



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

**ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ  
ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ  
ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Φωτοπούλου

**Επίβλεψη :** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Βασίλειος Α. Ευαγγελόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

## ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΜΕ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

### ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Φωτοπούλου

**Επίβλεψη :** Παύλος Σ. Γεωργιλάκης, Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.  
Βασίλειος Α. Ευαγγελόπουλος, Υποψήφιος Διδάκτορας Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 3 Οκτωβρίου 2019

.....  
Παύλος Γεωργιλάκης  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Γεώργιος Κορρές  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Ιωάννης Γκόνος  
Αν. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2019

.....  
Μαρία Φωτοπούλου

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π

Copyright © Μαρία Φωτοπούλου, 2019.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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 δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και επίλυση του προβλήματος διείσδυσης ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ) όχι μόνο ως φορτία αλλά και ως πηγές ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο προτείνεται η συγκρότηση διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων και επιχειρείται ο σχεδιασμός μοντέλων εύρωστης βελτιστοποίησης για την ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο.

Μελετάται η βέλτιστη λειτουργία του δικτύου διανομής με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ καθώς και η βέλτιστη λειτουργία του ΔΔΗΕ με γνώμονα τη μεγιστοποίηση του κέρδους κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η εύρωστη βελτιστοποίηση των παραπάνω δύο προβλημάτων, κατά την οποία λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες των προβλέψεων κάποιων παραμέτρων. Προκειμένου να επιτευχθεί η συντονισμένη λειτουργία του δικτύου παρουσιάζεται το προτεινόμενο μοντέλο εύρωστης βελτιστοποίησης για τη συνεργασία του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων. Στόχο του προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελεί η εύρεση εκείνης της συντονισμένης λειτουργίας μεταξύ των διαχειριστών που θα προσεγγίζει όσο δυνατόν περισσότερο το ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και τα μέγιστα κέρδη των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων.

Όλα τα προβλήματα βελτιστοποίησης που προκύπτουν αποτελούν προβλήματα μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού. Στην παρούσα εργασία, τα προτεινόμενα μοντέλα υλοποιήθηκαν σε περιβάλλον GAMS και εφαρμόστηκαν σε δύο δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 14 και 33 κόμβων. Παρουσιάζονται, συγκρίνονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα των παραπάνω μοντέλων. Επιπλέον, προτείνονται και ορισμένες επεκτάσεις της εργασίας.

## ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Δίκτυα διανομής, ηλεκτρικά οχήματα, διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων, εύρωστη βελτιστοποίηση, διανεμημένη παραγωγή



## **ABSTRACT**

The scope of this diploma thesis is the incorporation of electric vehicles into the distribution network not only as loads but also as electrical energy sources. For this purpose, the participation of electrical vehicle aggregators is recommended.

Two optimization models are developed. The first one seeks to minimize the cost for the distribution network operator (DNO) whereas the second one seeks to maximize the gains for each electrical vehicle aggregator. Then, the robust optimization models of the above problems are developed, which take into account the possible prediction errors of certain input parameters. Then, a robust optimization model is proposed for the cooperation of the DNO with the electrical vehicle aggregators. The purpose of this model is to seek the operation of the distribution network that suits best the objectives of the DNO and the aggregators.

All the above optimization problems are mixed integer nonlinear programming models. The proposed models have been developed using GAMS and were applied to a 14-bus and a 33-bus distribution test system. The obtained results are presented and discussed. Future research on the topic is also proposed.

## **KEY WORDS**

Distribution systems, electrical vehicles, electrical vehicle aggregators, robust optimization, distributed generation





## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2018-2019 υπό την επίβλεψη του κ. Παύλου Γεωργιλάκη, Αναπληρωτή Καθηγητή της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Ε.Μ.Π. στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της, δίνοντάς μου την ευκαιρία να ασχοληθώ με ένα ενδιαφέρον θέμα. Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον υποψήφιο διδάκτορα κ. Βασίλειο Ευαγγελόπουλο για την καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλη την διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου για την στήριξη που μου έδωσε κατά την διάρκεια των σπουδών μου.

Αφιερώνω αυτή την εργασία στην αγαπημένη μου φίλη, Παναγιώτα Φλουκατούλα, που ήταν κοντά μου όλα αυτά τα χρόνια και στον Ευάγγελο Παππά, η αγάπη του οποίου πάντα θα αποτελεί πηγή έμπνευσης για εμένα.



## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ</b>	13
1.1 Συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ)	13
1.2 Ηλεκτρικά οχήματα	14
1.3 Αβεβαιότητες στα ΣΗΕ	16
1.4 Αντικείμενο της εργασίας	16
1.5 Δομή της εργασίας	17
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: Η ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΔΗΕ</b>	19
2.1 Εισαγωγή	19
2.2 Περιγραφή ΔΔΗΕ	19
2.3 Περιγραφή διανεμημένων ενεργειακών πόρων	20
2.3.1 Μονάδες διανεμημένης παραγωγής καυσίμου	22
2.3.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ)	23
2.4 Παρουσία διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων στα ΔΔΗΕ	24
2.4.1 Τα ηλεκτρικά οχήματα	25
2.4.2 Τα ηλεκτρικά οχήματα ως πηγές ενέργειας	26
2.4.3 Συνεργασία διαχειριστή του ΔΔΗΕ με διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων	27
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ</b>	29
3.1 Εισαγωγή	29
3.2 Σύνολα και παράμετροι	29
3.3 Πρόβλημα ελαχιστοποίησης κόστους διαχειριστή του ΔΔΗΕ	31
3.3.1 Αντικειμενική συνάρτηση	31

3.3.2 Περιορισμοί ΔΔΗΕ	33
3.3.3 Περιορισμοί ΜΔΠ καυσίμου	33
3.3.4 Περιορισμοί διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων	34
3.4 Πρόβλημα μεγιστοποίησης κέρδους διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων	36
3.4.1 Αντικειμενική συνάρτηση	36
3.4.2 Περιορισμοί	37
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΡΩΣΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΔΗΕ</b>	39
4.1 Εισαγωγή	39
4.2 Μαθηματική διατύπωση	43
4.3 Μοντέλο εύρωστης βελτιστοποίησης (αναδιατύπωση προβλήματος Κεφαλαίου 3)	45
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΤΟΥ ΔΔΗΕ ΜΕ ΤΟΥΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ</b>	49
5.1 Εισαγωγή	49
5.2 Κριτήρια για την συνεργασία του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων	49
5.3 Παρουσίαση του μοντέλου συνεργασίας του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων	51
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ–ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ</b>	59
6.1 Εισαγωγή	59
6.2 Εφαρμογή στο δίκτυο 14 κόμβων	61
6.2.1 Αποτελέσματα ελαχιστοποίησης κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ στο δίκτυο 14 κόμβων	66
6.2.2 Αποτελέσματα μεγιστοποίησης κερδών για τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο 14 κόμβων	69

6.2.3 Αποτελέσματα μοντέλου βέλτιστης συνεργασίας στο δίκτυο 14 κόμβων	71
6.3 Εφαρμογή στο δίκτυο 33 κόμβων	73
6.3.1 Αποτελέσματα ελαχιστοποίησης κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ στο δίκτυο 33 κόμβων	77
6.3.2 Αποτελέσματα μεγιστοποίησης κερδών για τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο 33 κόμβων	80
6.3.3 Αποτελέσματα μοντέλου βέλτιστης συνεργασίας στο δίκτυο 33 κόμβων	81
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ</b>	<b>85</b>
7.1 Συμπεράσματα	85
7.2 Μελλοντικές επεκτάσεις της εργασίας	86
<b>ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b>	<b>89</b>
<b>ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ</b>	<b>91</b>



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

### 1.1 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΣΗΕ)

Σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας (ΣΗΕ) είναι το σύνολο των εγκαταστάσεων και μέσων, τα οποία χρησιμεύουν στην εξυπηρέτηση των αναγκών ενός συνόλου καταναλωτών σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα ΣΗΕ παρέχει ηλεκτρική ενέργεια σε μια εξυπηρετούμενη περιοχή κατανάλωσης. Το σύστημα πρέπει να έχει μελετηθεί και να λειτουργεί σωστά ικανοποιώντας τις ακόλουθες απαιτήσεις:

- Πρέπει να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση.
- Η ζήτηση ενεργού και αέργου ισχύος μεταβάλλεται με το χρόνο και το σύστημα πρέπει να μπορεί να ικανοποιεί αυτή τη συνεχώς μεταβαλλόμενη ζήτηση.
- Η παρεχόμενη ισχύς πρέπει να ικανοποιεί ορισμένους όρους ποιότητας. Τρεις βασικοί παράγοντες που συνιστούν την ποιότητα αυτή είναι η σταθερή συχνότητα, η σταθερή τάση και η υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.
- Η ενέργεια πρέπει να παρέχεται με τα ελάχιστα οικονομικά και οικολογικά κόστη.

Δεδομένου ότι η εξυπηρέτηση των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια ενός συνόλου καταναλωτών προϋποθέτει τις διακεκριμένες φάσεις της παραγωγής, της μεταφοράς και της διανομής, σε ένα ΣΗΕ είναι δυνατόν να διακριθούν τα εξής ειδικότερα μέρη:

- **Παραγωγή**

Η παραγωγή περιλαμβάνει τους σταθμούς παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας μαζί με τους υποσταθμούς ανύψωσης της τάσης για τη μεταφορά υπό υπερευψηλή (ΥΥΤ) και υψηλή τάση (ΥΤ). Η σύγχρονη βιομηχανία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχει θεμελιωθεί στη μετατροπή της θερμικής ενέργειας των ορυκτών καυσίμων σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω θερμικών σταθμών.

- **Μεταφορά**

Με τον όρο μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας εννοείται το σύνολο διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου των εγκαταστάσεων και μέσων που χρησιμοποιούνται για την μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης, απ' όπου ξεκινούν τα δίκτυα διανομής. Επίσης τα συστήματα μεταφοράς τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης. Περιλαμβάνουν τα δίκτυα των γραμμών υψηλής τάσης, τους υποσταθμούς ζεύξης των δικτύων αυτών και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού μεταξύ των διαφόρων επιπέδων τάσεων που χρησιμοποιούνται στο δίκτυο μεταφοράς. Το σύστημα μεταφοράς θα πρέπει να παρέχει σταθερή (ή σχεδόν σταθερή) τάση και οι τάσεις των τριών φάσεων να είναι συμμετρικές. Σημειώνεται πως η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, διότι αυτό συνεπάγεται μικρότερες ηλεκτρικές απώλειες και συνεπώς οικονομικότερη λειτουργία. Οι εφαρμοζόμενες τάσεις μεταφοράς έχουν σήμερα τιμές 66 kV, 110 kV, 132 kV, 138 kV, 150 kV, 220 kV, 275 kV, 345 kV, 380 kV, 400 kV, 500 kV, 750 kV. Οι τάσεις μέχρι 220 kV αποτελούν την βαθμίδα υψηλών τάσεων (ΥΤ), από 275 kV μέχρι και 500 kV, την βαθμίδα των υπερυψηλών τάσεων (ΥΥΤ) και πάνω από 500 kV την βαθμίδα των εξαιρετικά υψηλών τάσεων (ΕΥΤ).

- **Διανομή**

Η διανομή περιλαμβάνει τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ) μέσης (ΜΤ) και χαμηλής τάσης (ΧΤ). Στα δίκτυα αυτά υπάγονται και οι σταθμοί διανομής μέσω των οποίων η μέση τάση υποβιβάζεται σε χαμηλή τάση. Με τα δίκτυα διανομής η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στις μικρότερες περιοχές φορτίου και παρέχεται στους καταναλωτές μέσης και χαμηλής τάσης.

Ένα σύστημα παραγωγής και μεταφοράς μπορεί να λειτουργεί μεμονωμένο ή διασυνδεδεμένο με ένα ή περισσότερα άλλα γειτονικά συστήματα. Σημειώνεται ότι η δομή του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική μεταβολή κατά τη διάρκεια της ημέρας και από την χωροταξική της κατανομή [1], [2]. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται η γενική δομή ενός ΣΗΕ με τα διάφορα τμήματά του.

