΑΚΗΣ Ο.Ε. με δ.τ. ΕΡΜΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Ο.Ε.	ΧΑΝΙΩΝ	Εξαίρεση	0,04
		ΣΥΝΟΛΟ	29,04

Πίνακας 16: Εγκατεστημένα Αιολικά Πάρκα Ν. Ρεθύμνου [52]

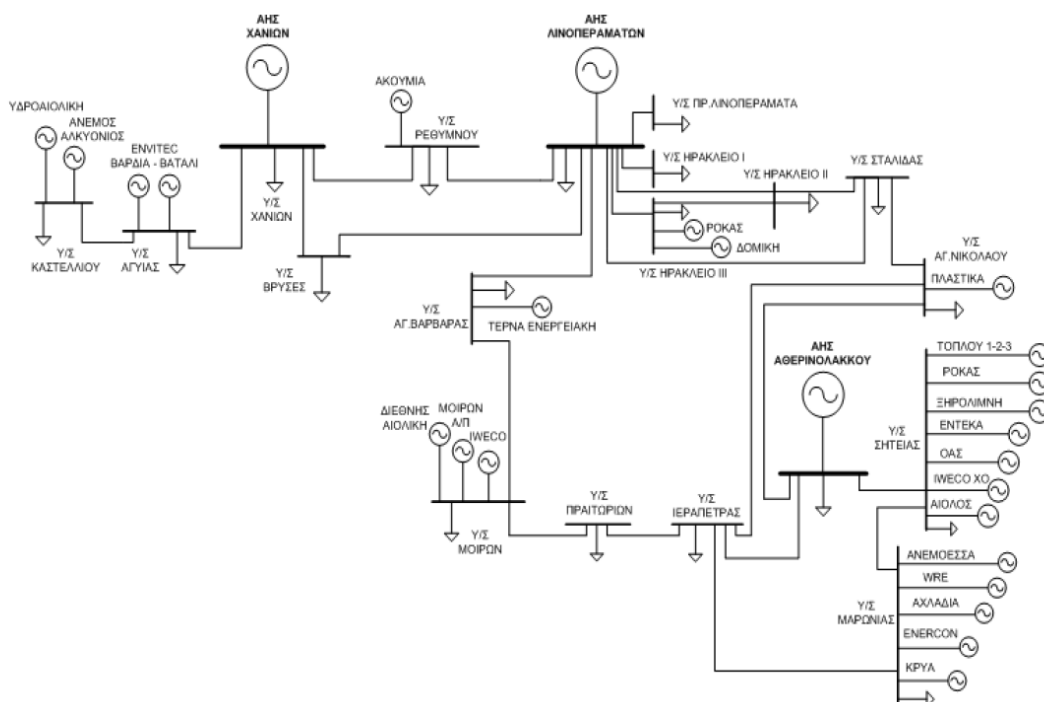
ΕΠΩΝΥΜΙΑ	ΝΟΜΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΠΡΩΤΗΣ ΑΔΕΙΑΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)
ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΑΕ	ΡΕΘΥΜΝΟΥ	Άδεια Παραγωγής	9,9
ΕΝΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΝΩΝΥΜΗ ΣΥΝΕΤΑΙΡΙΣΤΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟΥ	Άδεια Παραγωγής	2,4
ENEL GREEN POWER HELLAS ΑΕ	ΡΕΘΥΜΝΟΥ	Άδεια Παραγωγής	4,8
ΔΕΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΑΕ	ΡΕΘΥΜΝΟΥ	Άδεια Παραγωγής	7,2
		ΣΥΝΟΛΟ	24,3

Πίνακας 17: Εγκατεστημένα Αιολικά Πάρκα Ν. Ηρακλείου [52]

ΕΠΩΝΥΜΙΑ	ΝΟΜΟΣ	ΕΙΔΟΣ ΠΡΩΤΗΣ ΑΔΕΙΑΣ	ΙΣΧΥΣ (MW)
IWECO ΜΕΓΑΛΗ ΒΡΥΣΗ ΑΕΒΕΕ	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	4,95
ENEL GREEN POWER HELLAS Α.Ε.	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	5,95
ΑΙΟΛΙΚΑ ΠΑΡΚΑ ΜΟΙΡΩΝ ΑΝΩΝΥΜΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	5,25
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΒΕΤΕ	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	14,45
Χ.ΡΟΚΑΣ ΑΝΩΝΥΜΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	3,6
ENEL GREEN POWER HELLAS Α.Ε.	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Άδεια Παραγωγής	7,2
ΠΑΠΑΔΟΠΟΥΛΟΥ ΟΥΡΑΝΙΑ ΤΟΥ ΝΙΚΟΛΑΟΥ	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ	Εξαίρεση	0,02
		ΣΥΝΟΛΟ	41,42

Το μονογραμμικό διάγραμμα του ηλεκτρικού συστήματος μεταφοράς ενέργειας της Κρήτης παρουσιάζεται στην Εικόνα 24. Σε αυτό απεικονίζονται τόσο οι συμβατικοί

σταθμοί παραγωγής ενέργειας (Χανίων, Λινοπεραμάτων, Αθερινόλακκου), όσο και οι Υ/Σ και τα Α/Π, τα οποία είναι συνδεδεμένα στο δίκτυο.



Εικόνα 24: Μονογραμμικό διάγραμμα Ηλεκτρικού Δικτύου Κρήτης [54]

Αυξημένη Αιολική διείσδυση

Όπως προαναφέρθηκε, η λειτουργία σημαντικού αριθμού Α/Π σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να προκαλέσει ασταθείς καταστάσεις λειτουργίας. Για τον προγραμματισμό της σχεδίασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται μια στάθμη διείσδυσης (οριακή τιμή) των Α/Γ. Σε μελέτη του ΚΑΠΕ το 2001, το ποσοστό αυτό εκτιμήθηκε μεταξύ 10 – 15%, ενώ σήμερα εκτιμάται στο 30%. Όμως, η οριακή αυτή τιμή εξαρτάται από την τεχνολογία των Α/Γ, από την ποικιλομορφία των πηγών και από τη διασπορά τους στο ΣΗΕ.

Η αποκτηθείσα εμπειρία του διαχειριστή του δικτύου στο νησί της Κρήτης από την σταδιακή εγκατάσταση και λειτουργία, οδήγησε στην βελτίωση της τεχνολογίας και το ποσοστό αυτό έφτασε στο 34% (σε επίπεδο ημέρας το 2011) και ξεπέρασε το 40% στιγμιαία.

Ανεξάρτητα όμως από την τιμή της αιολικής διείσδυσης, υπάρχει πάντα ένα άνω όριο στην συμμετοχή των Α/Π στο σύστημα, που αποτελούν το 75% περίπου των εγκατεστημένων ΑΠΕ. Αυτός είναι και ο σημαντικότερος λόγος για τον οποίο η

διείσδυση των Α/Π στο νησί δεν μπορούν να αναπτυχθούν περαιτέρω, εκτός αν είτε το σύστημα διασυνδεθεί με αυτό της ηπειρωτικής χώρας, είτε κατασκευαστούν έργα αποθήκευσης της ενέργειας [55]. Υπό αυτές τις συνθήκες, η μελέτη του ηλεκτρικού συστήματος της Κρήτης που πραγματοποιείται στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, εξετάζει σενάρια τόσο αυξημένης διείσδυσης στο παρόν «ασύνδετο» σύστημα, όσο και ακόμα μεγαλύτερης διείσδυσης σε συνθήκες διασύνδεσης του νησιού με την ηπειρωτική Ελλάδα και δεν εφαρμόζονται οι περιορισμοί διείσδυσης, καθώς θεωρείται δεδομένη η διασύνδεση του συστήματος.

4.2 Μοντελοποίηση συστήματος

Στην παρούσα εργασία -για τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν για το νησί της Κρήτης- λαμβάνεται υπόψη μόνο η παραγωγή των αιολικών πάρκων και όχι των υπόλοιπων ΑΠΕ, καθώς αυτή είναι η κύρια μορφή ανανεώσιμης ενέργειας που συμμετέχει στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής του νησιού με 17,6%.

Υποσταθμοί

Στο ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης βρίσκονται συνολικά 17 υποσταθμοί Υ.Τ/Μ.Τ.. Η εγκατεστημένη ισχύς μετασχηματισμού ανύψωσης της τάσης είναι 820,35MVA και υποβιβασμού της τάσης 810MVA. Όσο για τους Μ/Σ και ΑΜ/Σ ζεύξεως, η συνολική τους ισχύς είναι ίση με 125 MVA. Παρακάτω παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των Υ/Σ του ΣΗΕ της Κρήτης και τα επίπεδα τάσεως των μετασχηματιστών τους. Στον Πίνακα 18, φαίνονται τα χαρακτηριστικά των μετασχηματιστών αποκλειστικής σύνδεσης Α/Π, ενώ στον Πίνακα 19 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά μετασχηματιστών υποβιβασμού της τάσεως [56].

Πίνακας 18: Χαρακτηριστικά Μ/Σ αποκλειστικής σύνδεσης Α/Π

Υ/Σ Ανυψώσεως	Εγκατεστημένη Ισχύς (MVA)	Επίπεδο Τάσης (kV/kV)
ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ	1X40	20/150
ΣΗΤΕΙΑ	1X50	20/150
ΜΑΡΩΝΙΑ	1X50	20/150

Πίνακας 19: Χαρακτηριστικά Μ/Σ

Υ/Σ Υποβιβασμού	Εγκατεστημένη Ισχύς (MVA)	Επίπεδο Τάσης (kV/kV)
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	2X25	150/20
ΧΑΝΙΑ	3X50	150/20
ΒΡΥΣΕΣ	2X25	150/20
ΑΓΥΙΑ	2X50	150/20
ΡΕΘΥΜΝΟ	1X50	150/20
ΡΕΘΥΜΝΟ	2X25	150/20
ΗΡΑΚΛΕΙΟ III	2X50	150/20
ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	3X50	66/20
ΗΡΑΚΛΕΙΟ I	2X25	150/20
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	1X25	150/20
ΜΟΙΡΕΣ	2X25	150/20
ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	2X25	150/20
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2X25	150/20
ΣΗΤΕΙΑ	2X12,5	150/20
ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	2X25	150/20
ΣΤΑΛΙΔΑ	2X25	150/20

Ζυγοί συστήματος

Το ηλεκτρικό δίκτυο της Κρήτης –όπως μοντελοποιείται αρχικά στη συγκεκριμένη εργασία- αποτελείται από 18 ζυγούς, οι οποίοι παρουσιάζονται στον Πίνακα 20, σύμφωνα με την αρίθμηση και τον τύπο ζυγού που χρησιμοποιήθηκε στο Matpower. Όλοι οι ζυγοί θεωρούνται ζυγοί φορτίου (PQ, τύπος:1), εκτός από τους σταθμούς παραγωγής, οι οποίοι είναι ζυγοί παραγωγής (PV, τύπος:2) και κάθε φορά ένας από τους ζυγούς παραγωγής, επιλέγεται ως ζυγός αναφοράς (reference/ slack bus, τύπος:3), ανάλογα με την περίπτωση η οποία θα εξετάζεται. Η επιλογή του ζυγού αναφοράς είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς το ΣΠΗΕ που χρησιμοποιείται κάθε φορά ως τέτοιος ζυγός, αποτελεί ουσιαστικά το σημείο διασύνδεσης της Κρήτης με οποιοδήποτε άλλο ΣΜΗΕ. Αν –για παράδειγμα- επιλέγονται τα Λινοπεράματα ως slack bus, αυτό μεταφράζεται ως το σημείο έναρξης του καλωδίου διασύνδεσης. Ανάλογη με την περίσσεια ισχύος η οποία υπολογίζεται κάθε φορά από τις ροές φορτίου –στα πλαίσια της προσομοίωσης- για το ζυγό αναφοράς, θα πρέπει να είναι και η κατασκευή του υποβρύχιου καλωδίου διασύνδεσης.

Πίνακας 20: Ζυγοί μοντελοποιημένου συστήματος μεταφοράς ενέργειας της Κρήτης

Υ/Σ	Α/Α Ζυγού	Τάση (kV)	Τύπος Ζυγού
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	1	150	1
ΑΓΥΙΑ	2	150	1
ΧΑΝΙΑ	3	150	2
ΒΡΥΣΕΣ	4	150	1
ΡΕΘΥΜΝΟ	5	150	1
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	6	150	3
ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι	7	66	1
ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	8	150	1
ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	9	150	1
ΑΓΙΑ ΒΑΡΒΑΡΑ	10	150	1
ΜΟΙΡΕΣ	11	150	1
ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	12	150	1
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	13	150	1
ΜΑΡΩΝΙΑ	14	150	1
ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	15	150	2
ΣΗΤΕΙΑ	16	150	1
ΑΓΙΟΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ	17	150	1
ΣΤΑΛΙΔΑ	18	150	1

Στο χάρτη της Εικόνας 25 παρουσιάζονται αριθμημένοι οι ζυγοί του Πίνακα 20, ώστε να γίνει κατανοητή και η γεωγραφική τους απεικόνιση.



Εικόνα 25: Ζυγοί συστήματος μεταφοράς ενέργειας Κρήτης

Γραμμές μεταφοράς

Οι γραμμές μεταφοράς του δικτύου είναι γραμμές μεταφοράς Υ.Τ. των 150kV και των 66kV. Αναλυτικά, τα χαρακτηριστικά των 21 γραμμών –που χρησιμοποιούνται αρχικά για την προσομοίωση του συστήματος- παρουσιάζονται στον Πίνακα 22. Οι γραμμές είναι τριών τύπων: βαρέως τύπου μονού κυκλώματος, βαρέως τύπου διπλού κυκλώματος και ελαφρού τύπου και συμβολίζονται στον Πίνακα 21 με B, B2 και E, αντίστοιχα. Ο υπολογισμός των αντιστάσεων (r) και των αντιδράσεων (x) των γραμμών, ανά μονάδα (p.u.) έγινε σύμφωνα με τους τύπους:

$$r = l * R / Z_{base} \quad (4.1)$$

$$x = l * X / Z_{base} \quad (4.2)$$

όπου, l : μήκος γραμμής σε km (σύμφωνα με τον Πίνακα 22),

R : η αντίσταση σε Ω/km (σύμφωνα με τον Πίνακα 22),

X : η αντίδραση σε Ω/km (σύμφωνα με τον Πίνακα 22),

Z_{base} : η αντίσταση βάσης, η οποία υπολογίζεται ως εξής:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{(150\text{kV})^2}{100\text{MW}} = 225\Omega \quad (4.3)$$

Πίνακας 21: Στοιχεία Γ.Μ. [57]

Τύπος γραμμής	R (Ω/km)	X (Ω/km)	Θερμικό όριο (MW)	Θερμικό όριο θέρους (MW)*
150kV (E)	0,183	0,446	138	116,9
150kV (E2)	0,183	0,404	2x138	2x168,9
150kV (B)	0,097	0,422	202	168,9
150kV (B2)	0,097	0,391	2x202	2x168,9
66 kV εναέρια	0,1828	0,4005	60,5	51,4

* Μείωση του ονομαστικού ορίου κατά 20% περίπου σε περίπτωση θερμοκρασίας περιβάλλοντος 40°C και πλήρους άπνοιας

Το τελευταίο χαρακτηριστικό των Γ.Μ. που απαιτείται για τη μοντελοποίηση και προσομοίωση του συστήματος είναι το θερμικό τους όριο (φόρτιση), για το οποίο επιλέχθηκε το θερινό όριο των γραμμών, για να καλυφθούν όλες οι περιπτώσεις προσομοίωσης, και ειδικά οι θερμοκρασίες του καλοκαιριού, οι οποίες μπορεί να είναι ιδιαίτερα υψηλές. Υπό κανονικές συνθήκες, το όριο μιας γραμμής μεταφοράς βαρέως τύπου μονού κυκλώματος είναι 202 MW.

Πίνακας 22: Χαρακτηριστικά Γραμμών Μεταφοράς ηλεκτρικού δικτύου Κρήτης

A/A	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	V _{ON} (kV)	Τύπος	Μήκος (l) (km)	r (p.u)	x (p.u.)	Φόρτιση (MW)
1	ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	150	B	21,619	0,0093202	0,040548	168,9
2	ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	150	B	11,22	0,0048371	0,021044	168,9
3	ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	150	B	18,84	0,0081221	0,035335	168,9
4	ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	150	B	80,501	0,0347049	0,150984	168,9
5	ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	150	B	52,603	0,0226777	0,09866	168,9
6	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	150	B	46,741	0,0201506	0,087665	168,9
7	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	150	E	24,03	0,0195444	0,047633	116,9
8	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	ΜΟΙΡΕΣ	150	E	14,22	0,0115656	0,028187	116,9
9	ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	150	E	25,91	0,0210735	0,051359	116,9
10	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150	E	54,4	0,0442453	0,107833	116,9
11	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι (Α)	66	E	6,788	0,0055149	0,012083	51,4
12	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι (Β)	66	E	8,6333	0,0070141	0,015367	51,4
13	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	150	B2	10,67	0,0224733	0,054689	168,9
14	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	150	B2	19,202	0,008284	0,033383	168,9
15	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΣΤΑΛΙΔΑ	150	B2	19,963	0,033164	0,079359	168,9
16	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	150	B2	28,847	0,0234364	0,057033	168,9
17	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150	B2	80,319	0,0170893	0,041587	168,9
18	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑ	150	B	33,402	0,0144	0,062647	168,9
19	ΜΑΡΩΝΙΑ	ΣΗΤΕΙΑ	150	B	8,076	0,0034817	0,015147	168,9
20	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150	B2	37,148	0,0302569	0,073631	168,9
21	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	150	B	23,218	0,0100095	0,043547	168,9

Στο χάρτη που ακολουθεί (Εικόνα 26) παρουσιάζονται οι γραμμές μεταφοράς του Πίνακα 22, ώστε να γίνει κατανοητή και η γεωγραφική τους απεικόνιση.



Εικόνα 26: Γραμμές μεταφοράς συστήματος Κρήτης

Α/Π και νέες γραμμές μεταφοράς

Τα σενάρια που εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφορούν τόσο σε προβλέψεις της ΡΑΕ και του ΑΔΜΗΕ για μελλοντικές αιχμές φορτίου και αιολικές παραγωγές, όσο και σε υποθετικές μεγάλες αιολικές παραγωγές, με στόχο την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με συνθήκες μεγάλης διείσδυσης ΑΠΕ σε απομονωμένα ΣΗΕ, όπως αυτό της Κρήτης.

Οι μέγιστες αιολικές παραγωγές που χρησιμοποιήθηκαν προήλθαν από στοιχεία του ΥΠΕΚΑ, σχετικά με τα αιολικά πάρκα της Κρήτης που βρίσκονται σε Κανονική Λειτουργία, σε στάδιο Άδειας Εγκατάστασης και σε Στάδιο Άδειας Παραγωγής. Συγκεκριμένα, τα αιολικά πάρκα τα οποία βρίσκονται σε Κανονική Λειτουργία παρουσιάστηκαν στους Πίνακες 14-17, ενώ τα Α/Π που βρίσκονται σε Άδεια Εγκατάστασης και Παραγωγής, παρουσιάζονται στους Πίνακες 23-24.

