



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Ανάπτυξη αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας σε συστήματα διανομής

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του/της

ΠΕΤΡΟΥ ΜΑΓΚΟΥ

Επιβλέπων: Μπουχουράς Άγγελος
Επίκουρος Καθηγητής

ΚΟΖΑΝΗ / ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ / 2023



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA

FUCULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL &
COMPUTER ENGINEERING



Development of energy management algorithm in distribution system

THESIS

PETROS MAGKOS

SUPERVISOR: Bouhouras Aggelos
Assistant Professor

KOZANI/OCTOBER/2023



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο "Ανάπτυξη αλγορίθμου διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας σε συστήματα διανομής " καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Άγγελου Μπουχουρά αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και μόνο.

Copyright (C) Πέτρος Μάγκος & Άγγελος Μπουχουράς, 2023, Κοζάνη

Υπογραφή Φοιτητή:

Περίληψη

Τα περιβαλλοντικά προβλήματα που έχουν έρθει στο προσκήνιο ως άμεση συνέπεια της κλιματικής αλλαγής έχουν φέρει μέτρα περιορισμού σε παγκόσμιο επίπεδο καθώς και στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ). Μια από τις στρατηγικές που ακολουθείται σε επίπεδο ευρωπαϊκής ένωσης είναι η στροφή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε «καθαρότερες» πηγές. Η ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), όπως φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες, στο ενεργειακό μείγμα συμβάλει στην μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και κατ' επέκταση στο περιορισμό των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Για τον σκοπό αυτό, η προώθηση των ΑΠΕ αποτελεί κύριο μέλημα της ΕΕ, στοχεύοντας στην περαιτέρω ενσωμάτωση τους σε στέγες οικιακών κτιρίων μετατρέποντας τους παραδοσιακούς καταναλωτές σε καταναλωτές-παραγωγούς. Ωστόσο, η υψηλή διείδυση αυτών των μονάδων δημιουργεί προκλήσεις στην λειτουργία του δικτύου διανομής. Συγκεκριμένα, η μεταβαλλόμενη, μη ελεγχόμενη παραγωγή των ΑΠΕ, αναμένεται να δημιουργήσει ανισορροπίες μεταξύ παραγωγής και ζήτησης, επιβαρύνοντας την λειτουργία του δικτύου. Η συμφόρηση του δικτύου, αντίστροφη ροή ισχύος και η παραβίαση των τεχνικών ορίων όπως είναι αυτών της τάσης είναι κάποια από τα κύρια ζητήματα που αναμένεται να επιβαρύνουν την λειτουργία του δικτύου. Η εφαρμογή συστημάτων ενεργειακής διαχείρισης θα μπορούσε να συνεισφέρει στην εξισορρόπηση της διαφοράς μεταξύ της παραγωγής και ζήτησης για την αποφυγή δυσμενών καταστάσεων.

Σε αυτό το πλαίσιο, η παρούσα διπλωματική εργασία, υλοποιεί ένα κεντρικό σύστημα ενεργειακής διαχείρισης για ένα δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης με αυξημένη διείδυση παραγωγών-καταναλωτών. Το προτεινόμενο σύστημα διαχειρίζεται την λειτουργία τόσο του συστήματος αποθήκευσης με μπαταρίες όσο και των ευέλικτων συσκευών κάθε οικίας του δικτύου. Στόχος της μελέτης είναι να προσδιορίσει τον βέλτιστο ρυθμό φόρτισης και αποφόρτισης της μπαταρίας και την βέλτιστη ώρα εκκίνησης των ευέλικτων συσκευών για κάθε οικία του δικτύου, λαμβάνοντας υπόψη και την άνεση του χρήστη. Σε αυτή την προσέγγιση έχουν τεθεί 3 συναρτήσεις στόχου. Η πρώτη αφορά την μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος στο δίκτυο, η δεύτερη στην μείωση της συμφόρησης του δικτύου και η τρίτη την μείωση του λειτουργικού κόστους των παραγωγών/καταναλωτών του δικτύου. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν συγκρίνονται τόσο ως προς

την λειτουργία του δικτύου όσο και ως προς το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας του κάθε χρήστη. Τέλος, αναγνωρίζοντας την αδυναμία κάποιου στόχου να παρέχει ταυτόχρονα μια οικονομική ως προς τους παραγωγούς/καταναλωτές που συνεισφέρει στην βέλτιστη λειτουργία του δικτύου διανομής, προτείνεται ένα μοντέλο συνδυασμού των οικονομικών και τεχνικών στόχων του δικτύου παρέχοντας ένα σύνολο διαφορετικών ενεργειακών προγραμμάτων (pareto) που αντισταθμίζουν την απόκλιση μεταξύ των βέλτιστων λύσεων αυτών των προσεγγίσεων.

Λέξεις Κλειδιά: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ), Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας (ΣΑΕ), Ευέλικτες Συσκευές, Διαχείριση ζήτησης Ενέργειας (DSM), Απώλειες Δικτύου, General Algebraic Modeling System (GAMS)

Abstract

The environmental problems that have come to the fore as a direct consequence of climate change have brought mitigation measures at global level as well as in the European Union (EU). One of the strategies being pursued at EU level is the shift to "cleaner" sources of electricity generation. The integration of renewable energy sources (RES), such as photovoltaics and wind turbines, into the energy mix contributes to reducing greenhouse gas emissions and thus to limiting the effects of climate change. To this end, the promotion of RES is a key EU priority, aiming at further integrating them into roofs of domestic buildings, turning traditional consumers into consumer-producers. However, the high penetration of these plants creates challenges in the operation of the distribution network. In particular, the changing, uncontrolled generation of RES is expected to create imbalances between production and demand, putting a strain on the operation of the grid. Grid congestion, reverse power flow and violation of technical limits such as those of voltage are some of the main issues that are expected to burden the operation of the grid. The implementation of energy management systems could contribute to balancing the difference between generation and demand to avoid adverse situations.

In this context, this thesis implements a centralized energy management system for a low-voltage distribution network with increased producer-consumer penetration. The proposed system manages the operation of both the battery storage system and the flexible appliances of each home in the network. The objective of the study is to determine the optimal battery charging and discharging rate and the optimal starting time of the flexible appliances for each home in the grid, taking into account the user's comfort. In this approach 3 objective functions have been set. The first one concerns the reduction of active power losses in the grid, the second one the reduction of congestion in the grid and the third one the reduction of operational costs for the grid producers/consumers. The results obtained are compared both in terms of network operation and in terms of the electricity costs of each user. Finally, recognizing the impossibility of any objective to simultaneously provide an economic one for the producers/consumers that contributes to the optimal operation of

the distribution network, a model combining the economic and technical objectives of the network is proposed by providing a set of different energy schedules (pareto) that compensate the divergence between the optimal solutions of these approaches.

Keywords: Renewable Energy Sources (RES), Energy Storage Systems (ESS), Flexible appliances, Demand Side Management (DSM), Grid Losses, General Algebraic Modeling System (GAMS)

Ευχαριστίες

Η εκτέλεση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί το τελευταίο στάδιο για την ολοκλήρωση των σπουδών μου στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών το Πανεπιστήμιου Δυτικής Μακεδονίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον κ. Άγγελο Μπουχουρά επιβλέπων στην εργασία μου, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό το θέμα καθώς και για την άψογη συνεργασία.

Επίσης, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον Νίκο Κελεπούρη Υποψήφιο Διδάκτορα του τμήματος για την άψογη συνεργασία που είχαμε και για την πολύτιμη βοήθεια που μου έδωσε.

Τέλος, ένα ακόμα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια και στους φίλους μου, για την στήριξη που μου παρείχαν καθ' όλη την διάρκεια των σπουδών μου.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	- 1 -
ABSTRACT	4
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	7
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	9
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	11
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Κλιματική αλλαγή	14
1.2 Αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής στη Ε.Ε	16
1.2.1 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία	17
1.2.2 Σχέδιο REPowerEU	18
1.3 Αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής στην Ελλάδα	20
1.3.1 Μετασχηματισμός του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής	21
1.3.2 Προώθηση της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ	24
2.1 Προβλήματα του Δικτύου Διανομής	24
2.1.1 Αβεβαιότητα Παραγωγής	24
2.1.2 Αντίστροφη Ροή Ισχύος	25
2.1.3 Διακύμανση Τάσης	25
2.1.4 Συμφόρηση Δικτύου	26
2.1.5 Απώλειες στις γραμμές του δικτύου	26
2.2 Αντιμετώπιση των Προβλημάτων στο Δίκτυο Διανομής	27
2.2.1 Έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	27

2.2.2 Μικροδίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας	28
2.2.3 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας	29
2.2.4 Διαχείριση Ζήτησης Ενέργειας	30
2.2.5 Συστήματα διαχείρισης ενέργειας	32
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΣΥΣΤΗΜΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ	34
3.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	34
3.2 Περιγραφή Αλγορίθμου	35
3.3 Μαθηματικό Μοντέλο	36
3.3.1 Αντικειμενικές Συναρτήσεις	36
3.3.2 Περιορισμοί Ανάλυσης ροής φορτίου	37
3.3.3 Περιορισμοί Ισχύος	38
3.3.4 Περιορισμοί Συστήματος Μπαταριών	39
3.3.5 Περιορισμοί Ευέλικτων Φορτίων	41
3.3.6 Περιορισμοί για το Pareto	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	67
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	69
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ - ΑΡΚΤΙΚΟΛΕΞΑ - ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ	74
ΑΠΟΔΟΣΗ ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΩΝ ΟΡΩΝ	76

Κατάλογος Εικόνων

	15
ΕΙΚΟΝΑ 1: ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΑΝΑ ΤΟΜΕΑ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΤΟ 2020 [3]	15
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΩΝ ΧΩΡΩΝ ΤΗΣ ΕΕ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΚΛΙΜΑ [5]	16
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΒΑΣΙΚΗ ΑΞΟΝΕΣ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ	17
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2020-2030 [10]	21
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΟΜΕΩΝ ΣΤΟ ΕΞΥΠΝΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ [20]	28
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΟΥ [22]	29
	32
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (DSM) [29]	32
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ PARETO	44
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ 18 ΖΥΓΩΝ [43]	47
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΙΑ 1ΚWΡ	52
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΙΜΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	55
ΕΙΚΟΝΑ 12: PARETO ΜΕΤΑΞΥ ΣΤΟΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ	64

Κατάλογος Πινάκων

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ	47
ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΜΗ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΣΠΙΤΙΑ	48
ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΣΠΙΤΙΑ	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 1	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 2	49
ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 3	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 4	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 5	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 6	50
ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ Φ/Β ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΠΙΤΙ	51
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΧΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΡΥΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ/ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ	53
ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΚΟΣΤΟΣ ΗΛΕΚΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 1	56
ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΚΟΣΤΟΣ ΗΛΕΚΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 2	57
ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΑΙΧΜΕΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΣΕ KW ΑΝΑ ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 1	58
ΠΙΝΑΚΑΣ 16: ΑΙΧΜΕΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΣΕ KW ΑΝΑ ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 2	59
ΠΙΝΑΚΑΣ 17: ΑΙΧΜΕΣ ΕΞΑΓΩΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ KW ΑΝΑ ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 1	60

ΠΙΝΑΚΑΣ 18: ΑΙΧΜΕΣ ΕΞΑΓΩΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΚΩ ΑΝΑ ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 2	61
ΠΙΝΑΚΑΣ 19: ΡΑΡ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	62
ΠΙΝΑΚΑΣ 20: ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ ΚΩΗ ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΣΤΟΧΟΥ	63

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

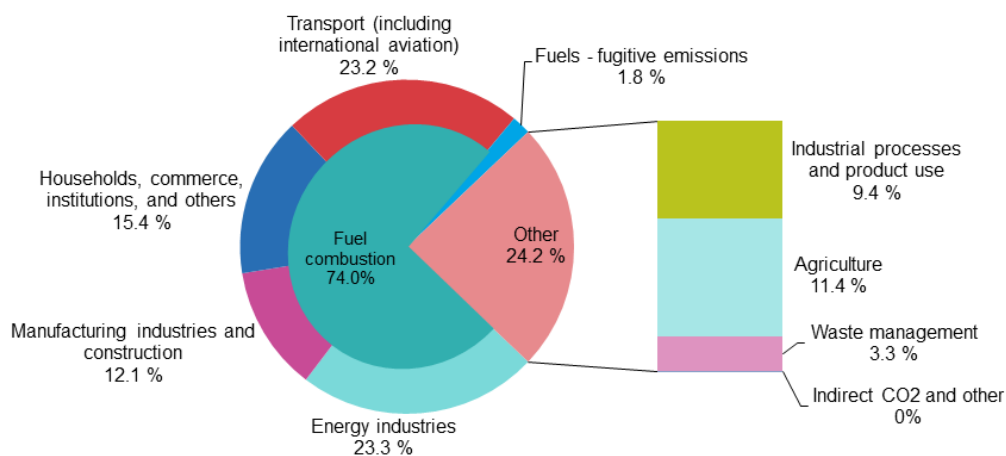
1.1 Κλιματική αλλαγή

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί επείγουσα απειλεί για το σύνολο του πλανήτη και ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που έχει να αντιμετωπίσει η επιστημονική κοινότητα, καθώς χαρακτηρίζεται ως η μεγαλύτερη αναδυόμενη περιβαλλοντική κρίση των καιρών μας. Ως κλιματική αλλαγή ορίζεται, η μεταβολή του κλίματος που αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα και τροποποιεί την σύνθεση της παγκόσμιας ατμόσφαιρας η οποία παρατηρείται από κοινού με την μεταβλητότητα του φυσικού κλίματος σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους, σύμφωνα με την Σύμβαση Πλαίσιο για την κλιματική Αλλαγή (FCCC). Όπως καταδεικνύει και ο ορισμός της κλιματικής αλλαγής η κρίση αυτή αφορά περισσότερο την αλλαγή του κλίματος λόγω της ανθρώπινης δραστηριότητας παρά λόγω φυσικών μεταβολών. [1]

Η κλιματική αλλαγή σχετίζεται με το φαινόμενο του θερμοκηπίου καθώς αποτελεί το κύριο αίτιο που οδηγεί σε αυτήν. Οι ανθρώπινες δραστηριότητες που απαιτούν την καύση ορυκτών καυσίμων, η αποψίλωση των δασών, η γεωργία και η κτηνοτροφία απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες αερίων του θερμοκηπίου όπως διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, νιτρώδη αέρια στην ατμόσφαιρα. Η αυξημένη συγκέντρωση των συγκεκριμένων αερίων κυρίως ως αποτέλεσμα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων σε συνδυασμό με το ότι ορισμένα από αυτά τα αέρια λειτουργούν ως γυαλί παγιδεύοντας την θερμότητα και εμποδίζοντας την διάχυση της ηλιακή ακτινοβολίας στο διάστημα επιφέρει την υπερθέρμανση του πλανήτη. Ενδεικτικό της αύξησης της συγκέντρωσης των συγκεκριμένων αερίων στην ατμόσφαιρα είναι ότι η συγκέντρωση του διοξειδίου του άνθρακα το 2020 έχει αυξηθεί κατά 48% σε σχέση με το 1750. Το διοξείδιο του άνθρακα αποτελεί το αέριο του θερμοκηπίου με την μεγαλύτερη επίπτωση καθώς έχει τον μεγαλύτερο χρόνο ζωής στην ατμόσφαιρα σε σύγκριση με τα υπόλοιπα, με κυριότερη πηγή παραγωγής του να αποτελεί η καύση ορυκτών καυσίμων. Σύμφωνα με Ευρωπαϊκή Στατιστική Υπηρεσία περίπου τα 3/4 των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων. Οι τομείς που συμπεριλαμβάνονται σε αυτό είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η βιομηχανία, τα κτήρια για την κατασκευή τους ή για την κάλυψη των αναγκών τους καθώς και οι

μεταφορές. Το υπόλοιπο 1/4 προέρχεται από δραστηριότητες που δεν αφορούν την καύση ορυκτών καυσίμων. [2,3]

Greenhouse gas emissions by source sector, EU, 2020



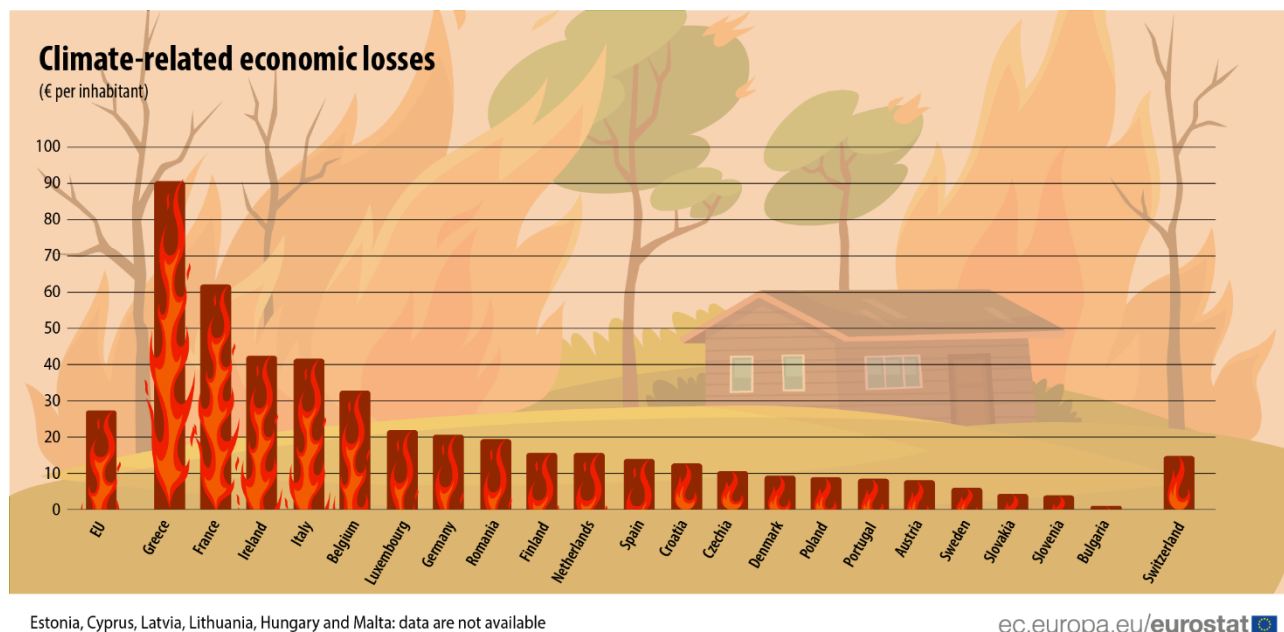
Source: EEA, republished by Eurostat (online data code: env_air_gge)

eurostat

ΕΙΚΟΝΑ 1: ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΑΕΡΙΟ ΤΟΥ ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΟΥ ΑΝΑ ΤΟΜΕΑ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗ ΕΝΩΣΗ ΤΟ 2020 [3]

Οι επιπτώσεις που προκαλούνται λόγω της κλιματικής αλλαγής αφορούν σημαντικούς τομείς όπως η οικονομία το περιβάλλον και η ανθρώπινη υγεία. Η μέση θερμοκρασία του πλανήτη έχει αυξηθεί κατά 1,1 βαθμούς κελσίου το 2019 σε σχέση με το επίπεδο που επικρατούσε πριν την βιομηχανική επανάσταση καθιστώντας την δεκαετία 2011–2020 ως την θερμότερη που έχει καταγραφεί. Με τους επιστήμονες να προειδοποιούν ότι μια αύξηση της τάξης του 1,5 βαθμού κελσίου ενδέχεται να έχει μη αναστρέψιμες συνέπειες για το περιβάλλον και την κοινωνία. Οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής γίνονται αισθητές στο σύνολο των περιοχών του πλανήτη. Οι πάγοι στους πόλους της γης λιώνουν και ανεβαίνει η στάθμη της θάλασσας. Σε ορισμένες περιοχές τα ακραία καιρικά φαινόμενα γίνονται ακόμη εντονότερα με κάποιες από αυτές τις περιοχές να επηρεάζονται από αυξημένες βροχοπτώσεις και πλημμύρες και άλλες από πολύ έντονους καύσωνες και ξηρασία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι περιοχές της Ευρώπης, όπως αυτές της βορειοδυτικής Ευρώπης με το χαμηλό υψόμετρο να αυξάνει ακόμα περισσότερο τον κίνδυνο για παράκτιες πλημμύρες λόγω της αύξησης της στάθμης της θάλασσας. Επίσης αναμένεται να αυξηθεί και η ένταση των βροχοπτώσεων σε αυτές της περιοχές. Στις περιοχές της ανατολικής και κεντρικής Ευρώπης, αλλά και στις περιοχές της μεσογείου, το κύριο χαρακτηριστικό είναι η αύξηση της θερμοκρασίας και μείωση των βροχοπτώσεων του θερινούς μήνες οδηγώντας σε ξηρασία, μείωση της απόδοσης των καλλιεργειών, δασικές πυρκαγιές, απώλειες στην βιοποικιλότητα και μείωση στην διαθεσιμότητα του νερού. [2,4]

Όλες οι παραπάνω πολύ σημαντικές επιπτώσεις επηρεάζουν και την οικονομία. Σύμφωνα με τον ευρωπαϊκό οργανισμό περιβάλλοντος και την ευρωπαϊκή στατιστική υπηρεσία οι οικονομικές απώλειες λόγω των επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής που έχουν να κάνουμε με τα ακραία καιρικά φαινόμενα ανέρχονται στα 145 δισεκατομμύρια την τελευταία δεκαετία στην ΕΕ. Με το 2017 να αποτελεί την χρονιά με τις μεγαλύτερες απώλειες στα 27,9 δισεκατομμύρια ευρώ και το 2020 στα 12 δισεκατομμύρια ευρώ. Με τις απώλειες του 2020 να μεταφράζονται σε 27 ευρώ αν ευρωπαίο πολίτη κατά μέσο όρο, με την χώρα που είχε τις μεγαλύτερες απώλειες ανά πολίτη να είναι η Ελλάδα με 91 ευρώ.[5]



ΕΙΚΟΝΑ 2: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΕΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΤΩΝ ΧΩΡΩΝ ΤΗΣ ΕΕ ΠΟΥ ΣΧΕΤΙΖΟΝΤΑΙ ΜΕ ΤΟ ΚΛΙΜΑ [5]

1.2 Αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής στη Ε.Ε

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί παγκόσμια πρόκληση καθώς επηρεάζει πολλές πτυχές του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης ζωής και η αντιμετώπιση της μπορεί να επιτευχθεί μόνο με παγκόσμια αντίδραση. Έχοντας αυτό ως γνώμονα η ευρωπαϊκή ένωση συμμετέχει ενεργά στις διεθνείς προσπάθειες που αφορούν το κλίμα κυρίως μέσω της σύμβασης Πλαισίου των Ηνωμένων Εθνών για την κλιματική αλλαγή (UNFCCC) και της συμφωνίας του Παρισιού[6]. Πρωταρχικός στόχος της συμφωνίας είναι η διατήρηση της αύξησης της μέσης θερμοκρασίας αρκετά κάτω από τους 2 βαθμούς κελσίου με δέσμευση ότι θα υπάρχουν συνεχείς προσπάθειες για τον περιορισμό της αύξησης στους 1,5 βαθμούς κελσίου σε σχέση με την προβιομηχανική περίοδο[7]. Στον πλαίσιο αυτό η ευρωπαϊκή επιτροπή προτείνει στο ευρωπαϊκό συμβούλιο στρατηγικές και σχέδια με πρωτοβουλίες και στόχους με κατεύθυνση την επίτευξη των δεσμεύσεων της ευρωπαϊκής ένωσης.