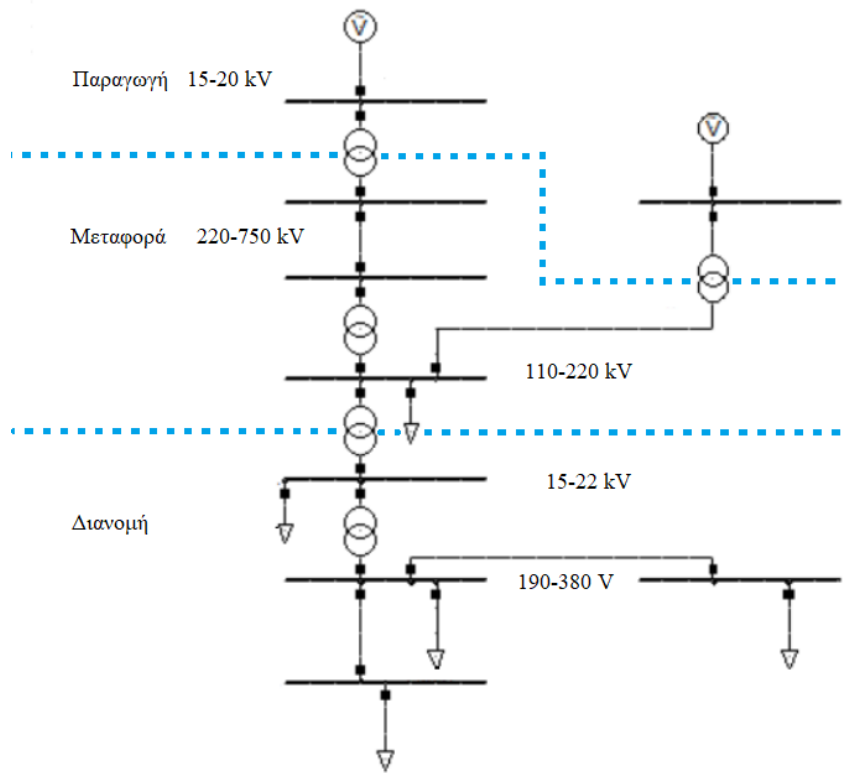
## 1.2 ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών έχει διαπιστωθεί πως οι τεχνολογίες καυσίμων έχουν δημιουργήσει έντονα οικολογικά προβλήματα στον πλανήτη. Για την αντιμετώπισή τους γίνεται μια συντονισμένη διεθνής προσπάθεια εύρεσης φιλικότερων προς το περιβάλλον εναλλακτικών. Καθώς μεγάλο μέρος των ρύπων στα αστικά κέντρα προέρχεται από τον τομέα των μετακινήσεων, η προσοχή έχει στραφεί στην αντικατάσταση των παραδοσιακών βενζινοκίνητων ή πετρελαιοκίνητων οχημάτων από ηλεκτρικά οχήματα.

Μερικά από τα βασικότερα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων έναντι των οχημάτων καυσίμου είναι:

- Χαμηλότερο κόστος μετακινήσεων





Σχήμα 1.1 : Γενική δομή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας [1].

- Ελάττωση ρύπων
- Ελάττωση ηχορύπανσης
- Δυνατότητα φόρτισης από εναλλακτικές πηγές

Παρά τα αδιαμφισβήτητα προτερήματά τους τα ηλεκτρικά οχήματα εξακολουθούν να έχουν κάποια μειονεκτήματα όπως:

- Υψηλό κόστος κτήσης
- Μικρότερη αυτονομία
- Δυσκολία εξυπηρέτησης σχετικά με τη φόρτιση

Η εξέλιξη αυτή αναμένεται να εδραιωθεί και προκειμένου οι δυσκολίες που παρουσιάζονται να υπερνικηθούν έχει ανοίξει πολλά πεδία έρευνας σχετικά με τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των ηλεκτρικών οχημάτων, με τους τρόπους εξυπηρέτησης τους από σταθμούς φόρτισης και σχετικά με τη δυνατότητα φόρτισης των οχημάτων από

ανανεώσιμες πηγές [3]. Ένα από αυτά τα πεδία, που έχει αρχίσει να αποκτά ολοένα μεγαλύτερο ενδιαφέρον είναι η πιθανή αξιοποίηση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές ενέργειας από το δίκτυο διανομής, εγχείρημα που προϋποθέτει αφενός την ύπαρξη πλήθους ηλεκτρικών οχημάτων, αφετέρου την ύπαρξη ανάλογου διαχειριστή για τον προγραμματισμό της προβλεπόμενης λειτουργίας [4].

### 1.3 ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΕΣ ΣΤΑ ΣΗΕ

Η λειτουργία των ΣΗΕ, όπως η λειτουργία όλων των πολύπλοκων συστημάτων, σχεδιάζεται μέσω μοντέλων προσομοίωσης. Προκειμένου ένα μοντέλο να προσεγγίζει όσο δυνατόν περισσότερο την πραγματικότητα οι σημαντικότερες προϋποθέσεις που οφείλει να πληροί είναι η ορθή και λεπτομερής αναπαράσταση όλων των στοιχείων που το απαρτίζουν καθώς και ο χειρισμός των αγνώστων παραμέτρων. Συνεπώς, ο βέλτιστος προγραμματισμός λειτουργίας των δικτύων διανομής γίνεται ακόμα πιο περίπλοκος αν ληφθούν υπόψη οι αβεβαιότητες που εισάγουν στο σύστημα διάφοροι παράγοντες στοχαστικής φύσης, όπως η τυχαία μεταβολή του φορτίου του δικτύου, η τυχαία ισχύς εξόδου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών), η τυχαία μεταβολή του κόστους καυσίμων και η τυχαία μεταβολή της τιμής αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας.

Επομένως, οι μηχανικοί που προγραμματίζουν τη λειτουργία του δικτύου καλούνται να μελετήσουν τις αβεβαιότητες που εισάγονται ώστε να καλύψουν τις απαιτήσεις του δικτύου με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Λόγω της στοχαστικής φύσης των αγνώστων παραμέτρων ο βέλτιστος σχεδιασμός πρέπει να γίνει με κάποιο επίπεδο εμπιστοσύνης.

Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διάφοροι μέθοδοι χειρισμού των αβεβαιοτήτων και ανάλυσης πιθανών σεναρίων ή ακόμα και μέθοδοι απαλλαγής των μοντέλων από τις αβεβαιότητες. Πλέον δεν αρκεί μια απλή ροή φορτίου ή η βελτιστοποίηση κάποιας αντικειμενικής συνάρτησης για την ανάλυση ενός ΣΗΕ αλλά χρειάζεται σχεδιασμός λειτουργίας τέτοιος ώστε το σύστημα να είναι μπορεί να λειτουργήσει κάτω από όλες τις πιθανές μεταβολές των παραμέτρων και να καταστεί εύρωστο [5].

### 1.4 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η διατύπωση και επίλυση του προβλήματος διείσδυσης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο διανομής όχι μόνο ως φορτία αλλά και ως πηγές ενέργειας. Σε αυτό το πλαίσιο προτείνεται η συγκρότηση διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων και επιχειρείται ο σχεδιασμός μοντέλων εύρωστης βελτιστοποίησης για την ένταξη των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο. Μελετάται τόσο η βέλτιστη λειτουργία με γνώμονα το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ όσο και η βέλτιστη λειτουργία με γνώμονα τη μεγιστοποίηση του κέρδους κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων. Με βάση τα αποτελέσματα των παραπάνω μοντέλων επιχειρείται ο σχεδιασμός ενός μοντέλου εύρωστης βελτιστοποίησης για την συνεργασία του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων. Στόχο του προβλήματος βελτιστοποίησης αποτελεί η εύρεση εκείνης της συντονισμένης λειτουργίας μεταξύ των διαχειριστών που θα προσεγγίζει όσο δυνατόν περισσότερο το ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και τα μέγιστα κέρδη των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων.

## 1.5 ΔΟΜΗ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η παρούσα εργασία οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια:

- ✓ Στο **Κεφάλαιο 2** γίνεται περιγραφή του δικτύου διανομής και των μονάδων διανεμημένης παραγωγής. Παρουσιάζονται οι τρόποι με τους οποίους τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να ενταχθούν στο δίκτυο διανομής και προτείνεται η συγκρότηση διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 3** παρουσιάζονται τα προτεινόμενα μαθηματικά μοντέλα του προβλήματος ελαχιστοποίησης κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και του προβλήματος μεγιστοποίησης κέρδους ενός διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 4** παρουσιάζονται τα αντίστοιχα μαθηματικά μοντέλα εύρωστης βελτιστοποίησης του προβλήματος ελαχιστοποίησης κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και του προβλήματος μεγιστοποίησης κέρδους ενός διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 5** παρουσιάζεται το προτεινόμενο μοντέλο εύρωστης βελτιστοποίησης για τη συνεργασία του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 6** παρουσιάζονται και σχολιάζονται τα αποτελέσματα εφαρμογής των παραπάνω μοντέλων σε δίκτυα διανομής 14 και 33 κόμβων.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 7** γίνεται μια σύνοψη της εργασίας και προτείνονται τρόποι βελτίωσης και επέκτασής της.
- ✓ Στο **Κεφάλαιο 8** παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε στην εργασία αυτή.



### Η ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΕΝΕΡΓΑ ΔΔΗΕ

#### 2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

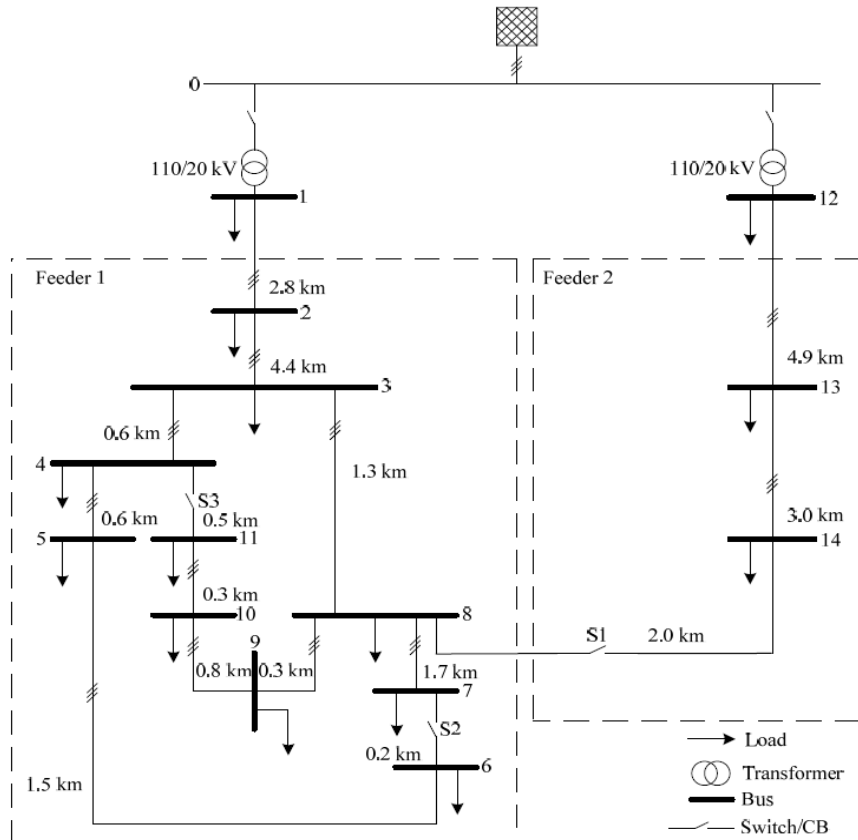
Τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (ΔΔΗΕ) είχαν αρχικά σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να εξυπηρετούν τη μεταφορά ηλεκτρικής ενέργεια από τον υποσταθμό υποβιβασμού υψηλής τάσης – μέσης τάσης (ΥΣ ΥΤ/ΜΤ) στους καταναλωτές. Ωστόσο, η αυξημένη διείσδυση μονάδων διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ) και συγκεκριμένα η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) έχουν δημιουργήσει νέες προκλήσεις στη λειτουργία των ΔΔΗΕ. Η ανάγκη για τοπικό και συντονισμένο έλεγχο της τάσης των κόμβων ενός ΔΔΗΕ, καθώς και των τεχνικών ορίων λειτουργίας των γραμμών διανομής, μετατρέπει τα ΔΔΗΕ από παθητικά σε ενεργά. Το γεγονός αυτό απαιτεί αλλαγές στον τρόπο διαχείρισης των ΔΕΠ που είναι συνδεδεμένα στα ΔΔΗΕ, προκειμένου να διασφαλισθεί η ομαλή σύνδεση τους στο δίκτυο και να διασφαλισθεί η σωστή εξυπηρέτηση των ηλεκτρικών φορτίων.

#### 2.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΔΗΕ

Με τον όρο διανομή ηλεκτρικής ενέργειας περιγράφεται το σύνολο των διαδικασιών λειτουργίας και ελέγχου με τις οποίες η ηλεκτρική ενέργεια διανέμεται στους καταναλωτές. Διακρίνονται δύο βαθμίδες διανομής: η διανομή μέσης τάσης (ή πρωτεύουσα διανομή) και η διανομή χαμηλής τάσης (ή δευτερεύουσα διανομή) [1].

Το δίκτυο διανομής μέσης τάσης τροφοδοτείται από τους σταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και τροφοδοτεί τους υποσταθμούς διανομής ΜΤ/ΧΤ και τους καταναλωτές μέσης τάσης. Τέτοιοι καταναλωτές είναι οι περισσότερες βιομηχανίες, νοσοκομεία, μεγάλα καταστήματα, τράπεζες κλπ. Η μέση τάση διανομής περιλαμβάνει σήμερα τιμές από 6.6 kV έως 20 kV.