Πίνακας 23: Α/Π με Άδεια Εγκατάστασης [52]

Επωνυμία εταιρείας	Τεχνολογία σταθμού	Ισχύς (MW)	Άδεια παραγωγής/εξαίρεση	Νομός
ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΕΝΕΡΓΚΙΚΟΝΤΟΡ Α.Ε. - ΕΠΑΝΩΣΗΦΗΣ 1 Α.Ε.Ε.	Αιολικά	5,95	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
Κ.Ι. ΣΑΡΑΝΤΟΠΟΥΛΟΣ Α.Ε. - ΑΝΑΤΟΛΙΩΤΑΚΗΣ (δ.τ. ΚΜΕΤΑΛΛΕΥΣΗ ΑΙΟΛΙΚΗΣ ΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΒΕΕ)	Αιολικά	5,4	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΑΙΟΛΙΚΟ ΒΙΑΝΝΟΥ ΑΕ	Αιολικά	1,2	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
ΛΑΤΟΜΙΚΗ ΑΕ	Αιολικά	4,5	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ

Πίνακας 24: Α/Π με Άδεια Παραγωγής [52]

Επωνυμία εταιρείας	Τεχνολογία σταθμού	Ισχύς (MW)	Άδεια παραγωγής/εξαιρέση	Νομός
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΒΟΡΕΙΝΑ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	30	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΑΓΚΑΘΙ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	24	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΤΣΟΥΝΕΣ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	26	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΜΕΤΕΡΙΖΙ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	32	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΏΝΥΧΑΣ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	20	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΧΑΣΙΟΥ ΚΟΡΥΦΗ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	18	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΚΑΤΣΟΝΥΧΙ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	30	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΚΑΚΟ ΚΑΣΤΕΛΙ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	30	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΚΕΔΡΟΣ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	30	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΜΑΓΛΙΝΟ ΚΕΦΑΛΙ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	4	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΓΟΥΡΓΟΥΘΑ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	30	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΣΤΡΟΓΓΥΛΗ ΚΟΡΥΦΗ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	10	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΜΑΥΡΟ ΚΕΦΑΛΙ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	30	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΠΛΑΚΟΚΕΦΑΛΑ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	20	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΚΑΛΥΠΗΤΗ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	30	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΜΥΙΝΑ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	24	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΚΟΡΦΑΛΙΑ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	30	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΛΟΥΛΟΥΔΑΚΙ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	26	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΜΕΓΑΛΟ ΚΕΦΑΛΙ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	24	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΣΩΡΟΣ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	24	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΙΔΗ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	26	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΣΤΕΦΑΝΙ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	16	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΣΕΛΕΝΑ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	26	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ

Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΜΑΔΑΡΑ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	18	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΣΠΑΣΜΕΝΟΣ ΒΩΛΑΚΑΣ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	28	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΞΕΚΕΦΑΛΑ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	28	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΔΡΟΥΠΙ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	18	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΣΟΦΙΑΝΗ ΚΟΥΡΥΦΗ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	26	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΧΑΝΤΡΙΑΝΗ ΚΕΦΑΛΑ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	24	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΚΟΥΛΟΥΚΩΝΑΣ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	18	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΣΤΑΥΡΟΣ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	16	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΚΟΥΚΙΕΣ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	28	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΠΕΖΑ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	32	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΒΑΡΣΑΜΗ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	24	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΚΑΘΑΡΟ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	24	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	21	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	27	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	24	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	21	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	33	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	30	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	33	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	27	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	21	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	39	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	36	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	39	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	48	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	30	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	45	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	42	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	48	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	48	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	39	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	33	Άδεια Παραγωγής	ΧΑΝΙΩΝ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	42	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	42	Άδεια Παραγωγής	ΗΡΑΚΛΕΙΟΥ

ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	24	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	45	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Β.Ε.Τ.Ε.	Αιολικά	36	Άδεια Παραγωγής	ΡΕΘΥΜΝΗΣ
Κ. ΣΑΡΡΑΣ & ΣΙΑ- ΘΕΣΗ ΜΑΧΑΙΡΑΣ ΟΜΟΡΡΥΘΜΟΣ ΕΤΑΙΡΕΙΑ	Αιολικά	29,9	Άδεια Παραγωγής	ΛΑΣΙΘΙΟΥ

Πίνακας 25: Σύνολο παλαιών και νέων Α/Π

Κατηγορία Α/Π	Συνολική Ρον (MW)
Εγκατεστημένα Α/Π	191,26
Α/Π με Άδεια Εγκατάστασης	17,05
Α/Π με Άδεια Παραγωγής	1747
ΣΥΝΟΛΟ	1955,31

Επιπρόσθετα, χρησιμοποιήθηκαν Α/Π των οποίων η ισχύς συνεισφέρει στην ακόμα μεγαλύτερη διείσδυση των Α/Π στο δίκτυο της Κρήτης. Τα Α/Π τα οποία ενσωματώθηκαν στο δίκτυο μελετώνται και ομαδοποιούνται στην εργασία [58], ανάλογα με τη γεωγραφική τους θέση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τα νέα Α/Π και οι Υ/Σ σύνδεσης τους, που παρουσιάζονται στον Πίνακα 26 και στην Εικόνα 27. Στην στήλη Υ/Σ αναγράφεται η ονομασία των παλαιών Υ/Σ καθώς και των νέων, των οποίων το όνομα επιλέχθηκε -στα πλαίσια της εργασίας- ανάλογα με την τοποθεσία κοντά στην οποία βρίσκονται. Στη στήλη Ρον (MW), αναγράφεται η ονομαστική τους ισχύς, ενώ στην τελευταία (%) η ποσοστιαία συμμετοχή των Υ/Σ στη συνολική αιολική παραγωγή.

Πίνακας 26: Παλαιοί και νέοι Υ/Σ που συνδέονται με Α/Π στην Κρήτη

	Υ/Σ	Α/Α	Ρον (MW)	%
ΥΠΑΡΧΟΝΤΕΣ Υ/Σ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	1	15,65	0,507641
	ΑΓΥΙΑ	2	10,8	0,350321
	ΡΕΘΥΜΝΟ	5	7,2	0,233547
	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	8	9,55	0,309774
	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	10	14,44	0,468392
	ΜΟΙΡΕΣ	11	17,4	0,564405
	ΜΑΡΩΝΙΑ	14	30,5	0,989331
	ΣΗΤΕΙΑ	16	57,6	1,868377
	ΑΓ.ΝΙΚ.	17	11,9	0,386001
	ΚΑΝΔΑΝΟΣ	19	247,3	8,021694
ΝΕΟΙ Υ/Σ	ΕΛΟΣ	20	218,5	7,087506
	ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	21	194,1	6,29604
	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	22	387,2	12,55964
	ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	23	229,95	7,45891
	ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	24	144,1	4,674186

	ΚΑΒΟΥΣΙ	25	215,2	6,980463
	ΖΑΚΡΟΣ	26	393,3	12,75751
	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ 2	27	236,9	7,684348
	ΚΡΙΤΣΑ	28	145,5	4,719598
	ΔΑΣΟΣ ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ	29	248,7	8,067106
	ΜΥΡΘΙΟΣ	30	247,1	8,015207
	ΣΥΝΟΛΟ		3082,89	100

Στο χάρτη της Εικόνας 27 παρουσιάζονται αριθμημένοι οι παλιοί και νέοι ζυγοί του Πίνακα 26, ώστε να γίνει κατανοητή και η γεωγραφική τους απεικόνιση.



Εικόνα 27: Παλιοί και νέοι Υ/Σ συστήματος Κρήτης

Η παραπάνω εκτίμηση δημιουργίας νέων Α/Π θα μπορούσε να θεωρηθεί αρκετά ρεαλιστική, καθώς υπάρχουν μελέτες οι οποίες επιδεικνύουν εξίσου υψηλές δυνατότητες εγκατάστασης αιολικής ισχύος για το νησί της Κρήτης. Συγκεκριμένα, η μελέτη του εργαστηρίου Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων, της Σχολής Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης [59], υπολογίζει μια μετριοπαθή φέρουσα ικανότητα τοποθέτησης Α/Γ στην Κρήτη, σύμφωνα με την οποία ακόμα και με την τοποθέτηση τυπικών Α/Γ με μέση ισχύ 2 MW, (οι οποίες θεωρούνται σχετικά μικρές σήμερα) μπορούν να εγκατασταθούν στην:

- ΠΕ Χανίων: 1.250 MW,
- ΠΕ Ρεθύμνης: 785 MW,
- ΠΕ Ηρακλείου: 1.390 MW και
- ΠΕ Λασιθίου: 895 MW,

με συνολική ισχύ 4.320 MW.



Εικόνα 28: Ποσοστό προτεραιότητας διαθέσιμων περιοχών χωροθέτησης

Υπό τις συνθήκες ενσωμάτωσης των νέων Α/Π αλλά και για την κάλυψη των αναγκών της αυξημένης διείσδυσης επιλέχθηκαν κάποιες νέες γραμμές μεταφοράς, οι οποίες προστίθενται κάθε φορά ανάλογα με το σενάριο προσομοίωσης που παρουσιάζεται. Ο αριθμός των κυκλωμάτων που ενισχύουν το σύστημα εξαρτάται από το μέγεθος του φορτίου – σεναρίου που εξετάζεται και την ανάγκη διασποράς της ισχύος ανά περιοχή. Το τελικό μοντέλο του συστήματος μεταφοράς της Κρήτης αποτελείται από 30 ζυγούς και 45 γραμμές μεταφοράς.

Συγκεκριμένα, οι νέες γραμμές που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζονται στον Πίνακα 27. Οι γραμμές επιλέχθηκαν είτε με βάση την απόσταση τους από τον κοντινότερο Υ/Σ, είτε με βάση τη συγκέντρωση ισχύος στη συγκεκριμένη περιοχή, η οποία υπολογίστηκε μετά από την εκτέλεση των πειραματικών προσομοιώσεων. Τα χαρακτηριστικά των νέων γραμμών μεταφοράς υπολογίστηκαν βάσει των Εξισώσεων 4.1- 4.3.

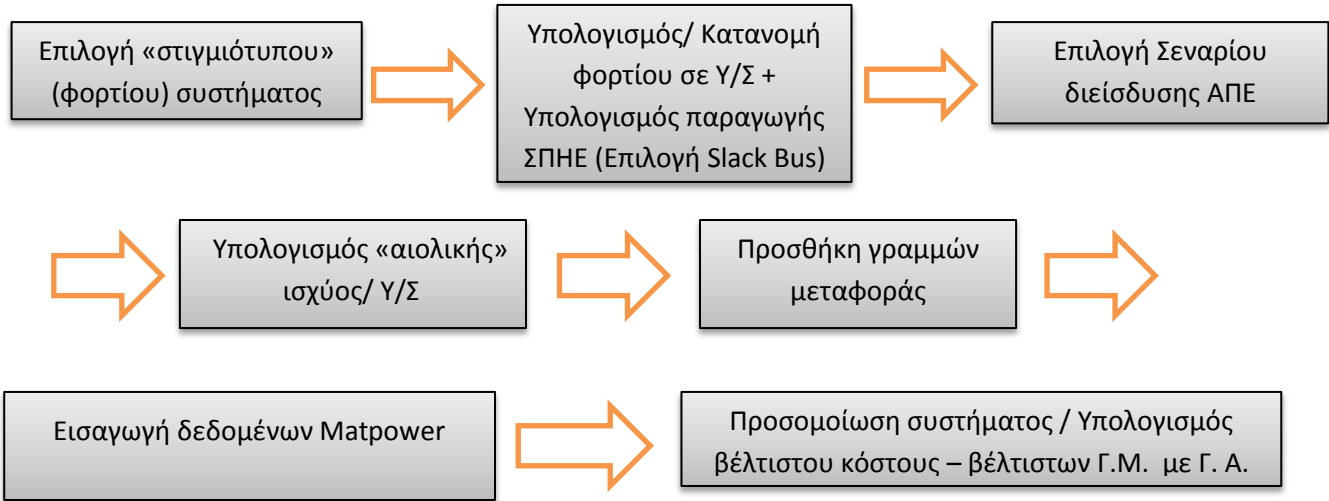
Πίνακας 27: Χαρακτηριστικά νέων γραμμών μεταφοράς

A/A	ΖΥΓΟΣ ΑΝΑΧΩΡΗΣΗΣ	ΖΥΓΟΣ ΑΦΙΞΗΣ	V _{ON} (kV)	ΤΥΠΟΣ	ΜΗΚΟΣ (km)	ΟΡΙΟ ΦΟΡΤΙΣΗΣ	r (p.u)	x (p.u)	ΚΟΣΤΟΣ (κ€)
22	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	150	B2	25,8	168,9	0,01146	0,04586	2051,1
23	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	150	B2	56,5	168,9	0,02511	0,10044	4491,1
24	ΜΟΙΡΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	150	B2	62,5	168,9	0,02777	0,111111	4968,1
25	ΚΑΝΔΑΝΟΣ	ΑΓΥΙΑ	150	B2	51,83	168,9	0,0223445	0,09721	5183
26	ΕΛΟΣ	ΚΑΣΤΕΛΙ	150	B2	25,72	168,9	0,0110882	0,048239	2572
27	ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	ΜΟΙΡΕΣ	150	B2	34,49	168,9	0,014869	0,064688	3449
28	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	150	B2	41,08	168,9	0,01771	0,077048	4108
29	ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	ΜΟΙΡΕΣ	150	B2	7,24	168,9	0,0031212	0,013579	724
30	ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150	B2	12,79	168,9	0,0055139	0,023988	1279
31	ΚΑΒΟΥΣΙ	ΜΑΡΩΝΙΑ	150	B2	25,95	168,9	0,0111873	0,048671	2595

32	ΖΑΚΡΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	150	B2	35,32	168,9	0,0152268	0,066245	3532
33	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2	150	B2	7	168,9	0,0030178	0,013129	700
34	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	150	B2	44,74	168,9	0,0192879	0,083912	4474
35	ΖΑΚΡΟΣ	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	150	B2	30	168,9	0,0129333	0,056267	3000
36	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	150	B2	48,81	168,9	0,0210425	0,091546	4881
37	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	150	B2	65,82	168,9	0,0283757	0,123449	6582
38	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	150	B2	33,67	168,9	0,0145155	0,06315	3367
39	ΒΡΥΣΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	150	B2	33,763	168,9	0,0145556	0,063324	3376,3
40	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΚΡΙΤΣΑ	150	B2	5,6	168,9	0,0024142	0,010503	560
41	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΔΑΣΟΣ ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ	150	B2	12	168,9	0,0051733	0,022507	1200
42	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΜΥΡΘΙΟΣ	150	B2	5,979	168,9	0,0025776	0,011214	597,9
43	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	150	B2	10,67	168,9	0,022473333	0,05468931	565,51
44	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΜΟΙΡΕΣ	150	B2	36,3	168,9	0,015649333	0,068082667	3630
45	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	150	B2	23,93	168,9	0,010316489	0,044882044	2393

4.3 Επίλυση προβλήματος

Την ολοκλήρωση της μοντελοποίησης του συστήματος μεταφοράς ενέργειας της Κρήτης, ακολουθεί η επίλυση του προβλήματος της βέλτιστης επέκτασης του. Τα στάδια που ακολουθήθηκαν για την επίλυση απεικονίζονται στην Εικόνα 29.



Εικόνα 29: Στάδια επίλυσης προβλήματος

Αναλυτικά, τα στάδια επίλυσης του προβλήματος είναι:

Επιλογή «στιγμιότυπου» (φορτίου) συστήματος: Η μελέτη του συστήματος πραγματοποιήθηκε για συγκεκριμένες χρονικές στιγμές, επομένως μελετώνται συγκεκριμένα φορτία που έχουν μετρηθεί ή προβλεφθεί για το νησί της Κρήτης. Η επιλογή των τιμών των φορτίων έγινε με τέτοιο τρόπο ώστε να καλύπτονται όλες οι χαρακτηριστικές περιπτώσεις «συμπεριφοράς» του ΣΗΕ, όπως για παράδειγμα τα μέγιστα και τα ελάχιστα φορτία συγκεκριμένων ετών, αλλά κυρίως χρησιμοποιήθηκε το μέγιστο προβλεπόμενο φορτίο της ΡΑΕ για το έτος 2040 (1150MW).

Κατανομή φορτίου σε Υ/Σ - Υπολογισμός παραγωγής ΣΠΗΕ: Μετά την επιλογή του συνολικού φορτίου, γίνεται η κατανομή του σε όλους τους Υ/Σ του νησιού, σύμφωνα με στοιχεία του ΔΕΣΜΗΕ αναφορικά με την ποσοστιαία συμμετοχή τους στην κατανάλωση ενέργειας ανά Υ/Σ. Υπολογίζεται η παραγωγή ενέργειας (συνολικά εκτιμήθηκε περίπου στο μισό του συνολικού φορτίου) για κάθε συμβατικό σταθμό παραγωγής, εκτός από έναν ο οποίος επιλέγεται κάθε φορά να είναι ο σταθμός (ζυγός) αναφοράς του συστήματος (slack/reference bus). Στα σενάρια διείσδυσης, όπου όπως αποδείχτηκε από δοκιμές, το ΣΜΗΕ Κρήτης δεν μπορεί να διαχειριστεί τα συγκεκριμένα ποσά «αιολικής» ισχύος, θεωρείται ότι ο σταθμός αναφοράς θα διασυνδεθεί με το ηπειρωτικό σύστημα, ώστε η περίσσεια ισχύος να διοχετεύεται στο διασυνδεδεμένο σύστημα και να μην απορρίπτεται από την Κρήτη.

Επιλογή Σεναρίου διείσδυσης ΑΠΕ: Για κάθε φορτίο του συστήματος επιλέγεται ένα ποσοστό διείσδυσης ΑΠΕ, και συγκεκριμένα αιολικής διείσδυσης, το οποίο αυξάνεται μέχρι ενός μεγίστου ορίου, ώστε να καταγραφεί η συμπεριφορά του ΣΗΕ.

Υπολογισμός «αιολικής» ισχύος/ Υ/Σ: Στη συνέχεια, υπολογίζεται η ισχύς που παράγεται από κάθε Α/Π, σύμφωνα με την ποσοστιαία κατανομή του Πίνακα 26. Η ισχύς των Α/Π θεωρείται «αρνητικό» φορτίο για τον Υ/Σ στον οποίο συνδέεται, επομένως αφαιρείται από το φορτίο που έχει νωρίτερα υπολογιστεί.

Προσθήκη γραμμών μεταφοράς: Οι γραμμές μεταφοράς οι οποίες προστίθενται στο σύστημα κατηγοριοποιούνται ως εξής:

- ✓ Οι ήδη υπάρχουσες: όπου υπάρχει ο περιορισμός της προσθήκης μέχρι 2 νέων κυκλωμάτων- γραμμών παράλληλα σε αυτές που ήδη είναι εγκατεστημένες (Εικόνα 26).
- ✓ Οι νέες γραμμές: οι οποίες είναι οι γραμμές που επιλέχθηκαν ως κατάλληλες – στα πλαίσια της παρούσας εργασίας- για την ενίσχυση του συστήματος υπό συνθήκες υψηλής αιολικής διείσδυσης. Επίσης, ο περιορισμός στην προσθήκη νέων γραμμών είναι 2.

Η επιλογή του αριθμού και της ταυτότητας (δηλαδή ποιες Γ.Μ. χρησιμοποιούνται σε κάθε περίπτωση) έγινε ανάλογα με το ποσοστό διείσδυσης, την κατανομή της αιολικής και της συμβατικής ισχύος ανά περιοχή και ανά Υ/Σ. Με λίγα λόγια, καταγράφηκε η ροή ισχύος ανάμεσα στους ζυγούς του ΣΗΕ -μετά από δοκιμαστικές προσομοιώσεις – και σε όποια σημεία παρατηρήθηκε αυξημένη και (αρκετές φορές) εκτός των ορίων ροή, σε εκείνα τα σημεία προστέθηκαν νέες γραμμές, ώστε να επιτευχθεί η «εκτόνωση» των παραπάνω γραμμών. Τελικά, χρησιμοποιήθηκαν συνολικά 24 νέες Γ.Μ. .