1.2.1 Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία

Στο πλαίσιο λήψη μέτρων και για την υλοποίηση της δέσμευσης της συμφωνίας του Παρισιού, η ευρωπαϊκή επιτροπή παρουσιάζει τον Δεκέμβριο του 2019 την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία η οποία εγκρίνεται τον Ιούλιο του 2021. Η συμφωνία αποτελεί μια σειρά από νομοθετικές προτάσεις με σκοπό να προσαρμοστούν οι πολιτικές της ευρωπαϊκής ένωσης για το κλίμα, τις μεταφορές και άλλους τομείς έχοντας ως πρωταρχικό στόχο να καταστήσουν την Ευρώπη την πρώτη κλιματικά ουδέτερη κοινότητα ως το 2050. Για να φτάσουν εκεί για τα 27 μέλη κράτη της ευρωπαϊκής ένωσης χαρακτηρίζεται ως θεμελιώδης δέσμευση η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% σε σχέση με το έτος 1990 έως το 2030. Η υλοποίηση των παραπάνω στόχων προϋποθέτει μια σειρά από αλλαγές σε αρκετούς άξονες όπως φαίνεται και στη Εικόνα 3.



ΕΙΚΟΝΑ 3: ΒΑΣΙΚΗ ΑΞΟΝΕΣ ΤΗΣ ΕΥΡΩΠΑΙΚΗΣ ΠΡΑΣΙΝΗΣ ΣΥΜΦΩΝΙΑΣ

Ο ενεργειακός τομέας χαρακτηρίζεται ως ένας από τους σημαντικότερους σε αυτή την προσπάθεια. Ο μετασχηματισμός του αποτελεί μια από τις προτεραιότητες της ευρωπαϊκής ένωσης. Προς αυτή την κατεύθυνση, η επιτροπή προτείνει ως δεσμευτικό στόχο την αύξηση κατά 40% της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της. Οι προτάσεις επίσης προωθούν την χρήση ανανεώσιμων καυσίμων και υδρογόνου στην βιομηχανία και τις μεταφορές. Επιπρόσθετα, η στροφή σε καθαρότερες πηγές ενέργειας είναι αναγκαίο να συνδυαστεί με την μείωση της κατανάλωσης όσο και της αύξησης της ενεργειακής απόδοσης, η οποία φιλοδοξεί η επιτροπή να είναι αυξημένη κατά 36%-39% έως το 2030. Με αυτό τον τρόπο, θα επιτευχθεί μείωση της πρωτογενούς και τελικής κατανάλωσης και επίσης μείωση του ενεργειακού κόστους για καταναλωτές και βιομηχανίες. [8]

Η ανακαίνιση των κατοικιών, των κτιρίων και των βιομηχανικών εγκαταστάσεων θα επιφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα στην προσπάθεια για την επίτευξη των στόχων καθώς και στην ευρωπαϊκή κοινωνία. Με την επιδίωξη της επιτροπής για ανακαίνιση 35 εκατομμυρίων κτιρίων αυξάνεται η αποδοτικότερη χρήση της ενέργειας με την ευρύτερη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς επίσης δημιουργούνται 160.000 νέες θέσεις εργασίας στον κατασκευαστικό τομέα. Επιπλέον, με το νέο Κοινωνικό ταμείο για το κλίμα στηρίζονται οι πολίτες της ευρωπαϊκής ένωσης που πλήττονται περισσότερο από την ενεργειακή φτώχεια. Αυτό αποσκοπεί στην μείωση του κόστους για τα άτομα που είναι περισσότερο εκτεθειμένα παρέχοντας χρηματοδότηση για την ανακαίνιση των κτιρίων και την πρόσβαση σε τεχνολογίες μηδενικών εκπομπών διασφαλίζοντας μια πιο δίκαιη μετάβαση. Σημαντικός άξονας πέρα από τις κατοικίες αποτελεί η ανακαίνιση των δημόσιων κτηρίων. Προς αυτή την κατεύθυνση προτείνεται η υποχρέωση των κρατών μελών να ανακαινίζουν τουλάχιστον το 3% του συνολικού εμβαδόν δαπέδου όλων των δημόσιων κτηρίων και να αυξήσουν την συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην θέρμανση και στην ψύξη κατά 1,1 ποσοστιαία μονάδα κάθε χρόνο έως το 2030. Τέλος, ορίζεται ως δείκτης αναφοράς το 49% των κτιρίων να διαθέτουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έως το 2030.[8]

Σε ότι έχει να κάνει με τις μεταφορές η ευρωπαϊκή επιτροπή στοχεύει στην μετάβαση σε πιο πράσινες και καθαρές μετακινήσεις με όπλο την μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στα καινούργια αυτοκίνητα και ημιφορτηγά. Ο στόχος που έχει τεθεί είναι η μείωση κατά 55% των εκπομπών των αυτοκινήτων και κατά 50% των ημιφορτηγών έως το 2030 με απώτερο σκοπό τις μηδενικές εκπομπές των καινούργιων αυτοκινήτων έως το 2035. Με σκοπό την προώθηση και την ανάπτυξη της αγοράς οχημάτων μηδενικών ή χαμηλών εκπομπών η επιτροπή θα θεσπίσει από το 2026 την εμπορία δικαιωμάτων εκπομπών για τις οδικές μεταφορές με την τιμολόγηση της ρύπανσης ώστε να φτάσει στην επίτευξη των στόχων. Επιπλέον στον τομέα των αερομεταφορών και της ναυτιλίας προτείνεται η επέκταση και σε αυτούς τους τομείς της τιμολόγησης των εκπομπών άνθρακα καθώς και η προώθηση των βιώσιμων καυσίμων για τις αερομεταφορές και η παροχή ενέργειας από ξηράς στην ναυτιλία σε συνέχεια της προσπάθειας μείωσης της χρήσης ρυπογόνων καυσίμων.[8]

Η φύση και το περιβάλλον πέρα από τις καταστροφές που επιδέχεται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες μπορεί να αποτελέσει σημαντικό σύμμαχο στην προσπάθεια για καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής. Σε αυτό το πλαίσιο προτείνεται η αποκατάσταση και αναζωογόνηση της βιοποικιλότητας για μια πιο γρήγορη απορρόφηση του ανθρακικού αποτυπώματος. Μέσω της αποκατάστασης των δασών των εδαφών και των υγροτόπων φιλοδοξεί η ευρωπαϊκή επιτροπή να επιτευχθεί ο νέος στόχος της για απορρόφηση 310Mt άνθρακα από αυτή την διαδικασία.[8]

1.2.2 Σχέδιο REPowerEU

Σε συνέχεια της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και ως απάντηση στις διαταραχές που έφερε στην παγκόσμια αγορά η εισβολή της Ρωσίας στη Ουκρανία η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε το σχέδιο REPowerEU. Το σχέδιο εγκρίθηκε στις 18 Μαΐου 2022 και αποσκοπεί στον μετασχηματισμό του ενεργειακού συστήματος της ηπείρου για δύο λόγους. Την απεξάρτηση από την προμήθεια ορυκτών καυσίμων από την Ρωσία αλλά και την συνέχεια και επέκταση των προσπαθειών περιορισμού της κλιματικής αλλαγής. Το συγκεκριμένο σχέδιο χαρακτηρίζεται ως το πιο φιλόδοξο σχέδιο που έχει προτείνει η ευρωπαϊκή επιτροπή και βασίζεται σε άξονες όπου προβλέπουν στην επιτάχυνση της ανάπτυξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την αντικατάσταση της χρήσης ορυκτών καυσίμων στην βιομηχανία, την ηλεκτροπαραγωγή και την βιομηχανία. Τον μετασχηματισμό του ενεργειακού εφοδιασμού και την εξοικονόμηση ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη το επιθυμητό χρονικό διάστημα υλοποίησης των μέτρων του σχεδίου κατηγοριοποιούνται σε αυτά που είναι βραχυπρόθεσμα και σε εκείνα που είναι μεσοπρόθεσμα.

Τα μέτρα που χαρακτηρίζονται ως βραχυπρόθεσμα παρουσιάζονται παρακάτω και είναι τα εξής:

- Δημιουργία κοινών αγορών φυσικού αερίου, υγροποιημένου φυσικού αερίου και υδρογόνου μέσω της πλατφόρμας της ΕΕ για όλα τα κράτη μέλη που το επιθυμούν καθώς και για την Ουκρανία, τη Μολδαβία, τη Γεωργία και τα Δυτικά Βαλκάνια.
- Σύναψη νέων ενεργειακών εταιρικών σχέσεων για μελλοντικές συνεργασίες που θα περιλαμβάνουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αέρια χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών με αξιόπιστους προμηθευτές.
- Εξοικονόμηση 50bcm από τις εισαγωγές φυσικού αερίου μέσω της ταχείας ανάπτυξης έργων αιολικής, ηλιακής ενέργειας και πράσινου υδρογόνου.
- Έγκριση των πρώτων έργων υδρογόνου στην ΕΕ
- Εξοικονόμηση 13bcm από τις εισαγωγές φυσικού αερίου με συστάσεις για τρόπους εξοικονόμησης ενέργειας σε πολίτες και επιχείρησης.
- Πληρότητα στις αποθήκες φυσικού αερίου της τάξης του 80% της χωρητικότητάς τους.
- Συντονισμένη μείωση της ζήτησης σε περίπτωση διαταραχών στην παροχή φυσικού αερίου.

Τα μεσοπρόθεσμα μέτρα αποτελούν μέτρα με χρόνο υλοποίησης μερικών πριν το 2027 και των υπολοίπων έως το έτος 2030 και είναι τα εξής:

- Αύξηση του στόχου από 40% σε 45% της συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα της ΕΕ έως

το 2030. Με την συνολική δυναμικότητα παραγωγής ενέργειας να γίνεται 1236 GW από 1067 GW έως το 2030.

- Διπλασιασμός σε σχέση με σήμερα της δυναμικότητας των φωτοβολταϊκών πρώτης εγκατάστασης ως το 2025 με την δυναμικότητα να ανέρχεται σε άνω των 320 GW και στόχο να φτάσει τα 600 GW έως το 2030.
- Θέσπιση νέας νομοθεσίας για την επιτάχυνση των διαδικασιών αδειοδότησης έργων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με έμφαση σε περιοχές με χαμηλό περιβαλλοντικό κίνδυνο.
- Εξοικονόμηση ενέργειας μέσω της αύξησης του στόχου της απόδοσης σε 13% από 9% έως το 2030.
- Κατασκευή 17,5 GW ηλεκτρολυτικών κυψελών για την τροφοδοσία της βιομηχανίας της ΕΕ με εγχώρια παραγωγή έως το 2025
- Εξασφάλιση της πρόσβασης σε κρίσιμες πρώτες ύλες στην βιομηχανία.
- Απαλλαγή της βιομηχανίας από ανθρακούχες εκπομπές με έργα ύψους 3 δις ευρώ.
- Στήριξη των επενδύσεων μέσω του τροποποιημένου Ταμείου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας ύψους 300 δις ευρώ.[9]

1.3 Αντιμετώπιση της Κλιματικής Αλλαγής στην Ελλάδα

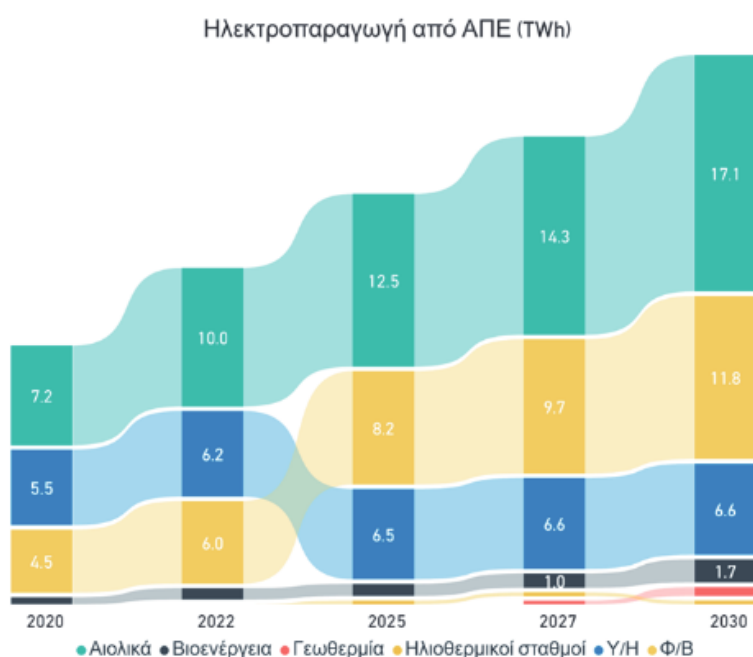
Η Ελλάδα αντιμετωπίζει σημαντικές προκλήσεις οι οποίες σχετίζονται με την κλιματική κρίση. Εναρμονιζόμενη με την πολιτική της ευρωπαϊκής ένωσης θα πρέπει να καταβάλει προσπάθειες για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής καθώς και για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί. Με αυτά ως γνώμονα, τον Δεκέμβριο του 2019 εγκρίθηκε από το υπουργικό συμβούλιο ένα Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (Ε.Σ.Ε.Κ). Μέσω του σχεδίου αυτού, προκύπτει ένα αναλυτικός οδικός χάρτης για την επίτευξη συγκεκριμένων στόχων έως το 2030. Για να είναι εφικτή υλοποίηση των στόχων μια από τις κυριότερες προϋποθέσεις είναι ο μετασχηματισμός του τομέα ηλεκτροπαραγωγής και των μεταφορών στην Ελλάδα. Μέσω της προώθησης των ΑΠΕ και πιο συγκεκριμένα των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών καθώς και την ανάπτυξη της αγοράς ηλεκτρικών αυτοκινήτων με τους στόχους αυτούς να συνδέονται άμεσα με την κεντρικό στόχο της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Οι κεντρικοί στόχοι που έχουν προταθεί και εγκριθεί στο Ε.Σ.Ε.Κ με ορίζοντα το 2030 είναι οι παρακάτω:

- Μείωση πάνω από 42% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε σχέση με αυτές του έτους 1990.Ενώ υπάρχει και στόχος μείωσης των εκπομπών και σε σχέση με το έτος 2005 κατά περισσότερο από 55% σε σχέση με το συγκεκριμένο έτος.
- Η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην τελική ακαθάριστη κατανάλωση ενέργειας να ανέρχεται σε ποσοστό τουλάχιστον 35%. Και η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας να φτάνει σε ποσοστό τουλάχιστον 60% .
- Βελτίωση της Ενεργειακής Απόδοσης κατά 38% στην τελική κατανάλωση ενέργειας και προσπάθεια μείωση της κατανάλωσης ενέργειας σε επίπεδα χαμηλότερα από αυτά του έτους 2017.[10]

1.3.1 Μετασχηματισμός του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής

Σε ότι έχει να κάνει με το σύστημα ηλεκτροπαραγωγής προβλέπεται η σταδιακή αύξηση της διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και σταδιακή μείωση της παραγωγής από συμβατικές μονάδες που χρησιμοποιούν ως καύσιμο τον λιγνίτη και το πετρέλαιο. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των ΑΠΕ αυξάνεται λίγο λιγότερο από 9 GW μέχρι το έτος 2030 σχέση με το έτος 2020, με το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης να αφορά το φωτοβολταϊκά που από 3GW το 2020 αναμένεται να αυξηθεί στα 7,7 GW το 2030. Αντίστοιχα η εγκατεστημένη ισχύς των ανεμογεννητριών θα ανέρχεται σε 7 GW το 2030 από 3,6 GW που ήταν το 2020. Η αύξηση αυτή εκφράζεται σε 11.816 GWh καθαρής ηλεκτροπαραγωγής για τα φωτοβολταϊκά και σε 17.208 GWh για τις ανεμογεννήτριες για το έτος 2030 όπως απεικονίζεται και στο γράφημα της Εικόνας 3 που δείχνει την αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στην καθαρή παραγωγή από το 2020 έως το 2030.



ΕΙΚΟΝΑ 4: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΩΝ ΑΠΕ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ ΤΗΝ ΠΕΡΙΟΔΟ 2020-2030 [10]

Επίσης, ένας ακόμα παράγοντας που προβλέπεται να παίξει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη του ενεργειακού συστήματος έως το 2030 είναι η προβλεπόμενη ανάπτυξη στην εγκατάσταση νέων φωτοβολταϊκών σε επίπεδο δικτύου διανομής με έμφαση στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Η εγκατεστημένη ισχύς των νέων αυτών μονάδων αναμένεται να φτάσει τα 600MW στην ελληνική επικράτεια κυρίως μέσω προγραμμάτων ενεργειακού συμψηφισμού. Η συγκεκριμένη ανάπτυξη αναμένεται να βοηθηθεί από τις νέες δυνατότητες που θα προσφέρονται στο τεχνολογικό κομμάτι και σε επίπεδο κανονιστικού πλαισίου.[10]

Τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζονται ως τεχνολογίες που θα παίξουν καθοριστικό ρόλο στον μετασχηματισμό του συστήματος παραγωγής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό ψηφίστηκε το 2022 στην Ελλάδα νομοθετικό πλαίσιο το οποίο διευκολύνει και καθορίζει το ποια θα είναι η διαδικασία που πρέπει να ακολουθηθεί για την αδειοδότηση και την κατασκευή έργων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (ΣΑΕ). Το συγκεκριμένο νομοθετικό πλαίσιο περιλαμβάνει επίσης των εκσυγχρονισμό της αδειοδοτικής διαδικασία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ώστε να επιταχυνθεί η ανάπτυξη τους.[11]

1.3.2 Προώθηση της ηλεκτροκίνησης στην Ελλάδα

Η προώθηση της ηλεκτροκίνησης αποτελεί βασικό πυλώνα στην προσπάθεια επίτευξης των στόχων που προβλέπει το Ε.Σ.Ε.Κ, καθώς το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του τομέα των μεταφορών είναι αρκετά ισχυρό. Το υψηλό κόστος αγοράς των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε συνδυασμό με τις ιδιομορφίες που παρουσιάζει η αγορά στην Ελλάδα και την αγοραστική δυνατότητα των κατοίκων δυσχεραίνουν την προσπάθεια διείσδυσης και ανάπτυξης της ηλεκτροκίνησης. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό καθώς τα αμιγώς ηλεκτρικά και τα Plug-In υβριδικά οχήματα κατείχαν μερίδιο σε ποσοστό μόλις 0,33% της συνολικής αγοράς το 2019. Για τους παραπάνω λόγους, είναι αναγκαίο να γίνουν προσπάθειες περαιτέρω προώθησης και ανάπτυξης της συγκεκριμένης αγοράς. Έτσι έχει συσταθεί μια διυπουργική επιτροπή για την υλοποίηση αυτής της προσπάθειας. Σκοπός της επιτροπής είναι η δημιουργία σχεδίου για την παροχή κινήτρων, την διαμόρφωση ρυθμιστικού πλαισίου και τον καθορισμό της χωροταξίας για τις υποδομές φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων.

Τα κίνητρα που αποσκοπούν στο να κάνουν πιο ελκυστική την αγορά ηλεκτρικών οχημάτων διακρίνονται σε αυτά που παρουσιάζουν καθαρά οικονομικό χαρακτήρα και περιλαμβάνουν επιδότηση στην τιμή αγοράς, φορολογικές απαλλαγές καθώς και έκπτώσεις σε προγράμματα ασφάλισης και τα διόδια. Παράλληλα δίνονται κίνητρα και ως προς την χρήση των οχημάτων με την καθημερινή κυκλοφορία στα αστικά κέντρα μεγάλων πόλεων, την ελεύθερη στάθμευση σε περιοχές με ελεγχόμενη στάθμευση και διευκόλυνση δημιουργίας υποδομών φόρτισης. Επίσης ξεχωριστά κίνητρα παρέχονται στις επιχειρήσεις ώστε να εντάξουν στον στόλο τους οχήματα χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών. Τα συγκεκριμένα μέτρα βαδίζουν προς την κατεύθυνση της

αύξησης του μεριδίου των ηλεκτρικών οχημάτων στην ελληνική αγορά σε 8,7% επί των νέων ταξινομήσεων εντός 5 ετών και την επιπρόσθετη αύξηση ως το 2030 για το οποίο έχουν εκπονηθεί δύο σενάρια εκτίμησης της διείσδυσης.