Τα ΔΔΗΕ μέσης τάσης είναι συνήθως βροχοειδή αλλά λειτουργούν ακτινικά, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.1 [6]. Η βροχοειδής δομή επιτρέπει οικονομία γραμμών για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησης και προσφέρει εναλλακτική τροφοδοσία σε περίπτωση βλαβών, ενώ η ακτινική λειτουργία επιβάλλεται από την απλότητά της προστασίας και της ροής της ηλεκτρικής ενέργειας στα δίκτυα αυτά. Ανάλογα με την κατασκευή τους τα δίκτυα διανομής διακρίνονται σε εναέρια και υπόγεια. Βασικά πλεονεκτήματα των εναέριων δικτύων έναντι των υπόγειων είναι το μικρότερο κόστος συντήρησης και η ταχύτερη αποκατάσταση των βλαβών. Στις πυκνοκατοικημένες περιοχές των πόλεων τα δίκτυα διανομής κατασκευάζονται συνήθως υπόγεια, αφενός διότι δεν υπάρχει ο απαιτούμενος χώρος ώστε να τηρούνται οι αποστάσεις

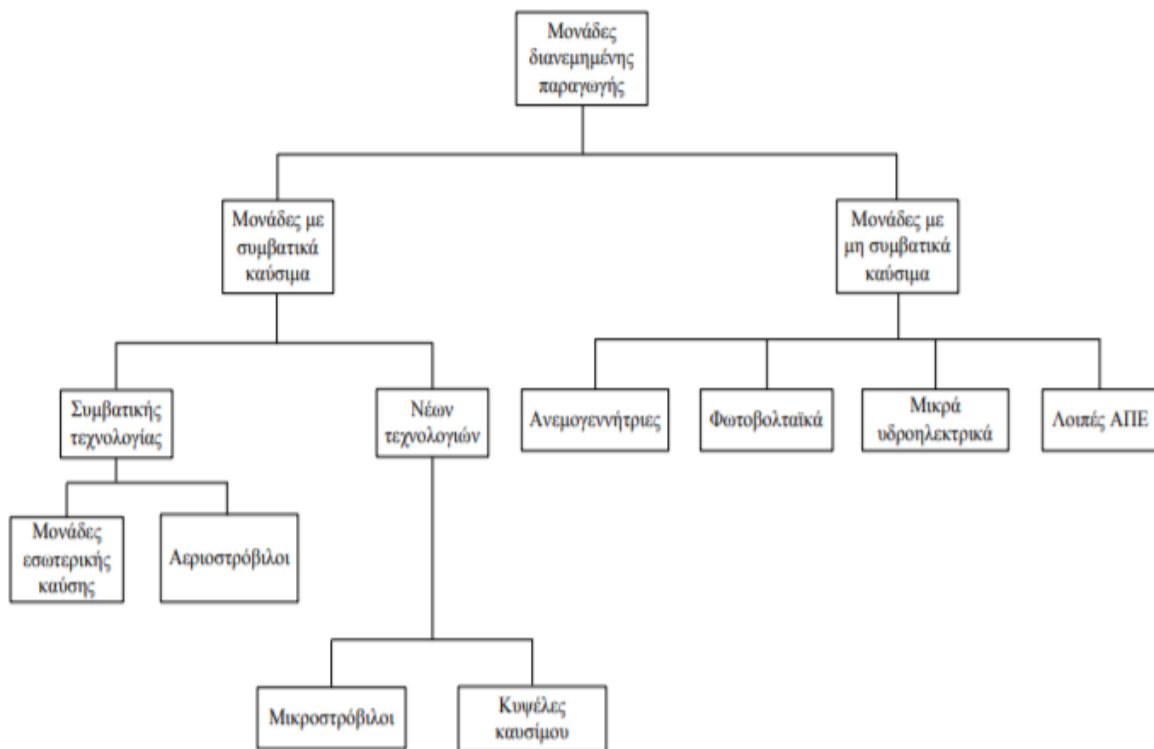


Σχήμα 2.1 : Δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

ασφαλείας από τα κτίρια και αφετέρου για λόγους αισθητικής [2]. Έτσι σε περιοχές μεγάλης πυκνότητας φορτίου τα δίκτυα είναι κατά το πλείστον υπόγεια, δηλαδή οι γραμμές διανομής αποτελούνται από καλώδια, ενώ στις λοιπές περιοχές τα δίκτυα είναι κατά κανόνα εναέρια. Η χαμηλή τάση διανομής είναι εκείνη με την οποία τροφοδοτούνται οι οικιακοί καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης αναχωρούν από τους ζυγούς χαμηλής τάσης των υποσταθμών διανομής και τροφοδοτούν τις παροχές των καταναλωτών χαμηλής τάσης. Τα αστικά δίκτυα διανομής χαμηλής τάσης ιδίως των πυκνοκατοικημένων περιοχών είναι κατά κανόνα υπόγεια. Επειδή οι παροχές χαμηλής τάσης μπορεί να είναι τριφασικές ή μονοφασικές, η χαμηλή τάση αναφέρεται με δύο τιμές. Η πρώτη αναφέρεται στην πολική τάση του συστήματος και η δεύτερη στην φασική. Το σύστημα χαμηλής τάσης το οποίο εφαρμόζεται πλέον είναι 400/230 V.

### 2.3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΟΡΩΝ

Το δίκτυο διανομής μέσης τάσης τροφοδοτείται από το σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας μέσω του ΥΣ ΥΤ/ΜΤ και από μονάδες διανεμημένης παραγωγής (ΜΔΠ). Οι ΜΔΠ είναι εκείνες οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που διασυνδέονται στο ΔΔΗΕ (ΜΤ ή ΧΤ) ή/και την πλευρά του καταναλωτή. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να προέρχεται είτε από καύσιμο είτε από εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Οι ΜΔΠ έχουν ονομαστική ισχύ από μερικά kW έως λίγα MW. Τα τελευταία χρόνια χρησιμοποιείται η γενικότερη ορολογία των διανεμημένων πηγών ενέργειας (ΔΕΠ), που περιλαμβάνουν τις ΜΔΠ, τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και τα αποκρινόμενα φορτία [7].



**Σχήμα 2.2 :** Οι κατηγορίες των ΜΔΠ.

Οι ΜΔΠ διαχωρίζονται σε μονάδες καυσίμου ή μονάδες εναλλακτικών μορφών ενέργειας (Σχήμα 2.2). Οι μονάδες με συμβατικά καύσιμα διαχωρίζονται σε μονάδες συμβατικής τεχνολογίας (όπως μονάδες εσωτερικής καύσης και αεριοστρόβιλοι) και σε μονάδες νέων τεχνολογιών (όπως μικροστρόβιλοι, κυψέλες καυσίμου). Μονάδες με εναλλακτικές μορφές ενέργειας είναι οι ΑΠΕ, όπως οι ανεμογεννήτριες, τα φωτοβολταϊκά, τα μικρά υδροηλεκτρικά κλπ.

Οι ΜΔΠ κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες ανάλογα με την ισχύ την οποία παράγουν ως εξής:

- Μικρής κλίμακας: 1 W έως 5 kW
- Μεσαίας κλίμακας: 5 kW έως 1 MW
- Μεγάλης κλίμακας: 1 MW έως 10 MW

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται διαρκώς αυξανόμενη εγκατάσταση ΑΠΕ στα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής πολλές κυβερνήσεις έχουν θέσει φιλόδοξους στόχους για τη μείωση των εκπομπών αερίων ρύπων κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Με την εγκατάσταση ΑΠΕ αποφεύγεται η κατασκευή νέων θερμικών μονάδων, ενώ με την εγκατάσταση ΜΔΠ γενικότερα αποφεύγεται η αναβάθμιση των γραμμών μεταφοράς. Επιπλέον η παρουσία των ΜΔΠ κοντά στα κέντρα κατανάλωσης φορτίου μπορεί να έχει θετική επίδραση στην ποιότητα ισχύος και στην αξιοπιστία παροχής. Με τις ΜΔΠ η ισχύς μεταφέρεται σε μικρότερη απόσταση, οπότε μειώνονται οι απώλειες. Επίσης μειώνεται η ροή ισχύος από υψηλότερα επίπεδα τάσης προς το φορτίο. Αυτό μειώνει το ρίσκο υπερφόρτισης στα υψηλότερα επίπεδα τάσης. Έτσι οι ΜΔΠ γενικά υπερέχουν από πλευράς υπερφόρτισης και

απωλειών. Η μεγαλύτερη μείωση των απωλειών επιτυγχάνεται όταν η ΜΔΠ βρίσκεται πολύ κοντά με το φορτίο.

Οι ΜΔΠ είναι ιδιαίτερα χρήσιμες στο πλαίσιο της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού. Είναι διανεμημένες σε διάφορα σημεία του δικτύου διανομής κοντά στους καταναλωτές, οπότε η βλάβη σε μια ΜΔΠ θα έχει περιορισμένη επίπτωση σε ολόκληρο το σύστημα σε σχέση με μια βλάβη σε μια μεγάλη θερμική μονάδα παραγωγής ή σε μια μεγάλη γραμμή μεταφοράς. Επιπλέον οι ΜΔΠ είναι μονάδες διαφορετικών τεχνολογιών και διαφορετικών καυσίμων, συνεπώς η διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας δημιουργεί την αίσθηση του ελέγχου του ενεργειακού εφοδιασμού για την εξυπηρέτηση των μελλοντικών ενεργειακών αναγκών.

### 2.3.1 ΜΟΝΑΔΕΣ ΔΙΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

Οι ΜΔΠ καυσίμου συνήθως χρησιμοποιούν πετρελαϊκά προϊόντα, φυσικό αέριο ή υδρογόνο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορούν να διαχωριστούν σε μονάδες συμβατικής και νέας τεχνολογίας. Τα συνηθέστερα παραδείγματα συμβατικής τεχνολογίας που απαντώνται στα δίκτυα διανομής είναι τα παρακάτω [8]:

- **Μονάδες εσωτερικής καύσης**

Πρόκειται για θερμικές μηχανές στις οποίες η καύση του καυσίμου γίνεται στο εσωτερικό σώμα της ίδιας της μηχανής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελούν οι ντιζελογεννήτριες. Είναι μια από τις παλιότερες και πιο κοινές λύσεις σε ζητήματα εφεδρείας και πολλά μη συνδεδεμένα νησιά στηρίζονται κυρίως σε αυτές για την κάλυψη των αναγκών τους.

- **Αεριοστρόβιλοι**

Ο αεριοστρόβιλος (Gas Turbine) είναι μια θερμική μηχανή, η οποία χρησιμοποιεί ως εργαζόμενο μέσο το αέριο. Στον στρόβιλο της μηχανής (Turbine) εκτονώνονται τα καυσαέρια και γενικότερα το εργαζόμενο μέσο, παράγοντας το ωφέλιμο έργο της εγκατάστασης, το οποίο προσδίνεται στη γεννήτρια για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Με την πάροδο του χρόνου οι τεχνολογικές εξελίξεις έχουν συμβάλει στην ανάπτυξη νέων μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής καυσίμου. Οι κυριότερες κατηγορίες είναι οι ακόλουθες [9]:

- **Μικροστρόβιλοι**

Οι μικροστρόβιλοι είναι μικρού μεγέθους μηχανές καύσης που εμφανίζουν μεγάλη ποικιλία καυσίμων (κατά βάση φυσικό αέριο) και χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αποτελούνται από έναν συμπιεστή, έναν καυστήρα, έναν στρόβιλο και μία γεννήτρια τα οποία βρίσκονται στον ίδιο άξονα. Κατά τη λειτουργία τους, μέσω μιας βοηθητικής μηχανής, εισάγεται αέρας, ο οποίος συμπιέζεται και



αναμειγνύεται με το καύσιμο. Στη συνέχεια το μείγμα που προκύπτει μεταφέρεται στο θάλαμο καύσης. Τα θερμά αέρια που παράγονται, επιταχύνουν τον άξονα με αποτέλεσμα τη λειτουργία της γεννήτριας και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

- **Κυψέλες καυσίμου**

Οι κυψέλες καυσίμου χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο και αναλαμβάνουν τη μετατροπή του καυσίμου σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια. Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος. Πρόκειται για νέο πεδίο έρευνας καθώς η συστηματική έρευνα πάνω σε αυτές άρχισε μόλις τη δεκαετία του '60.

### 2.3.2 ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ (ΑΠΕ)

Τις τελευταίες δεκαετίες η έρευνα για εναλλακτικές μορφές ενέργειας έχει στραφεί κυρίως στον τομέα των ΑΠΕ, κυρίως λόγω της «φιλικότητάς» τους προς το περιβάλλον.

Με την διεξόδυση των ΑΠΕ στο παγκόσμιο ενεργειακό ισοζύγιο επιτυγχάνεται μείωση της ρύπανσης του ήδη αρκετά βεβαρημένου φυσικού περιβάλλοντος. Θεωρούνται η λύση στο επερχόμενο ενεργειακό “αδιέξοδο” που πρόκειται να βρεθεί αντιμέτωπος ο ανθρωπίνος πολιτισμός από την αναμενόμενη σταδιακή εξάντληση των ορυκτών καυσίμων μέσα στον επόμενο αιώνα. Βασικό τους προτέρημα αποτελεί επίσης το γεγονός ότι οι ΑΠΕ, ανεξάρτητα από τον ρυθμό εκμετάλλευσής τους συνεχίζουν να είναι άμεσα διαθέσιμες ή αναπληρώνονται σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Οι βασικότερες μορφές των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι [10]:

- **Ηλιακή ενέργεια**

Η ηλιακή ενέργεια αξιοποιείται κυρίως με τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μετατρέπουν την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική, λύνοντας έτσι το πρόβλημα της ηλεκτροδότησης περιοχών που είναι δύσκολο να τροφοδοτηθούν από το ηλεκτρικό δίκτυο (απομονωμένα σπίτια, φάροι, κ.α). Στην Ελλάδα υπάρχουν προϋποθέσεις για ανάπτυξη και εφαρμογή των φωτοβολταϊκών συστημάτων, λόγω του ιδιαίτερα υψηλού δυναμικού ηλιακής ενέργειας.

- **Αιολική ενέργεια**

Η εκμετάλλευση της ενέργειας του ανέμου υπήρξε από την αρχαιότητα μια λύση για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του ανθρώπου: ιστιοφόρα, ανεμόμυλοι κ.λ.π. Για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας χρησιμοποιούνται σήμερα οι ανεμογεννήτριες, οι οποίες μετατρέπουν την ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Οι νησιωτικές περιοχές της Ελλάδας είναι από τις ευνοϊκότερες γεωγραφικές θέσεις παγκοσμίως για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας.