Εισαγωγή δεδομένων Matpower: Όλα τα παραπάνω δεδομένα (η κατανομή του φορτίου, η παραγωγή των ΣΠΗΕ, η επιλογή του slack bus, το συνολικό «αιολικό» φορτίο, η κατανομή της αιολικής ισχύος/Υ/Σ, ο αριθμός και τα χαρακτηριστικά των Γ.Μ.) εισάγονται στο Matpower, με στόχο την ολοκλήρωση του μοντέλου του ΣΜΗΕ Κρήτης και διεξαγωγή των προσομοιώσεων.

Υπολογισμός βέλτιστου κόστους / βέλτιστων Γ.Μ. με Γ.Α.: Φτάνοντας στο τελικό και κρίσιμο στάδιο της επίλυσης του προβλήματος επέκτασης του απομονωμένου ΣΜΗΕ, υπολογίζεται το βέλτιστο κόστος προσθήκης Γ.Μ., μέσω της επιλογής συγκεκριμένων Γ.Μ., με τη βοήθεια του Γ.Α., που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν τρεις (3) βασικές συναρτήσεις στο Matpower. Ο Γ.Α., μέσα από τον οποίο καλούνται οι συναρτήσεις simple_fitness2 και simple_fitness3, όπου υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση με ενσωματωμένους τους περιορισμούς που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 3. Μέσα στις simple_fitness2 και simple_fitness3, χρησιμοποιείται η τελευταία συνάρτηση και υπολογίζεται η ροή ισχύος (runpf) για κάθε συνδυασμό γραμμών μεταφοράς που εξετάζεται. Αναλυτικά, τα βήματα περιγράφονται παρακάτω.

Αρχικά, υλοποιήθηκε το DC μοντέλο του ΣΗΕ, με τη χρήση των περιορισμών της ροής ισχύος ανάμεσα στους ζυγούς (Εξισώσεις 3.11, 3.18, 3.19), του αριθμού των Γ.Μ. που προστίθενται (Εξίσωση 3.14), του ισοζυγίου ισχύος (Εξίσωση 3.10) και της παραγωγής των γεννητριών των Σ.Π.Η.Ε. (Εξίσωση 3.13). Τα χαρακτηριστικά του αλγορίθμου είναι τα εξής:

```
NVARS=24
aNVARS=0
lbound=zeros(1,NVARS)
ubound=2*ones(1,NVARS)
POPSIZE=50
q=2
PXOVER=0.8
scale=1
MAXGENS=100
PMUTATION=0.15
aiolikh_paragwgh=2000
```

NVARS: ο αριθμός των μεταβλητών, δηλαδή ο αριθμός των Γ.Μ. (από 21 έως 45) που μπορούν να προστεθούν στο κύκλωμα. Κάθε μεταβλητή αντιστοιχίζεται σε μία συγκεκριμένη γραμμή και η αρίθμηση των μεταβλητών ακολουθεί τον Πίνακα 27.

aNVARS: ο αριθμός των νέων Γ.Μ. που μπορούν να προστεθούν στο κύκλωμα και είναι «ανοιχτές»/ διαθέσιμες από την αρχή. Αν είναι όλες διαθέσιμες δίνεται την τιμή 0.

lbound: το κατώτατο όριο του αριθμού των Γ.Μ. που μπορούν να προστεθούν, το οποίο είναι 0.

ubound: το ανώτατο όριο του αριθμού των Γ.Μ. που μπορούν να προστεθούν, το οποίο είναι 2.

POPSIZE: Ο αριθμός χρωμοσωμάτων δηλαδή το μέγεθος του πληθυσμού των λύσεων, το οποίο κυμάνθηκε από 50 έως 150, ανάλογα με την κάθε περίπτωση που μελετήθηκε.

q: Ο τελεστής επιλογής για τον οποίο επιλέχθηκε η τιμή 2, και κάποιες φορές οι τιμές 3 και 4 για να διαπιστωθεί η επίδραση του τελεστή στο Γ.Α..

PXOVER: Η πιθανότητα επιλογής ενός χρωμοσώματος για να συμμετέχει στον επιχιασμό (η τιμή της κυμάνθηκε ανάμεσα στο 0,8 και 0,9, αλλά στις περισσότερες περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκε το 0,8).

scale: ο αριθμός ανάμεσα στο 0 και 1, ο οποίος εκτελεί scaling στο μέγεθος της διαταραχής. Μπορεί να εξαρτάται από το είδος του επιχιασμού που εφαρμόστηκε. Η τιμή που χρησιμοποιήθηκε ήταν scale=1.

MAXGENS: Ο αριθμός γενεών ο οποίος κυμάνθηκε από 50 ως 200 γενεές, ανάλογα με το πρόβλημα.

PMUTATION: Η πιθανότητα μετάλλαξης η οποία κυμάνθηκε από 0,08 έως 0,15, ενώ διαπιστώθηκε ότι για τιμές μικρότερες ή μεγαλύτερες από αυτές, ο αλγόριθμος δεν «εντόπιζε» λύσεις.

aiolikh_paragwgh: Το σύνολο παραγωγής αιολικής ισχύος, το οποίο χρησιμοποιείται στους περιορισμούς που εισάγονται στην αντικειμενική συνάρτηση, στις περιπτώσεις AC ροής φορτίου.

Ενώ τα βήματα που ακολουθεί ο αλγόριθμος αναλύονται μετά τη συνοπτική παρουσίαση τους:

```
generation=0
Initialize
Evaluate
    Call simple_fitness2.m
        opt=mpoption('PF_DC',1,'OUT_ALL',0);
        results = runpf(KRHTH_...,opt);
        fij = results.branch(:,14);
        ....
    or Call simple_fitness3.m
        opt=mpoption('PF_DC',1,'OUT_ALL',0);
        results = runpf(KRHTH_...,opt);
        fij = results.branch(:,14);
        ....
KeepBest
do generation=1, MAXGENS
Select
Crossover
```

Xover
Mutate
Report
Evaluate
Elitist
enddo

generation=0: Το πρόγραμμα ξεκινώντας από τη γενιά=0, αρχικοποιεί τις μεταβλητές, μέσω της συνάρτησης **Initialize**.

Evaluate: υπολογίζει τη συνάρτηση προσαρμογής κάθε χρωμοσώματος, καλώντας τις συναρτήσεις **simple_fitness2** (αν $aNVARs \sim 0$) ή **simple_fitness3** (αν $aNVARs = 0$). Οι συναρτήσεις **simple_fitness2** και **simple_fitness3** υπολογίζουν και εμφανίζουν το κόστος προσθήκης των γραμμών και τη ροή ισχύος ανάμεσα στους ζυγούς με τη χρήση των εντολών, όταν μελετάται η **DC ροή φορτίου**:

```
opt=mpoption('PF_DC',1,'OUT_ALL',0);
results = runpf(KRHTH_...,opt);
fij = results.branch(:,14);
```

Η εντολή `mpoption('PF_DC',1,'OUT_ALL',0)`, επιτρέπει τη χρήση του DC μοντέλου και αποτρέπει την εμφάνιση των αποτελεσμάτων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου. Με την εντολή `results = runpf(όνομα_αρχείου_προς_προσομοίωση,opt)`, εκτελείται η DC ροή φορτίου, ενώ η `fij = results.branch(:,14)`, ονομάζει τα αποτελέσματα της στήλης 14 του πίνακα `results.branch` ως f_{ij} , που είναι η ροές ισχύος.

Όταν εξετάζεται ο υπολογισμός της **AC ροής φορτίου** οι εντολές μορφοποιούνται ως εξής:

```
opt=mpoption('OUT_ALL',0);
results = runpf(KRHTH_max_2040_ap_3000,opt);
```

Παράλληλα, στην AC «περίπτωση» προστίθενται οι περιορισμοί που προαναφέρθηκαν και στα πλαίσια αυτά, υπολογίζονται και κάποιες παραπάνω μεταβλητές στις συναρτήσεις **simple_fitness2** και **simple_fitness3**. Συγκεκριμένα:

```
loss = get_losses(results);
real_loss=real(loss);
total=sum(real_loss);
voltage=results.bus(:,8);
p_gen=results.gen(:,2);
total_gen=sum(abs(p_gen));
```

όπου: `loss = get_losses(results)`, ζητείται η εξαγωγή των απωλειών από τον πίνακα `results`,

`real_loss`: εξάγεται το πραγματικό μέρος των απωλειών,

`total`: υπολογίζεται το άθροισμα του πραγματικού μέρους των απωλειών όλων των ζυγών

`voltage`: ονομάζονται τα αποτελέσματα της στήλης 8 του πίνακα `results.bus` ως `voltage`, που είναι η κανονικοποιημένη (ως προς τη βάση του συστήματος V_{base}) τάση κάθε ζυγού

`p_gen`: ονομάζονται τα αποτελέσματα της στήλης 2 του πίνακα `results.gen` ως `p_gen`, που είναι η παραγωγή ισχύος κάθε γεννήτριας, ενώ

`total_gen`: υπολογίζεται το άθροισμα της απόλυτης τιμής της παραγωγής ισχύος όλων των ζυγών- γεννητριών.

Στη συνέχεια, υπολογίζεται το η τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης (κόστος), με ενσωματωμένους τους περιορισμούς που προαναφέρθηκαν, στηριζόμενοι στα `penalty` που υπολογίστηκαν στις Εξισώσεις 3.9, 3.17-19, εφόσον αυτοί παραβιάζονται. Ο έλεγχος των περιορισμών γίνεται με τη χρήση της εντολής `if`.

KeepBest: φυλάσσει το καλύτερο άτομο κάθε γενιάς (χρωμόσωμα και συνάρτηση προσαρμογής του).

do generation=1, MAXGENS/ enddo: Η επανάληψη που πραγματοποιείται για την επιλογή των βέλτιστων λύσεων.

Select: επιλέγει τα χρωμοσώματα του ενδιαμέσου πληθυσμού, με χρήση της μεθόδου `tournament selection` ($q=2$ ή 4). Η `tournament selection` μπορεί να λειτουργεί με μίγμα θετικών – αρνητικών τιμών της συνάρτησης προσαρμογής, ενώ αντιμετωπίζει τόσο προβλήματα μεγιστοποίησης όσο και ελαχιστοποίησης [45].

Crossover: Επιλέγει τα ζεύγη για επιχiasμό. Σαρώνει όλα τα άτομα του πληθυσμού. Κάθε ένα επιλέγεται ως υποψήφιο για επιχiasμό με πιθανότητα `pcrossover`. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, χρησιμοποιήθηκε «Random crossover B».

Xover: πραγματοποιεί επιχiasμό τύπου «Random crossover B» μεταξύ των δύο ατόμων του επιλεγμένου ζεύγους χρωμοσωμάτων. Το σημείο τομής επιλέγεται βάσει της πιθανότητας [45]:

$$relprob = \frac{fitness\ function(parent_1)}{fitness\ function(parent_1) + fitness\ function(parent_2) + 10^{-10}}$$

Mutate: από το σύνολο του πληθυσμού και το σύνολο των γονιδίων κάθε χρωμοσώματος επιλέγονται (με ομοιόμορφη πιθανότητα) τα γονίδια που θα μεταλλαχθούν. Στη συνέχεια, χρησιμοποιήθηκε «Random non-uniform mutation I».

Report: υπολογίζει στατιστικά στοιχεία του πληθυσμού σε κάθε γενιά και τα εξάγει στο αρχείο εξόδου.

Evaluate: Επαναλαμβάνεται η διαδικασία η οποία περιγράφηκε στο βήμα $generation=0$, για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης.

Elitist: εάν το καλύτερο άτομο της παρούσης γενιάς είναι χειρότερο από το καλύτερο της προηγούμενης, το τελευταίο αντικαθιστά το χειρότερο άτομο της παρούσης γενιάς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΕΝΑΡΙΑ – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα σενάρια που μελετήθηκαν και υλοποιήθηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας, ενώ για κάθε περίπτωση καταγράφονται και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του ΣΜΗΕ Κρήτης και της βελτιστοποίησης της επέκτασης του, με τη χρήση του προτεινόμενου αλγορίθμου. Τα δεδομένα αρχιτεκτονικής του δικτύου παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο.

5.2 Εξεταζόμενα σενάρια

Αρχικά, τα σενάρια τα οποία εφαρμόστηκαν στο μοντέλο του ΣΜΗΕ Κρήτης, αφορούν στα μέγιστα και στα ελάχιστα φορτία κατανάλωσης του έτους 2010, με σκοπό να ελεγχθεί η ορθότητα και η σωστή λειτουργία του μοντέλου. Συγκεκριμένα, τα φορτία και η αιολική παραγωγή που χρησιμοποιήθηκαν είναι (Πίνακας 28) :

Πίνακας 28: Σενάρια μέγιστου - ελάχιστου φορτίου έτους 2010

	WINTER 2010		SUMMER 2010	
ΦΟΡΤΙΟ (MW)	MIN	MAX	MIN	MAX
Υ/Σ				
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	3,379	6,258	5,0783	6,491
ΑΓΥΙΑ	2,332	4,319	3,504	4,479
ΡΕΘΥΜΝΟ	1,554	2,879	2,336	2,986
ΗΡΑΚΛΕΙΟ III	2,0623	3,819	3,098	3,960
ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	3,118	5,774	4,685	5,989
ΜΟΙΡΕΣ	3,757	6,958	5,646	7,216
ΜΑΡΩΝΙΑ	6,586	12,197	9,897	12,650
ΣΗΤΕΙΑ	12,438	23,034	18,691	23,890
ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	2,569	4,758	3,861	4,935
Α/Π ΠΑΡΑΓΩΓΗ (MW)	37,8	70	56,8	72,6
ΣΥΝΟΛΟ (MW)	165,601	499,814	227,1	623,11

Ο έλεγχος που πραγματοποιήθηκε ήταν αναφορικά με την τήρηση των θερμικών ορίων, των ορίων τάσης των γραμμών κατά τον υπολογισμό της ροής ισχύος, τόσο σε DC, όσο και σε AC «συνθήκες». Εφόσον κανένα χαρακτηριστικό του συστήματος δεν

υπερέβη τα όρια, συνεχίστηκε η χρήση του μοντέλου για μεγαλύτερα φορτία και περιπτώσεις υψηλότερης αιολικής διείσδυσης.

Σε όλα τα σενάρια που μελετήθηκαν, χρησιμοποιήθηκε η μεγαλύτερη κατανάλωση της Κρήτης, συγκρίνοντας παλαιότερα έτη και μελλοντικά. Τελικά επιλέχθηκε το φορτίο των **1150MW**, το οποίο είναι η ετήσια αιχμή της πρόβλεψη της ΡΑΕ για το 2040. Η διαφοροποίηση των σεναρίων έγκειται στο ποσοστό αιολικής διείσδυσης, καθώς και στη διασύνδεση του νησιού της Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα, από διαφορετικό σημείο κάθε φορά. Τα σημεία διασύνδεσης με το ΣΜΗΕ τα οποία εξετάζονται είναι αυτά των τριών (3) ΣΠΗΕ του νησιού, δηλαδή τα Χανιά, τα Λινοπεράματα και ο Αθρινόλακκος. Σημαντικό είναι ότι ως συντελεστής ταυτοχρονισμού των Α/Γ χρησιμοποιήθηκε το 1, το οποίο είναι το πιο ακραίο σενάριο. Θεωρείται δηλαδή ότι η υπολογιζόμενη ισχύς για κάθε Α/Γ εμφανίζεται ταυτόχρονα. Οι περιορισμοί για κάθε περίπτωση, ανάλογα αν είναι επιθυμητή AC ή DC προσομοίωση, είναι αυτοί που περιγράφηκαν στο κεφάλαιο 4 στη μαθηματική διατύπωση του προβλήματος.

Όσον αφορά στα δεδομένα του αρχείου προσομοίωσης του Matpower, τα οποία διαφοροποιούνται σε κάθε περίπτωση, είναι το ποσό της αιολικής ισχύος, η κατανομή αυτού και του φορτίου στους ζυγούς, οι ισχύεις (ενεργές, άεργες) των ζυγών, η παραγωγή των ΣΠΗΕ, η επιλογή του slack bus και οι Γ.Μ. οι οποίες χρησιμοποιούνται. Τα αποτελέσματα του Γ.Α. που καταγράφονται, είναι το βέλτιστο κόστος επέκτασης και το υπολογιζόμενο διάνυσμα x , το οποίο αποτελείται από τον αριθμό των κυκλωμάτων που χρειάζεται να προστεθούν ανά γραμμή. Για παράδειγμα, αν το διάνυσμα είναι (για NVAR=24):

$X1=[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]$, μεταφράζεται όπως στην 4^η στήλη του Πίνακα 29 ή αν το διάνυσμα είναι (για NVAR=45):

$X2=[0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 2\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 2\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 2\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1\ 1\ 2\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]$, μεταφράζεται όπως στην 5^η στήλη του Πίνακα 29.

Πίνακας 29: Παράδειγμα αποτελεσμάτων διανύσματος x

A/A	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	X1	X2
1	ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	0	0
2	ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	0	1
3	ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	0	0
4	ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	0	0
5	ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0
6	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	0	2
7	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	0	0
8	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	ΜΟΙΡΕΣ	0	0
9	ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	0	0
10	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1
11	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Α)	0	0
12	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Β)	1	1

13	ΗΡΑΚΛΕΙΟ III	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	0	0
14	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	0	1
15	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	ΣΤΑΛΙΔΑ	0	0
16	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	0	0
17	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1
18	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑ	0	0
19	ΜΑΡΩΝΙΑ	ΣΗΤΕΙΑ	0	0
20	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1
21	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	0	0
22	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	0	0
23	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0
24	ΜΟΙΡΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0
25	ΚΑΝΔΑΝΟΣ	ΑΓΥΙΑ		2
26	ΕΛΟΣ	ΚΑΣΤΕΛΙ		1
27	ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	ΜΟΙΡΕΣ		1
28	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ		1
29	ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ		0
30	ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ		0
31	ΚΑΒΟΥΣΙ	ΜΑΡΩΝΙΑ		2
32	ΖΑΚΡΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ		1
33	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2		0
34	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ		1
35	ΖΑΚΡΟΣ	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.		0
36	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ		0
37	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ		0
38	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ		1
39	ΒΡΥΣΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ		1
40	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΚΡΙΤΣΑ		2
41	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΔΑΣΟΣ ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ		0
42	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΜΥΡΘΙΟΣ		0
43	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II		0
44	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΜΟΙΡΕΣ		0
45	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ		0

Για κάθε σενάριο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πρώτων προσομοιώσεων, όπου αρχικά είχε προστεθεί περιορισμένος αριθμός Γ.Μ. –και όχι όλες- συγκριτικά με την περίπτωση της προσθήκης όλων των νέων κυκλωμάτων. Σε κάθε περίπτωση ο αρχικός αριθμός Γ.Μ. είναι κατάλληλος και χρησιμοποιήθηκε ώστε να καλύπτει την αύξηση της αιολικής ισχύος, μειώνοντας με αυτόν τον τρόπο το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου και σε κάποιες περιπτώσεις και το κόστος επέκτασης του δικτύου μεταφοράς ενέργειας της Κρήτης.

5.2.1 Σενάριο 1

Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται η DC ροή φορτίου για περιορισμένο αριθμό Γ.Μ. και η AC ροή για 45 Γ.Μ. . Οι Γ.Μ. οι οποίες προστίθενται αρχικά είναι τρεις (3) και είναι οι Γ.Μ. με αύξοντα αριθμό 22,23,24 σύμφωνα με τον Πίνακα 27, ενώ τελικά μελετάται συγκριτικά το σύστημα με την προσθήκη όλων των υποψήφιων Γ.Μ. (45). Η επιλογή των συγκεκριμένων αρχικών γραμμών έγινε βάσει προτάσεων της ΡΑΕ για την ενίσχυση του συστήματος. Το νέο σύστημα μεταφοράς απεικονίζεται στο χάρτη της Εικόνας 30, στον οποίο οι νέες Γ.Μ. παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα.

Εικόνα 30: Το ΣΜΗΕ Κρήτης με την προσθήκη 3 Γ.Μ.