Το Σενάριο Α που χαρακτηρίζεται και ως σενάριο αναφοράς περιλαμβάνει τα εξής:

- Αύξηση της αγοράς καινούργιων αυτοκινήτων από 103.431 το 2018 σε 275.133 το 2030 το οποίο μεταφράζεται σε ετήσια αύξηση από 8% μέχρι 11% της συνολικής αγοράς.
- Αύξηση στον αριθμό των επιβατικών BEV-PHEV από 315 το 2018 σε 66.371 το 2030 το οποίο αποτελεί μια αρκετά μεγάλη αύξηση.
- Το ποσοστό των επιβατικών BEV-PHEV επί της ετήσιας αγοράς προβλέπεται να αυξηθεί από 0,3% που ήταν το 2018 σε 24,1% έως το 2030

Το Σενάριο Β χαρακτηρίζεται ως σενάριο εμπροσθοβαρές με οικονομική ανάπτυξη και αυξημένα μέτρα πολιτικής και όπως θα φανερωθεί και από τα δεδομένα είναι ένα πιο φιλόδοξο σενάριο περιλαμβάνει τα παρακάτω:

- Η αύξηση στην αγορά των καινούργιων επιβατικών αυτοκινήτων παραμένει ίδια με τον ρυθμό που αυξάνεται στο Σενάριο Α δηλαδή από 103.431 το 2018 σε 275.133 το 2030 με ετήσια αύξηση σε ποσοστό από 8% μέχρι 11% .
- Αύξηση στον αριθμό των επιβατικών BEV-PHEV από 315 το 2018 σε 82.422 έως το 2030.
- Το ποσοστό των επιβατικών BEV-PHEV επί της ετήσιας αγοράς προβλέπεται να αυξηθεί από 0,3% που ήταν το 2018 σε 30% έως το 2030 [10]

Κεφάλαιο 2: Προβλήματα του Δικτύου Διανομής και Μέθοδοι Αντιμετώπισης

2.1 Προβλήματα του Δικτύου Διανομής

Οι προσπάθειες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τον περιορισμό της κλιματικής αλλαγής, μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την απεξάρτηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τα ορυκτά καύσιμα έχουν οδηγήσει σε εκρηκτική αύξηση διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο πέρα από τα εξαιρετικά σημαντικά οφέλη που παρέχει η διείσδυση των τεχνολογιών αυτών φέρνει στο προσκήνιο και κάποιες προκλήσεις που δυσχεραίνουν αυτήν την προσπάθεια και είναι σημαντικό να επιλυθούν. Ειδικότερα η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κυρίως φωτοβολταϊκών σε οικίες και κάποιων μικρών ανεμογεννητριών με την μορφή διανεμημένης παραγωγής δηλαδή αποκεντρωμένα και πολύ κοντά στο φορτίο εμφανίζουν μια σειρά από προκλήσεις στο δίκτυο διανομής στο οποίο συνδέονται. Ο περιορισμός των προκλήσεων είναι σημαντικός καθώς προβλέπεται περαιτέρω αύξηση στην διείσδυση τέτοιου είδους διανεμημένης παραγωγής. Οι προκλήσεις που εντοπίζονται αφορούν την ευστάθεια, την αξιοπιστία και την βιωσιμότητα του δικτύου. Τα προβλήματα που προκύπτουν καθώς και κάποιοι από τους παράγοντες που τα προκαλούν αναλύονται παρακάτω.

2.1.1 Αβεβαιότητα Παραγωγής

Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει έχει να κάνει με την αβεβαιότητα στην παραγωγή που διέπει τις μονάδες παραγωγής ΑΠΕ. Πιο συγκεκριμένα τα φωτοβολταϊκά και οι αιολικοί σταθμοί χαρακτηρίζονται ως μεταβλητής παραγωγής λόγω της αβεβαιότητας και της μεταβλητότητας που παρουσιάζουν στην παραγωγή τους καθώς αυτή εξαρτάται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν και την εποχή. Έτσι επηρεάζεται το ισοζύγιο ανάμεσα στην παραγωγή και την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να διατηρείται σε ισορροπία κάθε χρονική στιγμή σε πραγματικό χρόνο. Καθώς η παραγωγή των

συγκεκριμένων μονάδων υπόκειται σε προβλέψεις που αφορούν τις καιρικές συνθήκες που θα επικρατήσουν τις επόμενες μέρες ή ώρες, είναι πολύ πιθανό να υπάρξει απόκλιση ανάμεσα στην προβλεπόμενη και στην πραγματική παραγωγή. Αυτό δημιουργεί την ανάγκη για ευελιξία στο σύστημα μέσω ευέλικτων συμβατικών μονάδων που μπορεί να προγραμματιστεί η παραγωγή τους. Ο λόγος είναι ότι η καμπύλη της καθαρής ζήτησης μεταβάλλεται συνεχώς και η υπολειπόμενη ζήτηση θα πρέπει να καλυφθεί από άλλους πόρους του συστήματος που θα πρέπει να βρίσκονται σε εφεδρεία. Ειδικότερα η μεταβολή αυτή είναι ακόμα εντονότερη στην αυξημένη διείσδυση φωτοβολταϊκών λόγω του κύκλου παραγωγής που έχουν και εξαρτάται από τις ώρες που υπάρχει ηλιοφάνεια. [12]

2.1.2 Αντίστροφη Ροή Ισχύος

Η παραδοσιακή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας είχε σχεδιαστεί να γίνεται με γνώμονα την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας κατά κύριο λόγο από μεγάλες μονάδες παραγωγής με ορυκτά καύσιμα οποίες ήταν συγκεντρωμένες σε κάποιες περιοχές μακριά από τους τελικούς καταναλωτές που συνδέονταν στο δίκτυο διανομής. Επίσης η κατεύθυνση της ροής ισχύος ήταν από την παραγωγή προς τους καταναλωτές. Η στροφή προς την χρήση των ΑΠΕ και η αποκέντρωση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα, έχει φέρει την αύξηση της διανεμημένης παραγωγής από ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής. Αυτό έχει δώσει την δυνατότητα στους καταναλωτές να λειτουργούν πλέον και ως καταναλωτές αλλά και ως παραγωγοί ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως θα υπάρξει ροή ισχύος και προς τις δύο κατεύθυνσης δηλαδή από το δίκτυο προς του καταναλωτές και αντίστροφα, η οποία θα αλλάζει συνεχώς κατεύθυνση. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται αντίστροφη ροή ισχύος και μπορεί να συμβεί κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Αρχικά μπορεί να προέλθει όταν η παραγωγή μιας ή περισσότερων μονάδων ΑΠΕ διανεμημένης παραγωγής είναι αρκετά μεγαλύτερη από το φορτίο που υπάρχει ή όταν το φορτίο μειώνεται σε σημείο που εμφανίζεται υπερπαραγωγή, δημιουργώντας ροή ισχύος προς την αντίθετη κατεύθυνση από την φυσιολογική. Επιπρόσθετα, αντίστροφη ροή ισχύος εμφανίζεται στην περίπτωση της ροής ενός ρεύματος σφάλματος προς την αντίθετη κατεύθυνση από την κανονική. [13]

2.1.3 Διακύμανση Τάσης

Η διατήρηση της τάσης εντός των επιθυμητών ορίων αποτελεί εξαιρετικά σημαντική συνθήκη για την αξιόπιστη λειτουργία του συστήματος διανομής. Μια συχνά παρατηρούμενη επίπτωση με την σύνδεση στο δίκτυο μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και πιο συγκεκριμένα φωτοβολταϊκών είναι τα προβλήματα υπέρτασης στο σημείο σύνδεσης των μονάδων με το δίκτυο. Στα περισσότερα δίκτυα διανομής, οι διακόπτες μεταγωγής υπό φορτίο (on load tap changers) στους μετασχηματιστές του υποσταθμού χρησιμοποιούνται παραδοσιακά από τους διαχειριστές του δικτύου για τον έλεγχο της

τάσης και την διατήρηση της εντός των επιθυμητών ορίων. Ωστόσο η υψηλή παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά συνήθως συμπίπτει με χαμηλή ζήτηση από τα οικιακά φορτία. Αυτή η κατάσταση μπορεί να δημιουργήσει αύξηση της τάσης στο σημείο σύνδεσης η οποία να υπερβαίνει τα αποδεκτά όρια της τάσης. Επίσης με την διεύθυνση των φωτοβολταϊκών μια αλλαγή στον διακόπτη υπό φορτίο δεν αρκεί για να διατηρείται σε αποδεκτό επίπεδο η τάση. Επιπρόσθετα και συγκεκριμένα για τα φωτοβολταϊκά μια παροδική συννεφιά μπορεί να προκαλέσει σημαντική μείωση της παραγωγής με αποτέλεσμα τον υποβιβασμό της τάσης καθώς η παραγωγή των φωτοβολταϊκών δεν αυξάνει πλέον το επίπεδο της τάσης.[14]

2.1.4 Συμφόρηση Δικτύου

Η συμφόρηση στο δίκτυο είναι ένα ακόμα ζήτημα που εμφανίζεται από την αυξημένη εγκατάσταση μονάδων διανεμημένης παραγωγής στο δίκτυο διανομής. Παράλληλα, η ενσωμάτωση ευέλικτων φορτίων όπως τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αλλά και αντλίες θερμότητας συμβάλλουν σε αυτό. Για τα δίκτυα διανομής το πρόβλημα αναγνωρίζεται από τεχνικής πλευράς καθώς οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος είναι οι ίδιες για όλο το δίκτυο. Η συμφόρηση στο δίκτυο διανομής προκύπτει από την δυνατότητα των καταναλωτών να δρουν και ως παραγωγοί όπως αναφέρθηκε. Η εγκατάσταση και σύνδεση σημαντικού αριθμού μονάδων όπως φωτοβολταϊκά στις στέγες των σπιτιών και ηλεκτρικών οχημάτων προκαλεί αντίστροφη ροή ισχύος. Αυτό συμβαίνει κυρίως τις ώρες που η παραγωγή είναι αρκετά αυξημένη σε σχέση με την κατανάλωση και σε ώρες αιχμής. Επίσης το συγκεκριμένο πρόβλημα το αντιμετωπίζουν οι διαχειριστές του δικτύου και όταν ένας μεγάλος αριθμός φορτίων όπως ηλεκτρικά αυτοκίνητα και αντλίες θερμότητας αντλούν ηλεκτρική ενέργεια ταυτόχρονα από το δίκτυο. Αντίστοιχα και όταν τέτοιου είδους ευέλικτα φορτία λειτουργούν με ασυνήθιστο τρόπο. Έτσι η ποσότητα της ισχύος που καλείται να διαχειριστεί το σύστημα διανομής είναι αρκετά αυξημένη δημιουργώντας ρεύματα τα οποία μπορεί να είναι μεγαλύτερα από τα επιτρεπτά όρια μεταφοράς των γραμμών. Αυτό οδηγεί σε καταπόνηση του εξοπλισμού του δικτύου, των γραμμών, των καλωδίων, των μετασχηματιστών και των ζυγών με πιθανότητα να υπερβούν το θερμικό του όριο.[15,16]

2.1.5 Απώλειες στις γραμμές του δικτύου

Οι απώλειες των γραμμών μεταφοράς είναι ανάλογες του τετραγώνου του ρεύματος που ρέει διάμεσο της γραμμής. Παράλληλα με αυτό η διεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και ειδικότερα αυτόν με μεταβλητή παραγωγή δημιουργούν αντίστροφη ροή ισχύος όπως προαναφέρθηκε. Ο συνδυασμός αυτός μπορεί να προκαλέσει αύξηση των απωλειών ισχύος σε περίπτωση αυξημένης αντίστροφης ροής. Συνεπώς η πολύ αυξημένη διεύθυνση τέτοιων μορφών παραγωγής ενέργειας στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης μπορεί να προκαλέσει αύξηση των απωλειών. Επίσης οι απώλειες στην γραμμή μπορεί να

ελαχιστοποιηθούν αν η ισχύς που εγχέεται από τα φωτοβολταϊκά είναι ίση με την ισχύς που καταναλώνεται από τα φορτία. Κάθε περεταίρω αύξηση της ισχύος από τα φωτοβολταϊκά θα έχει ως αποτέλεσμα την αντίστροφη ροή ισχύος και άρα την αύξηση των απωλειών στις γραμμές. [17,18]

2.2 Αντιμετώπιση των Προβλημάτων στο Δίκτυο Διανομής

Προκειμένου να αξιοποιηθούν στο μέγιστο δυνατό βαθμό τα πλεονεκτήματα της διείσδυσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διανεμημένης παραγωγής είναι σημαντικό να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα που σχετίζονται με την ενσωμάτωση των συγκεκριμένων τεχνολογιών στο δίκτυο διανομής. Οι τρόποι αντιμετώπισης που προτείνονται περιλαμβάνουν στρατηγικές και τεχνολογίες που στοχεύουν στην βελτίωση της αξιοπιστίας και σταθερότητας του δικτύου μέσω του προγραμματισμού των ωρών λειτουργίας των φορτίων και της φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων καθώς και την βελτίωση της λειτουργίας των διανεμημένων μονάδων με την αποθήκευση της παραγόμενης ενέργειας.

2.2.1 Έξυπνο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

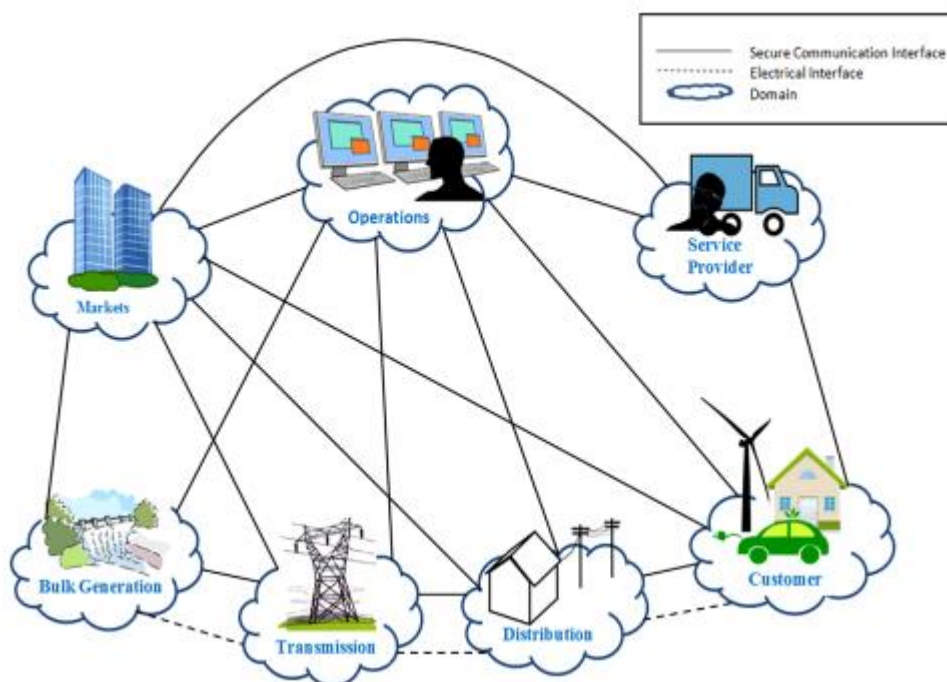
Τα συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζουν σημαντικές προκλήσεις λόγω της ευρείας έρευνας και προσπάθειας που αφορά την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και επεκτείνεται σε ένα ευρύ φάσμα κατευθύνσεων. Έτσι η μεταμόρφωση του υπάρχοντος δικτύου αποτελεί σημαντική προϋπόθεση. Η τεχνολογία του έξυπνου ή ευφυούς δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας (SG) μπορεί να υποστηρίξει την αυξανόμενη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο μελλοντικό δίκτυο. Το έξυπνο δίκτυο (SG) έχει οριστεί από την Ευρωπαϊκή τεχνολογική πλατφόρμα για τα έξυπνα δίκτυα ως ένα δίκτυο ηλεκτρισμού που μπορεί να ενσωματώνει έξυπνα όλες τις ενέργειες των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι σε αυτό, τους παραγωγούς, τους καταναλωτές και τους παραγωγούς/καταναλωτές με σκοπό την βιώσιμη, οικονομική και ασφαλή παροχή ηλεκτρικής ενέργειας.

Αξίζει να σημειωθεί ότι τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ήταν πάντα "έξυπνα", ειδικά στο επίπεδο της μεταφοράς. Το επίπεδο της διανομής ωστόσο, βιώνει μια εξέλιξη που απαιτεί να γίνει εξυπνότερο με στόχο:

- Την διευκόλυνση της διείσδυσης διανεμημένης παραγωγής σε υψηλότερα επίπεδα η οποία σχετίζεται κυρίως με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- Να επιτρέπει την διαχείριση της ενέργειας σε τοπικό επίπεδο με την αλληλεπίδραση με τους καταναλωτές μέσω έξυπνων μετρητικών συστημάτων

- Να εκμεταλλευτεί τις τεχνολογίες του δικτύου μεταφοράς με στόχο να προσφέρουν μεγαλύτερο επίπεδο ασφάλειας, ποιότητας και βιωσιμότητας

Έτσι το δίκτυο διανομής μετατρέπεται από ένα παθητικό σε ένα ενεργό δίκτυο. Με αυτό το τύπο του δικτύου διευκολύνει την διεξόδηση μονάδων ΑΠΕ διανεμημένης παραγωγής, αποθηκευτικών συστημάτων καθώς πλέον η ροή της ισχύος και των πληροφοριών θα επιτρέπεται και προς τις δύο κατεύθυνσης. Επιπρόσθετα θα συνδέεται με αποδοτικό τρόπο η παραγωγή με την κατανάλωση και θα επιτρέπεται να παίρνονται αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο και στις δύο πλευρές λόγω και της ενσωμάτωσης τεχνολογιών πληροφοριών και τηλεπικοινωνιών που παίζουν σημαντικό ρόλο.[19].



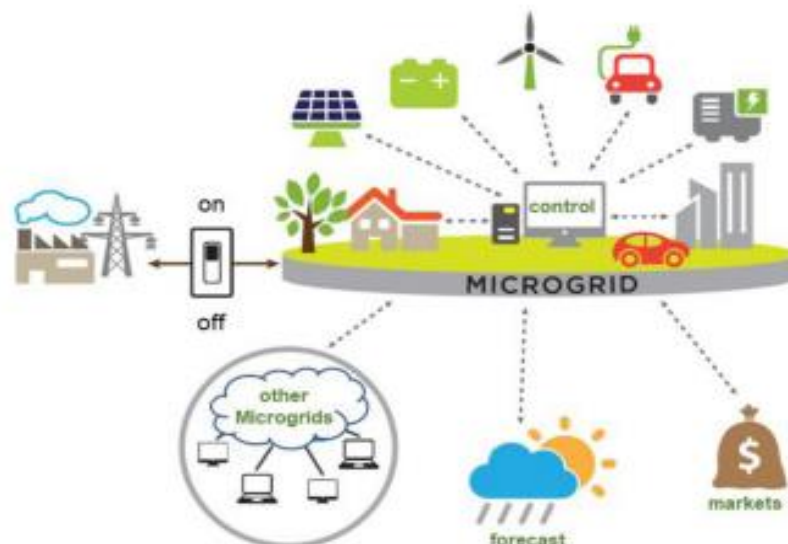
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ ΤΟΜΕΩΝ ΣΤΟ ΕΞΥΠΝΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΔΙΚΤΥΟ [20]

2.2.2 Μικροδίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

Το μικροδίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας (MG) χαρακτηρίζεται σύμφωνα με το Διεθνές συμβούλιο για τα μεγάλα ηλεκτρικά συστήματα (CIGRE), ως συστήματα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας που περιλαμβάνουν μονάδες διανεμημένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με έμφαση στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αποθηκευτικά συστήματα και ελεγχόμενα φορτία. Ο συγκεκριμένος τύπος δικτύου μπορεί να έχει είτε νησιδοποιημένη λειτουργία δηλαδή απομονωμένη από το κυρίως δίκτυο ενδεχομένως κατά την διάρκεια κάποιας βλάβης είτε να λειτουργεί συνδεδεμένο με το κυρίως δίκτυο.[21] Η κατηγοριοποίηση τους μπορεί να γίνει με βάση την λειτουργία τους και το μέγεθος. Με βάση το μέγεθος χωρίζονται σε νανοδίκτυο και πικοδίκτυο, με το πρώτο να περιλαμβάνει διανεμημένη παραγωγή και βιομηχανικούς καταναλωτές και το δεύτερο επίσης διανεμημένη παραγωγή αλλά

οικιακούς καταναλωτές. Το μικροδίκτυο μπορεί να χαρακτηριστεί ως μικρό τμήμα του δικτύου διανομής με χαμηλή ή μέση τάση. Η δυνατότητα του ελέγχου στην οποία βασίζεται η οργάνωση ενός μικροδικτύου (MG) είναι σημαντικό στοιχείο διαχωρίζοντας το από το υπάρχων δίκτυο διανομής και προσφέρει σημαντικά πλεονεκτήματα.