- **Βιομάζα**

Ο όρος βιομάζα περιλαμβάνει τα καυσόξυλα, τα φυτικά και δασικά υπολείμματα, τα ζωικά απόβλητα, τα αστικά απορρίμματα και τα υπολείμματα της βιομηχανίας τροφίμων και της αγροτικής βιομηχανίας τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ενέργειας

- **Γεωθερμία**

Η γεωθερμία είναι μια ήπια ανανεώσιμη ενεργειακή πηγή που μπορεί με τις σημερινές τεχνολογικές δυνατότητες να καλύψει ενεργειακές ανάγκες θέρμανσης αλλά και να παράγει ηλεκτρική ενέργεια σε ορισμένες περιπτώσεις. Η θερμοκρασία του γεωθερμικού ρευστού ή ατμού ποικίλει από περιοχή σε περιοχή και μπορεί να έχει τιμές από 25 °C έως 350 °C. Στις περιπτώσεις που τα γεωθερμικά ρευστά έχουν υψηλή θερμοκρασία (πάνω από 150 °C) η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

- **Υδραυλική ενέργεια**

Η υδραυλική ενέργεια αποτελεί παραδοσιακή πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται εδώ και πολλά χρόνια από τον άνθρωπο. Το νερό πέφτοντας από κάποιο ύψος ή ρέοντας με μεγάλη ταχύτητα μπορεί να περιστρέψει τροχούς με πτερύγια (υδροστροβίλους). Αυτή η περιστροφή αξιοποιείται παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια σε ειδικές εγκαταστάσεις (υδροηλεκτρικοί σταθμοί).

Ωστόσο, εκτός από πλεονεκτήματα, οι ΑΠΕ έχουν και κάποια μειονεκτήματα, όπως για παράδειγμα το σχετικά υψηλό κόστος κεφαλαίου ανά kW εγκατεστημένης ισχύος σε σχέση με τους μεγάλους σταθμούς παραγωγής. Ένα ακόμα μειονέκτημα αποτελεί το γεγονός της αδυναμίας ακριβούς πρόβλεψης της ικανότητας παραγωγής συγκεκριμένων ΑΠΕ, όπως τα αιολικά πάρκα. Στην περίπτωση αυτή πρέπει να γίνει μετεωρολογική πρόβλεψη, η οποία όμως δεν μπορεί να προβλέψει με ακρίβεια την ποσότητα ισχύος που μπορεί να παραχθεί. Σε μικρά χρονικά διαστήματα μπορούν να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις στη δυνατότητα παραγωγής ή ακόμα και απώλεια της παραγωγής εξαιτίας της φύσης ορισμένων πηγών, όπως για παράδειγμα ο άνεμος. Έτσι υπάρχει συγκεκριμένο ποσοστό της ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί από ανανεώσιμες πηγές, δηλαδή η διείσδυση των ΑΠΕ έχει ένα όριο, οπότε πρέπει να υπάρχει εφεδρεία συμβατικών μονάδων παραγωγής. Αυτό το πρόβλημα είναι ακόμα πιο σοβαρό στα αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα (π.χ. μη διασυνδεδεμένα νησιά). Τέλος, πρέπει να σημειωθεί πως όταν είναι μεγάλη η διείσδυση των μονάδων ΑΠΕ, το επίπεδο διαταραχών της ποιότητας ισχύος μπορεί να αυξηθεί περισσότερο από το αποδεκτό για κάποιους καταναλωτές (πχ flicker, βύθιση τάσης κλπ).

## 2.4 ΠΑΡΟΥΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΑ ΔΔΗΕ

Η εξέλιξη της τεχνολογίας των αυτοκινήτων και των μπαταριών έχει καταστήσει πλέον την ηλεκτροκίνηση μια απτή πραγματικότητα, η οποία αλλάζει ριζικά τα δεδομένα της αυτοκίνησης. Η αντιμετώπιση των μεγάλων περιβαλλοντικών και οικονομικών προκλήσεων, που συνδέονται με την κλιματική αλλαγή και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα δημιουργεί

νέες συνθήκες για την αυτοκινητοβιομηχανία αλλά και για την καθημερινότητα των ανθρώπων. Σε αυτό το πλαίσιο, ηλεκτρική ενέργεια από εναλλακτικές πηγές ενέργειας κερδίζουν συνεχώς έδαφος. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να χαρακτηριστούν ως διανεμημένοι ενεργειακοί πόροι, χάρη στη δυνατότητά τους να είναι διαχειρίσιμα ως φορτία ή ακόμα και ως πηγές ηλεκτρικής ενέργειας υπό προϋποθέσεις. Αξίζει να τονισθεί ότι τα ηλεκτρικά οχήματα, όταν συνδυάζονται με ΑΠΕ, μπορούν να θεωρηθούν ως φιλικά προς το περιβάλλον ηλεκτρικά φορτία ή/και πηγές ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 2.4.1 ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΩΣ ΦΟΡΤΙΑ

Όσο εξαπλώνονται και εξελίσσονται τα ηλεκτρικά οχήματα, τόσο περισσότερο ο ανεφοδιασμός τους καθίσταται από σημείο προβληματισμού για τους οδηγούς, σε σημείο υπεροχής τους έναντι των αυτοκινήτων με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Τα ΔΔΗΕ διαρκώς προσπαθούν να εξασφαλίσουν την ευρύτερη δυνατή διαθεσιμότητα πηγών ανεφοδιασμού (σταθμών φόρτισης), ενώ η τεχνολογία καθιστά ολοένα τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων πιο προσιτή και εύκολη διαδικασία.

Διακρίνονται τρία διαφορετικά είδη φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων [3]:

- **Οικιακή φόρτιση**

Η φόρτιση του οχήματος μπορεί να γίνει από μια απλή πρίζα, που πρέπει να διαθέτει όμως κάποιες ελάχιστες προδιαγραφές (όπως ξεχωριστή γραμμή με δική της ασφάλεια στον πίνακα χαμηλής τάσης). Στην περίπτωση της χρήσης μιας οικιακής πρίζας, μια πλήρης επαναφόρτιση άδειας μπαταρίας από μια συνηθισμένη μονοφασική παροχή, όπως αυτές που υπάρχουν στις περισσότερες οικιακές ηλεκτρικές εγκαταστάσεις, μπορεί να διαρκέσει από 9 έως 11 ώρες (ή περισσότερες) αναλόγως του τύπου του οχήματος και της χωρητικότητας των μπαταριών του. Για ταχύτερη φόρτιση, είναι δυνατή η εγκατάσταση ειδικής συσκευής φόρτισης με ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου και προστασίας, το οποίο ανάλογα με τη διαθέσιμη ισχύ και το μοντέλο του οχήματος μπορεί να ολοκληρώσει την πλήρη επαναφόρτιση των μπαταριών από 30% έως και 70% ταχύτερα συγκριτικά με τη χρήση μιας απλής πρίζας.

- **Ημιταχεία / κοινόχρηστη φόρτιση**

Οι συσκευές ημιταχείας φόρτισης που τοποθετούνται σε κοινόχρηστα σημεία, όπως σε πεζοδρόμια, οργανωμένους χώρους στάθμευσης και εμπορικά κέντρα, είναι ειδικές συσκευές που παρέχουν εναλλασσόμενο ρεύμα με ισχύ από 3,7 kW έως 22 kW. Μια πλήρης επαναφόρτιση άδειας μπαταρίας σε κοινόχρηστους σταθμούς ημιταχείας φόρτισης διαρκεί από 1 έως 5 ώρες, αναλόγως του τύπου του οχήματος και της έντασης ρεύματος του φορτιστή.

- **Ταχεία φόρτιση**

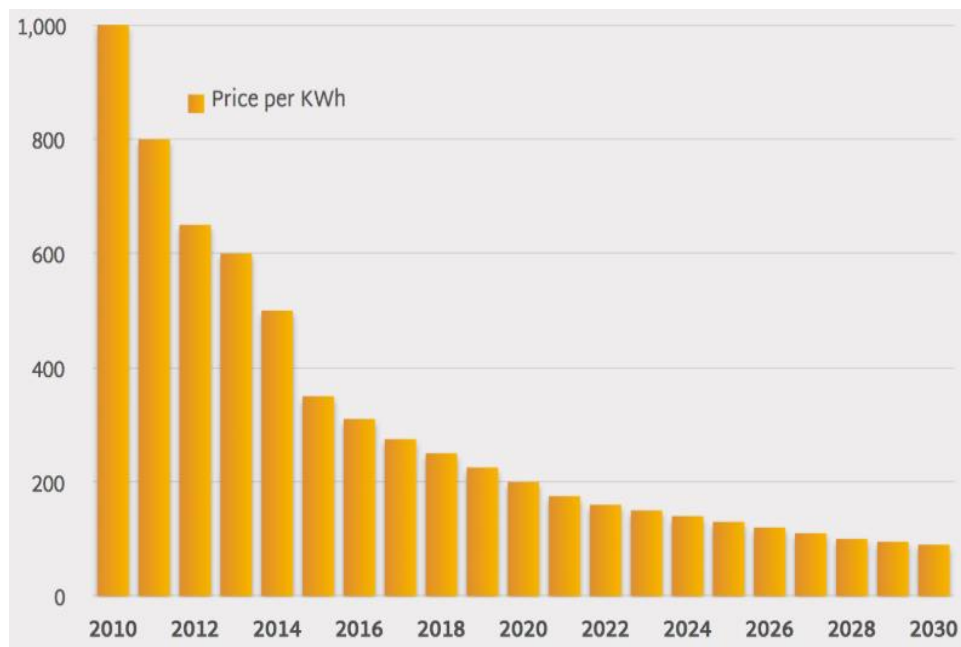
Οι σταθμοί ταχυφόρτισης μπορούν να καλύψουν τις ανάγκες τόσο των οδηγών που θέλουν να συνδυάσουν την στάθμευση του αυτοκινήτου τους με το γρήγορο και ασφαλή ανεφοδιασμό του σε σχέση με τους σταθμούς ημιταχείας φόρτισης, όσο και αυτών που αναζητούν να φορτίσουν το όχημα τους εντός ολίγων λεπτών, προκειμένου

να συνεχίσουν αμέσως την πορεία τους. Ο αριθμός των σταθμών ταχυφόρτισης αυξάνεται διαρκώς με στόχο να ανταποκριθεί στις προσδοκίες όλων όσων χρησιμοποιούν ηλεκτρικό όχημα ή σχεδιάζουν στο μέλλον να το χρησιμοποιήσουν.

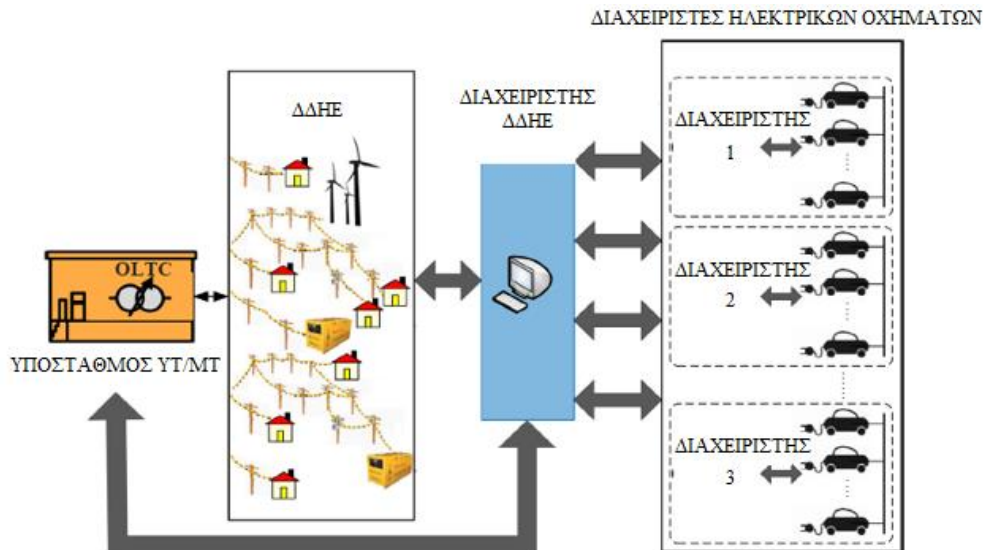
#### 2.4.2 ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ ΩΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Ένα νέο πεδίο έρευνας που αποκτά όλο και περισσότερο ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια αποτελεί η αξιοποίηση των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων όσο αυτά βρίσκονται στο σταθμό φόρτισης. Ειδικότερα, στο διάστημα που μεσολαβεί από την άφιξη μέχρι την αναχώρηση των οχημάτων από το σταθμό είναι δυνατό, εκτός από τη φόρτισή τους στο επιθυμητό επίπεδο, να επιτευχθεί η χρήση τους ως πηγές ενέργειας για το δίκτυο διανομής. Αυτό σημαίνει πως τα οχήματα μπορούν να παρέχουν ενέργεια στο δίκτυο ή να αποθηκεύουν ενέργεια προκειμένου να τροφοδοτηθεί αργότερα στο δίκτυο, όταν αυτό συμφέρει το διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

Βέβαια η λειτουργία αυτή έχει νόημα και από την πλευρά των οχημάτων μόνο όταν οι μπαταρίες τους αξιοποιούνται έναντι αντιτίμου για την καταπόνησή τους. Το γεγονός αυτό ίσως εγείρει ερωτήματα σχετικά με το πόσο συμφέρουσα μπορεί να είναι αυτή η λύση, λόγω του σχετικά μεγάλου κόστους κτήσης των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων. Στην πραγματικότητα όμως αυτό το ζήτημα δε θα έπρεπε να αποτελέσει εμπόδιο καθώς το κόστος κτήσης των μπαταριών των οχημάτων διαρκώς μειώνεται και σύμφωνα με προβλέψεις σε λίγα χρόνια θα είναι σημαντικά μικρότερο από το κόστος της ενέργειας που προέρχεται από τις περισσότερες ΜΔΠ (Σχήμα 2.3).