Παρατηρείται ότι οι γραμμές αυτές συνδέουν ήδη υπάρχοντες Υ/Σ, ενώ τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι:

Κατανάλωση: 1150MW

Αιολική διείσδυση: 500 MW

Αρχικός αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 21-24

Τελικός αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 45

Πίνακας 30: Φορτίο (MW)/ Υ/Σ Σενάριο 1

LOAD (MW)/Υ-Σ	P_d	Q_d
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	-1,03968408	0,260569392
ΧΑΝΙΑ	163,36	83,6898454
ΒΡΥΣΣΕΣ	21,23287671	12,03322576
ΑΓΥΙΑ	9,90333325	2,482009272
ΡΕΘΥΜΝΟ	119,8442313	30,03579561
ΗΡΑΚΛΕΙΟ III	43,03705954	10,78610384
ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	165,2801111	84,67551256
ΗΡΑΚΛΕΙΟ I	71,76636405	36,76699888
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	55,65068493	28,51069157
ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	-41,24771481	10,33765178

ΜΟΙΡΕΣ	12,0463801	3,01910744
ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	33,28494143	17,0523813
ΜΑΡΩΝΙΑ	-87,12294333	21,83506782
ΣΗΤΕΙΑ	-126,5201222	31,70893158
ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	43,91872856	11,00707093
ΣΤΑΛΙΔΑ	110,9589041	56,84593273
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	55,65068493	28,51069157
ΣΥΝΟΛΟ	650	

Στον Πίνακα 31 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του Σεναρίου 1. Συγκεκριμένα, εκτός από τον αριθμό των μεταβλητών, το ζυγό αναφοράς και το κόστος αναφέρονται οι παράμετροι του Γ.Α. και το όνομα του διανύσματος x, ώστε να γίνεται κατανοητός ο Πίνακας 32, όπου παρουσιάζονται αναλυτικά οι γραμμές που προστίθενται σε κάθε περίπτωση.

Πίνακας 31: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Σεναρίου 1

NVARS	Slack bus	Κόστος (κ€)	Παράμετροι Γ.Α.*	x
21	3	5.209,9		X1
	6	3.434,4		X2
	15	5.936		X3
24/45 (AC)	3	3.110,8 / 2.591,7	q=3	X4/X4a
24/45 (AC)	6	3.873 / 3.445	q=3	X5/X5a
24/45 (AC)	15	4.625,6 / 4.197,6	q=3	X6/X6a

*(popsize=50,maxgens=100, PXOVER=0.8,PMUTATION=0.15,q=2)

Το βασικό συμπέρασμα, που προκύπτει από τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα, είναι ότι στην περίπτωση της διείσδυσης των 500MW είναι οικονομικότερη η προσθήκη των νέων γραμμών, σε σχέση με την ενίσχυση των ήδη υπαρχόντων. Η προσθήκη όλων των διαθέσιμων Γ.Μ. (45) έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση του κόστους.

Πίνακας 32: Αναλυτική προσθήκη Γ.Μ. Σεναρίου 1

A/A	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιξης	X1	X2	X3	X4	X4a	X5	X5a	X6	X6a
1	ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	1	1	0	1	0	0	0	0	0
3	ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	0	0	0	0	0	0	0	1	1
8	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	ΜΟΙΡΕΣ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	1	0	0	1	1	1	1	1	1
10	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1	1	0	0	1	1	1	1
11	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Α)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Β)	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	0	0	0	0	0	1	1	0	0
14	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	0	0	0	0	0	0	0	0	0

15	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΣΤΑΛΙΔΑ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	0	0	0	1	1	1	1	0	0
17	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1	1	0	0	1	1	1	1
18	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑ	0	0	1	0	0	0	0	0	0
19	ΜΑΡΩΝΙΑ	ΣΗΤΕΙΑ	0	0	0	1	1	1	0	1	0
20	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1	1	0	0	1	1	1	1
21	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	1	1	1	0	0	1	1	1	1
22	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ				0	0	0	0	0	0
23	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ				0	0	0	0	0	0
24	ΜΟΙΡΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ				0	0	0	0	0	0
25	ΚΑΝΔΑΝΟΣ	ΑΓΥΙΑ				0	0	0	0	0	0
26	ΕΛΟΣ	ΚΑΣΤΕΛΙ					0		0		0
27	ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	ΜΟΙΡΕΣ					0		0		0
28	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ					0		0		0
29	ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ					0		0		0
30	ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ					0		0		0
31	ΚΑΒΟΥΣΙ	ΜΑΡΩΝΙΑ					0		0		0
32	ΖΑΚΡΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ					0		0		0
33	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2					0		0		0
34	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ					0		0		0
35	ΖΑΚΡΟΣ	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.					0		0		0
36	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ					0		0		0
37	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ					0		0		0
38	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ					0		0		0
39	ΒΡΥΣΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ					0		0		0
40	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΚΡΙΤΣΑ					0		0		0
41	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΔΑΣΟΣ ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ					0		0		0
42	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΜΥΡΘΙΟΣ					0		0		0
43	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ					0		0		0
44	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΜΟΙΡΕΣ					0		0		0
45	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ					0		0		0

Σύμφωνα τον Πίνακα 32, οι Γ.Μ. οι οποίες ενισχύονται σχεδόν σε όλες τις περιπτώσεις είναι οι:

- Μοίρες - Πραιτώρια
- Πραιτώρια - Ιεράπετρα
- Άγιος Νικόλαος - Ιεράπετρα
- Αθερινόλακκος - Ιεράπετρα
- Αθερινόλακκος - Σητεία

Το γεγονός αυτό συνδέεται άμεσα με την υψηλή συγκέντρωση ισχύος στις συγκεκριμένες περιοχές, η οποία απαιτεί «εκτόνωση» και επομένως προσθήκη νέων γραμμών.

5.2.2 Σενάριο 2

Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται η DC ροή φορτίου για περιορισμένο αριθμό Γ.Μ. και η AC ροή για 45 Γ.Μ. . Οι Γ.Μ. οι οποίες προστίθενται αρχικά είναι τρεις (3) και είναι οι Γ.Μ. με αύξοντα αριθμό 22,23,24 σύμφωνα με τον Πίνακα 27, ενώ τελικά μελετάται το σύστημα με την προσθήκη όλων των υποψήφιων Γ.Μ. (45). Η διαμόρφωση του ΣΜΗΕ παραμένει ίδια με αυτήν της Εικόνας 30 του Σεναρίου 1. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι:

Κατανάλωση: 1150MW

Αιολική διείσδυση: **800 MW**

Αρχικός αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 21-24

Τελικός αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 45

Πίνακας 33: Φορτίο (MW)/ Υ/Σ Σενάριο 2

LOAD (MW)/Υ-Σ	P _d	Q _d
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	-27,86212467	6,982906666
ΧΑΝΙΑ	163,3561644	83,6898454
ΒΡΥΣΣΕΣ	21,23287671	,
ΑΓΥΙΑ	-8,606721595	2,15704776
ΡΕΘΥΜΝΟ	107,5041947	26,94309092
ΗΡΑΚΛΕΙΟ III	26,66937215	6,683974707
ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	165,2801111	84,67551256
ΗΡΑΚΛΕΙΟ I	71,76636405	36,76699888
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	55,65068493	28,51069157
ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	-65,99634369	16,54024285
ΜΟΙΡΕΣ	-17,77537493	4,454928889
ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	33,28494143	17,0523813
ΜΑΡΩΝΙΑ	-139,3967093	34,93610851
ΣΗΤΕΙΑ	-225,2404147	56,45056909
ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	23,52339035	5,895517346
ΣΤΑΛΙΔΑ	110,9589041	56,84593273
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	55,65068493	28,51069157
TOTAL	350	

Στον Πίνακα 34 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του Σεναρίου 2. Συγκεκριμένα, εκτός από τον αριθμό των μεταβλητών, το ζυγό αναφοράς και το κόστος αναφέρονται οι παράμετροι του Γ.Α. και το όνομα του διανύσματος x, ώστε να γίνεται κατανοητός ο Πίνακας 35, όπου παρουσιάζονται αναλυτικά οι γραμμές που προστίθενται σε κάθε περίπτωση.

Εντυπωσιακό είναι το γεγονός ότι με την αύξηση των μεταβλητών σε 45, το κόστος επέκτασης μειώνεται ή είναι οριακά αυξημένο, παρόλο που η μελέτη γίνεται για AC συνθήκες και οι περιορισμοί είναι περισσότεροι. Επίσης παρατηρούμε ότι στις

περισσότερες περιπτώσεις, παρά την αύξηση των μεταβλητών, ο αλγόριθμος «επιλέγει» τη χρήση των ίδιων γραμμών.

Πίνακας 34: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Σεναρίου 2

NVARS	Slack bus	Κόστος (κ€)	Παράμετροι Γ.Α. *	x
21	3	12.454,2		X7
	6	10.593,9		X8
	15	9.740,6	q=3	X9
24/45(AC)	3	9.406,7/ 10.531,9		X10/X10a
24/45(AC)	6	9.549,8/ 8.272,4	q=4,pm=0.08	X11/X11a
24/45(AC)	15	10.827,1/ 9.177	q=4,pm=0.08	X12/X12a

*(popsize=50, maxgens=100, PXOVER=0.8, PMUTATION=0.15, q=2)

Πίνακας 35: Αναλυτική προσθήκη Γ.Μ. Σεναρίου 2

A/A	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	X7	X8	X9	X10	X10a	X11	X11a	X12	X12a
1	ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	1	0	0	1	0	0	0	0	0
3	ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	0	0	0	0	1	0	0	0	0
4	ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	1	0	0	0	0	0	0	0	0
5	ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	1	0	1	1	0	0	1	1	0
8	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	ΜΟΙΡΕΣ	1	1	1	0	1	1	0	1	0
9	ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	1	1	1	1	0	1	0	0	0
10	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1	1	1	0	1	0	1	0
11	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Α)	1	0	0	0	0	0	0	0	1
12	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Β)	0	0	0	0	1	0	0	0	0
13	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	0	0	0	0	1	0	0	0	1
πί	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΣΤΑΛΙΔΑ	0	1	0	0	0	0	1	1	1
16	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	1	1	1	1	0	1	0	1	0
17	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑ	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	ΜΑΡΩΝΙΑ	ΣΗΤΕΙΑ	0	1	0	0	1	0	0	0	0
20	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	0	1	1	0	1	0	1	0
21	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	0	0	0	0	0	1	0	1	0
22	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ				0	0	0	0	0	0
23	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ				0	0	0	0	0	0
24	ΜΟΙΡΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ				0	0	0	0	0	0
25	ΚΑΝΔΑΝΟΣ	ΑΓΥΙΑ					0		0		0
26	ΕΛΟΣ	ΚΑΣΤΕΛΙ					0		0		0
27	ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	ΜΟΙΡΕΣ					0		0		0
28	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ					0		0		0
29	ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ					0		0		0
30	ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ					0		0		0

31	ΚΑΒΟΥΣΙ	ΜΑΡΩΝΙΑ					0		0		0
32	ΖΑΚΡΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ					0		0		0
33	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2					0		0		0
34	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ					0		0		0
35	ΖΑΚΡΟΣ	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.					0		0		0
36	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ					0		0		0
37	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ					0		0		0
38	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ					0		0		0
39	ΒΡΥΣΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ					0		0		0
40	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΚΡΙΤΣΑ					0		0		1
41	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΔΑΣΟΣ ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ					0		0		0
42	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΜΥΡΘΙΟΣ					1		0		0
43	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II					0		0		0
44	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΜΟΙΡΕΣ					0		0		0
45	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ					0		0		0

Επίσης και σε αυτήν την περίπτωση οι Γ.Μ. που προστίθενται σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις είναι οι :

- Μοίρες – Πραιτώρια,
- Πραιτώρια – Ιεράπετρα,
- Άγιος Νικόλαος – Ιεράπετρα,
- Αθερινόλακκος – Ιεράπετρα.

Ενώ τα νέα κυκλώματα τα οποία καταγράφονται λόγω της μεγαλύτερης -συγκριτικά με αυτήν των 500MW- διείσδυσης είναι:

- Ιεράπετρα – Μαρωνία,
- Σταλίδα - Άγιος Νικόλαος,
- Λινοπεράματα – Αγία Βαρβάρα.

5.2.3 Σενάριο 3

Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται η DC ροή φορτίου για περιορισμένο αριθμό Γ.Μ. και η AC ροή για 45 Γ.Μ. . Οι Γ.Μ. οι οποίες προστίθενται αρχικά είναι τρεις (3) και είναι οι Γ.Μ. με αύξοντα αριθμό 22,23,24 σύμφωνα με τον Πίνακα 27, ενώ τελικά μελετάται το σύστημα με την προσθήκη όλων των υποψήφιων Γ.Μ. (45). Η διαμόρφωση του ΣΜΗΕ παραμένει ίδια με αυτήν της Εικόνας 30 του Σεναρίου 1. Τα χαρακτηριστικά του συστήματος είναι:

Κατανάλωση: 1150MW

Αιολική διείσδυση: **1000 MW**

Αρχικός αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 21-24

Τελικός αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 45

Πίνακας 36: Φορτίο (MW)/ Υ/Σ Σενάριο 3

LOAD (MW)/Υ-Σ	P _d	Q _d
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	-45,74375172	11,46446485
ΧΑΝΙΑ	163,3561644	83,6898454
ΒΡΥΣΕΣ	21,23287671	12,03322576
ΑΓΥΙΑ	-20,94675816	5,249752448
ΡΕΘΥΜΝΟ	99,27750369	24,88128779
ΗΡΑΚΛΕΙΟ III	15,75758056	3,949221951
ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	165,2801111	84,67551256
ΗΡΑΚΛΕΙΟ I	71,76636405	36,76699888
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	55,65068493	28,51069157
ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	-82,49542962	20,67530356
ΜΟΙΡΕΣ	-37,65654495	9,437619776
ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	33,28494143	17,0523813
ΜΑΡΩΝΙΑ	-174,2458867	43,67013564
ΣΗΤΕΙΑ	-291,0539431	72,94499409
ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	9,926498209	2,487814958
ΣΤΑΛΙΔΑ	110,9589041	56,84593273
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	55,65068493	28,51069157
TOTAL	150	

Στον Πίνακα 37 παρουσιάζονται τα Συγκεντρωτικά αποτελέσματα του Σεναρίου 3, τόσο για τη DC προσομοίωση, όσο και για την AC. Σε αυτήν την περίπτωση, φαίνεται να επηρεάζεται το κόστος επέκτασης του δικτύου από τη χρήση των 45 μεταβλητών, καθώς αυξάνεται έστω και οριακά.

Πίνακας 37: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Σεναρίου 3

NVARS	Slack bus	Κόστος (κ€) (DC)	x	Κόστος (κ€) (AC)	Παράμετροι Γ.Α. *	x
21	3					
	6	9.904,9	X13			
	15					
24	3			15.136	pmutation=0.08	X15
	6	14.828,6	X14	13.339,3	pmutation=0.08	X16
	15			16.418,6	pmutation=0.08	X17
45	3			14.902,5		X15a
	6			17.559,3		X16a
	15			18.844,3		X17a

*(popsize=50,maxgens=100, PXOVER=0.8,PMUTATION=0.15,q=2)

Πίνακας 38: Αναλυτική προσθήκη Γ.Μ. Σεναρίου 3

A/A	Ζυγός Αναχώρησης	σ	X13	X14	X15	X15a	X16	X16a	X17	X17a
a1	ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	0	0	0	1	0	0	0	0
2	ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	0	1	0	1	0	1	0	1
3	ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	0	0	0	0	0	0	0	1
4	ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	0	1	0	0	0	0	0	0
5	ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0	0	0	0	0	0	0
6	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	0	0	0	0	0	0	0	0
7	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	0	1	1	0	1	0	1	0
8	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	ΜΟΙΡΕΣ	1	1	1	1	1	1	1	1
9	ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	1	1	1	0	1	1	1	1
10	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	0	1	1	0	2	0	2	0
11	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Α)	0	1	0	0	0	1	0	1
12	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Β)	0	0	0	1	0	1	0	1
13	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	0	0	0	1	0	0	0	0
14	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	1	0	1	1	1	0	1	0
15	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΣΤΑΛΙΔΑ	1	0	1	1	1	1	2	1
16	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	1	1	1	0	1	0	1	0
17	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1	1	1	1	1	1	1
18	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑ	0	1	1	1	1	1	1	1
19	ΜΑΡΩΝΙΑ	ΣΗΤΕΙΑ	1	0	0	1	0	1	0	1
20	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	0	1	1	0	1	1	2	2
21	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	0	1	0	0	0	1	1	1
22	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ		1	1	0	0	0	0	1
23	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ		0	0	0	0	0	0	0
24	ΜΟΙΡΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ		0	0	0	0	0	0	0
25	ΚΑΝΔΑΝΟΣ	ΑΓΥΙΑ				0		0		0
26	ΕΛΟΣ	ΚΑΣΤΕΛΙ				0		0		0

27	ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	ΜΟΙΡΕΣ				0		0		0
28	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ				0		0		0
29	ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ				0		1		1
30	ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ				1		0		0
31	ΚΑΒΟΥΣΙ	ΜΑΡΩΝΙΑ				0		0		0
32	ΖΑΚΡΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ				0		0		0
33	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2				0		0		0
34	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ				0		0		0
35	ΖΑΚΡΟΣ	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.				0		0		0
36	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ				0		0		0
37	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ				0		0		0
38	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ				0		0		0
39	ΒΡΥΣΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ				0		0		0
40	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΚΡΙΤΣΑ				0		1		1
41	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΔΑΣΟΣ ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ				0		1		1
42	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΜΥΡΘΙΟΣ				1		1		1
43	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ				1		0		1
44	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΜΟΙΡΕΣ				0		0		0
45	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ				0		0		0

Σε αυτήν την περίπτωση οι Γ.Μ. που προστίθενται σε όλες σχεδόν τις περιπτώσεις είναι οι :

- Μοίρες – Πραιτώρια,
- Πραιτώρια – Ιεράπετρα,
- Άγιος Νικόλαος – Ιεράπετρα,
- Αθερινόλακκος – Ιεράπετρα,
- Ιεράπετρα – Μαρωνία,
- Σταλίδα - Άγιος Νικόλαος,
- Λινοπεράματα – Αγία Βαρβάρα.

Ενώ τα νέα κυκλώματα τα οποία καταγράφονται λόγω της μεγαλύτερης -συγκριτικά με αυτήν των 800MW- διείσδυσης είναι:

- Λινοπεράματα – Ηράκλειο ΙΙ,
- Ηράκλειο ΙΙ – Σταλίδα,
- Ιεράπετρα – Μαρωνία,
- Σταλίδα - Άγιος Νικόλαος,
- Λινοπεράματα - Αγία Βαρβάρα,
- Αγία Βαρβάρα – Μοίρες,
- Ρέθυμνο – Μυρθιός.

5.2.4 Σενάριο 4

Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται μόνο η AC ροή φορτίου. Οι Γ.Μ. οι οποίες προστίθενται αρχικά είναι δεκαοχτώ (18) και είναι οι Γ.Μ. με αύξοντα αριθμό 25-42 στον Πίνακα 27, ενώ τελικά συγκρίνονται με την προσθήκη 45 γραμμών. Όπως παρατηρείται κάποιες γραμμές συνδέουν ήδη υπάρχοντες όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις, αλλά οι περισσότερες συνδέουν νέους Υ/Σ, ενώ τα χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 39. Το νέο σύστημα μεταφοράς απεικονίζεται στο χάρτη της Εικόνας 31, στον οποίο οι 14 νέες Γ.Μ. παρουσιάζονται με μαύρο χρώμα.



Εικόνα 31: Το ΣΜΗΕ Κρήτης με 38 Γ.Μ.

Ενώ ο χάρτης της Εικόνας 32 απεικονίζει το σύστημα με 42 συνολικά (δηλαδή 18 νέες) Γ.Μ., όπου οι προστιθέμενες γραμμές έχουν γαλάζιο χρώμα.