Από την μεριά των καταναλωτών το μικροδίκτυο προσφέρει τοπική αξιοπιστία, μειώνει τις εκπομπές και βελτιώνει την ποιότητα ισχύος μέσω της υποστήριξης στη τάση, μειώνοντας επίσης το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Από την πλευρά των διαχειριστών του δικτύου η μικρή κλίμακας πηγές διανεμημένης παραγωγής μπορεί να μειώσουν την ζήτηση στις εγκαταστάσεις διανομής και μεταφοράς. Επίσης οι μονάδες διανεμημένης παραγωγής που θα είναι εγκατεστημένες κοντά στην ζήτηση θα μειώσουν την ροή ισχύος στις υποδομές του δικτύου διανομής. Επιπλέον το μικροδίκτυο μπορεί να προσφέρει υποστήριξη σε χρονικές στιγμές όπου επιβαρύνεται το δίκτυο από συμφόρηση. [16]



ΕΙΚΟΝΑ 6: ΔΟΜΗ ΕΝΟΣ ΜΙΚΡΟΔΙΚΤΥΟΥ [22]

2.2.3 Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας έχει προταθεί σαν μια ενδεχόμενη λύση για τον περιορισμό των προβλημάτων που προκαλεί η μετάβαση από τον παραδοσιακό τρόπο παραγωγής στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες ΑΠΕ διανεμημένης παραγωγής. Η αποθήκευση ενέργειας σε οικιακό επίπεδο γίνεται όλο και πιο δημοφιλής λόγω της πιθανής θετικής συνεισφοράς για την τεχνική λειτουργία του δικτύου διανομής και της οικονομικής απόδοσης των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Τα πλεονεκτήματα της αποθήκευσης για το δίκτυο διανομής είναι πολύ σημαντικά. Έτσι αρχίζει να

αναγνωρίζεται ως πολύ σημαντικός παίκτης από τους ρυθμιστές και λειτουργούς του δικτύου ως αποτέλεσμα των διαφορετικών εφαρμογών που μπορούν να προσφέρουν στο σύστημα.[23] Ωστόσο, η ενσωμάτωση των συστημάτων στο δίκτυο διανομής θα προαπαιτεί να έχουν κάποια συγκεκριμένα χαρακτηριστικά. Το σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες είναι ένας τύπος ο οποίος ικανοποιεί τις απαιτήσεις αυτές. Τα χαρακτηριστικά και οι απαιτήσεις αυτές είναι η υψηλή πυκνότητα ενέργειας, η αποδοτικότητα και η φιλικότητα προς το περιβάλλον. Επίσης η γρήγορη απόκριση με την παροχή ισχύος και η δυνατότητα ελέγχου, χαρακτηριστικά που έχουν τα συστήματα μπαταριών κάνουν ακόμα πιο ελκυστική την χρήση τους.[24]

Σε ότι έχει να κάνει με τα πλεονεκτήματα που φέρνει στο δίκτυο μέσω του ελέγχου της κατάστασης φόρτισης το σύστημα αποθήκευσης μπαταριών είναι η αποθήκευση ενέργειας σε περιόδους με μεγαλύτερο φορτίο για την χρήση του σε περιόδους αυξημένης ζήτησης. Η λειτουργία με αυτό τον τρόπο βελτιώνει τα οικονομικά και την αξιόπιστη λειτουργία του δικτύου. Παράλληλα στο επίπεδο των καταναλωτών η χρήση αποθηκευτικών μέσων είτε μπαταριών είτε κάποιου ηλεκτρικού οχήματος (EV), ελαττώνει το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας του καταναλωτή. Αυτό επιτυγχάνεται αποθηκεύοντας ενέργεια σε περιόδους με χαμηλή τιμή και αξιοποιώντας την όταν η τιμή είναι υψηλή[25]

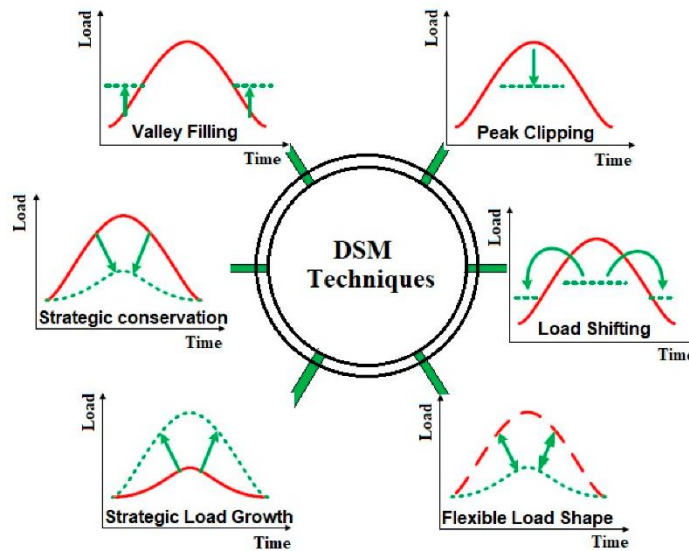
2.2.4 Διαχείριση Ζήτησης Ενέργειας

Η διαχείριση ζήτησης ενέργειας (DSM) μπορεί να αποτελέσει σημαντικό παράγοντα στην μετάβαση σε ένα ενεργειακά αποδοτικό δίκτυο. Η έννοια της διαχείρισης ζήτησης ενέργειας (DSM) περιλαμβάνει όλες τις ενέργειες για την αλλαγή του προφίλ ζήτησης των καταναλωτών με σκοπό την εξισορρόπηση της διαφοράς μεταξύ της ζήτησης και της παραγωγής βοηθώντας την αποδοτικότερη ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο διανομής. [26] Σύμφωνα με το Ινστιτούτο ερευνών ηλεκτρικής ενέργειας (EPRI) η διαχείριση ζήτησης ενέργειας (DSM) ορίζεται ως η εφαρμογή, ο προγραμματισμός και η επίβλεψη ενεργειών που έχουν σκοπό να επηρεάσουν την χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές, με τέτοιο τρόπο ώστε να αλλάξουν την καμπύλη φορτίου που αφορά της επιχείρησης κοινής ωφέλειας καθώς επίσης και το μοτίβο χρήσης ως προς την ώρα.[27]

Η εφαρμογή της διαχείρισης ζήτησης ενέργειας (DSM) μπορεί να εφαρμοστεί τόσο σε οικιακές όσο και σε επαγγελματικές εγκαταστάσεις. Ωστόσο το μεγαλύτερο μέρος της ζήτησης ισχύος προέρχεται από τα οικιακά προφίλ, το οποίο αντιστοιχεί στο 40% του συνόλου των προφίλ ζήτησης. Επίσης τα φορτία των οικιακών εγκαταστάσεων είναι περισσότερο ευέλικτα στις αλλαγές από ότι τα επαγγελματικά, έτσι η ενσωμάτωση της διαχείρισης ζήτησης ενέργειας (DSM) σε οικιακές εγκαταστάσεις έχει μεγαλύτερη απόδοση και μεγιστοποιεί τα πλεονεκτήματα που προσφέρει. Η διαδικασία μεταβολής του σχήματος των φορτίων χωρίζεται σε έξι διαφορετικές

τεχνικές με οδηγό την καμπύλη ζήτησης φορτίου που είναι άμεσα συνδεδεμένη με την λειτουργία του δικτύου. Οι έξι τεχνικές είναι αυτές που περιγράφονται παρακάτω και φαίνονται στην Εικόνα 4.[21]

- **Περικοπή φορτίου αιχμής (Peak Clipping):** Η συγκεκριμένη τεχνική χρησιμοποιείται για την μείωση των αιχμών ζήτησης κατά τις ώρες αιχμής. Η αποδοτική χρήση της μέθοδος μειώνει τις πιθανότητες της ένταξης επιπλέον μονάδων παραγωγής και σε συνδυασμό με την παραγωγή από μονάδες διανεμημένης παραγωγής εξισορροπεί το φορτίο και μειώνει επιπλέον τις αιχμές ζήτησης.
- **Γέμισμα των κοιλάδων (Valley Filling):** Η τεχνική γεμίσματος των κοιλάδων μειώνει την διαφορά ανάμεσα στην αιχμή και στην κοιλάδα που δημιουργείται στην καμπύλη φορτίου λόγω της διαφορετικής ζήτησης. Επίσης μειώνει την ζήτηση των φορτίων γεμίζοντας την κοιλάδα με φορτία που έχουν περικοπή.
- **Μετατόπιση φορτίου (Load Shifting):** Αποτελεί την τεχνική που χρησιμοποιείται περισσότερο στην διαχείριση ζήτησης ενέργειας. Χαρακτηρίζεται ως μια αποδοτική τεχνική που συμπεριλαμβάνει τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων και βασίζεται στην μετακίνηση των φορτίων από ώρες αιχμής σε ώρες που βρίσκονται εκτός αυτής
- **Στρατηγική εξοικονόμηση (Strategic conservation):** Με την παρούσα τεχνική μειώνεται η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται με την αποδοτικότερη κατανάλωση της ενέργειας.
- **Αύξηση του φορτίου (Load Growth):** Με αυτή την στρατηγική ενθαρρύνονται οι καταναλωτές να αυξήσουν κατανάλωση τους μέχρι ενός ορισμένου σημείου ώστε να διασφαλιστεί η ευστάθεια και η ομαλή λειτουργία του δικτύου.
- **Ευέλικτο σχήμα φορτίου (Flexible Load Shape):** Η τεχνική του ευέλικτου σχήματος φορτίου κυρίως διασφαλίζεται η αξιοπιστία ενός έξυπνου δικτύου (SG). Οι εταιρείες παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αναλύουν το προφίλ των καταναλωτών ώστε να αναγνωρίσουν ποιοι από τους καταναλωτές διαθέτουν ευέλικτα φορτία. Οι καταναλωτές συμμετέχουν σε προγράμματα επιβράβευσης για τον έλεγχο ή την περικοπή των φορτίων του κατά τις ώρες αιχμής.[28]



ΕΙΚΟΝΑ 7: ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (DSM) [29]

Με την ενσωμάτωση της διαχείρισης ζήτησης ενέργειας (DSM) στο δίκτυο μπορούν να επιτευχθούν σημαντικά οφέλη και πλεονεκτήματα που είναι τα εξής:

- Εξασφαλίζει την αξιόπιστη παροχή ενέργειας προς τους καταναλωτές
- Υποστηρίζει το δίκτυο ως προς τον περιορισμό της παραβίασης των ορίων της τάσης στους πιο ευάλωτους τροφοδοτητές του δικτύου
- Μειώνει τις αιχμές της ζήτησης το οποίο βοηθάει στην αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών προβλημάτων
- Μπορεί να βελτίωση τα οικονομικά των καταναλωτών και των υπηρεσιών κοινής ωφέλειας ταυτόχρονα [27]

2.2.5 Συστήματα διαχείρισης ενέργειας

Τα συστήματα διαχείρισης ενέργειας (EMS) έχουν προταθεί για χρήση στο ηλεκτρικό σύστημα για να βελτιώσουν την λειτουργία των υποδομών του ηλεκτρικού δικτύου και να προσφέρουν υποστήριξη στους διαχειριστές του δικτύου ώστε να βελτιώσουν τις αποφάσεις τους. Κάποια βασικά χαρακτηριστικά των συστημάτων διαχείρισης ενέργειας είναι η επίβλεψη, ο έλεγχος του δικτύου, η βελτιστοποίηση των ρών ισχύος καθώς και το ότι επιτρέπει στους καταναλωτές να έχουν ενεργό ρόλο σε αυτό. Οι βασικοί στόχοι του μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε διάφορες κατηγορίες όπως η βελτίωση της απόδοσης ενέργειας, η διαχείριση του προφίλ της ζήτησης, η βελτίωση του κόστους και η μείωση των εκπομπών ρύπων.

Στην περίπτωση του μικροδίκτυου, η ανάπτυξη ενός κατάλληλου συστήματος διαχείρισης ενέργειας είναι ακόμα πιο σημαντική. Ο λόγος είναι η ανάγκη για σωστή διαχείριση της αβεβαιότητας λόγω της παραγωγής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας καθώς και της ζήτησης ώστε να υπάρχει ομαλή λειτουργία του δικτύου. Για τον λόγο αυτό έχουν γίνει αρκετές προσεγγίσεις συστημάτων διαχείρισης ενέργειας που περιλαμβάνουν διάφορους τύπους μικροδίκτυου όπως σε επίπεδο γειτονιών ή βιομηχανιών. Οι διάφορες τοπολογίες περιλαμβάνουν παραγωγή από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας συστήματα αποθήκευσης με τον συνηθέστερο τύπο να είναι οι μπαταρίες και διάφορους τύπους ηλεκτρικών φορτίων.[30]

Τα οικιακά συστήματα διαχείρισης ενέργειας HEMS (Home Energy Management Systems) είναι μια κατηγορία συστήματος διαχείρισης ενέργειας. Χαρακτηρίζεται ως εργαλείο για την εφαρμογή διαχείρισης ζήτησης ενέργειας το οποίο μπορεί να περικόψει ή να μετατοπίσει την ζήτηση με σκοπό να βελτιώσει την παραγωγή και την κατανάλωση ενέργειας του οικιακού συστήματος σεβόμενο την άνεση του καταναλωτή και λαμβάνοντας υπόψη την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας. Μέσω του οικιακού συστήματος διαχείρισης ενέργειας δίνεται η δυνατότητα για επικοινωνία μεταξύ των οικιακών συσκευών και των συσκευών της εταιρείας κοινής ωφέλειες για την ανταλλαγή πληροφοριών που είναι σημαντικές για την βελτίωση του χρονοδιαγράμματος της παραγωγής και της κατανάλωσης ενέργειας των οικιακών συσκευών. Το βέλτιστο χρονοδιάγραμμα λειτουργίας των συσκευών από κατάλληλους αλγορίθμους που χρησιμοποιούν τις πληροφορίες που ανταλλάσσονται. Μέσω της δυνατότητας που δίνεται για επικοινωνία και προς τις δύο κατεύθυνσης.[31]

Κεφάλαιο 3: Σύστημα ενεργειακής διαχείρισης

3.1 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η βελτίωση της λειτουργίας του δικτύου μέσω της διαχείρισης της ζήτησης και της παραγωγής των οικιακών καταναλωτών είναι ένα ζήτημα που στο οποίο έχει επικεντρωθεί τα τελευταία χρόνια η επιστημονική κοινότητα. Έτσι προτείνονται αρκετές υλοποιήσεις μεθόδων και αλγορίθμων που ενσωματώνουν διαφορές προσεγγίσεις διαχείρισης ζήτησης για την βελτίωση των οικονομικών και της λειτουργίας του δικτύου. Οι συγγραφείς στο [32] προτείνουν μια μέθοδο ελέγχου των θερμικών φορτίων των καταναλωτών με μια Game-Theoretic προσέγγιση της διαχείρισης ζήτησης ενέργειας (DSM) χωρίς να συμπεριλαμβάνουν την χρήση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας με μπαταρίες. Σκοπός της συγκεκριμένης προσέγγισης είναι η ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του μικροδίκτυου (MG) και η εξομάλυνση των ανταλλαγών ισχύος με το δίκτυο. Στο [33] επιδιώκεται επίσης με μια προσέγγιση με πολλαπλές συναρτήσεις στόχου για την ελαχιστοποίηση του λειτουργικού κόστους του μικροδίκτυου (MG), αλλά αυτή την φορά λαμβάνοντας υπόψιν και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Επίσης στοχεύει στην μεγιστοποίηση της βιωσιμότητας. Τα παραπάνω επιτυγχάνονται μέσω ενός σχήματος διαχείρισης ζήτησης ενέργειας με απόκριση ζήτησης για την διαχείριση του μικροδίκτυου (MG) μέσω του οποίου ελέγχεται η λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης με μπαταρίες και οι ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής.

Η διασφάλιση της σταθερότητας της τάσης του δικτύου αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την ευστάθεια του δικτύου για αυτό κάποιες μελέτες όπως στην [34] ενσωματώνουν στους αλγόριθμους διαχείρισης ζήτησης (DSM) την ικανότητα ελέγχου μέσω της άεργου ισχύος του μετατροπέα των φωτοβολταϊκών. Εξίσου σημαντικός παράγοντας είναι και οι απώλειες στο δίκτυο, για τον λόγο αυτό οι συγγραφείς του [35] χρησιμοποιούν έναν αλγόριθμο για πετύχουν την ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου. Μέσω του αλγορίθμου επιδιώκεται ο βέλτιστος προγραμματισμός της λειτουργίας των μονάδων παραγωγής, του κεντρικού συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, των ευέλικτων φορτίων του μικροδίκτυου (MG) καθώς επίσης και των αλλαγών

μεταγωγής υπό φορτίο (OLTC) των μετασχηματιστών ώστε να επιτευχθεί ο στόχος. Παράλληλα με τον βασικό στόχο επιτυγχάνεται έλεγχος της τάσης και εξομάλυνση των ροών ισχύος. Η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου αποτελεί επίσης στόχο κλειδί της έρευνας στο [36]. Ωστόσο στην παρούσα μελέτη παρουσιάζεται μια μέθοδος απόκρισης ζήτησης που βασίζεται στον απευθείας έλεγχο φορτίων. Τα φορτία που διαχειρίζεται κατά την συγκεκριμένη προσέγγιση είναι θερμικά φορτία όπως το κλιματιστικό και ο θερμοσίφοντας. Επίσης ελέγχεται ο προγραμματισμός της φόρτισης και αποφόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων (EVs) και του κεντρικού συστήματος αποθήκευσης. Η μελέτη για να διατηρήσει την σταθερότητα του δικτύου λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα της παραγωγής των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι συγγραφείς του [37] βασιζόμενη σε μια μέθοδο βελτιστοποίησης προτείνουν ένα αλγόριθμο μέσω του οποίου προγραμματίζεται η φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων (EVs) σε ένα δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Ως στόχος της συγκεκριμένης προσέγγισης ορίζεται η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου και η βελτίωση του προφίλ τάσης. Η βελτίωση του προφίλ της τάσης του δικτύου και η αποφυγή της παραβίασης των ορίων που θέτουν οι διαχειριστές του δικτύου αποτελεί στόχο της προσέγγισης της έρευνας [37]. Οι συγγραφείς της [37] για να επιτύχουν τους στόχους προτείνουν μια στρατηγική έλεγχου των φορτίων ενός δικτύου διανομής χαμηλής τάσης βασισμένη στα κίνητρα ώστε να μπορέσουν να πετύχουν την μετατόπιση των φορτίων με τον κατάλληλο τρόπο. Στην μελέτη [38] προτείνεται ένας αλγόριθμος που εφαρμόζει ένα πρόγραμμα απόκρισης της ζήτησης βασισμένο στην επιβράβευση των καταναλωτών. Χρησιμοποιείται σε δίκτυα διανομής με ελεγχόμενα και μη ελεγχόμενα φορτία. Στόχος είναι η μείωση των αιχμών της ζήτησης που παρουσιάζονται κατά συγκεκριμένες περιόδους και παράλληλα η βελτίωση του προφίλ της τάσης του δικτύου.

3.2 Περιγραφή Αλγορίθμου

Η υλοποίηση του αλγορίθμου βελτιστοποίησης και των μαθηματικών σχέσεων που προτείνονται στην συγκεκριμένη διπλωματική προέκυψαν μετά από μελέτη και αναζήτηση σε παρεμφερείς μελέτες. Σε αυτή την διπλωματική το μαθηματικό μοντέλο που παρουσιάζεται αφορά στην υλοποίηση ενός κεντρικού συστήματος διαχείρισης ενέργειας σε ένα δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Το δίκτυο σε κάθε ζυγό περιλαμβάνει από ένα έξυπνο σπίτι με το κάθε ένα να αποτελείται από τα εξής στοιχεία:

- Υβριδικό σύστημα που αποτελείται από φωτοβολταϊκά και μπαταρίες
- Έναν αριθμό από ευέλικτες συσκευές
- Έναν αριθμό από μη ευέλικτες – σταθερές συσκευές

Ως ευέλικτες συσκευές ή φορτία χαρακτηρίζονται οι συσκευές εκείνες οι οποίες μπορούν να μετατοπίσουν την λειτουργία τους σε

μια διαφορετική χρονική στιγμή μέσα στην ημέρα, λαμβάνοντας υπόψη ωστόσο και την άνεση του χρήστη ως προς την αλλαγή του χρόνου λειτουργίας. Αντίστοιχα μη ευέλικτες συσκευές χαρακτηρίζονται εκείνες που η μετατόπιση της λειτουργίας του είναι πολύ δύσκολη ως ανέφικτη καθώς επηρεάζεται η άνεση του χρήστη.

Η προσέγγιση της συγκεκριμένης διπλωματικής έχει ως σκοπό τον έλεγχο κάθε οικιακής εγκατάστασης ξεχωριστά ως προς την λειτουργία του συστήματος αποθήκευσης μπαταριών και των ευέλικτων συσκευών. Ο έλεγχος αφορά στην μετατόπιση της λειτουργίας των φορτίων και του συστήματος των μπαταριών προς όφελος του δικτύου. Οι στόχοι που επιδιώκεται να επιτευχθούν είναι:

- Η ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος του δικτύου
- Η ελαχιστοποίηση της συμφόρησης του δικτύου
- Η ελαχιστοποίηση του ηλεκτρικού κόστους των παραγωγών-καταναλωτών και συνολικά του δικτύου
- Pareto μεταξύ της ελαχιστοποίησης των απωλειών ενεργού ισχύος και του ηλεκτρικού κόστους του δικτύου

3.3 Μαθηματικό Μοντέλο

Το μοντέλο της παρούσας διπλωματικής έχει υλοποιηθεί και προγραμματιστεί σε ένα σύστημα μαθηματικού προγραμματισμού και βελτιστοποίησης υψηλού επίπεδου που ονομάζεται GAMS. Το είδος του προγραμματισμού των μαθηματικών σχέσεων που επιλέχθηκε για το μοντέλο είναι μικτού ακέραιου τετραγωνικού προγραμματισμού MIQCP (Mix Integer Quadratically Constrained Programming).