Σχήμα 2.3 : Προβλέψεις για το κόστος κτήσης μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων [11].



**Σχήμα 2.4 :** Συντονισμένη λειτουργία διαχειριστή του ΔΔΗΕ με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων [4].

Το σύνολο όλων αυτών των παραμέτρων και περιορισμών που πρέπει να ληφθούν υπόψη για την ομαλή συνεργασία των οχημάτων με το δίκτυο καθιστά εμφανή την ανάγκη ενός μεσολαβητή μεταξύ των δύο αυτών μερών, ή αλλιώς διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων (electric vehicle aggregator). Ρόλος του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων είναι να γνωρίζει τις ανάγκες τόσο του διαχειριστή του δικτύου διανομής όσο τις απαιτήσεις των οχημάτων ώστε να ορίσει την ενέργεια που τα οχήματα θα πρέπει να καταναλώσουν ή να παράξουν κάθε ώρα της ημέρας για το δίκτυο. Ένας διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να έχει υπό τον έλεγχό του όλα ή μέρος των ηλεκτρικών οχημάτων, σε περίπτωση που υπάρχουν στο δίκτυο ηλεκτρικά οχήματα που ελέγχονται από άλλον διαχειριστή (Σχήμα 2.4)

### 2.4.3 ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΤΟΥ ΔΔΗΕ ΜΕ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Αξίζει εδώ να σημειωθεί πως το πρόβλημα της ηλεκτρικής οικονομίας επιδέχεται περισσότερες από μία λύσεις, αναλόγως τα συμφέροντα που εξυπηρετούνται. Για παράδειγμα, η βέλτιστη λύση που ελαχιστοποιεί το κόστος του διαχειριστή του δικτύου διανομής διαφέρει από αυτή που μεγιστοποιεί το κέρδος ενός διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων (ή άλλων διανεμημένων ενεργειακών πόρων αντίστοιχα).

Η συνήθης προσέγγιση του προβλήματος στοχεύει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του συστήματος από την πλευρά του διαχειριστή του ΔΔΗΕ. Παρ' όλ' αυτά, η ολοένα αυξανόμενη διείσδυση ΜΑΠ στο δίκτυο συνιστά την επίλυση του προβλήματος και από διαφορετικές οπτικές, τόσο από τη σκοπιά του διαχειριστή του ΔΔΗΕ όσο και από τη σκοπιά των διαχειριστών των ηλεκτρικών οχημάτων ώστε να δοθεί μια λύση που να έχει όσο το δυνατόν μικρότερη απόκλιση από τις βέλτιστες λύσεις του κάθε διαχειριστή χωριστά.



## ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ

### 3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η βέλτιστη λειτουργία ενός ΔΔΗΕ συνιστά την ομαλή τροφοδότηση των φορτίων από τις διαθέσιμες πηγές ενέργειας με σκοπό την ικανοποίηση των επιθυμητών στόχων στον μέγιστο δυνατό βαθμό. Προφανώς για την επίτευξη διαφορετικών στόχων προκύπτουν διαφορετικές προσεγγίσεις λειτουργίας του δικτύου. Στην παρούσα ενότητα διατυπώνονται δύο μαθηματικά μοντέλα για το πρόβλημα του προγραμματισμού λειτουργίας των ΔΔΗΕ με ΑΠΕ και αυξημένη χρήση ηλεκτρικών οχημάτων. Το πρώτο μοντέλο στοχεύει στη βελτιστοποίηση της λειτουργίας του ΔΔΗΕ με αντικειμενική συνάρτηση την ελαχιστοποίηση του κόστους του διαχειριστή του ΔΔΗΕ, ενώ το δεύτερο μοντέλο στοχεύει στην βελτιστοποίηση με αντικειμενική συνάρτηση την μεγιστοποίηση του κέρδους κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων. Στην ανάλυση που ακολουθεί οι ΜΔΠ καυσίμου θεωρούνται ως ντιζελογεννήτριες και οι μονάδες ΑΠΕ που λαμβάνονται υπόψη είναι αιολικά πάρκα διασυνδεδεμένα στο δίκτυο διανομής ΜΤ. Για λόγους περιβαλλοντικής πολιτικής θεωρείται πως η λειτουργία των ΑΠΕ δεν μπορεί να περιοριστεί, επιτρέποντας τους έτσι να παράγουν τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ [4].

### 3.2 ΣΥΝΟΛΑ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ

Για τη σαφέστερη διατύπωση του προβλήματος αρχικά παρατίθενται τα μαθηματικά σύνολα και αναλύονται οι παράμετροι των στοιχείων του δικτύου.

Ειδικότερα τα σύνολα του προβλήματος διατυπώνονται ως εξής:

$\Omega_k$	το σύνολο των κόμβων του ΔΔΗΕ
$\Omega_{km}$	το σύνολο των κόμβων $m$ που συνδέονται με τον κόμβο $k$
$\Omega_{DG}$	το σύνολο των ΜΔΠ καυσίμου
$\Omega_{WG}$	το σύνολο των ανεμογεννητριών
$\Omega_{EVA}$	το σύνολο των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων
$\Omega_e$	το σύνολο των ηλεκτρικών οχημάτων

Οι παράμετροι του ΔΔΗΕ διατυπώνονται ως εξής:

$\pi_t^{WS}$	η πρόβλεψη της τιμής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας την ώρα $t$ της ημέρας
--------------	---

$P_{k,t}^{ld}$	το άθροισμα οικιακού και βιομηχανικού φορτίου στον κόμβο $k$ την ώρα $t$ της ημέρας
$I_{km,max}$	το τεχνικό όριο της γραμμής διανομής που συνδέει τους κόμβους $k$ και $m$
$g_{km}$	το πραγματικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας
$b_{km}$	το φανταστικό μέρος της σύνθετης αγωγιμότητας

Οι παράμετροι των ανεμογεννητριών διατυπώνονται ως εξής:

$w_t$	η ταχύτητα του ανέμου (m/s) την ώρα $t$ κάθε περιοχής εγκατάστασης Α/Π
$w_{in}$	η ταχύτητα ανέμου ένταξης των ανεμογεννητριών
$w_{out}$	η ταχύτητα ανέμου αποκοπής των ανεμογεννητριών
$Poly(w_t)$	η καμπύλη παραγωγής των ανεμογεννητριών
$C_{wg}$	το κόστος παραγωγής κάθε ανεμογεννήτριας
$P_{wg,t}^{WG}$	η ισχύς που παράγει κάθε ανεμογεννήτρια $wg$ την ώρα $t$ ,

$$P_{wg,t}^{WG} = \begin{cases} 0, & w_t \leq w_{in} \\ Poly(w_t) & w_{in} < w_t < w_{out} \\ 0, & w_t \geq w_{out} \end{cases} \quad (3.1)$$

Οι παράμετροι των ΜΔΠ καυσίμου διατυπώνονται ως εξής:

$SUC_j$	το κόστος εκκίνησης της ΜΔΠ $j$ σε €
$SDC_j$	το κόστος παύσης της ΜΔΠ $j$ σε €
$a_j, b_j, c_j$	οι συντελεστές κόστους παραγωγής της ΜΔΠ $j$ σε (€/MWh <sup>2</sup> ), (€/MWh και (€), αντίστοιχα
$UR_j$	το όριο αύξησης της παραγωγής από μία ώρα στην επόμενη (ramp-up limit) για τη ΜΔΠ $j$ σε MW ανά h
$DR_j$	το όριο μείωσης της παραγωγής από μία ώρα στην επόμενη (ramp-down limit) για τη ΜΔΠ $j$ σε MW ανά h
$P_j^{DG,max}$	η εγκατεστημένη ισχύς της ΜΔΠ $j$ σε MW
$P_j^{DG,min}$	το τεχνικό ελάχιστο παραγωγής της ΜΔΠ $j$ σε MW
$UT_j$	ο ελάχιστος χρόνος λειτουργίας της ΜΔΠ $j$ σε ώρες
$DT_j$	ο ελάχιστος χρόνος εκτός λειτουργίας της ΜΔΠ $j$ σε ώρες

Οι παράμετροι των ηλεκτρικών οχημάτων διατυπώνονται ως εξής:

$C_e^{B,inv}$	το κόστος κτήσης μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος $e$ σε €
$LT_e$	ο κύκλος ζωής της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος $e$
$d_{DoD,e}$	το βάθος εκφόρτισης της μπαταρίας του ηλεκτρικού οχήματος $e$
$E_e^{B,max}$	η μέγιστη αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος $e$ , σε kWh
$E_e^{B,min}$	η ελάχιστη αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία του ηλεκτρικού οχήματος $e$ , σε kWh



$P_e^{ch,max}$	η μέγιστη ισχύς που μπορεί να απορροφήσει από το δίκτυο το ηλεκτρικό όχημα $e$ σε kW
$P_e^{dch,max}$	η μέγιστη ισχύς που μπορεί να εγχύσει στο δίκτυο το ηλεκτρικό όχημα $e$ σε kW
$\eta$	ο συντελεστής απόδοσης στην ανταλλαγή ενέργειας του δικτύου με το ηλεκτρικό όχημα $e$
$d_{max}$	η μέγιστη απόσταση που μπορεί να διανύσει ένα ηλεκτρικό όχημα σε km
$d$	η απόσταση που έχει διανύσει το ηλεκτρικό όχημα από την τελευταία φορά που φορτίστηκε σε km
$E^{Con}$	το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης του οχήματος, σε kWh
$E_{prev}^{Con}$	το επιθυμητό επίπεδο φόρτισης του οχήματος την προηγούμενη φορά που φορτίστηκε, σε kWh
$T_{arr}, T_{dep}$	η ώρα άφιξης και η ώρα αναχώρησης, αντίστοιχα.

### 3.3 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΤΟΥ ΔΔΗΕ

Η ελαχιστοποίηση του κόστους για το διαχειριστή του ΔΔΗΕ αποτελεί συνήθη στόχο για τον προσδιορισμό της βέλτιστης λειτουργίας του ΔΔΗΕ. Ο διαχειριστής καλείται να καλύψει τη ζήτηση των φορτίων επιλέγοντας τον οικονομικότερο για εκείνον συνδυασμό των διαθέσιμων πηγών, λαμβάνοντας υπόψη τους τεχνικούς περιορισμούς του δικτύου.

#### 3.3.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ αποτελείται από τους παρακάτω έξι όρους:

$$\min F = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \quad (3.2)$$

όπου :

$$F_1 = \sum_{t=1}^{N_T} \pi_t^{WS} P_t^{WS} \quad (3.3)$$

$$F_2 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_{DG}} SUC_j u_{j,t}^{ON} \quad (3.4)$$

$$F_3 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_{DG}} (c_j u_{j,t} + b_j P_{j,t}^{DG} + a_j P_{j,t}^{DG^2}) \quad (3.5)$$

$$F_4 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{j=1}^{N_{DG}} SDC_j u_{j,t}^{OFF} \quad (3.6)$$

$$F_5 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_{EVA}} D_{i,t}(P_{e,t}^{dch}) \quad (3.7)$$

$$F_6 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{w=1}^{N_{WG}} C_{wg} P_{wg,t}^{WG} \quad (3.8)$$

$$D_{i,t}(P_{e,t}^{dch}) = \sum_{e=1}^{N_{EV} \in EVA(i)} \frac{C_e^{B,inv} d_{DoD,e}}{LT_e E_e^{B,max}} P_{e,t}^{dch} \quad (3.9)$$

Ο πρώτος όρος αφορά το κόστος της συνολικής εισερχόμενης ενέργειας από το δίκτυο μεταφοράς. Ο δεύτερος και ο τέταρτος όρος αφορούν το κόστος εκκίνησης/παύσης μιας μονάδας διανεμημένης παραγωγής καυσίμου αντίστοιχα. Ο τρίτος όρος αφορά το κόστος λειτουργίας μιας μονάδας διανεμημένης παραγωγής καυσίμου. Ο πέμπτος όρος αφορά το κόστος της συνολικής χρησιμοποιούμενης ενέργειας από τα ηλεκτρικά οχήματα, όπου το κόστος εκμετάλλευσης των μπαταριών κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων για κάθε στιγμή δίνεται από τη σχέση (3.9). Ο έκτος όρος αφορά το κόστος της συνολικής παραχθείσας ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές.