Εικόνα 32: Το ΣΜΗΕ Κρήτης με 42 Γ.Μ.

Είναι φανερό ότι η αιολική διείσδυση είναι σχεδόν διπλάσια της ενεργειακής ανάγκης της Κρήτης, επομένως η μόνος τρόπος εκμετάλλευσης της περίσσειας ενέργειας είναι η διασύνδεση της, μέσω των ζυγών αναφοράς ή η ταυτόχρονη κατασκευή μεγάλων αποθηκευτικών διατάξεων, όπως αυτές περιγράφηκαν νωρίτερα.

Κατανάλωση: 1150MW

Αιολική διείσδυση: **2000 MW**

Αρχικός αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 38-42

Τελικός αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 45

Πίνακας 39: Φορτίο (MW)/ Υ/Σ Σεναρίου 4

LOAD (MW)/Υ-Σ	P _d	Q _d
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	30,84486841	7,730452714
ΧΑΝΙΑ	163,3561644	83,6898454
ΒΡΥΣΕΣ	21,23287671	10,8779254
ΑΓΥΙΑ	31,9067305	7,996580438
ΡΕΘΥΜΝΟ	134,5131628	33,71217638
ΗΡΑΚΛΕΙΟ III	62,49376728	15,66241446
ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	165,2801111	84,67551256
ΗΡΑΚΛΕΙΟ I	71,76636405	36,76699888
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	55,65068493	28,51069157
ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	-11,82835775	2,96446589
ΜΟΙΡΕΣ	47,49629788	11,90369432
ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	33,28494143	17,0523813
ΜΑΡΩΝΙΑ	-24,98371963	6,261510362
ΣΗΤΕΙΑ	-9,168670236	2,297885365
ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	68,16321256	17,08331138
ΣΤΑΛΙΔΑ	110,9589041	56,84593273
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	55,65068493	28,51069157
ΚΑΝΔΑΝΟΣ	-202,5729136	50,76955779
ΕΛΟΣ	-178,9817291	44,85704964
ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	-158,9947534	39,84784136
ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	-317,1703685	79,49038729
ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	-188,3608632	47,20768222
ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	-118,037836	29,58307027
ΚΑΒΟΥΣΙ	-176,2785726	44,17957475
ΖΑΚΡΟΣ	-322,1671124	80,74268936
ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ 2	-194,0538747	48,6344854
Total	-850	

Όταν χρησιμοποιείται ο σταθμός των Χανίων ως slack, το σύστημα παραβιάζει συνεχώς τους περιορισμούς. Ο μόνος τρόπος να μείνει εντός ορίων είναι η προσθήκη όλων σχεδόν των διαθέσιμων γραμμών, με αποτέλεσμα την αύξηση του αριθμού των μεταβλητών σε 42 (NVAR=42). Πολύ σημαντική επίδραση στο κόστος φαίνεται να έχει η περίπτωση «μηδενισμού» της παραγωγής ενός από τους δύο (2) ζυγούς παραγωγής, όπως για παράδειγμα αν μηδενιστεί η παραγωγή του Αθερινόλακκου, όταν είναι ζυγός αναφοράς τα Λινοπεράματα. Μηδενίζοντας την

παραγωγή των Χανίων παρατηρείται ότι το κόστος επέκτασης δε μειώνεται με τον ίδιο ρυθμό, παρόλο που η μείωση είναι αρκετά σημαντική. Ενώ στη συνέχεια μελετώνται τα σενάρια, κατά τα οποία οι ΣΠΗΕ των Χανίων και των Λινοπεραμάτων, «μηδενίζουν» την παραγωγή τους.

Στον Πίνακα 40 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του Σεναρίου 4, για την AC προσομοίωση του συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, φαίνεται να επηρεάζεται το κόστος επέκτασης του δικτύου από την διαφοροποίηση της παραγωγής σε κάθε ΣΠΗΕ, καθώς αυτή επιβάλλει ή όχι την κατασκευή νέων κυκλωμάτων.

Πίνακας 40: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Σεναρίου 4

NVARS	Slack bus	Κόστος (κ€) (AC)	Υπόλοιπα ΣΠΗΕ	Παράμετροι Γ.Α. *	X
38/45	6	92.117/ 83.918	Χανιά=330MW Αθερινόλακκος=170MW	Maxgens=200, popsize=100/q=4	X21/X21a
	6	69.422,6/ 65.055,4	Χανιά=330MW Αθερινόλακκος=0MW	q=4 (nvars=45)	X22/X22a
	6	72.300,8/ 66.258,5	Χανιά=0MW Αθερινόλακκος=170MW	q=4 (nvars=45)	X23/X23a
42/45	3	111.360,8/ 102.570,8	Λινοπεράματα=240MW Αθερινόλακκος=170MW	Maxgens=150, Pmutation=0.1	X18/X18a
	3	103.976,5/ 105.038,3	Λινοπεράματα=0MW Αθερινόλακκος=170MW	q=4, Pmutation=0.08	X20/X20a
	3	77.486,5/ 69.143,4	Λινοπεράματα=240MW Αθερινόλακκος=0MW	q=3, Pmutation=0.08	X19/X19a
42/45	15	51.486,8/ 45.822,8	Χανιά=330MW Λινοπεράματα=240MW	Pmutation=0.08	X24/X24a
	15	27.978,5/ 25.271,7	Χανιά=0MW Λινοπεράματα=240MW	q=3/q=4, Pmutation=0.08	X25/X25a
	15	27.877,1/ 36.275,2	Χανιά=330MW Λινοπεράματα=0MW	q=4, Pmutation=0.08	X26/X26a

*(popsize=50, maxgens=100, PXOVER=0.8, PMUTATION=0.15, q=2)

Το σημαντικότερο αποτέλεσμα –εκτός του κόστους- της προσομοίωσης του Σεναρίου 4 είναι η σημασία επιλογής του ζυγού αναφοράς και κατ' επέκταση του σημείου διασύνδεσης της Κρήτης με άλλα ΣΜΗΕ. Η περίπτωση των Χανίων αποδεικνύεται η πιο «δύσκολη» και ταυτόχρονα η πιο ακριβή. Καταγράφηκε το γεγονός της λειτουργίας των συμβατικών ΣΠΗΕ (με περίπου μισή ισχύ από τη ζητούμενη κατανάλωση) παράλληλα με την αιολική διείσδυση, το οποίο αυξάνει το κόστος της επέκτασης του συστήματος. Αντίθετα, αν περιοριστεί η λειτουργία αυτών των σταθμών, το κόστος μειώνεται σημαντικά, όπως παρουσιάζεται στις περιπτώσεις όπου μηδενίζεται η παραγωγή ενός ΣΠΗΕ κάθε φορά (Πίνακας 40).

Πίνακας 41: Αναλυτική προσθήκη Γ.Μ. Σεναρίου 4

A/A	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	X18	X18a	X19	X19a	X20	X20a	X21	X21a	X22	X22a
1	ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2
3	ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1
4	ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡ.	2	2	2	1	2	1	2	1	1	1

5	ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	2	2	2	2	2	2	0	0	1	0
6	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡ.	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
7	ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΑΓ. ΒΑΡ.	1	0	0	1	0	1	1	2	1	2
8	ΑΓ. ΒΑΡ.	ΜΟΙΡΕΣ	1	0	1	1	1	2	2	2	2	2
9	ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	2	1	1	0	1	1	1	0	1	0
10	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2	1	1	0	2	2	1	0	0	0
11	ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚ.Ι(Α)	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
12	ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚ.Ι(Β)	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0
13	ΗΡΑΚ. ΙΙΙ	ΗΡΑΚ. ΙΙ	2	0	1	1	0	0	1	1	0	1
14	ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚ.ΙΙ	1	1	1	2	2	1	1	0	1	0
15	ΗΡΑΚ. ΙΙ	ΣΤΑΛΙΔΑ	1	0	1	2	0	1	1	1	0	1
16	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚ.	0	0	0	1	0	2	1	0	0	0
17	ΑΓ.ΝΙΚΟΛ.	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
18	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑ	2	2	1	2	2	2	1	1	1	1
19	ΜΑΡΩΝΙΑ	ΣΗΤΕΙΑ	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1
20	ΑΘΕΡΙΝ.	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1	2	1	2	1	1	1	1	1
21	ΑΘΕΡΙΝ.	ΣΗΤΕΙΑ	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
22	ΑΓ.ΒΑΡ.	ΗΡΑΚ. ΙΙ	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
23	ΑΓ.ΒΑΡ.	ΡΕΘΥΜΝΟ	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0
24	ΜΟΙΡΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	2	2	1	1	2	1	1	0	1	0
25	ΚΑΝΔΑΝΟΣ	ΑΓΥΙΑ	1	1	1	1	1	1	2	1	1	1
26	ΕΛΟΣ	ΚΑΣΤΕΛΙ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	ΜΟΙΡΕΣ	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
28	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΛΙΝΟΠΕΡ.	2	1	1	0	2	2	2	2	2	2
29	ΧΟΥΣΤ.	ΑΡΚΑΛΟΧ.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0
31	ΚΑΒΟΥΣΙ	ΜΑΡΩΝΙΑ	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
32	ΖΑΚΡΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	1	0	0	1	0	1	1	0	0	0
33	ΑΘΕΡΙΝ.	ΑΘΕΡΙΝ.2	1	1	0	0	0	0	1	0	0	0
34	ΑΘΕΡΙΝ.2	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2	1	0	0	1	1	1	0	1	0
35	ΖΑΚΡΟΣ	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1
36	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛ.	1	2	1	0	2	1	1	0	1	0
37	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΑΡΚΑΛΟΧ.	1	2	0	1	1	1	2	1	1	1
38	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΡΚΑΛΟΧ.	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0
39	ΒΡΥΣΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0	0	0	0	1		0	0	0
40	ΑΓ.ΝΙΚΟΛ.	ΚΡΙΤΣΑ	1	0	1	0	0	0		1	1	1
41	ΑΓ.ΝΙΚΟΛ.	Δ.ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ	0	0	0	0	0	0		0	0	0
42	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΜΥΡΘΙΟΣ	0	0	1	0	0	0		0	1	0
43	ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚ. ΙΙ		0		0		0		1	0	1
44	ΑΡΚΑΛΟΧ.	ΜΟΙΡΕΣ		0		0		0		0	1	0
45	ΑΡΚΑΛΟΧ.	ΑΓ.ΒΑΡ.		1		1		1		0	0	0

Πίνακας 42: Αναλυτική προσθήκη Γ.Μ. Σεναρίου 4

A/A	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	X23	X23a	X24	X24a	X25	X25a	X26	X26a
1	ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	1	1	1	1	1	0	1	1
2	ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	2	2	2	2	2	2	2	1
3	ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	1	0	1	1	0	0	1	1
4	ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡ.	1	0	0	0	0	0	0	0
5	ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0	0	1	0	0	0	0
6	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡ.	0	0	0	0	0	0	0	0
7	ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΑΓ. ΒΑΡ.	1	2	0	0	0	0	0	0
8	ΑΓ. ΒΑΡ.	ΜΟΙΡΕΣ	2	2	1	1	1	0	1	0
9	ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	1	0	1	2	1	1	1	1
10	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	0	1	1	0	0	0	1
11	ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚ.Ι(Α)	1	0	1	1	0	0	0	0
12	ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚ.Ι(Β)	1	0	1	0	0	0	0	0
13	ΗΡΑΚ. ΙΙΙ	ΗΡΑΚ. ΙΙ	1	0	0	0	0	0	1	0
14	ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚ.ΙΙ	1	1	1	0	1	0	0	0
15	ΗΡΑΚ. ΙΙ	ΣΤΑΛΙΔΑ	1	0	1	0	0	0	0	0
16	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚ.	0	0	0	0	0	0	0	0
17	ΑΓ.ΝΙΚΟΛ.	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2	2	1	0	0	0	0	0
18	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑ	1	2	0	0	0	0	0	0
19	ΜΑΡΩΝΙΑ	ΣΗΤΕΙΑ	0	1	1	1	1	1	1	1
20	ΑΘΕΡΙΝ.	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	0	1	2	0	0	0	0
21	ΑΘΕΡΙΝ.	ΣΗΤΕΙΑ	1	1	1	1	1	1	1	1
22	ΑΓ.ΒΑΡ.	ΗΡΑΚ. ΙΙ	1	0	1	0	0	1	1	0
23	ΑΓ.ΒΑΡ.	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0	0	0	0	0	0	0
24	ΜΟΙΡΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	1	0	0	0	0	0	0	0
25	ΚΑΝΔΑΝΟΣ	ΑΓΥΙΑ	1	1	1	1	1	1	1	2
26	ΕΛΟΣ	ΚΑΣΤΕΛΙ	1	1	1	1	1	2	1	1
27	ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	ΜΟΙΡΕΣ	0	1	1	1	1	1	1	1
28	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΛΙΝΟΠΕΡ.	2	2	1	0	0	0	0	0
29	ΧΟΥΣΤ.	ΑΡΚΑΛΟΧ.	1	1	1	1	1	1	1	1
30	ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	0	1	1	0	1	0	0
31	ΚΑΒΟΥΣΙ	ΜΑΡΩΝΙΑ	1	1	1	1	1	0	1	1
32	ΖΑΚΡΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	0	0	0	0	0	1	0	1
33	ΑΘΕΡΙΝ.	ΑΘΕΡΙΝ.2	1	0	1	1	1	0	1	1
34	ΑΘΕΡΙΝ.2	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1	0	0	0	1	0	0
35	ΖΑΚΡΟΣ	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	1	0	1	1	1	0	1	1
36	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛ.	1	1	0	0	0	1	0	0
37	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΑΡΚΑΛΟΧ.	1	2	1	1	0	0	0	0
38	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΡΚΑΛΟΧ.	1	0	0	0	0	0	1	0
39	ΒΡΥΣΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	1	0	0	0	0	0	0	0
40	ΑΓ.ΝΙΚΟΛ.	ΚΡΙΤΣΑ	1	0	1	0	0	0	1	0
41	ΑΓ.ΝΙΚΟΛ.	Δ.ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ	1	0	1	0	0	1	0	0

42	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΜΥΡΘΙΟΣ	1	0	1	1	0	0	1	1
43	ΛΙΝΟΠΕΡ.	ΗΡΑΚ. ΙΙ		0		1		1		0
44	ΑΡΚΑΛΟΧ.	ΜΟΙΡΕΣ		0		0		0		0
45	ΑΡΚΑΛΟΧ.	ΑΓ.ΒΑΡ.		0		0		0		0

Σύμφωνα με τον Πίνακα 41, κατά την προσομοίωση του Σεναρίου 4 χρησιμοποιούνται οι περισσότερες Γ.Μ. του συστήματος με 38-42 κυκλώματα, ενώ ελάχιστες είναι αυτές που δεν προστίθενται συχνά. Παρόλα αυτά, δεν είναι δυνατόν να αφαιρεθούν αυτές οι γραμμές (όπως π.χ. οι Ζάκρος – Σητεία, Βρύσες – Ρέθυμνο, Σταλίδα – Άγιος Νικόλαος κ.α.), καθώς η ισχύς που μεταφέρουν είναι καθοριστική για το ΣΜΗΕ.

Το σημαντικό στοιχείο το οποίο καταγράφεται, σύμφωνα με τον Πίνακα 40 είναι ότι η χρήση του αλγορίθμου με το μέγιστο αριθμό μεταβλητών (45) δίνει βελτιωμένα αποτελέσματα, μικρότερο κόστος επέκτασης, στις περισσότερες περιπτώσεις, συγκριτικά με τη χρήση λιγότερων μεταβλητών.

5.2.5 Σενάριο 5

Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται μόνο η AC ροή φορτίου. Οι Γ.Μ. οι οποίες προστίθενται εξ' αρχής είναι εικοσιπένσσερις (24) και είναι οι Γ.Μ. με αύξοντα αριθμό 22-45 στον Πίνακα 27. Όπως παρατηρείται οι γραμμές αυτές συνδέουν ήδη υπάρχοντες όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις, αλλά οι περισσότερες συνδέουν νέους Υ/Σ. Οι 3 (τρεις) Γ.Μ. που χρησιμοποιούνται και στο Σενάριο 5 απεικονίζονται στο χάρτη της Εικόνας 33 με μωβ χρώμα.



Εικόνα 33: Το ΣΜΗΕ Κρήτης με 45 Γ.Μ.

Τα χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 42. Είναι φανερό ότι η αιολική διείσδυση είναι υπερδιπλάσια της ενεργειακής ανάγκης της Κρήτης, επομένως η μόνος τρόπος εκμετάλλευσης της περίσσειας ενέργειας είναι η διασύνδεση της, μέσω των ζυγών αναφοράς ή η ταυτόχρονη κατασκευή μεγάλων αποθηκευτικών ή υβριδικών διατάξεων, όπως αυτές που περιγράφηκαν νωρίτερα.

Κατανάλωση: 1150MW

Αιολική διείσδυση: **2500 MW**

Αρχικός αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 42-45

Τελικός αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 45

Πίνακας 43: Φορτίο (MW)/ Υ/Σ Σεναρίου 5

LOAD (MW)/Υ-Σ	P _d (MW)	Q _d
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	30,97336961	7,76265815
ΧΑΝΙΑ	163,3561644	83,6898454
ΒΡΥΣΕΣ	21,23287671	10,8779254
ΑΓΥΙΑ	31,99540864	8,018805276
ΡΕΘΥΜΝΟ	134,5722816	33,72699294
ΗΡΑΚΛΕΙΟ III	62,57218176	15,68206698
ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	165,2801111	84,67551256
ΗΡΑΚΛΕΙΟ I	71,76636405	36,76699888
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	55,65068493	28,51069157
ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	-11,70979179	2,934750458
ΜΟΙΡΕΣ	47,63916822	11,939501
ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	33,28494143	17,0523813
ΜΑΡΩΝΙΑ	-24,73328598	6,198745773
ΣΗΤΕΙΑ	-8,69572013	2,179352895
ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	68,26092274	17,10779986
ΣΤΑΛΙΔΑ	110,9589041	56,84593273
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	55,65068493	28,51069157
ΚΑΝΔΑΝΟΣ	-200,5423483	50,26065016
ΕΛΟΣ	-177,1876389	44,40740824
ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	-157,4010101	39,44841163
ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	-313,9910928	78,69358569
ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	-186,4727577	46,73447838
ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	-116,8546396	29,28653331
ΚΑΒΟΥΣΙ	-174,5115784	43,73672428
ΖΑΚΡΟΣ	-318,93775	79,93333484
ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ 2	-192,1087032	48,14697947
ΚΡΙΤΣΑ	-117,989938	29,5710659
ΔΑΣΟΣ ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ	-201,6776466	50,54518275
ΜΥΡΘΙΟΣ	-200,3801628	50,22000264
Total	-1350	

Στον Πίνακα 44 παρουσιάζονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα του Σεναρίου 5, για την AC προσομοίωση του συστήματος. Σε αυτήν την περίπτωση, φαίνεται να επηρεάζεται το κόστος επέκτασης του δικτύου από την διαφοροποίηση της παραγωγής σε κάθε ΣΠΗΕ, καθώς αυτή επιβάλλει ή όχι την κατασκευή νέων κυκλωμάτων. Σε κάποιες περιπτώσεις μάλιστα, εξαιτίας της «υπερφόρτωσης» του συστήματος δε βρίσκεται λύση από τον Γ.Α.