3.3.1 Αντικειμενικές Συναρτήσεις

Ο στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (1) είναι η ελαχιστοποίηση των απωλειών του δικτύου διανομής χαμηλής τάσης.

$$\text{minimizing } OF1 = P_{losses} = \sum_t \sum_{i,j} g_{ij} (\theta_{t,i} - \theta_{t,j})^2 \quad (1)$$

Με βάση την ανάλυση ροής φορτίου συνεχούς ρεύματος (DC-OPF) ανά χρονική στιγμή που χρησιμοποιείται στην παρούσα προσέγγιση οι απώλειες ενεργού ισχύος υπολογίζονται ως εξής. Αρχικά στην εξίσωση χρησιμοποιείται το g_{ij} όπου αποτελεί την επιδεκτικότητα της γραμμής ij και υπολογίζεται από την σχέση $g_{ij} = \frac{r_{ij}}{r_{ij}^2 + x_{ij}^2}$. Με το r_{ij} και το x_{ij} να είναι η ωμική και η επαγωγική αντίσταση αντίστοιχα του κυκλώματος ij όπου το ij συμβολίζει τους δύο ζυγούς που ενώνει η κάθε γραμμή. Επίσης συμπεριλαμβάνεται στην σχέση υπολογισμού των

απωλειών το διάνυσμα φάσης της τάσης $\theta_{t,i}$ για κάθε χρονική στιγμή και για όλους του ζυγούς πλην του ζυγού αναφοράς στον οποίο ορίζεται να παίρνει την τιμή 0.[39] Μέσω του στόχου της συγκεκριμένης αντικειμενικής συνάρτησης δηλαδή την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος επιτυγχάνεται έμμεσα και η μείωση των ροών ενεργού ισχύος στο δίκτυο και κατ' επέκταση και η μείωση της συμφόρησης του. Επίσης βελτιώνεται και το προφίλ τάσης του δικτύου.

Ο στόχος της αντικειμενικής συνάρτησης (2) είναι η ελαχιστοποίηση των ροών ενεργού ισχύος ανάμεσα στους ζυγούς και κατ' επέκταση και σε όλο το δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Μέσω αυτής της προσέγγισης φιλοδοξείτε να μειωθεί η ροή ενεργού ισχύος στις γραμμές του δικτύου και να βελτιωθεί το προφίλ τάσης. Εξετάζοντας μια διαφορετική περίπτωση όπως αυτή της ελαχιστοποίησης των ροών ενεργού ισχύος στο δίκτυο έμμεσα πετυχαίνουμε και την μείωση των απωλειών ενεργού ισχύος στο δίκτυο και επίσης την μείωση της συμφόρησης του. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της ελαχιστοποίησης των ροών ενεργού ισχύος είναι υψωμένη στο τετράγωνο προκυμμένου να ελαχιστοποιηθούν οι υψηλές τιμές $P_{i,j,t}^{ij}$ μειώνοντας κατά αυτόν τον τρόπο την υψηλή συμφόρηση του δικτύου.[40]

$$\text{minimizing OF2} = P_{pf} = \sum_{i,j,t} P_{i,j,t}^{ij}{}^2 \quad (2)$$

Η συνάρτηση στόχου (3) εισάγεται με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας τόσο για κάθε οικιακή εγκατάσταση όσο και για το σύνολο του δικτύου. Ο υπολογισμός του συγκεκριμένου στόχου γίνεται με βάση την διαφορά ανάμεσα στην εγχεόμενη ενέργεια $E_{i,t}^{import}$ από το δίκτυο προς την κάθε οικιακή εγκατάσταση πολλαπλασιασμένη με την τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας και στην εξαγόμενη προς το δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια $E_{i,t}^{export}$ πολλαπλασιασμένη επίσης με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Το άθροισμα όλων των διαφορών για κάθε χρονική στιγμή και κάθε οικιακή εγκατάσταση υπολογίζει τον στόχο της αντικειμενικής συνάρτησης

$$\text{minimizing OF3} = \sum_{i,t} E_{i,t}^{import} * PC_t - E_{i,t}^{export} * SC \quad (3)$$

3.3.2 Περιορισμοί Ανάλυσης ροής φορτίου

Για την εισαγωγή της συνεχούς ανάλυσης φορτίου (DC OPF) που πραγματοποιείται στον αλγόριθμο χρησιμοποιήθηκαν οι παρακάτω μαθηματικές σχέσεις. Στην εξίσωση (4) ορίζεται ο υπολογισμός της ροής ενεργού ισχύος ανάμεσα στους ζυγούς i και j για κάθε χρονική στιγμή. Η ενεργός ισχύς που ρέει ανάμεσα στους δύο ζυγούς

συμβολίζεται με την μεταβλητή $P_{i,j,t}^{ij}$ που αποτελεί το διάνυσμα των προβλεπόμενων εγχύσεων και εξαγωγών σε όλους του ζυγούς του δικτύου εκτός του ζυγού αναφοράς. Επίσης μέσω αυτού προσδιορίζονται και τα διανύσματα φάσης τάσης $\theta_{i,t}^i, \theta_{j,t}^j$ για τον ζυγό i και j αντίστοιχα για κάθε χρονική στιγμή. Για την επίλυση της εξίσωσης χρησιμοποιείται και η αγωγιμότητα των γραμμών του δικτύου που συμβολίζεται με ως $b_{i,j}^{ij}$.

$$P_{i,j,t}^{ij} = b_{i,j}^{ij} * (\theta_{i,t}^i - \theta_{j,t}^j) \quad (4)$$

Η μαθηματική σχέση (5) υπολογίζει το ισοζύγιο ενεργού ισχύος για τον κάθε κόμβο ενός συγκεκριμένου ζυγού. Πιο συγκεκριμένα το άθροισμα των ρών $P_{i,j,t}^{ij}$ που είτε στέλνονται από τον ζυγό είτε φτάνουν σε αυτόν, θα πρέπει να είναι ίσο με την παραγόμενη ισχύς εφόσον καλυφθεί η ζήτηση. Η μεταβλητή $P_{g,t}^{gen}$ συμβολίζει την παραγωγή του ζυγού αναφοράς και η μεταβλητή $P_{i,t}^{grid}$ είτε την περίσσια της παραγωγής στον συγκεκριμένο ζυγό ή την ισχύς που υπολείπεται για την κάλυψη των φορτίων του συγκεκριμένου ζυγού. [41]

$$\sum_G P_{g,t}^{gen} - \frac{P_{i,t}^{grid}}{S_{base}} = \sum_j P_{i,j,t}^{ij} \quad (5)$$

3.3.3 Περιορισμοί Ισχύος

Το ισοζύγιο ισχύος αντιπροσωπεύει τις συνολικές συναλλαγές ισχύος ανάμεσα στο δίκτυο και το κάθε σπίτι που βρίσκεται σε κάθε ζυγό, δηλαδή είτε την ισχύ που λαμβάνει από το δίκτυο το κάθε σπίτι είτε την ισχύ που εγχέει το σπίτι στο δίκτυο. Για τον λόγο αυτό, ορίζεται αρχικά η μαθηματική εξίσωση (6) με βάση την οποία, οι ανταλλαγές ισχύος μεταξύ του δικτύου και του σπιτιού διακρίνονται σε θετικές και αρνητικές. Όπου, οι θετικές τιμές της μεταβλητής $P_{i,t}^{imp}$ συμβολίζουν την ροή ισχύος από το δίκτυο στο σπίτι και οι αρνητικές τιμές της μεταβλητής $-P_{i,t}^{exp}$ συμβολίζουν την ροή από το σπίτι στο δίκτυο.

$$P_{i,t}^{grid} = P_{i,t}^{imp} - P_{i,t}^{exp} \quad \forall i \neq 1 \quad (6)$$

Με την εισαγωγή της μαθηματικής σχέσης (7) υπολογίζεται η ενέργεια που λαμβάνει το κάθε σπίτι από το δίκτυο για κάθε χρονική στιγμή μέσω της μεταβλητής για την ισχύ $P_{i,t}^{imp}$. Η μεταβλητή $E_{i,t}^{import}$ στην παρακάτω μαθηματική σχέση συμβολίζει την ενέργεια που λαμβάνει το κάθε σπίτι από το δίκτυο.

$$E_{i,t}^{import} = \frac{P_{i,t}^{imp}}{4} \quad \forall i \neq 1 \quad (7)$$

Αντίστοιχα στην εξίσωση (8) υπολογίζεται η ενέργεια που εγχέεται από το κάθε σπίτι στο δίκτυο για κάθε χρονική στιγμή. Για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται η ισχύς έγχυσης $P_{i,t}^{exp}$ με την ενέργεια να συμβολίζεται με την μεταβλητή $E_{i,t}^{export}$.

$$E_{i,t}^{export} = \frac{P_{i,t}^{exp}}{4} \quad \forall i \neq 1 \quad (8)$$

Η εξίσωση (9) που εισάγει το ισοζύγιο ισχύος λαμβάνει υπόψη την συνολική κατανάλωση του κάθε σπιτιού. Επίσης συνυπολογίζεται η παραγωγή από τα φωτοβολταϊκά $P_{i,t}^{PV}$ καθώς και η φόρτιση $P_{i,t}^{ch}$ και αποφόρτιση $P_{i,t}^{disch}$ του συστήματος μπαταριών. Έτσι καθορίζεται η ζήτηση που υπάρχει από το δίκτυο εφόσον δεν ήταν δυνατόν να καλυφθεί ή η ισχύ που εγχέεται σε αυτό εφόσον καλυφθεί το φορτίο και υπάρχει περίσσεια χωρίς την δυνατότητα αποθήκευσης της. Η ανταλλαγή της ισχύος που αναφέρθηκε συμβολίζεται με την μεταβλητή $P_{i,t}^{grid}$.

$$P_{i,t}^{grid} = P_{i,t}^{const} + \sum_l^L (x_{i,t}^{op} * P_{i,l}^{flex}) + P_{i,t}^{ch} - P_{i,t}^{disch} - P_{i,t}^{PV}, \quad \forall i \neq 1 \quad (9)$$

3.3.4 Περιορισμοί Συστήματος Μπαταριών

Ο σημαντικότερος περιορισμός που χρησιμοποιείται για να μοντελοποιηθεί η λειτουργία του συστήματος μπαταριών αναφέρεται στην κατάσταση φόρτισης (State of Charge). Για να υπολογιστεί η κατάσταση φόρτισης αρχικά, υπολογίζεται στην εξίσωση (10) το ποσό της ενέργειας που είναι αποθηκευμένο στο σύστημα μπαταριών ($E_{i,t}^{BESS}$) κάθε χρονική στιγμή και για κάθε ζυγό. Αυτό θα είναι ίσο με το με το ποσό της αποθηκευμένης ενέργειας που είχε την ακριβώς προηγούμενη στιγμή $E_{i,t-1}^{BESS}$, συν το ποσό της ενέργειας που λαμβάνει κατά την φόρτιση $E_{i,t}^{BESS,ch}$, μείον το ποσό που δίνει κατά την αποφόρτιση $E_{i,t}^{BESS,disch}$. Λαμβάνοντας επίσης υπόψη την απόδοση της φόρτισης η^{Ch} και της εκ φόρτισης η^{disch} αντίστοιχα.

$$E_{i,t}^{BESS} = E_{i,t-1}^{BESS} + (E_{i,t}^{BESS,ch} * \eta^{Ch}) - \left(\frac{E_{i,t}^{BESS,disch}}{\eta^{disch}} \right) \quad \forall i \neq 1 \quad (10)$$

Έτσι στην εξίσωση (11) υπολογίζεται η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (State of Charge) για κάθε χρονική στιγμή. Μετριέται σε μονάδες επί της εκατό και υποδηλώνει την χωρητικότητα της μπαταρίας. Στην εξίσωση (11) η παράμετρος C_t^{BESS} παίρνει τιμή ίση με την συνολική χωρητικότητα της μπαταρίας

$$SoC_{i,t} = \left(\frac{E_{i,t}^{BESS}}{C_t^{BESS}} \right) * 100\% \quad \forall i \neq 1 \quad (11)$$

Η κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας $SoC_{i,t}$ δεν πρέπει να ξεπερνάει ένα άνω όριο φόρτισης $SoC_{i,t}^{max}$ και ένα κάτω όριο φόρτισης $SoC_{i,t}^{min}$ κάθε χρονική στιγμή t , όπως παρουσιάζεται στον περιορισμό της ανίσωσης (12).

$$SoC_{i,t}^{min} \leq SoC_{i,t} \leq SoC_{i,t}^{max} \quad (12)$$

Έπειτα στις εξισώσεις (13) και (14) υπολογίζεται η ισχύς φόρτισης και αποφόρτισης μέσω της ενέργειας φόρτισης και αποφόρτισης αντίστοιχα. Η ισχύς φόρτισης αντιστοιχεί στην μεταβλητή $P_{t,i}^{BESS,ch}$ και η ισχύς εκφόρτισης στην μεταβλητή $P_{t,i}^{BESS,disch}$.

$$P_{t,i}^{BESS,ch} = E_{i,t}^{BESS,ch} * 4 \quad \forall i \neq 1 \quad (13)$$

$$P_{t,i}^{BESS,disch} = E_{i,t}^{BESS,disch} * 4 \quad \forall i \neq 1 \quad (14)$$

Επιπρόσθετα για να διασφαλιστεί ότι δεν υπάρχει ανταλλαγή ισχύος μεταξύ του δικτύου και του συστήματος μπαταριών όταν το τελευταίο δεν είναι πλήρως φορτισμένο έχουν οριστεί οι παρακάτω μαθηματικές εξισώσεις. Αρχικά, στην εξίσωση (15) υπολογίζεται για κάθε χρονική στιγμή το σύνολο της ισχύος που εξάγει στο δίκτυο ή η συνολική ισχύς που εισάγει από αυτό. Αναλυτικότερα, ο υπολογισμός γίνεται συνυπολογίζοντας την παραγωγή από τις μονάδες των φωτοβολταϊκών $P_{i,t}^{PV}$ και την ζήτηση σε ισχύς του κάθε σπιτιού για κάθε χρονική στιγμή. Την ζήτηση του κάθε σπιτιού αποτελούν το άθροισμα της ισχύς των ευέλικτων φορτίων δηλαδή φορτίων που μπορούν να μετατοπιστούν ως προς την ώρα λειτουργίας. Επίσης η ζήτηση σε ισχύς των σταθερών φορτίων, φορτίων που δεν μετατοπίζονται ως προς τον χρόνο. Η ισχύς των σταθερών φορτίων συμβολίζεται με την παράμετρο $P_{i,t}^{const}$ και των ευέλικτων με την παράμετρο $P_{i,l}^{flex}$.

$$P_{t,i}^{home} = P_{i,t}^{const} + \sum_l^L (x_{i,t}^{op} * P_{i,l}^{flex}) - P_{i,t}^{PV} \quad \forall i \neq 1 \quad (15)$$

Στην μαθηματική σχέση (16) διαχωρίζονται οι τιμές που αντιστοιχούν στην εισαγωγή ισχύος από το δίκτυο και στην εξαγωγή σε αυτό που ορίστηκαν στην μαθηματική σχέση (15). Με τον τρόπο αυτό εξάγεται η ποσότητα της καθαρής ζήτησης, με άλλα λόγια η ζήτηση που δεν μπορεί να καλυφθεί από την παραγωγή των φωτοβολταϊκών ή η περίσσεια λόγω υψηλής παραγωγής των φωτοβολταϊκών μετά την κάλυψη της ζήτησης των φορτίων του κάθε σπιτιού για κάθε χρονική στιγμή. Η θετική μεταβλητή που συμβολίζει την ζήτηση ισχύος είναι $P_{t,i}^{home,pos}$ και η αρνητική που συμβολίζει την περίσσεια είναι η $-P_{t,i}^{home,neg}$.

$$P_{t,i}^{home} = P_{t,i}^{home,pos} - P_{t,i}^{home,neg} \quad \forall i \neq 1 \quad (16)$$

Στις ανισώσεις (17) και (18) καθορίζονται τα όρια στην ισχύς φόρτισης και εκφόρτισης για τις μπαταρίες. Αρχικά στην ανίσωση (17) το άνω όριο φόρτισης αποτελεί η περίσσεια ισχύος από την

παραγωγή των φωτοβολταϊκών για κάθε χρονική στιγμή. Με τον τρόπο αυτό εφόσον υπάρχει περίσσεια στην παραγωγή η μπαταρία θα φορτίσει το πολύ με αυτό το ποσό ισχύος, σε διαφορετική περίπτωση δεν θα φορτίσει καθόλου. Έτσι διασφαλίζεται ότι η μπαταρίες δεν θα φορτίζουν απευθείας από το δίκτυο.

$$P_{t,i}^{BESS,ch} < P_{t,i}^{home,neg} \forall i \neq 1 \quad (17)$$

Αντίστοιχα με την προηγούμενη ανίσωση στην (18) ορίζεται άνω όριο στην ισχύς εκφόρτισης των μπαταριών. Για να αποφευχθεί η απευθείας εκφόρτιση προς το δίκτυο ορίζεται ως όριο η καθαρή ζήτηση του σπιτιού εφόσον δεν καλυφθεί από την παραγωγή των φωτοβολταϊκών. Έτσι ή θα εξαχθεί από τις μπαταρίες το πολύ αυτό το ποσό ή δεν θα εκφορτιστούν καθόλου.

$$P_{t,i}^{BESS,disch} < P_{t,i}^{home,pos} \forall i \neq 1 \quad (18)$$

Ωστόσο κάθε χρονική στιγμή t και για κάθε ζυγό i τουλάχιστον μια από τις μεταβλητές $P_{t,i}^{BESS,ch}$ και $P_{t,i}^{BESS,disch}$ θα πρέπει να είναι μηδέν. Για να διασφαλιστεί η επιθυμητή λειτουργία εφαρμόστηκε η τεχνική Big M. Πιο συγκεκριμένα το M είναι ένας πολύ μεγάλος αριθμός της τάξεως του 10^6 ο οποίος πολλαπλασιάζεται με κατάλληλο τρόπο με την δυαδική μεταβλητή απόφασης $P_{t,i}^{BESS,bin}$ ώστε όταν η μεταβλητή είναι ίση με 1 να λειτουργεί η φόρτιση και όταν είναι ίση με 0 η εκφόρτιση όπως γίνεται αντιληπτό από τις (19) και (20). Η χρήση αυτής της τεχνικής αποσκοπεί στο να παραμείνει το πρόβλημα γραμμικό και επιπρόσθετα ο τόσο μεγάλος αριθμός M στο να μην υπερκαλύπτει τους προηγούμενους περιορισμούς φόρτισης και εκφόρτισης.

$$P_{t,i}^{BESS,ch} \leq M * P_{t,i}^{BESS,bin} \forall i \neq 1 \quad (19)$$

$$P_{t,i}^{BESS,disch} \leq M * (1 - P_{t,i}^{BESS,bin}) \forall i \neq 1 \quad (20)$$

3.3.5 Περιορισμοί Ευέλικτων Φορτίων

Τα ευέλικτα φορτία για να μοντελοποιηθεί η λειτουργία τους υπόκεινται σε μια σειρά από περιορισμούς. Αρχικά ο κυριότερος από αυτούς αφορά την διάρκεια λειτουργίας του κάθε φορτίου 1 σε κάθε ζυγό i . Στην εξίσωση (21) υλοποιείται ο περιορισμός της διάρκεια λειτουργίας κάθε ευέλικτου φορτίου, η οποία ορίζεται ως το άθροισμα των δυαδικών μεταβλητών κάθε φορτίου 1, για κάθε χρονική στιγμή t και για κάθε ζυγό i . Η δυαδική μεταβλητή $x_{i,l,t}^{op}$ παίρνει την τιμή 1, όταν το κάθε ευέλικτο φορτίο βρίσκεται σε λειτουργία και την τιμή 0 όταν δεν βρίσκεται σε λειτουργία. Ως $D_{i,l}$ ορίζεται η μεταβλητή που αντιστοιχεί στην διάρκεια λειτουργίας του κάθε ευέλικτου φορτίου σε κάθε ζυγό.

$$D_{i,l} = \sum_t^T x_{i,l,t}^{op}, \forall i \neq 1 \quad (21)$$

Ακολουθως, στις εξισώσεις (22) και (23) ορίζεται συγκεκριμένη χρονική στιγμή έναρξης και λήξης της λειτουργίας του κάθε ευέλικτου φορτίου με την βοήθεια των δυαδικών μεταβλητών $start_{i,l,t}$ και $end_{i,l,t}$ αντίστοιχα. Η δυαδική μεταβλητή $start_{i,l,t}$ παίρνει την τιμή 1 όταν το φορτίο ξεκινάει την λειτουργία του και 0 όταν δεν βρίσκεται σε λειτουργία. Επίσης η δυαδική μεταβλητή $end_{i,l,t}$ δέχεται την τιμή 1 την χρονική στιγμή που το φορτίο σταματάει την λειτουργία του και τις υπόλοιπες παίρνει την τιμή 0. Εξισώνοντας το άθροισμα των δύο αυτών μεταβλητών με το 1 διασφαλίζεται ότι η έναρξη και η λήξη θα είναι μία συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

$$\sum_t^T start_{i,l,t} = 1, \forall i \neq 1 \quad (22)$$

$$\sum_t^T end_{i,l,t} = 1, \forall i \neq 1 \quad (23)$$

Με την μαθηματική εξίσωση (24), εξασφαλίζεται η συνεχής και αδιάκοπη λειτουργία του κάθε ευέλικτου φορτίου καθ' όλη την διάρκεια της λειτουργίας του σε συνδυασμό και με τις δύο προηγούμενες εξισώσεις.