Το πρόβλημα αυτό έχει πραγματικές και δυαδικές μεταβλητές ελέγχου οι οποίες παρουσιάζονται παρακάτω :

Μεταβλητές ελέγχου (πραγματικές) :

$P^{WS}$	η εισερχόμενη ισχύς από το δίκτυο μεταφοράς (MW)
$P^{DG}$	η ισχύς από μονάδες διανεμημένης παραγωγής καυσίμου (MW)
$P^{dch}$	η ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο κατά την εκφόρτιση ενός οχήματος (MW)
$P^{ch}$ ,	η ισχύς που απορροφά ένα ηλεκτρικό όχημα κατά τη φόρτιση του (MW)
$P^{AGGR}$	η συνολική ισχύς που παράγει/απορροφά ο κάθε διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων (MW)
$E_e^B$	η αποθηκευμένη ενέργεια στη μπαταρία ενός οχήματος (kWh)
$P_{km}^{flow}$	η ροή ισχύος της γραμμής που συνδέει τους κόμβους $k$ , $m$ (MW)
$\delta_k$	η γωνία της τάσης στον κόμβο $k$
$\Delta V_k$	η απόκλιση της τάσης από την ονομαστική στον κόμβο $k$

Μεταβλητές ελέγχου (δυναμικές) :

$u_{ch}$	το ηλεκτρικό όχημα φορτίζεται
$u_{dch}$	το ηλεκτρικό όχημα εκφορτίζεται
$u_{ON}$	η ντιζελογεννήτρια εντάσσεται στο σύστημα
$u_{OFF}$	η ντιζελογεννήτρια απενεργοποιείται
$u$	η κατάσταση της ντιζελογεννήτριας

### 3.3.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΔΔΗΕ

$$P_{km,t}^{flow} = |1 + \Delta V_{k,t}| |1 + \Delta V_{k,t}| g_{km} - |1 + \Delta V_{k,t}| |1 + \Delta V_{m,t}| * \quad (3.10)$$

$$(b_{km} \sin(\delta_{k,t} - \delta_{m,t}) + g_{km} \cos(\delta_{k,t} - \delta_{m,t})) \quad \forall k, m, t$$

$$P_{k,t}^{prod} - P_{k,t}^{ld} = \sum_{m \in \Omega_{km}} P_{km,t}^{flow} \quad \forall k, m, t \quad (3.11)$$

$$\Delta V_{k,t} \leq 4\% \quad \forall k, t \quad (3.12)$$

$$|P_{km,t}^{flow}| \leq I_{km,max} \quad \forall k, m, t \quad (3.13)$$

Ο περιορισμός (3.10) αφορά τη ροή ενεργού ισχύος στις γραμμές του δικτύου διανομής. Ο περιορισμός (3.11) είναι το ενεργειακό ισοζύγιο ενεργού ισχύος σε κάθε κόμβο του δικτύου. Ο περιορισμός (3.12) αφορά το όριο τάσης σε κάθε κόμβο και ο περιορισμός (3.13) αφορά το όριο των γραμμών του δικτύου διανομής.

### 3.3.3 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΜΔΠ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

$$P_j^{DG,min} u_{j,t} \leq P_{j,t}^{DG} \leq P_j^{DG,max} u_{j,t} \quad \forall t, j \quad (3.14)$$

$$P_{j,t}^{DG} - P_{j,t-1}^{DG} \leq UR_j (1 - u_{j,t}^{ON}) + P_j^{DG,min} u_{j,t}^{ON} \quad \forall t, j \quad (3.15)$$

$$P_{j,t-1}^{DG} - P_{j,t}^{DG} \leq DR_j (1 - u_{j,t}^{OFF}) + P_j^{DG,min} u_{j,t}^{OFF} \quad \forall t, j \quad (3.16)$$

$$\sum_{h=t}^{t+UT_j-1} u_{j,t} \geq UT_j u_{j,t}^{ON} \quad \forall t, j \quad (3.17)$$

$$\sum_{h=t}^{t+DT_j-1} (1 - u_{j,t}) \geq DT_j u_{j,t}^{OFF} \quad \forall t, j \quad (3.18)$$

$$u_{j,t+1}^{ON} = u_{j,t+1} (1 - u_{j,t}) \quad \forall t, j \quad (3.19)$$

$$u_{j,t+1}^{OFF} = u_{j,t} (1 - u_{j,t+1}) \quad \forall t, j \quad (3.20)$$

Ο περιορισμός (3.14) αφορά τα όρια παραγωγής κάθε ΜΔΠ καυσίμου. Οι περιορισμοί (3.15) και (3.16) αφορούν τα όρια μεταβολής (αύξησης/μείωσης αντίστοιχα) της παραγωγής κάθε ΜΔΠ σε μια ώρα. Οι περιορισμοί (3.17) και (3.18) αφορούν τον ελάχιστο χρόνο λειτουργίας/πάυσης αντίστοιχα κάθε ΜΔΠ καυσίμου. Οι περιορισμοί (3.19) και (3.20) σημαίνουν την έναρξη/παύση λειτουργίας κάθε ΜΔΠ καυσίμου.

### 3.3.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

$$P_{e,t}^{ch} \geq 0 \quad \forall t, e \quad (3.21)$$

$$P_{e,t}^{dch} \geq 0 \quad \forall t, e \quad (3.22)$$

$$E_{e,t}^B \geq E_e^{B,min} \quad \forall t, e \quad (3.23)$$

$$E_{e,t}^B \leq E_e^{B,max} \quad \forall t, e \quad (3.24)$$

$$E_{e,Tarr}^B = E_{prev,e}^{Con} - \left( \frac{d}{d_{max}} \right) E_e^{B,max} \quad \forall e \quad (3.25)$$

$$E_{e,Tarr}^B = E_e^{Con} \quad \forall e \quad (3.26)$$

$$u_{ch\,e,t} = 0 \quad \forall t \notin (T_{arr}, T_{dep}), \forall e \quad (3.27)$$

$$u_{dch\,e,t} = 0 \quad \forall t \notin (T_{arr}, T_{dep}), \forall e \quad (3.28)$$

$$u_{ch\,e,t} + u_{dch\,e,t} = 1 \quad \forall t \in (T_{arr}, T_{dep}), \forall e \quad (3.29)$$

$$P_{e,t}^{ch} \leq u_{ch\,e,t} P_{e,t}^{ch,max} \quad \forall t, e \quad (3.30)$$

$$P_{e,t}^{dch} \leq u_{dch\,e,t} P_{e,t}^{dch,max} \quad \forall t, e \quad (3.31)$$

$$E_{e,t+1}^B = E_{e,t}^B + u_{ch\,e,t} P_{e,t}^{ch} \eta - \frac{u_{dch\,e,t} P_{e,t}^{dch}}{\eta} \quad (3.32)$$

$$\forall t \in (T_{arr}, T_{dep}), \forall e$$

$$P_{i,t}^{AGGR} = \sum_{e=1}^{N_{EV} \in EVA(i)} (P_{e,t}^{dch} - P_{e,t}^{ch}) \quad \forall t, e, i \quad (3.33)$$

Οι περιορισμοί (3.21) και (3.22) διαχωρίζουν την ισχύ κάθε οχήματος σε ισχύ φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα. Οι περιορισμοί (3.23) και (3.24) θέτουν το άνω και κάτω όριο της αποθηκευμένης ενέργειας στη μπαταρία κάθε οχήματος. Ο περιορισμός (3.25) αποτελεί μια προσέγγιση της αποθηκευμένης ενέργειας στη μπαταρία κάθε οχήματος πριν αυτό να φορτιστεί ενώ ο περιορισμός (3.26) αφορά την επιθυμητή κατάσταση της μπαταρίας μόλις αυτή σταματήσει να φορτίζεται. Οι περιορισμοί (3.27)-(3.29) αφορούν τις δυαδικές μεταβλητές του προβλήματος και διασφαλίζουν πως ένα όχημα δεν μπορεί να φορτίζεται ή να εκφορτίζεται τις ώρες που δε βρίσκεται σε κάποιο σταθμό φόρτισης καθώς και ότι ένα όχημα δεν μπορεί να φορτίζεται και να εκφορτίζεται ταυτόχρονα. Οι περιορισμοί (3.30) και (3.31) θέτουν τα όρια της ισχύος φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα. Ο περιορισμός (3.32) αποτελεί το ενεργειακό ισοζύγιο της μπαταρίας κάθε οχήματος. Τέλος, ο περιορισμός (3.33) δηλώνει πως η ισχύς που εγγχεί (ή καταναλώνει) ένας διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων κάθε στιγμή στο δίκτυο ισούται με την διαφορά της ισχύος εκφόρτισης των οχημάτων που εκείνη τη στιγμή εκφορτίζονται με την ισχύ φόρτισης των οχημάτων που εκείνη τη στιγμή φορτίζονται και βρίσκονται υπό τον έλεγχο του.

### 3.4 ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΕΡΔΟΥΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ

Βασικό στόχο κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων αποτελεί η μεγιστοποίηση του κέρδους του, προϋποθέτοντας βεβαίως τη σωστή εξυπηρέτηση των οχημάτων που βρίσκονται υπό τον έλεγχο του. Αυτό σημαίνει πως ένας διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων επιδιώκει τη μέγιστη δυνατή εκμετάλλευση των μπαταριών των οχημάτων που ελέγχει για την τροφοδότηση των φορτίων, έναντι των άλλων διαθέσιμων πηγών. Για την επίτευξη αυτών των στόχων προτείνει στο διαχειριστή του ΔΔΗΕ το σενάριο λειτουργίας που μεγιστοποιεί το κέρδος του.

#### 3.4.1 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

Η αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποίησης κέρδους ενός διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζεται στη σχέση (3.34) όπου το συνολικό κέρδος εκμετάλλευσης της μπαταρίας όλων των οχημάτων που ελέγχονται από τον συγκεκριμένο διαχειριστή κάθε στιγμή,  $D_{i,t}(P_{e,t}^{dch})$ , δίνεται από τη σχέση (3.9) :

$$K_i = \max \sum_{t=1}^{N_T} D_{i,t}(P_{e,t}^{dch}) \quad (3.34)$$

Επισημαίνεται ότι εφόσον ένας διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων προτείνει στον διαχειριστή του ΔΔΗΕ τη λειτουργία του δικτύου που τον εξυπηρετεί, οι μεταβλητές ελέγχου αυτού του προβλήματος παραμένουν ίδιες με τις μεταβλητές ελέγχου του προηγούμενου προβλήματος. Συνεπώς:

Μεταβλητές ελέγχου (πραγματικές) :

$P^{WS}$	η εισερχόμενη ισχύς από το δίκτυο μεταφοράς (MW)
$P^{DG}$	η ισχύς από μονάδες διανεμημένης παραγωγής καυσίμου (MW)
$P^{dch}$	η ισχύς που εγχέεται στο δίκτυο κατά την εκφόρτιση ενός οχήματος (MW)
$P^{ch}$ ,	η ισχύς που απορροφά ένα ηλεκτρικό όχημα κατά τη φόρτιση του (MW)
$P^{AGGR}$	η συνολική ισχύς που παράγει/απορροφά ο κάθε διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων (MW)
$E_e^B$	η αποθηκευμένη ενέργεια στη μπαταρία ενός οχήματος (kWh)
$P_{km}^{flow}$	η ροή ισχύος της γραμμής που συνδέει τους κόμβους $k$ , $m$ (MW)
$\delta_k$	η γωνία της τάσης στον κόμβο $k$
$\Delta V_k$	η απόκλιση της τάσης από την ονομαστική στον κόμβο $k$

Μεταβλητές ελέγχου (δυναμικές) :

$u_{ch}$	το ηλεκτρικό όχημα φορτίζεται
$u_{dch}$	το ηλεκτρικό όχημα εκφορτίζεται
$u_{ON}$	η ντιζελογεννήτρια εντάσσεται στο σύστημα

$u_{OFF}$  η ντιζελογεννήτρια απενεργοποιείται  
 $u$  η κατάσταση της ντιζελογεννήτριας

### 3.4.2 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

Περιορισμούς αυτού του προβλήματος αποτελούν οι σχέσεις (3.1), (3.9)-(3.33) που περιγράφουν το ΔΔΗΕ, τις ΜΔΠ και τον τρόπο λειτουργίας των μπαταριών των οχημάτων. Οι περιορισμοί αυτοί είναι αρκετοί για να δώσει το μοντέλο βέλτιστη λύση, όμως η λύση αυτή θα συνιστούσε υπερβολικά εκτεταμένη χρήση των οχημάτων, πράγμα ασύμφορο για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ. Σε αυτό το σημείο έχει νόημα η εισαγωγή ενός επιπλέον περιορισμού, (3.35), ώστε το κέρδος του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων να μεγιστοποιείται με την προϋπόθεση το συνολικό κόστος λειτουργίας του δικτύου να μην ξεπερνά κάποια τιμή για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ :

$$F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \leq DNO_{cost} \quad (3.35)$$

Όπου τα  $F_1 - F_6$  δίνονται, όπως στο προηγούμενο πρόβλημα, από τις σχέσεις (3.3)-(3.8) και  $DNO_{cost}$  το κόστος για το διαχειριστή του ΔΔΗΕ.





### ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΡΩΣΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΗΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΤΟΥ ΔΔΗΕ

#### 4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η ντετερμινιστική βελτιστοποίηση, η οποία έχει ακολουθηθεί στο Κεφάλαιο 3, αγνοεί τις μεταβολές στις οποίες υπόκεινται οι παράμετροι εισόδου. Στην πραγματικότητα, οι παράμετροι εισόδου, όπως η πρόβλεψη αιολικής παραγωγής, έχουν σφάλμα και οι πιο σύγχρονες τεχνικές προβλέψεων δεν μπορούν να εγγυηθούν για την ακρίβεια των αποτελεσμάτων τους.