Πίνακας 44: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα Σεναρίου 5

NVARS	Slack bus	Κόστος (κ€) (AC)	Υπόλοιπα ΣΠΗΕ	Παράμετροι Γ.Α. *	x
42/45	6	Δε βρίσκεται λύση	Χανιά=330MW Αθερινόλακκος=170MW		
45	6	162.354	Χανιά=200MW Αθερινόλακκος=150MW	q=2, Pmutation=0.08	X27
45	6	101.970,7	Χανιά=330MW Αθερινόλακκος=0MW	Pmutation=0.08/q=4	X28
45	6	99.594,4	Χανιά=0MW Αθερινόλακκος=170MW	Pmutation=0.08	X29
42/45	3	Δε βρίσκεται λύση	Λινοπεράματα=240MW Αθερινόλακκος=170MW		
45	3	115.304,6	Λινοπεράματα=200MW Αθερινόλακκος=170MW		X33
45	3	136.948	Λινοπεράματα=0MW Αθερινόλακκος=170MW	q=4, Pmutation=0.08	X34
42/45	15	Όχι λύση /135.334,8	Χανιά=330MW Λινοπεράματα=240MW	Pmutation=0.08/q=4	X30
42/45	15	73.476,6/ 53.844,4	Χανιά=0MW Λινοπεράματα=240MW	Pmutation=0.1, q=4	X31/X31a
42/45	15	76.914,6/ 56.494,4	Χανιά=330MW Λινοπεράματα=0MW	Pmutation=0.08/q=4	X32/X32a

Η περίπτωση κατά την οποία τα Χανιά έχουν το ρόλο του ζυγού αναφοράς είναι η πιο «δύσκολη» αναφορικά με την τήρηση των περιορισμών που έχουν τεθεί. Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 43 η αύξηση των υποψήφιων γραμμών μεταφοράς, λύνει το αντίστοιχο πρόβλημα των Λινοπεραμάτων –ως ζυγός αναφοράς- αλλά το σενάριο των Χανιών δεν αντιμετωπίζεται. Χαρακτηριστική είναι η υπέρβαση του θερμικού ορίου των γραμμών Χανιά- Βρύσες, Χανιά- Ρέθυμνο και Βρύσες- Ρέθυμνο, των οποίων η ροή ισχύος ξεπερνά κατά 25-100% το θερμικό όριο. Η συγκέντρωση ισχύος στην περιοχή αυτή απαιτεί την προσθήκη αρκετών παραπάνω Γ.Μ., οι οποίες είναι δύσκολο να κατασκευαστούν στο νομό Χανίων, κυρίως λόγω του ορεινού όγκου των Λευκών Ορέων, ο οποίος είναι ταυτόχρονα προστατευόμενη περιοχή. Η μόνη λύση είναι η χαλάρωση του περιορισμού του θερμικού ορίου των Γ.Μ. και η αύξηση του από 168,9 MW σε 202MW, που είναι το όριο φόρτισης υπό κανονικές συνθήκες. Επίσης, μια άλλη λύση είναι η χαλάρωση του περιορισμού του αριθμού των γραμμών που προστίθενται, η οποία όμως αυξάνει το κόστος επέκτασης του δικτύου κατακόρυφα, ενώ η χρήση παραπάνω των 2 (δύο) γραμμών δε θεωρείται λογική επέκταση ενός δικτύου. Οι 1 (μία) ή οι 2 (δύο) Γ.Μ. μπορούν να προστεθούν σαν ένα κύκλωμα, ενώ οι περισσότερες από 2 απαιτούν την κατασκευή νέων εξ' ολοκλήρου κυκλωμάτων. Οι μόνες περιπτώσεις κατά τις οποίες βρίσκεται λύση είναι όταν μηδενίζεται η παραγωγή ενός εκ των δύο άλλων ΣΠΗΕ ή όταν και των δύο ταυτόχρονα.

Πίνακας 45: Αναλυτική προσθήκη Γ.Μ. Σεναρίου 5

Α/Α	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	X27	X28	X29	X30	X31	X31a
1	ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	1	1	0	1	0	1
2	ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	2	2	2	2	2	2
3	ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	2	1	1	1	1	0
4	ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	2	1	2	0	1	0
5	ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	2	1	0	1	1	0
6	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	2	2	2	1	0	0
7	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	2	2	2	1	1	1
8	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	ΜΟΙΡΕΣ	2	2	2	1	1	1
9	ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	1	0	0	2	2	1
10	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2	0	1	2	1	1
11	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Α)	1	0	1	1	1	0
12	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Β)	2	1	0	1	0	0
13	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	2	1	0	2	1	0
14	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	2	2	2	2	1	1
15	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΣΤΑΛΙΔΑ	2	1	1	0	0	0
16	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	2	1	0	1	1	0
17	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2	2	2	2	1	1
18	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑ	1	1	1	2	0	0
19	ΜΑΡΩΝΙΑ	ΣΗΤΕΙΑ	1	0	1	2	1	1
20	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2	0	1	2	2	2
21	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	1	1	1	2	1	1
22	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	2	1	0	2	0	1
23	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	1	1	1	1	1	0
24	ΜΟΙΡΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	2	1	2	2	0	0
25	ΚΑΝΔΑΝΟΣ	ΑΓΥΙΑ	1	1	1	2	1	1
26	ΕΛΟΣ	ΚΑΣΤΕΛΙ	1	1	1	2	1	1
27	ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	ΜΟΙΡΕΣ	1	1	1	2	1	1
28	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	2	2	2	1	0	0
29	ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	1	1	1	1	1	1
30	ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	0	0	1	1	0
31	ΚΑΒΟΥΣΙ	ΜΑΡΩΝΙΑ	1	1	1	1	1	1
32	ΖΑΚΡΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	0	1	1	2	1	0
33	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2	1	0	1	2	2	2
34	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2	1	0	1	1	1
35	ΖΑΚΡΟΣ	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	2	1	0	2	1	1
36	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	2	2	2	1	1	0
37	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	2	1	1	2	1	1
38	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	1	1	0	1	0	0
39	ΒΡΥΣΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	1	0	0	1	1	0
40	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΚΡΙΤΣΑ	1	1	0	1	1	0

41	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΔΑΣΟΣ ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ	2	1	1	1	1	1
42	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΜΥΡΘΙΟΣ	1	1	1	1	1	1
43	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	1	0	0	0		1
44	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΜΟΙΡΕΣ	2	0	0	0		0
45	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	1	0	0	0		0

Πίνακας 46: Αναλυτική προσθήκη Γ.Μ. Σεναρίου 5

Α/Α	Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Αφίξης	Χ32	Χ32a	Χ33	Χ34
1	ΑΓΥΙΑ	ΚΑΣΤΕΛΛΙ	1	0	1	1
2	ΧΑΝΙΑ	ΑΓΥΙΑ	2	2	1	2
3	ΒΡΥΣΕΣ	ΧΑΝΙΑ	0	1	1	1
4	ΒΡΥΣΕΣ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	0	0	1	2
5	ΧΑΝΙΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	2	0	1	1
6	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	1	1	1	2
7	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	1	0	2	2
8	ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	ΜΟΙΡΕΣ	1	1	1	1
9	ΜΟΙΡΕΣ	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	2	2	1	1
10	ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	2	2	1	2
11	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Α)	1	1	0	1
12	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ Ι(Β)	1	0	1	2
13	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙΙ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	0	1	1	1
14	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	0	0	2	2
15	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	ΣΤΑΛΙΔΑ	1	1	1	2
16	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	0	0	1	1
17	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	1	2	2
18	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΜΑΡΩΝΙΑ	2	1	1	1
19	ΜΑΡΩΝΙΑ	ΣΗΤΕΙΑ	2	2	1	2
20	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	2	1	2
21	ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	2	2	0	1
22	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ ΙΙ	1	0	1	0
23	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ	ΡΕΘΥΜΝΟ	1	0	0	1
24	ΜΟΙΡΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0	1	2
25	ΚΑΝΔΑΝΟΣ	ΑΓΥΙΑ	1	1	2	1
26	ΕΛΟΣ	ΚΑΣΤΕΛΙ	1	1	1	1
27	ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	ΜΟΙΡΕΣ	1	1	1	1
28	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	1	0	2	2
29	ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	1	1	1	0
30	ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	0	1	0
31	ΚΑΒΟΥΣΙ	ΜΑΡΩΝΙΑ	1	1	1	1
32	ΖΑΚΡΟΣ	ΣΗΤΕΙΑ	0	0	0	0
33	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2	2	1	1	2
34	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.2	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	1	0	1	1

35	ΖΑΚΡΟΣ	ΑΘΕΡΙΝΟΛ.	1	1	1	1
36	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	0	0	2	2
37	ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	1	1	1	2
38	ΣΤΑΛΙΔΑ	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	1	0	1	1
39	ΒΡΥΣΕΣ	ΡΕΘΥΜΝΟ	0	0	1	1
40	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΚΡΙΤΣΑ	1	1	1	1
41	ΑΓ.ΝΙΚΟΛΑΟΣ	ΔΑΣΟΣ ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ	1	1	1	1
42	ΡΕΘΥΜΝΟ	ΜΥΡΘΙΟΣ	1	1	1	1
43	ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	ΗΡΑΚΛΕΙΟ II		0	2	1
44	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΜΟΙΡΕΣ		0	1	1
45	ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	ΑΓ.ΒΑΡΒΑΡΑ		0	1	1

Το σημαντικό στοιχείο το οποίο καταγράφεται, σύμφωνα με τον Πίνακα 43 είναι ότι η χρήση του αλγορίθμου με το μέγιστο αριθμό μεταβλητών (45) δίνει καλύτερα αποτελέσματα και σε αυτήν την περίπτωση, υπολογίζεται μικρότερο κόστος επέκτασης, σε όλες τις περιπτώσεις, συγκριτικά με τη χρήση λιγότερων μεταβλητών.

5.2.6 Σενάριο 6

Σε αυτήν την περίπτωση μελετάται μόνο η AC ροή φορτίου. Οι Γ.Μ. οι οποίες προστίθενται εξ' αρχής είναι εικοσιτέσσερις (24) και είναι οι Γ.Μ. με αύξοντα αριθμό 22-45 στον Πίνακα 27. Η διαμόρφωση του δικτύου είναι ίδια με αυτή της Εικόνας 33. Όπως παρατηρείται οι γραμμές αυτές συνδέουν ήδη υπάρχοντες όπως στις προηγούμενες περιπτώσεις, αλλά οι περισσότερες συνδέουν νέους Υ/Σ, ενώ τα χαρακτηριστικά του συστήματος παρουσιάζονται στον Πίνακα 45. Είναι φανερό ότι η αιολική διείσδυση είναι σχεδόν τριπλάσια της ενεργειακής ανάγκης της Κρήτης, επομένως η μόνος τρόπος εκμετάλλευσης της περίσσειας ενέργειας είναι η διασύνδεση της, μέσω των ζυγών αναφοράς ή η ταυτόχρονη κατασκευή μεγάλων αποθηκευτικών διατάξεων, όπως αυτές περιγράφηκαν νωρίτερα.

Κατανάλωση: 1150MW

Αιολική διείσδυση: **3000 MW**

Αριθμός Γ.Μ. / μεταβλητών: 45

Πίνακας 47: Φορτίο (MW)/ Υ/Σ Σεναρίου 6

LOAD (MW)/Υ-Σ	P _d (MW)	Q _d
ΚΑΣΤΕΛΛΙ	28,43516682	7,126524568
ΧΑΝΙΑ	163,3561644	83,6898454
ΒΡΥΣΕΣ	21,23287671	10,8779254
ΑΓΥΙΑ	30,24380544	7,579812133
ΡΕΘΥΜΝΟ	133,4045461	33,43433085
ΗΡΑΚΛΕΙΟ III	61,0233104	15,29388322
ΗΡΑΚΛΕΙΟ II	165,2801111	84,67551256
ΗΡΑΚΛΕΙΟ I	71,76636405	36,76699888
ΛΙΝΟΠΕΡΑΜΑΤΑ	55,65068493	28,51069157
ΑΓ. ΒΑΡΒΑΡΑ	-14,05175014	3,521700549
ΜΟΙΡΕΣ	44,81714084	11,23223427
ΠΡΑΙΤΩΡΙΑ	33,28494143	17,0523813
ΜΑΡΩΝΙΑ	-29,67994317	7,438494928
ΣΗΤΕΙΑ	-18,03760388	4,520649659
ΑΓ. ΝΙΚΟΛΑΟΣ	66,3309155	16,62409445
ΣΤΑΛΙΔΑ	110,9589041	56,84593273
ΙΕΡΑΠΕΤΡΑ	55,65068493	28,51069157
ΚΑΝΔΑΝΟΣ	-240,6508179	60,31278019
ΕΛΟΣ	-212,6251666	53,28888989
ΚΡΥΑ ΒΡΥΣΗ	-188,8812121	47,33809395
ΑΡΚΑΛΟΧΩΡΙ	-376,7893113	94,43230282
ΧΟΥΣΤΟΥΛΙΑΝΑ	-223,7673092	56,08137405
ΞΗΡΟΚΑΜΠΟΣ	-140,2255676	35,14383997
ΚΑΒΟΥΣΙ	-209,4138941	52,48406913
ΖΑΚΡΟΣ	-382,7253	95,92000181

ΑΘΕΡΙΝΟΛΑΚΚΟΣ 2	-230,5304438	57,77637536
ΚΡΙΤΣΑ	-141,5879256	35,48527908
ΔΑΣΟΣ ΑΤΣΙΛΑΧΩΝ	-242,0131759	60,6542193
ΜΥΡΘΙΟΣ	-240,4561953	60,26400317
Total	-1850	

Η περίπτωση κατά την οποία τα Χανιά έχουν το ρόλο του ζυγού αναφοράς είναι η πιο «δύσκολη» αναφορικά με την τήρηση των περιορισμών που έχουν τεθεί, όπως αποδείχτηκε και στο Σενάριο 5. Για να ελεγχθεί αν το μοντελοποιημένο σύστημα «μπορεί» να διαχειριστεί την περίπτωση αυτή, εκτελέστηκε η προσομοίωση του, με ζυγό αναφοράς τα Χανιά, μηδενική παραγωγή από τα άλλα 2 (δύο) ΣΓΠΗΕ και την προσθήκη του μεγίστου των γραμμών σε κάθε κλάδο, δηλαδή 2. Οι ροές ισχύος που προέκυψαν, υπερβαίνουν τα όρια και παρουσιάζονται στον Πίνακα 46.

Πίνακας 48: Γ.Μ. με υπέρβαση ορίου φόρτισης

Ζυγός Αναχώρησης	Ζυγός Άφιξης	Ροή Ισχύος	Ζυγός αναφοράς	Περίσσεια ισχύος
Βρύσες	Χανιά	277,5 MW	Χανιά	1626,89
Χανιά	Ρέθυμνο	197,57 MW	Χανιά	1626,89
Αθερινόλακκος	Αθερινόλακκος 2	184,5	Αθερινόλακκος	1754,11
Αγ. Βαρβάρα	Μοίρες	133,41	Λινοπεράματα	1700,95
Λινοπεράματα	Αγ. Βαρβάρα	150,41	Λινοπεράματα	1700,95

Όπως παρατηρείται η υπέρβαση του θερμικού ορίου των γραμμών του Πίνακα 47 είναι σημαντική, ξεπερνά κατά 17-65% το όριο. Επομένως, το σύστημα των 45 κλάδων δεν μπορεί να διαχειριστεί την περίπτωση των Χανιών, ως ζυγός αναφοράς. Η συγκέντρωση ισχύος στην περιοχή αυτή απαιτεί την προσθήκη αρκετών παραπάνω Γ.Μ., οι οποίες όπως προαναφέρθηκε είναι δύσκολο να κατασκευαστούν στο νομό Χανίων. Η περίσσεια ισχύος είναι πολύ υψηλή αντίστοιχα. Δυστυχώς, η ίδια συμπεριφορά παρουσιάστηκε και στις περιπτώσεις όπου ο Αθερινόλακκος ή τα Λινοπεράματα «αναλαμβάνουν» το ρόλο του ζυγού αναφοράς.

Υπό αυτές τις συνθήκες, το σύστημα δεν μπορεί να εξεταστεί για αιολική διείσδυση της τάξης των 3000MW. Έγιναν δοκιμαστικές προσομοιώσεις με προσθήκη νέων γραμμών, όσο αυτό ήταν δυνατόν καθώς το πλήθος τους είναι σε σημαντικό βαθμό απαγορευτικό, με αντίστοιχα αρνητικά αποτελέσματα. Ένα σενάριο το οποίο θα μπορούσε να εξυπηρετήσει αυτήν την περίπτωση, αλλά θεωρείται αρκετά ουτοπικό και μάλλον ανέφικτο σύμφωνα με τα τωρινά δεδομένα, είναι η διασύνδεση της Κρήτης τόσο με το ηπειρωτικό σύστημα, όσο και με την Κύπρο ή γενικότερα, η διασύνδεση της Κρήτης από 2 (δύο) σημεία. Με αυτόν τον τρόπο, θα μπορούσε να διοχετευτεί το περίσσειμα ισχύος και ενέργειας προς δύο κατευθύνσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Όπως διαπιστώθηκε, από τη συλλογή δεδομένων και τη μελέτη των αποτελεσμάτων - στα πλαίσια της παρούσας διατριβής- σχετικά με την αιολική ισχύ, αλλά κυρίως αναφορικά με τη μελλοντική εξέλιξη της, η αυξημένη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στο νησί της Κρήτης μπορεί να χαρακτηριστεί τουλάχιστον ως υψηλή. Η μεγαλύτερη πρόκληση όμως, δεν είναι η εγκατάσταση των ΑΠΕ, παρόλο που αποδεδειγμένα επιφέρει αρκετά προβλήματα παράλληλα με τα μέγιστα πλεονεκτήματα της, αλλά η διαχείριση των τεχνικών ζητημάτων που αυτή προκαλεί.

Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα, η επέκταση του δικτύου μεταφοράς ενέργειας κάτω από συνθήκες υψηλής διείσδυσης ΑΠΕ, και συγκεκριμένα αιολικής αποτέλεσε το αντικείμενο της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, πολύ σημαντική είναι η άρτια και ολοκληρωμένη μοντελοποίηση του δικτύου. Η ακρίβεια των στοιχείων και των χαρακτηριστικών του, αποτελεί τη βάση της ανάπτυξης του μοντέλου και κατ' επέκταση την απαραίτητη προϋπόθεση που οδηγεί στη άρτια διαχείριση και σχεδίαση του. Όσον αφορά στη διαμόρφωση του μοντέλου του ΣΜΗΕ Κρήτης αντιμετωπίστηκαν κάποιες δυσκολίες, καθώς η εξακρίβωση ή η εύρεση ορισμένων δεδομένων αποδείχτηκε χρονοβόρα και σε κάποιες περιπτώσεις δύσκολη.

Όπως παρατηρείται από τα διαγράμματα, καθώς επίσης και από τα αποτελέσματα της ανάλυσης ροής φορτίου, που προκύπτουν από τον προτεινόμενο αλγόριθμο, το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία αναπαράγει με καλή ακρίβεια το σύστημα. Η επάρκεια του αποδεικνύεται από το γεγονός ότι παρέχονται λογικά αποτελέσματα τόσο σε επίπεδο τάσεων στους ζυγούς του συστήματος, όσο και σε επίπεδο ροής ισχύος στις Γ.Μ. Επομένως το μοντέλο κρίνεται κατάλληλο για την διεξαγωγή μελετών ανάλυσης ροών φορτίου του ΣΜΗΕ Κρήτης σε συνθήκες αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ. Θα πρέπει να τονιστεί ότι η προσέγγιση του μοντέλου έγινε με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς ήδη σε ορισμένες περιπτώσεις η πραγματικότητα είναι πολύ διαφορετική από τις προβλέψεις που τέθηκαν.

Το σύστημα εξετάστηκε υπό συνθήκες πολύ υψηλής αιολικής διείσδυσης, με ζητούμενη κατανάλωση την αιχμή -που προβλέπει η ΡΑΕ- του έτους 2040.