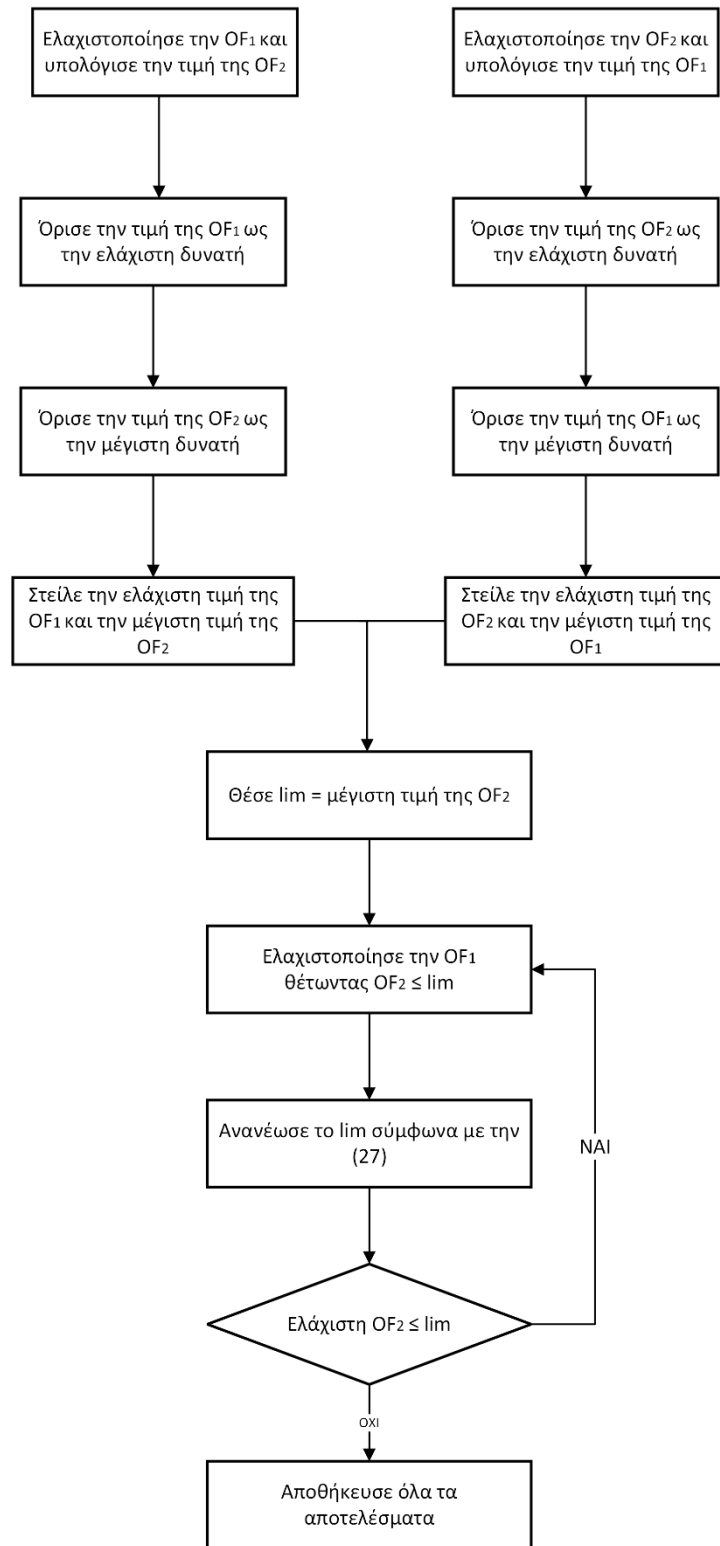
$$start_{i,l,t} - end_{i,l,t} = x_{i,l,t}^{op} - x_{i,l,t-1}^{op}, \forall i \neq 1, \forall t > 1 \quad (24)$$

Επιπλέον, καθορίζεται στον αλγόριθμο μια ζώνη άνεσης για τον χρήστη. Για τον λόγο αυτό ορίζεται ένα χρονικό διάστημα μέσα στο οποίο θα ξεκινάει και θα λήγει η λειτουργία των ευέλικτων φορτίων του κάθε καταναλωτή. Ως δεδομένο εισάγεται η πρώτη χρονική στιγμή κατά την οποία μπορεί να γίνει έναρξη λειτουργίας του φορτίου και η τελευταία χρονική στιγμή κατά την οποία θα πρέπει να είναι η τελευταία στιγμή λειτουργίας του ευέλικτου φορτίου και μετά να λήξει. Οι δύο παράμετροι που αντιστοιχούν σε αυτές τις χρονικές στιγμές είναι το $C_{l,i}^{start}$ για την έναρξη και το $C_{l,i}^{end}$ για την λήξη. Έχοντας δεδομένα για το μοτίβο λειτουργίας των συσκευών πριν την εφαρμογή του αλγορίθμου, δίνεται ένα περιθώριο + 20% στην χρονική στιγμή έναρξης και λήξης σε σχέση με αυτό που ίσχυε πριν. Επομένως, στις μαθηματικές σχέσεις (25) και (26) που ακολουθούν ορίζεται αυτή η λειτουργία. Στην εξίσωση (25), στην χρονική περίοδο πριν την στιγμή της έναρξης που καθορίζει η παράμετρος $C_{l,i}^{start}$, η δυαδική μεταβλητή $start_{i,l,t}$ λαμβάνει την τιμή 0 ώστε το φορτίο να μην έχει την δυνατότητα να τεθεί σε λειτουργία. Αντίστοιχα στην (26) μετά την χρονική στιγμή της λήξης $C_{l,i}^{end}$, η δυαδική μεταβλητή $end_{i,l,t}$ λαμβάνει αποκλειστικά την τιμή 0 ώστε να μη υπάρχει δυνατότητα έναρξης λειτουργίας του κάθε ευέλικτου φορτίου.

$$x_{i,l,t}^{op} = \begin{cases} 1, \forall t > C_{l,i}^{start} \\ 0, \forall t < C_{l,i}^{start} \end{cases}, \forall l, \forall i > 1 \quad (25)$$

$$x_{i,l,t}^{op} = \begin{cases} 1, \forall t < C_{l,i}^{end} \\ 0, \forall t > C_{l,i}^{end} \end{cases}, \forall l, \forall i > 1 \quad (26)$$

3.3.6 Περιορισμοί για το Pareto



ΕΙΚΟΝΑ 8 : ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΤΟ PARETO

Κάθε συνάρτηση στόχου που παρουσιάστηκε επιδιώκει έναν μεμονωμένο στόχο που θα ωφελήσει είτε τους παραγωγούς/καταναλωτές μειώνοντας το συνολικό κόστος ενέργειας είτε την λειτουργία του δικτύου μέσα από την μείωση της συμφόρησης και των απωλειών. Σύμφωνα με αυτό, είναι εμφανής η αδυναμία κάποιου στόχου να

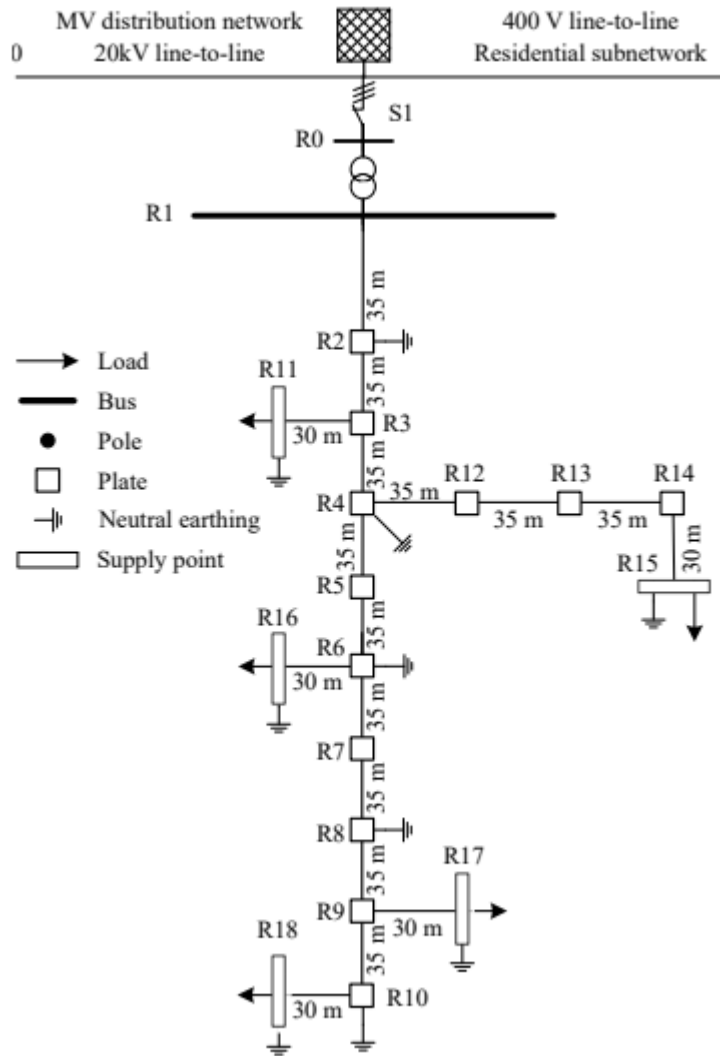
παρέχει ταυτόχρονα μια οικονομική ως προς τους παραγωγούς/καταναλωτές διαχείριση ενέργειας που συνεισφέρει στην βέλτιστη λειτουργία του δικτύου διανομής. Για τον σκοπό αυτό προτείνεται ένα μοντέλο συνδυασμού των οικονομικών και τεχνικών στόχων του δικτύου, η οποία παρέχει ένα σύνολο διαφορετικών ενεργειακών προγραμμάτων (pareto) που αντισταθμίζουν την απόκλιση μεταξύ των βέλτιστων λύσεων αυτών των προσεγγίσεων. Η μεθοδολογία που ακολουθείτε περιγράφεται στην Εικόνα 8 . Όπως φαίνεται στην Εικόνα 8, η προτεινόμενη μέθοδος ορίζει τις ελάχιστες και μέγιστες τιμές που λαμβάνει κάθε συνάρτηση στόχου και βελτιστοποιεί την μία περιορίζοντας συνεχώς την δεύτερη. Ο περιορισμός που τίθεται στην δεύτερη συνάρτηση στόχου προσδιορίζεται μέσα από την εξίσωση (27) :

$$Lim = (Cost^{max} - Cost^{min}) * \frac{ord(c)}{card(c)} + Cost^{min} \quad (27)$$

Όπου η μεταβλητή $Cost^{max}$ αντιστοιχεί στην μέγιστη δυνατή τιμή που λαμβάνει το κόστος, όταν βελτιστοποιούνται οι τεχνικοί στόχοι του δικτύου. Αντίστοιχα, η μεταβλητή $Cost^{min}$ ορίζεται ως η βέλτιστη τιμή που παίρνει το κόστος, όταν αυτό αποτελεί την συνάρτηση στόχου που ελαχιστοποιείται. Οι όροι $ord(c)$ και $card(c)$ υπολογίζουν, ο πρώτος την επανάληψη την οποία βρίσκεται ο αλγόριθμος και ο δεύτερος δίνει το σύνολο των επαναλήψεων που έχει οριστεί στον αλγόριθμο να πραγματοποιήσει.

Κεφάλαιο 4: Μελέτη Περίπτωσης

Για την υλοποίηση και την εξαγωγή αποτελεσμάτων για το προτεινόμενο σύστημα διαχείρισης ενέργειας χρησιμοποιήθηκε η τοπολογία ενός δικτύου διανομής χαμηλής τάσης. Το εξεταζόμενο δίκτυο αποτελείται από 19 ζυγούς. Η μορφή του δικτύου που επιλέχθηκε καθώς επίσης και τα χαρακτηριστικά των γραμμών που συνδέουν τους ζυγούς μεταξύ τους παρουσιάζονται στην Εικόνα 9 και στον Πίνακα 1. Αρχικά στο δίκτυο περιλαμβάνεται ένας μετασχηματιστής μεταξύ των δύο πρώτων ζυγών που συνδέει την χαμηλή με την μέση τάση και είναι υπεύθυνος για την τροφοδοσία του οικιακού δικτύου διανομής χαμηλής τάσης. Στο σύστημα μας έχει οριστεί ως ζυγός αναφοράς του οποίου η τάση και η συχνότητα παραμένουν σταθερές, ανεξάρτητα από το μέγεθος της ισχύς που τροφοδοτεί ή λαμβάνει. Στους υπόλοιπους 17 ζυγούς του δικτύου σε κάθε έναν από αυτούς συνδέεται από ένα έξυπνο σπίτι. Το κάθε έξυπνο σπίτι λειτουργεί ως παραγωγός και καταναλωτής ταυτόχρονα, έχοντας την δυνατότητα να τροφοδοτείται από το δίκτυο σε περίπτωση ελλείμματος ενέργειας και αδυναμίας κάλυψης των αναγκών του. Επίσης δύναται να επιστρέφει ισχύς στο δίκτυο σε περίπτωση περισσευούμενης μετά από κάλυψη των αναγκών του συνόλου των φορτίων του. Σε κάθε ένα από αυτά περιλαμβάνεται ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής και αποθήκευσης με φωτοβολταϊκά και μπαταρίες καθώς και ευέλικτες και μη ευέλικτες οικιακές συσκευές. Για την αξιολόγηση του προτεινόμενου αλγορίθμου και την εξαγωγή αποτελεσμάτων όσο είναι δυνατόν κοντινότερα σε αυτά των πραγματικών συνθηκών χρησιμοποιήθηκε μια βάση δεδομένων με πραγματικές μετρήσεις για τις οικιακές συσκευές. Το χρονικό βήμα των μετρήσεων της ενεργού ισχύος που χρησιμοποιήθηκε είναι τα 15 λεπτά για κάθε οικιακή συσκευή ξεχωριστά. Για τις ευέλικτες συσκευές επιλέχθηκε να εισαχθεί ο μέσος όρος της συνολικής κατανάλωσης κάθε συσκευής. [42]



ΕΙΚΟΝΑ 9: ΤΟΠΟΛΟΓΙΑ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ 18 ΖΥΓΩΝ [43]

ΠΙΝΑΚΑΣ 1: ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΓΡΑΜΜΩΝ ΔΙΚΤΥΟΥ

	R (ohm αν km)	X (ohm αν km)	Απόσταση (km)
R1-R2	0,162	0,0832	0,035
R2-R3	0,162	0,0832	0,035
R3-R4	0,162	0,0832	0,035
R4-R5	0,162	0,0832	0,035
R5-R6	0,162	0,0832	0,035
R6-R7	0,162	0,0832	0,035
R7-R8	0,162	0,0832	0,035
R8-R9	0,162	0,0832	0,035

R9-R10	0,162	0,0832	0,035
R3-R11	0,822	0,0847	0,03
R4-R12	0,822	0,0847	0,035
R12-R13	0,822	0,0847	0,035
R13-R14	0,822	0,0847	0,035
R14-R15	0,822	0,0847	0,03
R6-R16	0,822	0,0847	0,03
R9-R17	0,822	0,0847	0,03
R10-R18	0,822	0,0847	0,03

Τα μη ευέλικτα φορτία που χρησιμοποιήθηκαν για την εξεταζόμενη προσομοίωση είναι κοινά και για τα 17 σπίτια που χρησιμοποιήθηκαν και είναι αυτά που παρουσιάζονται στον Πίνακα 2 παρακάτω.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2: ΜΗ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΣΠΙΤΙΑ

Μη Ευέλικτα Φορτία
Τηλεόραση
Προσωπικός Υπολογιστής
Ψυγείο
Θερμοσίφωνας
Τοστιέρα
Φούρνος
Κλιματιστικό
Συμβατικός Φωτισμός
Έξυπνος Φωτισμός
Πιστολάκι Μαλλιών

Το σύνολο των ευέλικτων συσκευών που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται στον Πίνακα 3. Ωστόσο σε κάθε οικιακή εγκατάσταση

χρησιμοποιήθηκε διαφορετικός σύνδεσμος από το σύνολο των ευέλικτων φορτίων. Τα ευέλικτα φορτία των 6 οικιακών εγκαταστάσεων που παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες επαναλαμβάνονται σε δύο εξάδες των συγκεκριμένων σπιτιών και μια πεντάδα απαρτίζοντας τις συνολικά 17 οικιακές εγκαταστάσεις του οικιακού δικτύου χαμηλής τάσης.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3: ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΠΟΥ ΠΕΡΙΕΧΟΝΤΑΙ ΣΤΑ ΣΠΙΤΙΑ

Ευέλικτα Φορτία
Ηλεκτρικό Όχημα
Πλυντήριο ρούχων
Πλυντήριο Πιάτων
Στεγνωτήριο
Ηλεκτρικό Σίδερο

ΠΙΝΑΚΑΣ 4: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 1

Σπίτι 1
Ηλεκτρικό Όχημα
Πλυντήριο ρούχων
Πλυντήριο Πιάτων
Στεγνωτήριο
Ηλεκτρικό Σίδερο

ΠΙΝΑΚΑΣ 5: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 2

Σπίτι 2
Ηλεκτρικό Όχημα
Πλυντήριο ρούχων
Πλυντήριο Πιάτων
Στεγνωτήριο
Ηλεκτρικό Σίδερο

ΠΙΝΑΚΑΣ 6: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 3

Σπίτι 3
Ηλεκτρικό Όχημα
Πλυντήριο ρούχων
Πλυντήριο Πιάτων
Στεγνωτήριο
Ηλεκτρικό Σίδερο

ΠΙΝΑΚΑΣ 7: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 4

Σπίτι 4
Πλυντήριο ρούχων
Πλυντήριο Πιάτων
Στεγνωτήριο
Ηλεκτρικό Σίδερο

ΠΙΝΑΚΑΣ 8: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 5

Σπίτι 5
Πλυντήριο ρούχων
Πλυντήριο Πιάτων
Στεγνωτήριο
Ηλεκτρικό Σίδερο

ΠΙΝΑΚΑΣ 9: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΑ ΕΥΕΛΙΚΤΑ ΦΟΡΤΙΑ ΤΟΥ ΣΠΙΤΙΟΥ 6

Σπίτι 6
Πλυντήριο ρούχων
Πλυντήριο Πιάτων

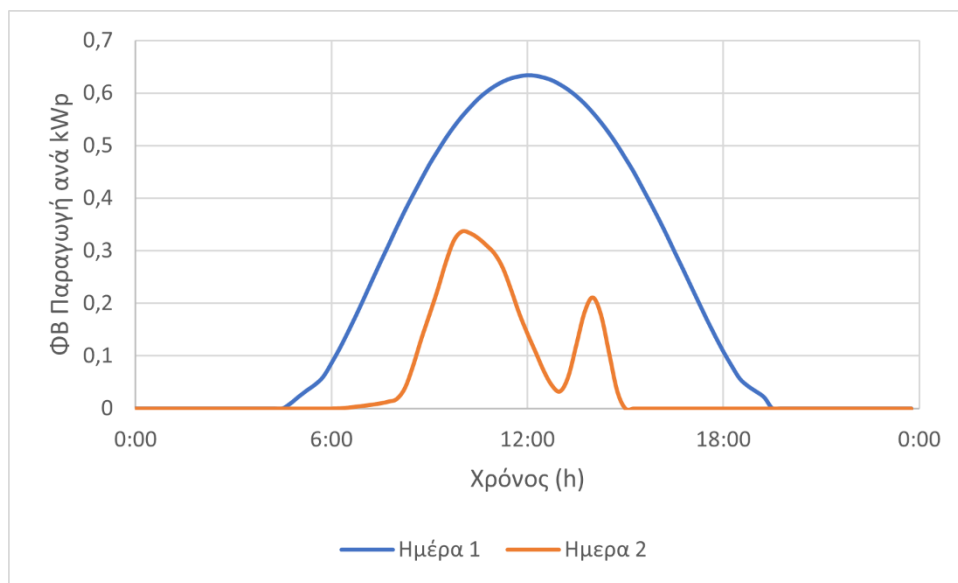
Στεγνωτήριο
Ηλεκτρικό Σίδερο

Η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών συστημάτων που επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί σε κάθε οικία, έγινε τυχαία μεταξύ ενός εύρους από 3kWp έως 10 kWp. Η εγκατεστημένη ισχύς κάθε σπιτιού είναι αυτή που φαίνεται στον Πίνακα 10. Επιπρόσθετα ως δεδομένο εισάγεται η παραγωγή των φωτοβολταϊκών κάθε συστήματος που περιλαμβάνεται στην αντίστοιχη οικία.

ΠΙΝΑΚΑΣ 10: ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ Φ/Β ΣΕ ΚΑΘΕ ΣΠΙΤΙ

Οικιακές Εγκαταστάσεις	Εγκατεστημένη Ισχύς ΦΒ (kWp)
Σπίτι 1	7,0
Σπίτι 2	8,0
Σπίτι 3	6,0
Σπίτι 4	10,0
Σπίτι 5	9,0
Σπίτι 6	4,0
Σπίτι 7	7,0
Σπίτι 8	8,0
Σπίτι 9	6,0
Σπίτι 10	10,0
Σπίτι 11	9,0
Σπίτι 12	4,0
Σπίτι 13	7,0
Σπίτι 14	8,0
Σπίτι 15	6,0
Σπίτι 16	10,0
Σπίτι 17	9,0

Η εφαρμογή του αλγορίθμου αξιολογείται κάτω από δύο διαφορετικές ημέρες, προσομοιώνοντας μία ηλιόλουστη μέρα (ημέρα 1) και μία συννεφιασμένη μέρα (ημέρα 2). Η αναμενόμενη φωτοβολταϊκή παραγωγή για 1 kWp φαίνεται στις Εικόνα για την ημέρα 1 (Μπλε γραμμή) και 2 (Πορτοκαλί γραμμή). Η τελική παραγωγή κάθε σπιτιού προσδιορίζεται από την εγκατεστημένη φωτοβολταϊκή ισχύς κάθε ισχύς και την αναμενόμενη ημερήσια παραγωγή του 1 kWp που παρουσιάζεται στις Εικόνα 10.