Στο πλαίσιο μοντέλων βελτιστοποίησης, η αβεβαιότητα μπορεί να οριστεί ευρέως ως ένας άγνωστος συντελεστής, ο οποίος μπορεί όμως να μοντελοποιηθεί και να ληφθεί υπόψη. Συνεπώς, η αβεβαιότητα μιας πρόβλεψης μπορεί να καταστεί διαχειρίσιμη εφόσον η πιθανή απόκλιση από την πρόβλεψη είναι δυνατό να ποσοτικοποιηθεί και να ενσωματωθεί στο μοντέλο.

Υπάρχουν δύο κύριες κατηγορίες αβεβαιότητας στις βραχυχρόνιες μελέτες ηλεκτρικών δικτύων:

- αβεβαιότητα για την κατάσταση ενός στοιχείου του δικτύου
- αβεβαιότητα για την έγχυση/απορρόφηση ισχύος στους κόμβους του δικτύου

Η πρώτη κατηγορία προκύπτει από την πιθανότητα ένα στοιχείο του συστήματος να μη λειτουργήσει όπως αναμενόταν ή η τιμή μιας παραμέτρου (όπως η αντίσταση μιας γραμμής που συνδέει δύο κόμβους) να έχει μεταβληθεί. Η δεύτερη προκύπτει από τις πιθανές ανακρίβειες των μετρήσεων και των προβλέψεων των στοχαστικών παραμέτρων εισόδου αυτών των μελετών, όπως η πρόβλεψη κατανάλωσης φορτίου, η πρόβλεψη αιολικής παραγωγής, η πρόβλεψη παραγωγής φωτοβολταϊκών σταθμών, κ.ά.

Η αβεβαιότητα για την κατάσταση ενός στοιχείου του δικτύου είναι δυνατόν να ελεγχθεί μέσω της στενής παρακολούθησης και επίβλεψης του δικτύου. Σε βραχυχρόνιους ορίζοντες είναι ευκολότερο να προβλεφθεί τότε ένα συγκεκριμένο στοιχείο θα αστοχήσει και με προληπτικά προστατευτικά μέτρα οι πιθανές αυτές αστοχίες μπορούν να αποφευχθούν.

Αυτή η διπλωματική εργασία πραγματεύεται το χειρισμό των αβεβαιοτήτων της δεύτερης κατηγορίας, δηλαδή των αβεβαιοτήτων εκείνων που οφείλονται στις προβλέψεις για την έγχυση/απορρόφηση ισχύος στους κόμβους του δικτύου. Οι εξελίξεις στον τομέα των προβλέψεων παρέχουν τη δυνατότητα ολοένα ακριβέστερων προσεγγίσεων των παραμέτρων εισόδου. Παρ' όλ' αυτά, η διαχείριση των δικτύων που στηρίζεται σε μοντέλα ντετερμινιστικής

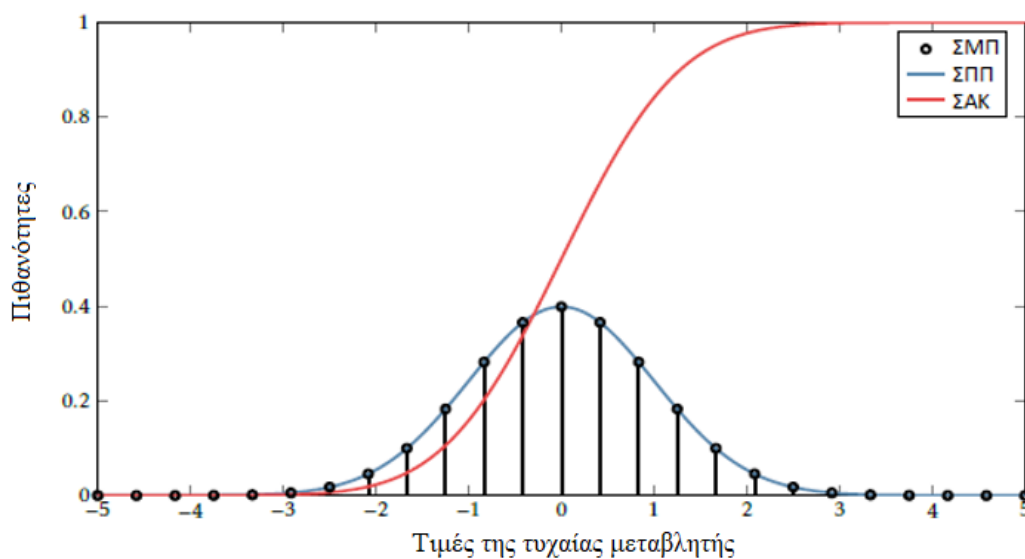
βελτιστοποίησης μπορεί να επιφέρει επιπλοκές στη λειτουργία του δικτύου καθώς η απόκλιση της προβλεπόμενης παραγωγής ή κατανάλωσης ενέργειας είναι δυνατό να προκαλέσει την παραβίαση των περιορισμών του. Σε αυτό το πλαίσιο, θεωρείται κρίσιμη η υλοποίηση ενός μοντέλου, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη τις αβεβαιότητες των προβλέψεων.

Υπάρχουν διάφορες προσεγγίσεις για να μοντελοποιηθούν οι αβεβαιότητες ενός προβλήματος και να διατυπωθούν μαθηματικά. Οι κυριότερες είναι η στοχαστική βελτιστοποίηση και η εύρωστη βελτιστοποίηση.

Συγκεκριμένα, για την στοχαστική βελτιστοποίηση αναφέρεται ότι οι στοχαστικές μέθοδοι ενσωματώνουν τις αβέβαιες παραμέτρους εισόδου στο μοντέλο ως μεταβλητές με τη χρήση συναρτήσεων κατανομής πιθανότητας. Έτσι οι αβέβαιες αυτές μεταβλητές αντιπροσωπεύουν την έκβαση ενός γεγονότος καθώς η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας αναθέτει πιθανότητες για τις αντίστοιχες εκβάσεις. Με αυτόν τον τρόπο η ακρίβεια του μοντέλου εξαρτάται από την καλή αναπαράσταση της συνάρτησης κατανομής πιθανότητας. Βασικοί πυλώνες της στοχαστικής βελτιστοποίησης είναι οι συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας και τα σενάρια με την αντίστοιχη πιθανότητά τους (διακριτή στοχαστική βελτιστοποίηση).

#### • Βελτιστοποίηση με συναρτήσεις κατανομής

Όταν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά κάποιων μεταβλητών, είναι δυνατή η δόμηση συναρτήσεων κατανομής πιθανότητας για την περιγραφή τους. Αυτές οι κατανομές συσχετίζουν μια συγκεκριμένη τιμή της τυχαίας μεταβλητής στην πιθανότητα εμφάνισής της. Συνεπώς αποτελούν μια λίστα όλων των πιθανών τιμών που η μεταβλητή μπορεί να λάβει μαζί με τις αντίστοιχες πιθανότητες. Αν, παραδείγματος χάρη, μια αβεβαιότητα παρουσιάζει χαρακτηριστικά κανονικής κατανομής τότε μπορεί να παρασταθεί ως τέτοια, με τις αντίστοιχες συναρτήσεις πυκνότητας πιθανότητας (ΣΠΠ), αθροιστικής κατανομής (ΣΑΚ) και μάζας πιθανότητας (ΣΜΠ), όπως φαίνονται στο Σχήμα 4.1.

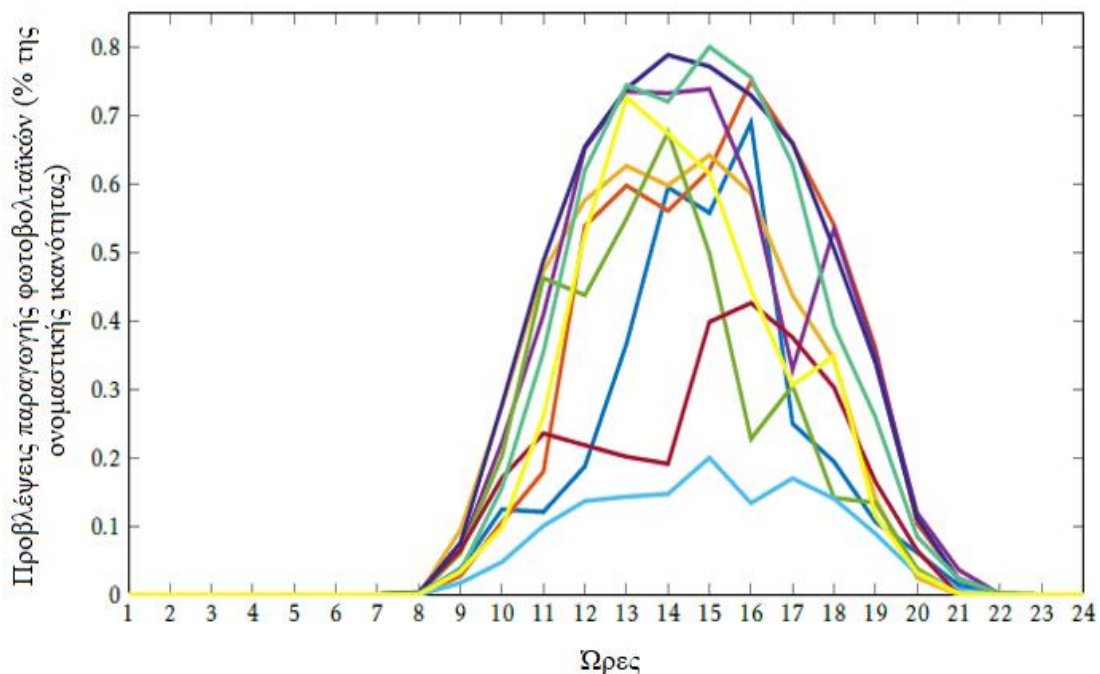


Σχήμα 4.1 : Αβεβαιότητα με χαρακτηριστικά κανονικής κατανομής.

### • Διακριτή στοχαστική βελτιστοποίηση

Τα σενάρια αποτελούν έναν διακριτό τρόπο αναπαράστασης της συμπεριφοράς των αβέβαιων μεταβλητών, σε αντίθεση με τις συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας. Πρόκειται για μια ομάδα τιμών που μια συγκεκριμένη αβεβαιότητα μπορεί να λάβει και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την περιγραφή πρόσκαιρων εξελίξεων των μεταβλητών, πράγμα που οι κατανομές πιθανότητας γενικά αδυνατούν να επιτύχουν. Μια αναπαράσταση σεναρίων φαίνεται στο Σχήμα 4.2 όπου παρουσιάζονται δέκα διαφορετικά σενάρια φωτοβολταϊκής παραγωγής σε χρονικό διάστημα μιας ημέρας. Υπάρχουν τρεις τρόποι παραγωγής σεναρίων:

- Σύμφωνα με τις απόψεις ειδικών πάνω στις εξελίξεις των μεταβλητών στο μέλλον.
- Μέσω στατιστικών αναπαραστάσεων των κατανομών που περιγράφουν τις πιθανές εκβάσεις των γεγονότων.
- Μέσω απευθείας μετρήσεων των εκβάσεων των αβέβαιων μεταβλητών για την ομαδοποίηση τους σύμφωνα με συγκεκριμένα κριτήρια. Τα παραγόμενα σενάρια στη συνέχεια αντιστοιχίζονται σε πιθανότητες εμφάνισης όπως στις κατανομές πιθανότητας.

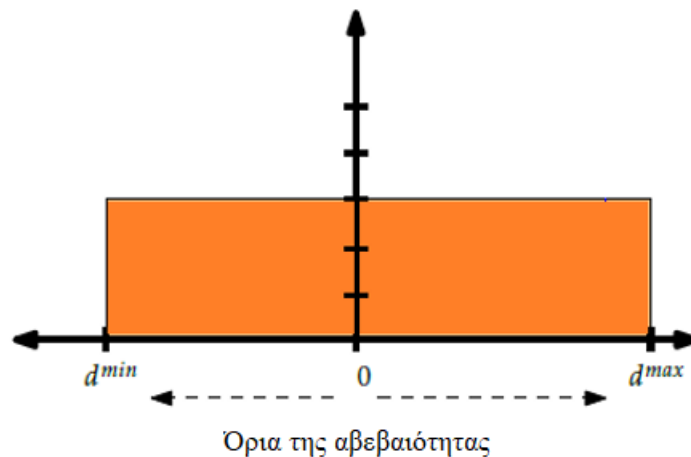


Σχήμα 4.2 : Σενάρια παραγωγής φωτοβολταϊκών.

- **Εύρωστη βελτιστοποίηση**

Από την άλλη πλευρά υπάρχουν προσεγγίσεις μοντελοποίησης αβεβαιοτήτων, όπως η εύρωστη βελτιστοποίηση, χωρίς τη χρήση πιθανοτήτων. Οι προσεγγίσεις αυτές είναι εξαιρετικά χρήσιμες όταν οι πληροφορίες σχετικά με τις αβεβαιότητες είναι ανεπαρκείς. Στις περισσότερες περιπτώσεις μόνο τα όρια αυτών των αβεβαιοτήτων είναι γνωστά. Η εύρωστη βελτιστοποίηση αντιπροσωπεύει μοντέλα τα οποία είναι απαλλαγμένα από αβεβαιότητες. Για την εφαρμογή αυτής της προσέγγισης δεν χρειάζεται η γνώση των συναρτήσεων κατανομής πιθανότητας. Συγκεκριμένα η διατύπωσή τους θεωρεί τη χειρότερη πιθανή περίπτωση απόκλισης από την πρόβλεψη και προστατεύει την βελτιστοποίηση από αυτήν. Η απόκλιση (αβεβαιότητα) αναπαρίσταται από τα όρια,  $d_{min}$  και  $d_{max}$ , ενώ δεν υπάρχει αναπαράσταση της συμπεριφοράς της μέσα σε αυτό το διάστημα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής επιχειρείται η υλοποίηση ενός μοντέλου εύρωστης βελτιστοποίησης, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη τα σφάλματα των προβλέψεων και θα παρέχει λύση ικανή να διασφαλίσει τη λειτουργία του δικτύου στο χειρότερο πιθανό σενάριο. Με αυτόν τον τρόπο το μοντέλο αφενός απαλλάσσεται από την αβεβαιότητα της πρόβλεψης, αφετέρου συγκλίνει σε υψηλότερο κόστος (ή χαμηλότερα κέρδη αντίστοιχα) καθώς χρειάζεται να επιβαρυνθεί με επιπλέον κόστος η αντικειμενική συνάρτηση που πρόκειται να βελτιστοποιηθεί.