Ο βέλτιστος σχεδιασμός της επέκτασης του συστήματος μεταφοράς με διείσδυση ΑΠΕ στα δίκτυα γίνεται ακόμα πιο περίπλοκος, αν ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες και οι περιορισμοί που εισάγονται στα ΣΗΕ, οι οποίες αναφέρθηκαν αναλυτικά σε προηγούμενο κεφάλαιο. Η τήρηση των περιορισμών είναι αντικείμενο τόσο μαθηματικής ανάλυσης, όσο και τεχνικών βελτιστοποίησης, γεγονός το οποίο αυξάνει το βαθμό δυσκολίας του αντικειμένου καθώς οι επιλογές ανάμεσα στις τεχνικές επίλυσης είναι πολλές και η διαχείριση τους αποτελεί σοβαρή πρόκληση.

Η προτεινόμενη μέθοδος επίλυσης του προβλήματος είναι ένας γενετικός αλγόριθμός που υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Matlab. Το μοντέλο της επέκτασης του συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας υλοποιήθηκε με τη βοήθεια του Matpower, το οποίο

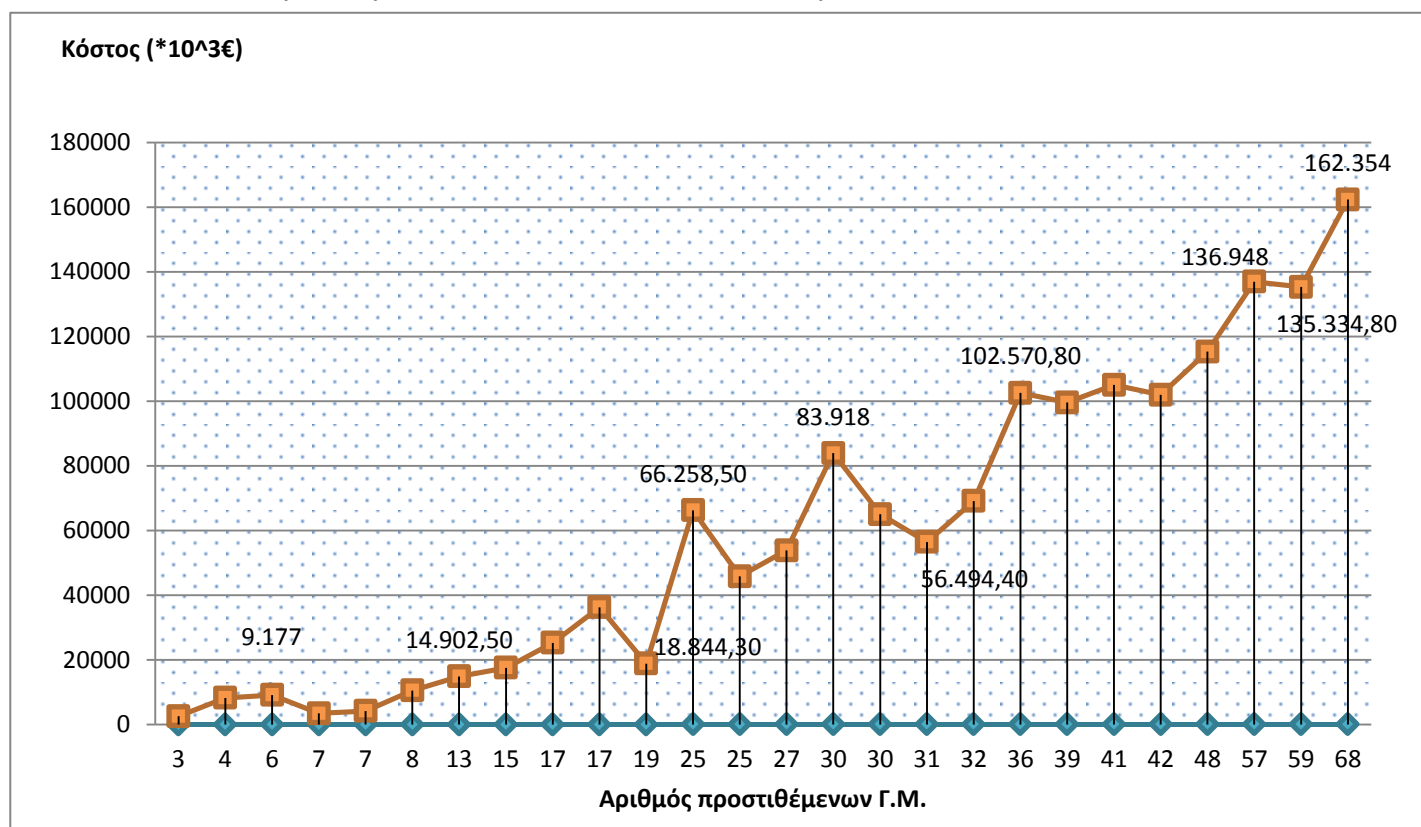
αποδείχτηκε αξιόπιστο και αποτελεσματικό σε τέτοιες περιπτώσεις, καθώς απαιτεί ακρίβεια, δίνει τη δυνατότητα χρήσης συναρτήσεων και εντολών που διευκολύνουν την ανάπτυξη και προσομοίωση του μοντέλου. Οι χρόνοι εκτέλεσης των αλγορίθμων κρίνονται ικανοποιητικοί, ειδικά λαμβάνοντας υπ' όψη την πολυπλοκότητα του συστήματος και την αύξηση της με την προσθήκη πολλών μεταβλητών. Η εισαγωγή των περιορισμών στα πλαίσια του Γ.Α. αποτέλεσε αντικείμενο εκτεταμένης μελέτης και δοκιμών.

Όπως διαπιστώθηκε -στο κεφάλαιο 5- η προσθήκη γραμμών μεταφοράς στο δίκτυο της Κρήτης αποτελεί σοβαρή πρόκληση για το σχεδιαστή του δικτύου, κυρίως λόγω των περιορισμών που αναγκαστικά επιβάλλονται. Το όριο της προσθήκης μέχρι 2 (δύο) Γ.Μ. ανά κλάδο. είναι λογικό και απαιτεί κατασκευή μόνο ενός κυκλώματος. Ο περιορισμός των απωλειών, ο οποίος τέθηκε στο 5% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας, είναι λίγο πιο ελαστικός σε σχέση με τον περιορισμό του 3-3,5% που υπάρχει στο εθνικό Διασυνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς. Η επιλογή των γραμμών οι οποίες ενισχύουν το σύστημα απαιτεί προσοχή και κυρίως μελέτη των ροών ισχύος σε όλες τις περιοχές τόσο σε μεμονωμένο επίπεδο, όσο και σε συνολικό. Η επανάληψη των προσομοιώσεων και της εκτέλεσης του Γ.Α. οδηγεί στη σωστή επιλογή τόσο των ίδιων των γραμμών, όσο και των περιορισμών. Ένας άλλος πολύ σημαντικός παράγοντας ο οποίος επηρεάζει την ενίσχυση του δικτύου των Γ.Μ. είναι η γεωγραφική διαμόρφωση της Κρήτης. Είναι γνωστό ότι το μέσο του νησιού αποτελείται από οροσειρές, οι οποίες εκτείνονται στο μεγαλύτερο μέρος του. Το γεγονός αυτό είναι φανερά αποτρεπτικό για την κατασκευή Γ.Μ. που θα συνδέουν ουσιαστικά το βόρειο με το νότιο τμήμα της Κρήτης, όσο και αν αυτό κρίνεται απαραίτητο για την επέκταση του ΣΜΗΕ. Το ίδιο ισχύει και για την εγκατάσταση Α/Π σε μέρη τα οποία έχουν μελετηθεί ως ιδανικά λόγω των ταχυτήτων του ανέμου που καταγράφονται σε σημεία, που ανήκουν είτε σε προστατευόμενες περιοχές (όπως τα Λευκά Όρη), είτε σε περιοχές πολύ δύσκολα προσεγγίσιμες. Επομένως, εκτός από τους τεχνικούς περιορισμούς, η εύρεση νέων Γ.Μ. δεσμεύεται και από τη γεωλογία - γεωγραφία της Κρήτης. Η δυσκολία αυτή παρατηρήθηκε στα Σενάρια πολύ υψηλής διείσδυσης (2500 και 3000MW), όπου η αδυναμία προσθήκης νέων Γ.Μ. οδήγησε στην αδυναμία του συστήματος να εξυπηρετήσει την αιολική παραγωγή.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης το γεγονός, ότι παραβλέποντας τον περιορισμό της αιολικής διείσδυσης (25%-40% της ισχύος των εν λειτουργία συμβατικών μονάδων), λόγω της προτεινόμενης διασύνδεσης, η αύξηση της στάθμης αιολικής παραγωγής μειώνει την αντίστοιχη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια των συμβατικών ΣΠΗΕ. Σαν αποτέλεσμα, προκαλείται αισθητή μείωση της ποσότητας καυσίμου και του κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, συμβάλλοντας ενεργά στην οικονομικότερη, φιλικότερη προς το περιβάλλον και ασφαλέστερη λειτουργία των ηλεκτρικών συστημάτων στα ελληνικά νησιά. Το γεγονός αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα ελληνικά νησιά, ιδιαίτερα τους χειμερινούς μήνες, όπου αρκετά από αυτά αντιμετωπίζουν προβλήματα τροφοδοσίας λόγω των άσχημων καιρικών συνθηκών που κυριαρχούν.

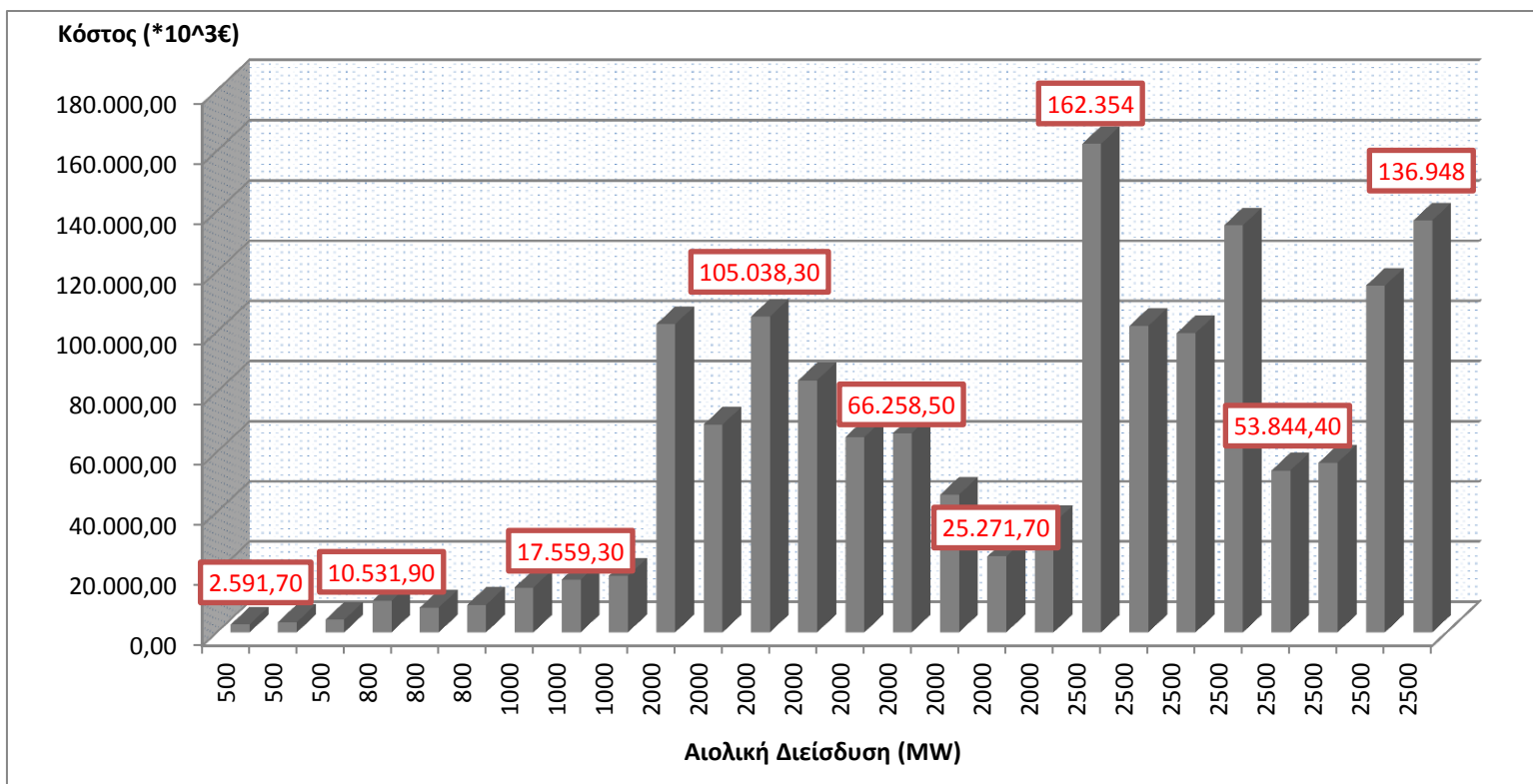
Λογικό αποτέλεσμα της μελέτης της παρούσας εργασίας είναι ότι με την αύξηση της αιολικής παραγωγής αυξάνεται και ο αριθμός των Γ.Μ. που τελικά χρησιμοποιούνται. Αν και υπάρχουν περιπτώσεις, όπως αυτή της διείσδυσης των 2000 MW, με ζυγό αναφοράς τον Αθρινόλακκο, όπου ενώ οι πιθανές γραμμές είναι 45, το σύνολο

αυτών που προστίθενται είναι μόλις 15. Το γράφημα της Εικόνας 34 αποδεικνύει την άμεση σχέση ανάμεσα στα δύο (2) αυτά μεγέθη.



Εικόνα 34: Διάγραμμα κόστους επέκτασης του ΣΜΗΕ Κρήτης συναρτήσει του αριθμού των προστιθέμενων Γ.Μ.

Αντίστοιχα, στο γράφημα της Εικόνας 35 παρουσιάζεται η σχέση ανάμεσα στο κόστος επέκτασης του συστήματος και το ύψος της αιολικής διεύθυνσης. Γενικά, η αύξηση της αιολικής παραγωγής προκαλεί αύξηση των υποψήφιων Γ.Μ. και κατ' επέκταση του κόστους κατασκευής τους. Ειδικότερα, στις περιπτώσεις που ο ζυγός αναφοράς είναι ο ΣΠΗΕ των Χανίων, το κόστος και ο αριθμός των προστιθέμενων κυκλωμάτων μεγεθύνονται κατακόρυφα. Αντίθετα, στην περίπτωση του Αθρινόλακκου και των Λινοπεραμάτων, ως ζυγών αναφοράς, το κόστος είναι το μικρότερο για τα περισσότερα Σενάρια (Πίνακας 47). Το παραπάνω αποτέλεσμα οφείλεται στο γεγονός ότι στο νομό Λασιθίου υπάρχουν ήδη και προτείνονται προς κατασκευή πολύ περισσότερες Γ.Μ., σε σχέση με το νομό Χανίων, ο οποίος αντιμετωπίζει τους γεωγραφικούς περιορισμούς που έχουν ήδη αναφερθεί. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, η ισχύς του κάθε νομού και του αντίστοιχου ΣΠΗΕ μοιράζεται διαφορετικά στις Γ.Μ. του, με συνέπεια την «εκτόνωση» κάποιων γραμμών και την υπερφόρτιση κάποιων άλλων.



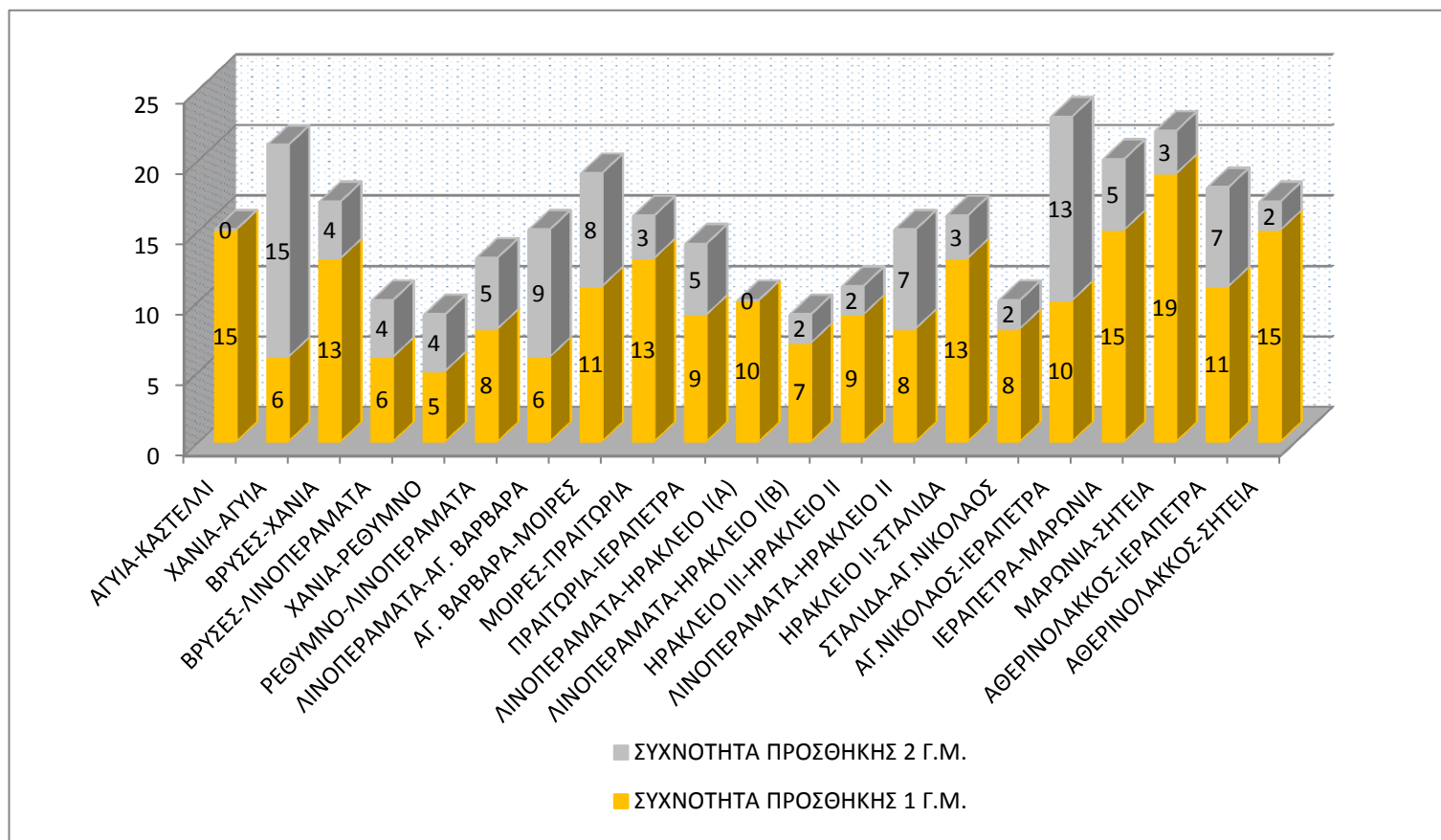
Εικόνα 35: Διάγραμμα του κόστους επέκτασης του ΣΜΗΕ Κρήτης συναρτήσει της αιολικής διείσδυσης

Συγκεκριμένα, οι πιο οικονομικές και οι πιο δαπανηρές περιπτώσεις για κάθε Σενάριο καταγράφονται στον Πίνακα 47. Όπως παρατηρείται, ανάλογα με το ύψος της αιολικής διείσδυσης προτείνεται διαφορετικό σημείο διασύνδεσης κάθε φορά. Γεγονός είναι ότι τα σενάρια της ΡΑΕ τα οποία προτείνουν διασύνδεση της Κρήτης – με το ηπειρωτικό σύστημα, είτε με την Πελοπόννησο, είτε με την Αττική- μελετούν ως πιθανά σημεία τα Χανιά και την Κορακιά, που είναι ο νέος συμβατικός ΣΠΗΕ που θα αντικαταστήσει αυτόν των Λινοπεραμάτων. Παρ’ όλα αυτά, στα πλαίσια της παρούσας εργασίας προτείνεται και η χρήση του σταθμού του Αθερινόλακκου χάριν ολοκληρωμένης μελέτης του συστήματος, αλλά και στο ενδεχόμενο σύνδεσής του με την Κύπρο.