ΕΙΚΟΝΑ 10: ΑΝΑΜΕΝΟΜΕΝΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΙΑ 1KWp

Το σύστημα αποθήκευσης με την χρήση μπαταριών που περιλαμβάνεται σε κάθε σπίτι έχει επιλεχθεί να έχει τα εξής τεχνικά χαρακτηριστικά.

- Η συνολική απόδοση για έναν πλήρη κύκλο φόρτισης-αποφόρτισης των μπαταριών είναι 0,849. Η τιμή έχει προκύψει συνυπολογίζοντας τις απώλειες του inverter και το round-trip efficiency των μπαταριών
- Το σύστημα αποθήκευσης με μπαταρίες ορίστηκε να αποφορτίζει έως το 20% της συνολικής χωρητικότητας του και όχι πλήρως. Συνεπώς η κατάσταση φόρτισης (SoC) κυμαίνεται από το 20% έως το 100% της συνολικής χωρητικότητας της κάθε μπαταρίας.
- Η ονομαστική χωρητικότητα των μπαταριών που υπάρχει σε κάθε σπίτι επιλέχθηκε τυχαία με ένα εύρος από 3 kW έως 10kW. Αντίστοιχα με τον ίδιο τρόπο επιλέχθηκε και η ενέργεια που είναι αρχικά αποθηκευμένη στην μπαταρία σε κάθε οικία. Ο Πίνακας 11 παρουσιάζει αναλυτικά την ονομαστική χωρητικότητα και το αρχικό επίπεδο φόρτισης για κάθε οικιακή μπαταρία που εξετάστηκε.

- Καθορίζεται επίσης όπως φαίνεται στο Πίνακα 12 αναλυτικά για κάθε σπίτι η μέγιστη ισχύς φόρτισης και η μέγιστη ισχύς εκφόρτισης του συστήματος αποθήκευσης μπαταριών

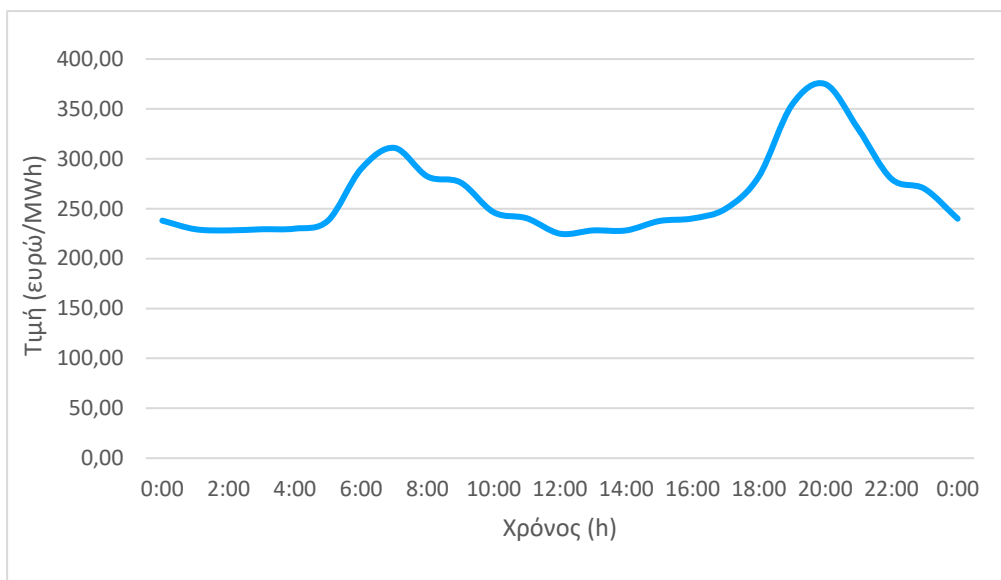
ΠΙΝΑΚΑΣ 11: ΟΝΟΜΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΡΧΙΚΗ ΧΩΡΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

	Ονομαστική Χωρητικότητα Συστήματος Αποθήκευσης (kWh)	Αρχική Αποθηκευμένη Χωρητικότητα Συστήματος Αποθήκευσης (kWh)	Αρχική Κατάσταση Φόρτισης-SoC (%)
Σπίτι 1	7,0	3,78	54
Σπίτι 2	8,0	2,0	25
Σπίτι 3	6,0	2,1	35
Σπίτι 4	10,0	4,0	40
Σπίτι 5	9,0	4,31	48
Σπίτι 6	4,0	1,77	45
Σπίτι 7	7,0	3,78	54
Σπίτι 8	8,0	2,0	25
Σπίτι 9	6,0	2,1	35
Σπίτι 10	10,0	4,0	40
Σπίτι 11	9,0	4,31	48
Σπίτι 12	4,0	1,77	45
Σπίτι 13	7,0	3,78	54
Σπίτι 14	8,0	2,0	25
Σπίτι 15	6,0	2,1	35
Σπίτι 16	10,0	4,0	40
Σπίτι 17	9,0	4,31	48

ΠΙΝΑΚΑΣ 12: ΡΥΘΜΟΣ ΦΟΡΤΙΣΗΣ/ΕΚΦΟΡΤΙΣΗΣ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ

	Μέγιστη Ισχύς Φόρτισης Συστήματος Αποθήκευσης (kW)	Μέγιστη Ισχύς Εκφόρτισης Συστήματος Αποθήκευσης (kW)
Σπίτι 1	7,0	7,0
Σπίτι 2	8,0	8,0
Σπίτι 3	6,0	6,0
Σπίτι 4	10,0	10,0
Σπίτι 5	9,0	9,0
Σπίτι 6	4,0	4,0
Σπίτι 7	7,0	7,0
Σπίτι 8	8,0	8,0
Σπίτι 9	6,0	6,0
Σπίτι 10	10,0	10,0
Σπίτι 11	9,0	9,0
Σπίτι 12	4,0	4,0
Σπίτι 13	7,0	7,0
Σπίτι 14	8,0	8,0
Σπίτι 15	6,0	6,0
Σπίτι 16	10,0	10,0
Σπίτι 17	9,0	9,0

Οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας που επιλέχθηκαν για τον υπολογισμό του κόστους αγοράς της ενέργειας από το δίκτυο παρουσιάζεται στο γράφημα της Εικόνας 11 . Οι διακυμάνσεις στις τιμές αυτές αντιστοιχούν σε ωριαία τιμολόγηση μιας ημέρας. Επίσης εισάγεται ως τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από το σπίτι προς το δίκτυο τα 87 ευρώ/MWh η οποία είναι σταθερή καθ' όλη την διάρκεια της ημέρας.



ΕΙΚΟΝΑ 11: ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΤΙΜΗΣ ΑΓΟΡΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Κεφάλαιο 5: Αποτελέσματα

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται τα αποτελέσματα όπως αυτά εξάγονται έπειτα από την εφαρμογή του προτεινόμενου μαθηματικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται αφορούν τις 3 διαφορετικές συναρτήσεις στόχου που επιλέχθηκαν, στις οποίες συγκρίνεται ο αντίκτυπος τους τόσο σε επίπεδο δικτύου όσο και σε επίπεδο παραγωγού/καταναλωτή. Ο αλγόριθμος εξετάστηκε κάτω από 2 ημέρες με διαφορετική ηλιοφάνεια, αξιολογώντας την εφαρμογή σε μια ηλιόλουστη και μία συννεφιασμένη μέρα.

Αρχικά, ο τελικός χρονοπρογραμματισμός λειτουργίας που προτείνεται από την εφαρμογή τις εκάστοτε συνάρτησης στόχους χρησιμοποιείται για να αποτυπωθεί το ηλεκτρικό κόστος ενέργειας για κάθε χρήστη. Πιο συγκεκριμένα, στους Πίνακες 13 και 14 παρουσιάζεται το συνολικό ημερήσιο κόστος ενέργεια για κάθε σπίτι για την ημέρα 1 και 2, αντίστοιχα. Το συνολικό κόστος κάθε σπιτιού, είναι μικρότερο στην περίπτωση ελαχιστοποίησης του κόστους σε σχέση με την βελτιστοποίηση των τεχνικών όρων του δικτύου, όπως ήταν αναμενόμενο. Για να επιτευχθεί η ελαχιστοποίηση του κόστους προωθείται η κατανάλωση της παραγόμενης από τα φωτοβολταϊκά ηλεκτρικής ενέργειας τοπικά σε κάθε σπίτι. Ο λόγος είναι ότι η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας προς το δίκτυο, είναι σε όλες τις χρονικές στιγμές μικρότερη σε σύγκριση με αυτήν της αγοράς από αυτό.

ΠΙΝΑΚΑΣ 13: ΚΟΣΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 1

	OF1	OF2	OF3
R2	8,63	6,60	5,93
R3	6,65	6,64	6,04
R4	6,22	6,33	6,00
R5	-0,40	-0,46	-0,97

R6	-0,64	-0,72	-1,24
R7	8,10	8,15	7,88
R8	10,55	10,31	5,93
R9	6,29	6,62	6,22
R10	6,20	6,36	6,13
R11	-0,48	-0,21	-0,96
R12	-0,69	-0,80	-1,24
R13	8,15	8,12	7,91
R14	6,87	6,92	5,93
R15	7,22	7,48	6,07
R16	6,41	7,23	5,99
R17	-0,45	-0,49	-0,88
R18	-0,72	-0,69	-1,24

ΠΙΝΑΚΑΣ 14: ΚΟΣΤΟΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΑΝΑ ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 2

	OF1	OF2	OF3
R2	14,78	12,35	12,03
R3	13,96	14,26	13,76
R4	14,60	14,55	11,81
R5	5,62	5,36	5,08
R6	4,92	4,69	4,46
R7	12,13	12,10	11,95
R8	14,92	12,19	12,02
R9	14,01	16,63	13,76
R10	14,52	14,64	11,81
R11	5,52	5,45	5,08

R12	4,96	4,72	4,48
R13	12,07	12,06	11,93
R14	14,96	12,34	12,02
R15	14,06	16,60	13,76
R16	12,03	14,66	11,78
R17	5,41	5,24	5,08
R18	4,74	4,70	4,46

Στον Πίνακα 15 και στον Πίνακα 16 παρατίθενται οι αιχμές ζήτησης για την πρώτη και δεύτερη ημέρα αντίστοιχα για κάθε σπίτι του δικτύου. Στην πλειοψηφία των σπιτιών, οι αιχμές ζήτησης που έχουν δημιουργηθεί βασιζόμενη στην εφαρμογή της βελτιστοποίησης με συνάρτησης στόχους αυτές της ελαχιστοποίησης των απωλειών ενεργού ισχύος και της συμφόρησης του δικτύου, είναι μικρότερες έναντι της οικονομικής βελτιστοποίησης. Αυτό είναι αναμενόμενο καθώς η ελαχιστοποίηση του κόστους προτείνει την εκμετάλλευση των χαμηλότερο τιμών ηλεκτρικής ενέργειας, όσο αυτό επιτρέπεται από την ζώνη άνεση του χρήστη που έχει οριστεί. Για αυτό το λόγο και εμφανίζει μεγαλύτερες αιχμές στην ζήτηση εκείνες τις ώρες. Εμφανέστερο γίνεται την δεύτερη ημέρα όπου η παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι χαμηλότερη και προτείνεται ακόμα πιο έντονα η εκμετάλλευση των χαμηλών τιμών. Από την άλλη πλευρά, οι συναρτήσεις στόχου που βελτιστοποιούν τεχνικούς όρους του δικτύου έχουν προκαλέσει μεγαλύτερες αιχμές ζήτησης σε σχέση με την οικονομική βελτιστοποίηση σε συγκεκριμένα σπίτια. Αυτό συμβαίνει, για τον λόγο ότι οι συναρτήσεις αυτές βλέπουν τα σπίτια συνολικά. Κατά αυτό τον τρόπο, δύναται να προτείνουν υψηλότερες αιχμές ζήτησης σε συγκεκριμένες χρονικές στιγμές όπου η ροή ισχύος είναι χαμηλή προκειμένου να μπορέσουν να μειώσουν την ζήτηση από κάποια σπίτια τις χρονικές περιόδους όπου είναι αυξημένη για όλο το δίκτυο και υπάρχει μικρότερη διαθέσιμη ευελιξία. Ως αποτέλεσμα, αυτές οι προσεγγίσεις μειώνουν την συνολική αιχμή ζήτησης όλων των σπιτιών και κατ' επέκταση την ροή ισχύος στο δίκτυο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 15: ΑΙΧΜΕΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΣΕ kW ANA ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 1

	OF1	OF2	OF3
R2	5,38	5,38	6,18
R3	4,60	4,60	4,84

R4	5,91	6,73	5,91
R5	0,93	1,13	1,96
R6	1,03	0,70	0,80
R7	6,04	5,65	6,04
R8	6,16	6,22	6,22
R9	4,93	4,93	4,60
R10	5,91	5,91	5,91
R11	1,11	1,13	1,65
R12	0,75	0,70	0,80
R13	5,65	5,65	6,04
R14	5,38	6,07	6,22
R15	5,76	5,76	4,84
R16	5,91	6,73	5,91
R17	0,98	1,13	2,43
R18	0,79	0,70	0,80

ΠΙΝΑΚΑΣ 16: ΑΙΧΜΕΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΣΕ kW ΑΝΑ ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 2

	OF1	OF2	OF3
R2	7,01	6,69	6,97
R3	7,37	8,06	10,47
R4	7,72	7,02	9,79
R5	3,10	4,93	4,94
R6	3,85	5,49	6,28
R7	6,97	7,03	7,34
R8	7,02	6,73	6,97
R9	7,30	8,01	10,47
R10	7,00	7,30	9,79

R11	3,04	2,91	4,94
R12	3,37	6,19	6,28
R13	6,97	6,99	7,34
R14	7,19	6,69	6,97
R15	8,09	8,28	10,47
R16	7,84	7,20	9,79
R17	4,93	4,94	4,94
R18	5,92	5,49	6,28

Στους Πίνακες 17 και 18 παρουσιάζονται οι αιχμές στην εξαγόμενη ισχύς από τα σπίτια προς το δίκτυο. Ειδικότερα, την δεύτερη ημέρα όπου η παραγωγή των φωτοβολταϊκών είναι μικρότερη σε σύγκριση με της πρώτης ημέρας, με την ζήτηση να υπερκαλύπτει την παραγωγή. Στον Πίνακα 19 παρατηρείται ότι οι αιχμές της εξαγόμενης ισχύος των σπιτιών είναι στην πλειοψηφία του μηδενικές και για τις 3 συναρτήσεις στόχου. Αυτό συμβαίνει, για τον λόγο ότι θεωρείται προτιμότερο να αυτοκαταναλώνεται η ενέργεια που παράγεται παρά να πωλείται και να εισάγεται μεγαλύτερο ποσό ισχύος από το δίκτυο. Όπως αναφέρθηκε ήδη το δίκτυο εκμεταλλεύεται τις χαμηλές τιμές για την οικονομικότερη λειτουργία του και συνδυάζοντας το με την αυτοκατανάλωση αποφεύγει την αγορά μεγαλύτερων ποσοτήτων ενέργειας από το δίκτυο που μπορεί να συμπίπτουν με χρονικές στιγμές με υψηλότερη τιμή. Επίσης, η αυτοκατανάλωση ωφελεί και τις υλοποιήσεις για την ελαχιστοποίηση των τεχνικών όρων καθώς μειώνει την ροή ισχύος και τις απώλειες στο δίκτυο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 17: ΑΙΧΜΕΣ ΕΞΑΓΩΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ kW ANA ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 1

	OF1	OF2	OF3
R2	3,51	3,01	2,60
R3	1,29	0,94	3,25
R4	0,99	0,99	0,99
R5	5,21	5,21	5,34
R6	4,23	4,49	4,77
R7	0,00	0,00	0,00
R8	3,34	3,79	2,50

R9	0,94	1,29	1,66
R10	0,99	1,13	0,99
R11	5,51	5,51	5,51
R12	3,70	4,49	4,08
R13	0,00	0,00	0,00
R14	3,10	3,79	3,73
R15	3,69	3,69	2,42
R16	0,99	2,49	0,99
R17	5,21	5,51	5,37
R18	3,81	3,59	4,77

ΠΙΝΑΚΑΣ 18: ΑΙΧΜΕΣ ΕΞΑΓΩΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ kW ΑΝΑ ΟΙΚΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΗΜΕΡΑ 2

	OF1	OF2	OF3
R2	0,69	0,00	0,00
R3	0,00	0,00	0,00
R4	0,32	0,00	0,00
R5	1,24	0,99	0,00
R6	0,00	0,00	0,00
R7	0,00	0,00	0,00
R8	0,78	0,00	0,00
R9	0,00	0,02	0,00
R10	0,00	0,17	0,00
R11	1,24	1,24	0,00
R12	0,00	0,00	0,00
R13	0,00	0,00	0,00
R14	0,78	0,00	0,00

R15	0,00	0,76	0,00
R16	0,00	0,31	0,00
R17	1,24	0,37	0,00
R18	0,00	0,00	0,00

Αυτό, γίνεται αντιληπτό σε μεγαλύτερο βαθμό, παρατηρώντας τον Πίνακα 19 παρακάτω όπου εξετάζεται η συνολική αιχμή ζήτησης όλου του δικτύου για κάθε μια από τις συναρτήσεις στόχου. Για να το πετύχουμε αυτό, χρησιμοποιήθηκε ο όρος Peak to Average Ratio (PAR) όλης της ζήτησης όλων των σπιτιών αυτού του δικτύου. Το PAR υπολογίζεται από τις εξισώσεις (28)-(30).

$$P_{total,t}^{import} = \sum_i P_{i,t}^{import} \quad (28)$$

$$P_{total,t}^{Avg} = \frac{\sum_i P_{i,t}^{const} + \sum_i \sum_l^L (x_{i,t}^{op} * P_{i,l}^{flex})}{T} \quad (29)$$

$$PAR = \frac{\max_t (P_{total,t}^{import})}{P_{total,t}^{Avg}} \quad (30)$$

Σύμφωνα με τον Πίνακα 19, το PAR που προκύπτει από τις συναρτήσεις OF1 και OF2 είναι σημαντικά μειωμένο και για τις δύο ημέρες έναντι της OF3, φανερώνοντας την τάση αυτών των συναρτήσεων να μειώσουν την συμφόρηση στο δίκτυο.

ΠΙΝΑΚΑΣ 19: PAR ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

	OF1	OF2	OF3
Ημέρα 1	1,38	1,38	1,52
Ημέρα 2	1,37	1,38	2,62

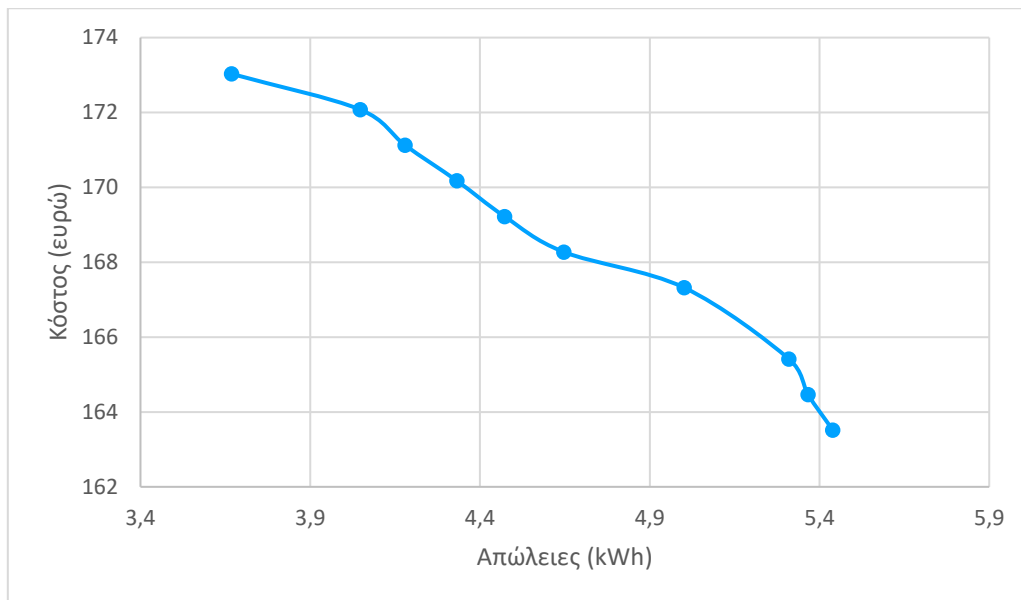
Ο Πίνακας 20 παρουσιάζει τις ημερήσιες απώλειες σε kWh που προέκυψε από την εφαρμογή κάθε προσέγγισης. Όπως αναμενόταν η ελαχιστοποίηση των απωλειών έχει επιτύχει τον στόχο της παρουσιάζοντας σημαντικές αποκλίσεις έναντι των άλλων συναρτήσεων. Η μείωση της ροής ισχύος σε κάθε γραμμή που προτείνεται στην OF2 παρέχει επίσης μειωμένες απώλειες στο δίκτυο. Τέλος, η βελτιστοποίηση του κόστους και κατ' επέκταση η προσπάθεια εκμετάλλευσης των ευνοϊκότερων τιμών ενέργειας οδηγεί σε σημαντικές αιχμές ζήτησης που προσδίδουν υψηλές απώλειες στο δίκτυο εφαρμογής. Είναι χαρακτηριστικό πως στην ημέρα 1, η

βελτιστοποίηση του κόστους προσδίδει τριπλάσιες απώλειες συγκριτικά με τις ελάχιστες της OF1.

ΠΙΝΑΚΑΣ 20: ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΣΕ kWh ΓΙΑ ΤΙΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ ΣΤΟΧΟΥ

	OF1	OF2	OF3
Ημέρα 1	0,62	0,91	1,73
Ημέρα 2	3,66	3,74	5,44

Μέσω των αποτελεσμάτων παρατηρούμε ότι ακολουθώντας είτε τις προσεγγίσεις που βελτιστοποιούν τους τεχνικούς όρους είτε αυτή που ελαχιστοποιεί το κόστος πετυχαίνετε ο στόχος της κάθε μιας ξεχωριστά, σε βάρος της άλλης. Αναλυτικότερα, ακολουθώντας αποκλειστικά την προσέγγιση η οποία βελτιστοποιεί το κόστος στο δίκτυο, παρατηρείται ότι θα μπορούσε να αποφέρει υψηλές απώλειες στην διάρκεια όλης της ημέρας όπου στην συγκεκριμένη περίπτωση προέκυψαν 5,44 kWh. Από την άλλη πλευρά, η εφαρμογή της συνάρτησης στόχου που έχει να κάνει με την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενεργού ισχύος, θα μπορούσε να φέρει σημαντικά μειωμένες απώλειες και πιο συγκριμένα 3,66 kWh. Ωστόσο, το κόστος σε αυτή την περίπτωση προκύπτει μεγαλύτερο κατά 10 ευρώ, αφού αυξάνεται στα 173 ευρώ συνολικά για όλα τα σπίτια. Σε μια προσπάθεια, να συσχετιστούν οι δύο στόχοι που αναφέρονται προτείνεται μια μέθοδος που περιλαμβάνει ένα σύνολο λύσεων που αντισταθμίζει τις βέλτιστες προσεγγίσεις και των δύο στόχων. Αυτό αποσκοπεί στο να εξεταστεί η περίπτωση μιας ομαλής λειτουργίας από τεχνικής πλευράς για το δίκτυο οι οποία όμως θα λαμβάνει υπόψη και την οικονομική λειτουργία των σπιτιών, με τέτοιο τρόπο που να μην αποκλίνουν πολύ από την οικονομικότερη λειτουργία τους τα σπίτια. Το συγκεκριμένο σύνολο λύσεων έχει προκύψει λύνοντας τις δύο προσεγγίσεις την μια συναρτήσει της άλλης για τον προσδιορισμό της κατάλληλης για το δίκτυο λειτουργίας. Το γράφημα που προκύπτει μέσω αυτής της μεθόδου ονομάζεται Pareto και απεικονίζεται στην Εικόνα 12.



ΕΙΚΟΝΑ 12: PARETO ΜΕΤΑΞΥ ΣΤΟΧΟΥ ΓΙΑ ΤΗΣ ΑΠΩΛΕΙΕΣ ΚΑΙ ΤΟ ΚΟΣΤΟΣ

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία, υλοποιήθηκε με στόχο να αποτελέσει μια λύση στην αυξημένη διείσδυση παραγωγών-καταναλωτών στο δίκτυο διανομής. Κατ' επέκταση προτείνεται ένα κεντρικό σύστημα ενεργειακής διαχείρισης το οποίο θα βρίσκει εφαρμογή σε δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης. Το προτεινόμενο σύστημα εφαρμόζεται σε δίκτυα που έχουν συνδεδεμένα σε αυτά σημαντικό αριθμό παραγωγών-καταναλωτών. Μέσω του συστήματος, επιδιώκεται ο χρονοπρογραμματισμός του συστήματος αποθήκευσης και των ευέλικτων φορτίων του κάθε σπιτιού, ώστε να επιλεχθεί η βέλτιστη χρονική στιγμή λειτουργίας τους για την επίτευξη των στόχων των αντικειμενικών συναρτήσεων. Στο μαθηματικό μοντέλο, εισάχθηκαν 3 συναρτήσεις στόχοι, όπου οι δύο από αυτές **OF1** και **OF2** βελτιστοποιούν τους τεχνικούς όρους του δικτύου και η **OF3** ελαχιστοποιεί το ηλεκτρικό κόστος των παραγωγών-καταναλωτών. Πιο συγκεκριμένα η **OF1** βελτιστοποιεί τις απώλειες ενεργού ισχύος και η **OF2** την συμφόρηση του δικτύου. Όλες οι αντικειμενικές συναρτήσεις αξιολογήθηκαν σε δύο σενάρια. Το πρώτο για μια ημέρα με μεγάλη ηλιοφάνεια και το δεύτερο για μια μέρα με μικρή ηλιοφάνεια. Το δίκτυο το οποίο επιλέχθηκε για την υλοποίηση είναι ένα οικιακό δίκτυο 19 ζυγών στο οποίο συνδέονται 17 παραγωγοί-καταναλωτές ένας σε κάθε ζυγό. Με την εξαγωγή των αποτελεσμάτων συμπεραίνουμε ότι οι αντικειμενικές συναρτήσεις που εφαρμόστηκαν, πετυχαίνουν σε μεγάλο ποσοστό τον στόχο τους. Βελτιώνοντας την λειτουργία του δικτύου και ωφελώντας τους παραγωγούς-καταναλωτές αξιολογώντας την κάθε προσέγγιση ξεχωριστά. Αναλυτικότερα τα συμπεράσματα που εξάγονται είναι τα παρακάτω.

Αρχικά, συμπεραίνεται ότι μέσω του χρονοπρογραμματισμού της συνάρτησης στόχου **OF3** επιτυγχάνεται η ελαχιστοποίηση του ηλεκτρικού κόστους των παραγωγών-καταναλωτών. Αυτό γίνεται φανερό, καθώς το ηλεκτρικό κόστος σε αυτή την περίπτωση είναι μικρότερο σε σχέση με την εφαρμογή των προσεγγίσεων για την βελτιστοποίηση των τεχνικών όρων. Ο τρόπος που το επιτυγχάνει, είναι προωθώντας την κατανάλωση της παραγόμενης ενέργειας τοπικά. Ωστόσο, η συγκεκριμένη περίπτωση επιβαρύνει την λειτουργία του δικτύου καθώς εμφανίζει στην πλειοψηφία των σπιτιών μεγαλύτερες αιχμές ζήτησης. Έπειτα παρατηρούμε ότι με την βελτιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων **OF1** και **OF2**, πετυχαίνετε η βελτιστοποίηση της

λειτουργίας του δικτύου με τις αιχμές της ζήτησης στην πλειοψηφία τους να είναι μειωμένες. Αυτό γίνεται ξεκάθαρα με τον όρο PAR, που μας δίνει τις συνολικές αιχμές του δικτύου, οι οποίες είναι μικρότερες στις δυο αυτές προσεγγίσεις σε σχέση με του ηλεκτρικού κόστους. Επιπρόσθετα, συμπεραίνουμε πως όλα τα σενάρια που βελτιστοποιούνται προωθούν την αυτοκατανάλωση της ενέργειας καθώς αυτό είναι βέλτιστο και για το κόστος όπως επίσης για την μείωση των ροών ισχύος και της συμφόρησης. Τέλος, παρατηρείται ότι κάθε συνάρτηση στόχου επιδιώκει την βελτιστοποίηση του μεμονωμένου στόχου. Αυτό δημιουργεί αδυναμία στην εύρεση μιας λύσης, ώστε να ωφελεί ταυτόχρονα και το ηλεκτρικό κόστος και τους τεχνικούς όρους. Έτσι, προτάθηκε μια μέθοδος που δίνει έναν συνδυασμό λύσεων. Η συγκεκριμένη μέθοδος, ορίζει ελάχιστη και μέγιστη τιμή για κάθε συνάρτηση στόχου, και ελαχιστοποιεί την μια επαναληπτικά, περιορίζοντας την άλλη. Μέσω του γραφήματος που προέκυψε από την εφαρμογή της, μπορεί να επιλεγεί μια λύση η οποία να ικανοποιεί το ηλεκτρικό κόστος και τους τεχνικούς στόχους του δικτύου ταυτόχρονα. Συνήθως, επιλέγεται μια λύση από το ‘‘ γόνατο’’ του γραφήματος.

Παράρτημα

Το GAMS (General Algebraic Modeling System) είναι ένα περιβάλλον υπολογιστή που χρησιμοποιείται για τον ορισμό, την ανάλυση και την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Προσφέρει μια συνοπτική αλλά ισχυρή γλώσσα η οποία μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα ευέλικτο και ισχυρό εργαλείο για την αντιμετώπιση προβλημάτων μαθηματικού προγραμματισμού.

Ορισμένα από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά του GAMS περιλαμβάνουν:

- Τη δυνατότητα επίλυσης προβλημάτων διαφόρων μεγεθών με το ίδιο μήκος κώδικα. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην ικανότητά της να εκφράζει πολυάριθμους παρόμοιους περιορισμούς χρησιμοποιώντας μια συμπαγή και αποδοτική μορφή ευρετηρίασης.
- Ο διαχωρισμός της μοντελοποίησης του προβλήματος από την τεχνική του επίλυση. Οι χρήστες ορίζουν το μοντέλο και στη συνέχεια το αναθέτουν σε έναν από τους διαθέσιμους επιλυτές. Αυτό επιτρέπει στους χρήστες να επικεντρωθούν στη διαμόρφωση του μοντέλου αντί να αναλωθούν στις τεχνικές λεπτομέρειες της κατασκευής αλγορίθμων.
- Το GAMS αντικατοπτρίζει στενά τη μαθηματική περιγραφή ενός προβλήματος βελτιστοποίησης. Ως αποτέλεσμα, ο κώδικας του GAMS μπορεί να είναι κατανοητός σε αναγνώστες με υπόβαθρο στη βελτιστοποίηση.
- Το GAMS παρέχει επίσης μηχανισμούς για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης, τα οποία μπορεί να περιλαμβάνουν μεγάλο αριθμό περιορισμών και μεταβλητών.

Στην ουσία, το GAMS είναι ένα εργαλείο που απλοποιεί τη διαδικασία της μαθηματικής βελτιστοποίησης προσφέροντας μια φιλική προς το χρήστη γλώσσα μοντελοποίησης. Επίσης δίνει την δυνατότητα διασύνδεσης με διάφορους επιλυτές, καθιστώντας το πολύτιμο για την αντιμετώπιση ενός ευρέος φάσματος προκλήσεων βελτιστοποίησης του πραγματικού κόσμου. [44]

Βιβλιογραφία

[1] Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία "Επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής στη χλωρίδα και στη πανίδα", Καλανταρίδου Αθηνά-Φανή, Σχολή Δημόσιας Υγείας, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής

[2] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, «Αίτια της κλιματικής αλλαγής», [Online].Available: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_el

[3] Ευρωπαϊκή Στατιστική Υπηρεσία, «Κλιματική αλλαγή-κινητήριες δυνάμεις», [Online].Available: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Climate_change_-_driving_forces#Context

[4] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, «Συνέπειες της κλιματικής αλλαγής», [Online].Available: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_el

[5] Ευρωπαϊκή Στατιστική Υπηρεσία, «Απώλειες από την κλιματική αλλαγή: 145 δισεκατομμύρια Ευρώ σε μια δεκαετία», [Online].Available:<https://ec.europa.eu/eurostat/en/web/products-eurostat-news/-/ddn-20221024-1>

[6] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, «Η δράση για το κλίμα και η Πράσινη Συμφωνία», [Online].Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/climate-action-and-green-deal_el

[7] United Nations Climate Change, "The Paris Agreement", [Online].Available: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>

[8] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, «Υλοποίηση της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας», [Online].Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_el

[9] Ευρωπαϊκή Επιτροπή, «REPowerEU: οικονομικά προσιτή, εξασφαλισμένη και βιώσιμη ενέργεια για την Ευρώπη» [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowereu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_el

[10] Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 31 Δεκεμβρίου 2019 [Online]. Available: <https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2020/11/%CE%A6%CE%95%CE%9A-%CE%92-4893.2019.pdf>

[11]] Εφημερίδα της Κυβερνήσεως, 4 Ιουλίου 2022 [Online]. Available: <https://ypen.gov.gr>

[12] Διδακτορική διατριβή, «Μοντελοποίηση και ανάλυση της ευελιξίας ηλεκτροπαραγωγικών συστημάτων με μεγάλη διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας», Μαρία Π. Κανναβού, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

[13] Holguin, J. P., Rodriguez, D. C., & Ramos, G. (2020). Reverse Power Flow (RPF) Detection and Impact on Protection Coordination of Distribution Systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 56(3), 2393-2401. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2969640>

[14] Babacan, O., Torre, W., & Kleissl, J. (2017). Siting and sizing of distributed energy storage to mitigate voltage impact by solar PV in distribution systems. *Solar Energy*, 146, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.047>

[15] Bouhouras, A. S., Christoforidis, G. C., Parisses, C., & Labridis, D. P. (2014). Reducing network congestion in distribution networks with high DG penetration via network reconfiguration. *International Conference on the European Energy Market, EEM*. <https://doi.org/10.1109/EEM.2014.6861255>

[16] Fotouhi Ghazvini, M. A., Lipari, G., Pau, M., Ponci, F., Monti, A., Soares, J., Castro, R., & Vale, Z. (2019). Congestion management in active distribution networks through demand response implementation. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 17, 100185. <https://doi.org/10.1016/j.segan.2018.100185>

[17] Baviskar, A., Hansen, A. D., Das, K., & Koivisto, M. (2020, November). Challenges of future distribution systems with a large share of variable renewable energy sources-review. In 19th wind integration workshop (Vol. 2020). Energynautics GmbH.

[18] Alboaouh, K. A., & Mohagheghi, S. (2020). Impact of Rooftop Photovoltaics on the Distribution System. *Journal of Renewable Energy*, 2020, 1-23. <https://doi.org/10.1155/2020/4831434>

- [19] Schwaegerl, C., & Tao, L. (2013). The microgrids concept. *microgrids*, 1-24.
- [20] Tuballa, M. L., & Abundo, M. L. (2016). A review of the development of Smart Grid technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 710-725.
- [21] Kanakadhurga, D., & Prabakaran, N. (2022). Demand side management in microgrid: A critical review of key issues and recent trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111915. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111915>
- [22] Stadler, M., & Naslé, A. (2019). Planning and implementation of bankable microgrids. *The Electricity Journal*, 32(5), 24-29.
- [23] Bagalini, V., Zhao, B. Y., Wang, R. Z., & Desideri, U. (2019). Solar PV-Battery-Electric Grid-Based Energy System for Residential Applications: System Configuration and Viability. *Research*, 2019. <https://doi.org/10.34133/2019/3838603>
- [24] Khaboot, N., Chatthaworn, R., Siritaratiwat, A., Surawanitkun, C., & Khunkitti, P. (2019). Increasing PV penetration level in low voltage distribution system using optimal installation and operation of battery energy storage. *Cogent Engineering*, 6(1), 1641911.
- [25] Διδακτορική διατριβή, «Energy Management and Consumer Modeling in Smart Grid Systems», Βασιλική Χατζή, Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών & Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας
- [26] Vardakas, J. S., Zorba, N., & Verikoukis, C. V. (2014). A survey on demand response programs in smart grids: Pricing methods and optimization algorithms. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(1), 152-178.
- [27] Panda, S., Mohanty, S., Rout, P. K., Sahu, B. K., Bajaj, M., Zawbaa, H. M., & Kamel, S. (2022). Residential Demand Side Management model, optimization and future perspective: A review. *Energy Reports*, 8, 3727-3766. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.02.300>
- [28] Sarker, E., Halder, P., Seyedmahmoudian, M., Jamei, E., Horan, B., Mekhilef, S., & Stojcevski, A. (2021). Progress on the demand side management in smart grid and optimization approaches. *International Journal of Energy Research*, 45(1), 36-64.
- [29] Sa'ed, J. A., Wari, Z., Abughazaleh, F., Dawud, J., Favuzza, S., & Zizzo, G. (2020). Effect of demand side management on the operation of pv-integrated distribution systems. *Applied Sciences*, 10(21), 7551.

- [30] Di Piazza, M. C. (2021). Energy Management Systems for Optimal Operation of Electrical Micro/Nanogrids. *Energies*, 14(24), 8469.
- [31] Beaudin, M., & Zareipour, H. (2015). Home energy management systems: A review of modelling and complexity. *Renewable and sustainable energy reviews*, 45, 318-335.
- [32] Ding, Y., Xie, D., Hui, H., Xu, Y., & Siano, P. (2021). Game-Theoretic Demand Side Management of Thermostatically Controlled Loads for Smoothing Tie-Line Power of Microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36(5), 4089-4101. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2021.3065097>
- [33] Yang, M., Sun, L., & Wang, J. (2020). Multi-Objective Optimization Scheduling Considering the Operation Performance of Islanded Microgrid. *IEEE Access*, 8, 83405-83413. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2989161>
- [34] Xie, Q., Hui, H., Ding, Y., Ye, C., Lin, Z., Wang, P., Song, Y., Ji, L., & Chen, R. (2020). Use of demand response for voltage regulation in power distribution systems with flexible resources. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 14(5), 883-892. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1170>
- [35] Ziadi, Z., Taira, S., Oshiro, M., & Funabashi, T. (2014). Optimal Power Scheduling for Smart Grids Considering Controllable Loads and High Penetration of Photovoltaic Generation. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(5), 2350-2359. <https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2323969>
- [36] Erenoğlu, A. K., Şengör, İ., Erdiñç, O., Taşcıkaraoğlu, A., & Catalão, J. P. S. (2022). Optimal energy management system for microgrids considering energy storage, demand response and renewable power generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 136, 107714. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107714>
- [37] Bouhouras, A. S., Athanasiou, A., Christoforidis, G. C., Tsiakalos, A., & Roumeliotis, M. (2017). Analysis of high penetration of electric vehicles and photovoltaics on a greek low-voltage network. *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/UPEC.2017.8231987>
- [38] Vivekananthan, C., Mishra, Y., Ledwich, G., & Li, F. (2014). Demand response for residential appliances via customer reward scheme. *IEEE transactions on smart grid*, 5(2), 809-820.
- [39] Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, Μεθοδολογία, «Υπολογισμός Απωλειών ΕΣΜΗΕ [Online]. Available: https://www.admie.gr/sites/default/files/users/dda/KAE/%CE%9C%CE%95%CE%98_%CE%91%CF%80%CF%8E%CE%BB%CE%B5%CE%B9%CE%B5%CF%82%20%CE%95%CE%A3%CE%9C%CE%97%CE%95_v1.pdf

[40] Kelepouris, N. S., Nousedilis, A. I., Bouhouras, A. S., & Christoforidis, G. C. (2023). Optimal scheduling of prosumer's battery storage and flexible loads for distribution network support. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 17(7), 1491-1508. <https://doi.org/10.1049/gtd2.12759>

[41] Soroudi, A. (2017). Power system optimization modeling in GAMS (Vol. 78). Berlin/Heidelberg, Germany: Springer.

[42] Kelepouris, N. S., Kothona, D., Kelepouris, D., Magkos, P., Tsigkouni, S., Bouhouras, A. S., & Christoforidis, G. C. (2022, October). Energy management system for mitigating buildings' power exchanges with the grid. In 2022 2nd International Conference on Energy Transition in the Mediterranean Area (SyNERGY MED) (pp. 1-6). IEEE.

[43] CIGRE, "Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources", Task Force C6.04.02, 2013.

[44] Διπλωματική εργασία, «Ένταξη μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για ελαχιστοποίηση του κόστους με το λογισμικό GAMS », Κονδύλης Δημήτριος Τμήμα Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης, Πολυτεχνείο Κρήτης

Συντομογραφίες – Αρκτικόλεξα – Ακρωνύμια

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

FPCC: Σύμβαση Πλαίσιο για την Κλιματική Αλλαγή

ΕΕ: Ευρωπαϊκή Ένωση

ΕΣΕΚ: Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα

ΣΑΕ: Συστήματα Αποθήκευσης Ενέργειας

PHEV: Plug-in Hybrid Electric Vehicle

BEV: Battery Electric Vehicle

EV: Ηλεκτρικό Όχημα

SG: Έξυπνο δίκτυο

MG: Μικροδίκτυο

DSM: Demand Side Management

EPRI: Ινστιτούτο Ερευνών Ηλεκτρικής Ενέργειας

EMS: Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας

HEMS : Οικιακό Σύστημα Διαχείρισης Ενέργειας

GAMS: General Algebraic Modeling System

OF: Objective Function

ΦΒ: Φωτοβολταϊκό

SoC: State of charge

PAR: Peak to Average Ratio

MIQCP: Mix Integer Quadratically Constrained Programming

Απόδοση ξενόγλωσσων όρων

On Load Tap Changers: Διακόπτες Μεταγωγής υπό Φορτίο

State of Charge: Κατάσταση Φόρτισης

Mix Integer Quadratically Constrained Programming: Μικτού ακέραιου Τετραγωνικός προγραμματισμός

Peak Clipping: Περικοπή φορτίου αιχμής

Valley Filling: Γέμισμα των κοιλάδων

Load Shifting: Μετατόπιση φορτίου

Strategic conservation: Στρατηγική εξοικονόμηση

Load Growth: Αύξηση του φορτίου

Flexible Load Shape: Ευέλικτο σχήμα φορτίου

Minimizing: Ελαχιστοποίηση