Πίνακας 49: Συγκριτικά αποτελέσματα Σεναρίων Αιολικής Διείσδυσης

Σενάριο	Ελάχιστο κόστος (κ€)	ΣΠΗΕ Διασύνδεσης	Μέγιστο κόστος (κ€)	ΣΠΗΕ Διασύνδεσης
1 (500MW)	2.591,7	Χανιά	5.209,9	Χανιά
2 (800 MW)	8.272,4	Λινοπεράματα	10.827	Αθερινόλακκος
3 (1000 MW)	13.339,3	Λινοπεράματα	18.844,3	Αθερινόλακκος
4 (2000 MW)	25.271,7	Αθερινόλακκος	111.360,8	Χανιά
5 (2500 MW)	53.844,4	Αθερινόλακκος	136.948	Χανιά

Εξίσου σημαντική κρίθηκε η καταγραφή της συχνότητας προσθήκης κάθε Γ.Μ. (Εικόνες 36 – 37).

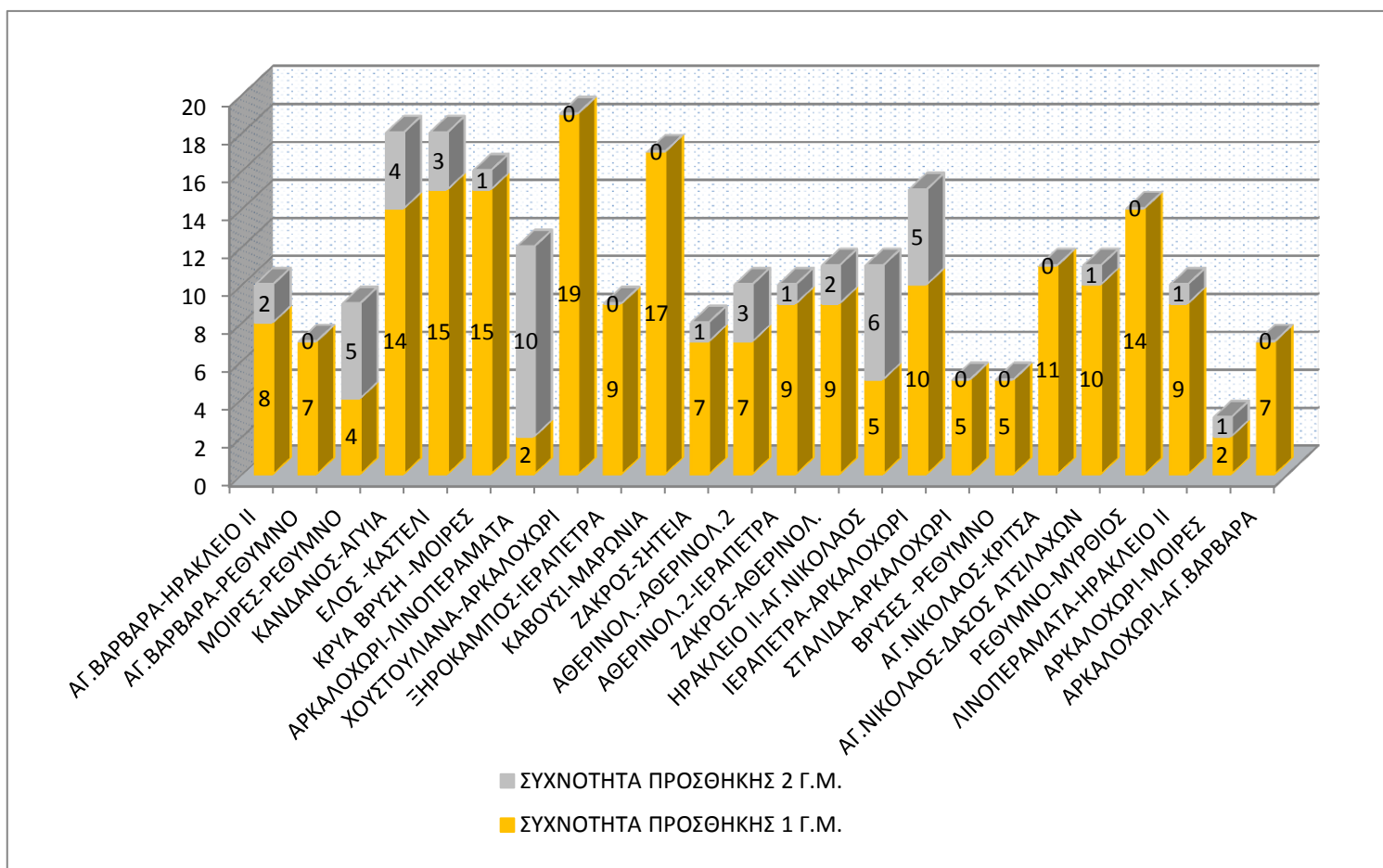


Εικόνα 36: Συχνότητα προσθήκης 1 ή 2 Γ.Μ./ κλάδο (για τους κλάδους 1-21)

Οι Γ.Μ. του υπάρχοντος συστήματος (1-21) χρησιμοποιούνται σταθερά περισσότερο, καθώς συμμετέχουν σε όλα τα Σενάρια και σε όλες τις περιπτώσεις αυτών. Συγκεκριμένα, οι Γ.Μ. που στατιστικά επιλέχθηκαν πιο πολλές φορές είναι:

- Χανιά – Αγυιά (15x2 Γ.Μ.)
- Αγυιά – Καστέλι (15x1 Γ.Μ.)
- Μοίρες – Πραιτώρια (13x1 Γ.Μ.)
- Άγιος Νικόλαος – Ιεράπετρα (10x1 Γ.Μ., 13x2 Γ.Μ.)
- Ιεράπετρα - Μαρωνία (15x1 Γ.Μ.)
- Αθερινόλακκος – Ιεράπετρα (11x1 Γ.Μ., 7x2 Γ.Μ.)
- Αθερινόλακκος – Σητεία (15x1 Γ.Μ.)

Τα παραπάνω αποτελέσματα αποδεικνύουν τη συγκέντρωση ισχύος σε αυτές τις περιοχές, με αναπόφευκτη συνέπεια την ανάγκη προσθήκης παραπάνω Γ.Μ. υπό υψηλότερη αιολική παραγωγή. Η ανάγκη αυτή επαληθεύεται στο επόμενο γράφημα, όπου παρουσιάζονται οι νέες γραμμές και η συχνότητα προσθήκης τους.



Εικόνα 37: Συχνότητα προσθήκης 1 ή 2 Γ.Μ./ κλάδο (για τους κλάδους 22-45)

Συγκεκριμένα, οι κλάδοι που επιλέγονται και ενισχύονται συχνότερα είναι:

- Κάνδανος – Αγιά (14x1 Γ.Μ.)
- Έλος – Καστέλι (15x1 Γ.Μ.)
- Κρύα Βρύση – Μοίρες (15x1 Γ.Μ.)
- Χουστουλιανά – Αρκαλοχώρι (19x1 Γ.Μ.)
- Αρκαλοχώρι – Λινοπεράματα (2x1 Γ.Μ., 10x2 Γ.Μ)
- Καβούσι – Μαρωνία (17x1 Γ.Μ.)
- Αγ. Νικόλαος – Δάσος Ατσιλαχών (14x1 Γ.Μ.)

Επίλογος

Το αποτέλεσμα της μελέτης που προηγήθηκε, για τη διαμόρφωση του Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης ήταν η δημιουργία ενός ασφαλούς μοντέλου, το οποίο αρχικά ικανοποιεί τους στόχους διείσδυσης ΑΠΕ στο Σύστημα που έχουν τεθεί από την Ε.Ε. και το ΕΣΔ/ΑΠΕ, ενώ η επένδυση νέων έργων ΑΠΕ με συνέπεια την υψηλότερη διείσδυση τους στο ενεργειακό μίγμα, προτείνεται μόνο σε περίπτωση διασύνδεσης της Κρήτης με το ηπειρωτικό σύστημα, τα νησιά των Κυκλάδων ή και την Κύπρο. Οι τελευταίες εξελίξεις αναφέρονται στην ταυτόχρονη

διπλή διασύνδεση της Κρήτης (Χανιά- Πελοπόννησος/ Ηράκλειο- Αττική), γεγονός που αυξάνει τις πιθανότητες υλοποίησης επενδύσεων σε ΑΠΕ, ακόμα και με υψηλά ποσοστά διείσδυσης. Εναλλακτική λύση αποτελεί η χρήση αποθηκευτικών μέσων ενέργειας, εφόσον η τεχνολογία τους αναπτυχθεί και γίνει οικονομικά πιο προσιτή. Ιδανικό είναι το σενάριο συνδυασμού τεχνικών αποθήκευσης ενέργειας, υβριδικών συστημάτων και διασύνδεσης του νησιού.

Σε δεύτερο και –ίσως σημαντικότερο- επίπεδο το προτεινόμενο μοντέλο πληροί πολλούς και απαιτητικούς τεχνικούς περιορισμούς που η επέκταση του συστήματος επιβάλλει, ενώ ο τρόπος ανάπτυξης του Γ.Α. επιτρέπει την τροποποίηση, αλλά και ενδεχόμενη ενίσχυσή τους. Τέλος, το μοντέλο αυτό μπορεί να αποτελέσει βάση περαιτέρω ανάπτυξης και μελέτης του ΣΜΗΕ Κρήτης.

Σε αυτό το σημείο, θεωρείται αναγκαίο να τονιστεί ότι πέρα από την ερευνητική διάθεση και θεωρητική μελέτη των ΑΠΕ, απαιτείται πολιτική βούληση και κεντρικός σχεδιασμός. Πολύ σημαντική είναι η επίτευξη συνεργασίας με γειτονικές και μη χώρες, με στόχο τη διασύνδεση αλλά και την ανταλλαγή τεχνογνωσίας στην ενίσχυση των δικτύων. Γενικότερα, οι ερευνητικές τάσεις είναι απαραίτητο να συνδυάζονται με την κοινωνική και οικονομική ανάπτυξη, ώστε να έχουν εφαρμογή και θετικά αποτελέσματα στην καθημερινότητα.

Βιβλιογραφία

- [1] Μελέτη Επάρκειας Ισχύος, 2013-2020, ΑΔΜΗΕ
- [2] ΡΑΕ, www.rae.gr
- [3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", EPRI Power System Engineering Series, McGraw-Hill, 1994.
- [4] Κ. Βουρνά, Γ. Κονταξή, "Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας", Αθήνα 2001.
- [5] Φ. Κανέλλος, «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας από ΑΠΕ», Μηχανικοί Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης, Παρουσιάσεις Μεταπτυχιακού Μαθήματος.
- [6] Σταυρόπουλος Δημήτρης, «Δίκτυα Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Η Ανάπτυξη και Συντήρησή τους», Ε.Μ.Π. 2007
- [7] Μητροπούλου Δέσποινα, «Συγκριτική μελέτη διατάξεων Υ/Σ Μεταφοράς Υ.Τ./Μ.Τ. και ΚΥΤ», Ε.Μ.Π. 2010
- [8] www.wikipedia.org
- [9] ΕΟΠ: Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος,
<http://www.eea.europa.eu/data-and-maps>
- [10] www.kathimerini.gr
- [11] <http://ggb.gr>
- [12] πηγή: ΛΑΓΗΕ, ΔΕΗ
- [13] ΥΠΕΚΑ, www.ypeka.gr
- [14] πηγή: HWEA WIND Energy Statistics
- [15] Κέντρο ανανεώσιμων πηγών και εξοικονόμησης ενέργειας,
<http://www.cres.gr/kape/>
- [16] www.allaboutenergy.gr
- [17] Κασιμάτης Βασίλης, «Σχεδιασμός, κατασκευή και δοκιμαστική λειτουργία ανεμογεννήτριας οριζόντιου άξονα», Χανιά, 2003
- [18] www.ebooks.edu.gr
- [19] www.ape.chania.teicrete.gr
- [20] www.aegean-energy.gr
- [21] Κανατσούλη Ελένη, «Εφαρμογές τεχνολογιών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε χώρες της Μεσογείου με έμφαση στην ηλιακή ενέργεια», Ε.Μ.Π, 2010
- [22] Ευαγγελία Τ. Τζιάσιου, «Διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην Ελλάδα και προώθηση εξοικονόμησης ενέργειας», ΕΜΠ 2012
- [23] <http://www.agroenergy.gr/greek/>
- [24] Δημήτρης Ν. Τράκας, «Επιπτώσεις της Αιολικής Διείσδυσης στην Ασφάλεια και Αξιοπιστία Λειτουργίας Απομονωμένων Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας», Ε.Μ.Π, 2009
- [25] «Βιβλιογραφική ανασκόπηση υφισταμένων μεθόδων/εργαλείων για την αποτελεσματική και αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας υπό συνθήκες αυξημένης διείσδυσης ΑΠΕ»,
<http://larinem.web.auth.gr/>
- [26] «Επιδράσεις και αναγκαίες προσαρμογές για τη μεγάλης κλίμακας διείσδυση ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή», Ίδρυμα Οικονομικών κ Βιομηχανικών Ερευνών, Αθήνα, 2011

- [27] N. Troy, E. Denny and M. O'Malley, "Base-load cycling on a system with significant wind penetration," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 25, no. 2, pp. 1088-1097, May 2010.
- [28] The Western Wind and Solar Integration Study Phase 2, National Renewable Energy Lab., Tech. Report, Sep 2013
- [29] H. Holttinen, "Impact of hourly wind power variations on the system operation in the Nordic countries," *Wind Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 197-210, Apr-Jun. 2005.
- [30] H. Holttinen, "Impact of hourly wind power variations on the system operation in the Nordic countries," *Wind Energy*, vol. 8, no. 2, pp. 215-218, Apr-Jun. 2005.
- [31] T. Ackermann, "Wind Power in Power Systems," 1st edition, Wiley & Sons, UK, Jan. 2005.
- [32] J. Depablos, J. De La Ree and V. Centeno, "Identifying distribution protection system vulnerabilities prompted by the addition of distributed generation," *Securing critical infrastructures*, Grenoble, Oct. 2004.
- [33] A. Woyte, V. V. Thong, R. Belmans and J. Nijs, "Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 21, no. 1, pp. 202-209, Mar. 2006.
- [34] S. Vlachopoulos and C. Demoulias, "Voltage regulation in low-voltage rural feeders with distributed PV systems," in *Proc. 2011 IEEE EUROCON – International Conference on Computer as a Tool*, Lisbon, Apr. 2011.
- [35] J. Depablos, J. De La Ree and V. Centeno, "Identifying distribution protection system vulnerabilities prompted by the addition of distributed generation," *Securing critical infrastructures*, Grenoble, Oct. 2004.
- [36] Morales J.M., Conejo A.J., Madsen H, Pinson P., Zugno M., "Integrating Renewables in Electricity Markets Operational Problems", 2014.
- [37] L. Lazic, G. Pejanovic, and M. Zivkovic, "Wind forecasts for wind power generation using the Eta model," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 6, pp. 1236-1243, June 2010.
- [38] J. Tambke, et al., "Short-term Forecasting of Offshore Wind Farms Production – Developments of the Anemos Project" . In *Proc. of the European Wind Energy Conference 2006*, Athens, Greece, 27/2-2/3 2006.
- [39] Xiaochen Wang , Peng Guoc , Xiaobin Huang, «A Review of Wind Power Forecasting Models», Volume 12, Pages 770–778, 2011
- [40] G. Giebel, G. Kariniotakis, and R. Brownsword, "The State-of-the-Art in Short-Term Prediction of Wind Power - A literature Review»
- [41] A. R. Garcia, and E. De-La-Torre-Vega, "A Statistical wind power forecasting system – A Mexican wind-farm case study," *European Wind Energy Conference & Exhibition – EWEC Parc Chanot, Marseille, France, March 2009*.
- [42] Γιώργος Α. Ορφανός, «Επέκταση δικτύου μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με τη μέθοδο αποσύνθεσης Benders» , Ε.Μ.Π., 2006
- [43] <http://www.capital.gr/Articles.asp?id=1132287>
- [44] Ευαγγελόπουλος Βασίλειος, «Βέλτιστος σχεδιασμός διεσπαρμένης παράγωγης στα δίκτυα διανομής λαμβάνοντας υπόψη αβεβαιότητες», ΕΜΠ 2013.

- [45] Ι. Νικολός, «Εισαγωγή στους Εξελικτικούς Αλγόριθμους», Μηχανικοί Παραγωγής και Διοίκησης Πολυτεχνείου Κρήτης, Παρουσιάσεις Μεταπτυχιακού Μαθήματος.
- [46] Z. Michalewicz, «Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs», Springer-Verlag, New York, 1996.
- [47] D.E. Goldberg, «Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning», Addison-Wesley, Reading, MA, 1989.
- [48] Ξυδιάρη Άννα, «Μεθοδολογία γενετικού αλγορίθμου για τη βέλτιστη επέκταση συστήματος μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς», ΜΠΔ, Χανιά, 2008.
- [49] Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sanchez, "MATPOWER 5.0 User's Manual", 2014.
- [50] Σφυρής Ελευθέριος, «Μελέτη των οριακών τιμών κόμβων στα αυτόνομα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας με διείσδυση αιολικών – εφαρμογή στο δίκτυο Ρόδου και Κρήτης», Ε.Μ.Π, 2014.
- [51] ΡΑΕ, ΔΕΣΜΗΕ, ΔΕΗ, "Μελέτη ανάπτυξης του συστήματος της Κρήτης – Εκτενής περίληψη", Αθήνα, 2011.
- [52] ΓΓΕΚΑ, <http://www.resoffice.gr/>
- [53] ΑΔΜΗΕ, "Δεκαετής πρόγραμμα ανάπτυξης συστήματος μεταφοράς 2014-2023", Αθήνα, 2012.
- [54] Αντωνίου Αντώνης, «Επιπτώσεις στην Οικονομική Λειτουργία των Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας Κρήτης και Κύπρου λόγω της διασύνδεσής τους.», ΗΜΜΥ, Χανιά 2013.
- [55] ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΣ ΣΥΛΛΟΓΟΣ ΔΙΠΛ. ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ–ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ/Τμήματα : Ανατ. Κρήτης, Ρεθύμνου, Χανίων: «Η διείσδυση των ΑΠΕ στο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης»
- [56] Τσακρίδης Απόστολος, "Επίπτωση της Διείσδυσης Φωτοβολταϊκών Συστημάτων στο Μη Διασυνδεδεμένο Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης", ΤΕΙ Κρήτης, Ηράκλειο 2012.
- [57] ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΙΙ, ΤΕΙ ΧΑΛΚΙΔΑΣ.
- [58] Φίλος Γεώργιος, «Σχεδιασμός Ανάπτυξης δικτύου Διασύνδεσης νέων έργων ΑΠΕ με το Σύστημα Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας με χρήση Ευρετικών Αλγορίθμων», Μ.Π.Δ., Χανιά 2015.
- [59] «Βιώσιμη χωροθέτηση μονάδων ΑΠΕ στα νησιά», Εργαστήριο Ανανεώσιμων και Βιώσιμων Ενεργειακών Συστημάτων, Ομάδα Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Τσούτσου, Σχολή Μηχανικών Περιβάλλοντος, Χανιά, 2014.
- [60] M. Lange, and U. Focken, "New developments in wind energy forecasting," IEEE Power and Energy Society General Meeting 2008 - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-8, 20-24 July 2008.
- [61] R. Gallego, A. Monticelli, and R. Romero, "Transmission system expansion planning by an extended genetic algorithm," IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, vol. 145, no. 3, pp. 329-335, 1998.