**Σχήμα 4.3 :** Αναπαράσταση της αβεβαιότητας στην εύρωστη βελτιστοποίηση [12].

## 4.2 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ

Στη γενική περίπτωση της μαθηματικής διατύπωσης, θεωρείται πως οι παράμετροι  $c_j$  και  $a_{i,j}$  έχουν αβεβαιότητα και εμπλέκονται τόσο στην αντικειμενική συνάρτηση όσο και στους περιορισμούς ως εξής:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^N c_j x_j \quad (4.1)$$

$$\sum_{j=1}^N a_{i,j} x_j \leq b_i \quad \forall i \quad (4.2)$$

$$x_j^{\min} \leq x_j \leq x_j^{\max} \quad \forall j \quad (4.3)$$

$$c_j^{\text{real}} \in [c_j - c_j^{\text{err}}, c_j + c_j^{\text{err}}] \quad (4.4)$$

$$a_{i,j}^{\text{real}} \in [a_{i,j} - a_{i,j}^{\text{err}}, a_{i,j} + a_{i,j}^{\text{err}}] \quad (4.5)$$

όπου

$c_j$	οι προβλέψεις των αβεβαιοτήτων της αντικειμενικής συνάρτησης
$a_{i,j}$	οι προβλέψεις των αβεβαιοτήτων των περιορισμών
$c_j^{\text{real}}$	οι πραγματικές τιμές των αβεβαιοτήτων $c_j$
$a_{i,j}^{\text{real}}$	οι πραγματικές τιμές των αβεβαιοτήτων $a_{i,j}$
$c_j^{\text{err}}$	τα σφάλματα των προβλέψεων $c_j$
$a_{i,j}^{\text{err}}$	τα σφάλματα των προβλέψεων $a_{i,j}$
$x_j$	οι μεταβλητές ελέγχου
$x_j^{\min}$	τα κάτω όρια των μεταβλητών ελέγχου
$x_j^{\max}$	τα άνω όρια των μεταβλητών ελέγχου
$b_i$	τα όρια των περιορισμών

Η σχέση (4.1) αποτελεί την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος στη γενική περίπτωση. Η σχέση (4.2) αφορά τους περιορισμούς του προβλήματος, με τις παραμέτρους  $b_i$  να αποτελούν σταθερές του προβλήματος. Η σχέση (4.3) διατυπώνει τα όρια,  $x_j^{\min}$  και  $x_j^{\max}$ , των μεταβλητών ελέγχου,  $x_j$ . Οι σχέσεις (4.4) και (4.5) αφορούν τα όρια των προβλέψεων των παραμέτρων  $c_j$  και  $a_{i,j}$  αντίστοιχα. Οι παράμετροι  $c_j^{\text{real}}$  και  $a_{i,j}^{\text{real}}$  λαμβάνουν πραγματικές τιμές και κυμαίνονται στην περιοχή των προβλέψεων  $c_j$  και  $a_{i,j}$  με σφάλματα  $c_j^{\text{err}}$   $a_{i,j}^{\text{err}}$ , όπως διατυπώνεται από τις σχέσεις (4.4) και (4.5), αντίστοιχα.

Προκειμένου να καταστεί το παραπάνω μοντέλο εύρωστο οι παραπάνω σχέσεις αναδιατυπώνονται ως εξής:

$$\text{Min} \sum_{j=1}^N c_j x_j + u_0 \Gamma_0 + \sum_{j=1}^N \eta_{0,j} \quad (4.6)$$

$$\sum_{j=1}^N a_{i,j}x_j + u_i\Gamma_i + \sum_{j=1}^N \eta_{i,j} \leq b_i \quad \forall i \quad (4.7)$$

$$u_0 + \eta_{0,j} \geq c_j^{err} \gamma p_j \quad \forall j \quad (4.8)$$

$$u_i + \eta_{i,j} \geq a_{i,j}^{err} \gamma p_j \quad \forall i, j \quad (4.9)$$

$$-\gamma p_j \leq x_j \leq \gamma p_j \quad \forall j \quad (4.10)$$

$$x_{j,min} \leq x_j \leq x_{j,max} \quad \forall j \quad (4.11)$$

$$\eta_{0,j} \geq 0 \quad \forall j \quad (4.12)$$

$$\eta_{i,j} \geq 0 \quad \forall i, j \quad (4.13)$$

$$\gamma p_j \geq 0 \quad \forall j \quad (4.14)$$

$$u_0 \geq 0 \quad (4.15)$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i \quad (4.16)$$

όπου

$u_0, \eta_{0,j}$  οι βοηθητικές μεταβλητές των αβεβαιοτήτων  $c_j$

$u_i, \eta_{i,j}$  οι βοηθητικές μεταβλητές των αβεβαιοτήτων  $a_{i,j}$

$\gamma p_j$  οι βοηθητικές μεταβλητές των μεταβλητών ελέγχου

$\Gamma_0$  ο προϋπολογισμός των αβεβαιοτήτων  $c_j$

$\Gamma_i$  ο προϋπολογισμός των αβεβαιοτήτων  $a_{i,j}$

Τα  $u_0, \eta_{0,j}$  αποτελούν βοηθητικές μεταβλητές που αφορούν την επιβάρυνση της αντικειμενικής συνάρτησης λόγω της αβεβαιότητας της πρόβλεψης  $c_j$ , τα  $u_i$  και  $\eta_{i,j}$  αποτελούν βοηθητικές μεταβλητές που αφορούν την επιβάρυνση της αντικειμενικής συνάρτησης λόγω της αβεβαιότητας της πρόβλεψης  $a_{i,j}$  και τα  $\gamma p_j$  αποτελούν βοηθητικές μεταβλητές που σχετίζονται με τις μεταβλητές ελέγχου  $x_j$ . Τα  $\Gamma_0$  και  $\Gamma_i$  αποτελούν τους προϋπολογισμούς των αβεβαιοτήτων, αφορούν τις προβλέψεις  $c_j$  και  $a_{i,j}$ , αντίστοιχα, και στο δυσμενέστερο σενάριο ισούνται με το πλήθος των προβλέψεων αυτών στις εξισώσεις όπου εμφανίζονται.

Η σχέση (4.6) αποτελεί τη νέα αντικειμενική συνάρτηση, η οποία είναι επιβαρυνόμενη με τον δεύτερο και τρίτο όρο, καθώς έχει θεωρηθεί το δυσμενέστερο σενάριο πρόβλεψης των παραμέτρων  $c_j$ . Η σχέση (4.7) αποτελεί τους νέους περιορισμούς του προβλήματος, οι οποίοι είναι επίσης επιβαρυνόμενοι λόγω της αβεβαιότητας για την πρόβλεψη των παραμέτρων  $a_{i,j}$ . Οι σχέσεις (4.8) και (4.9) ορίζουν τα όρια των βοηθητικών μεταβλητών σύμφωνα με τα σφάλματα των προβλέψεων  $c_j$  και  $a_{i,j}$  αντίστοιχα. Η σχέση (4.10) αποτελεί τον περιορισμό των βοηθητικών μεταβλητών,  $\gamma p_j$ , από τις μεταβλητές ελέγχου  $x_j$ . Η σχέση (4.11) ορίζει τα όρια των μεταβλητών ελέγχου. Οι σχέσεις (4.12)–(4.16) δηλώνουν πως όλες οι βοηθητικές μεταβλητές πρέπει να είναι θετικές (ή μηδενικές).

### 4.3 ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΥΡΩΣΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ (ΑΝΑΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3)

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας θεωρείται πως υπάρχει αβεβαιότητα στην πρόβλεψη των τιμών αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας,  $\pi_t^{WS}$ , και στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής,  $P_{wg,t}^{WG}$ . Λαμβάνοντας υπόψη τη γενική μαθηματική διατύπωση, είναι πλέον δυνατό το ντετερμινιστικό μοντέλο που διατυπώθηκε στο Κεφάλαιο 3 να αναδιατυπωθεί, έτσι ώστε να είναι εύρωστο στις αβεβαιότητες που έχουν θεωρηθεί. Αυτό σημαίνει την τροποποίηση των σχέσεων (3.3), (3.8) και (3.11) αντίστοιχα, ως εξής:

$$F_1 = \sum_{t=1}^{N_T} \pi_t^{WS} P_t^{WS} + \Gamma_0 u_0 + \sum_{t=1}^{N_T} \eta_{0,t} \quad (4.17)$$

$$F_6 = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{wg=1}^{N_{WG}} C_{wg} (P_{wg,t}^{WG} + \Gamma_{wg} u_{1\,wg} + \eta_{1\,wg,t}) \quad (4.18)$$

$$P_{k,t}^{prod} + \sum_{wg \in \Omega_{WGk}} (\Gamma_{wg} u_{1\,wg} + \eta_{1\,wg,t}) - P_{k,t}^{ld} = \sum_{m \in \Omega_{km}} P_{kmt}^{flow} \quad \forall k, m, t \quad (4.19)$$

Επιπλέον, εισάγονται οι ακόλουθες βοηθητικές σχέσεις:

$$u_0 + \eta_{0,t} \geq \pi_{t\,max}^{WS} \gamma p_{0\,t} \quad \forall t \quad (4.20)$$

$$u_{1\,wg} + \eta_{1\,wg,t} \geq P_{wg,t\,max}^{WG} \gamma p_{1\,wg,t} \quad \forall wg, t \quad (4.21)$$

$$P_t^{WS} \leq \gamma p_{0\,t} \quad \forall t \quad (4.22)$$

$$P_{wg,t}^{WG} \leq \gamma p_{1\,wg,t} \quad \forall wg, t \quad (4.23)$$

$$u_0 \geq 0 \quad (4.24)$$

$$u_{1\,wg} \geq 0 \quad \forall wg \quad (4.25)$$

$$\eta_{0,t} \geq 0 \quad \forall t \quad (4.26)$$

$$\eta_{1\,wg,t} \geq 0 \quad \forall wg, t \quad (4.27)$$

όπου

$\pi_{t\,max}^{WS}$  τα σφάλματα των προβλέψεων  $\pi_t^{WS}$

$P_{wg,t\,max}^{WG}$  τα σφάλματα των προβλέψεων  $P_{wg,t}^{WG}$

$u_0, \eta_{0,t}$  οι βοηθητικές μεταβλητές των αβεβαιοτήτων  $\pi_t^{WS}$

$u_{1\,wg}, \eta_{1\,wg,t}$  οι βοηθητικές μεταβλητές των αβεβαιοτήτων  $P_{wg,t}^{WG}$

$yp_{0\,t}$  οι βοηθητικές μεταβλητές των μεταβλητών ελέγχου  $P_t^{WS}$

$yp_{1\,wg,t}$  οι βοηθητικές μεταβλητές της παραγωγής  $P_{wg,t}^{WG}$

$\Gamma_0$  ο προϋπολογισμός των αβεβαιοτήτων  $\pi_t^{WS}$

$\Gamma_{wg}$  ο προϋπολογισμός των αβεβαιοτήτων  $P_{wg,t}^{WG}$

Τα  $u_0, \eta_{0,t}$ , αποτελούν βοηθητικές μεταβλητές που αφορούν την επιβάρυνση της αντικειμενικής συνάρτησης λόγω της αβεβαιότητας της πρόβλεψης για την τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο μεταφοράς,  $\pi_t^{WS}$ . Τα  $u_{1\,wg}, \eta_{1\,wg,t}$  αποτελούν βοηθητικές μεταβλητές που αφορούν την επιβάρυνση της αντικειμενικής συνάρτησης λόγω της αβεβαιότητας της αιολικής παραγωγής,  $P_{wg,t}^{WG}$ . Οι βοηθητικές μεταβλητές  $yp_{0\,t}$  σχετίζονται με τις μεταβλητές ελέγχου  $P_t^{WS}$ , οι οποίες επηρεάζονται από την αβεβαιότητα των τιμών  $\pi_t^{WS}$ , ενώ οι βοηθητικές μεταβλητές  $yp_{1\,wg,t}$  σχετίζονται με την αιολική παραγωγή,  $P_{wg,t}^{WG}$ .

Οι παράμετροι  $\Gamma_0$  και  $\Gamma_{wg}$  αποτελούν τους προϋπολογισμούς των αβεβαιοτήτων, αφορούν τις προβλέψεις των  $\pi_t^{WS}$  και  $P_{wg,t}^{WG}$  αντίστοιχα και ισούνται με τον αριθμό των αγνώστων παραμέτρων στις σχέσεις όπου βρίσκονται. Συνεπώς, το  $\Gamma_0$  ισούται με  $N_T$  καθώς η σχέση (4.1) περιλαμβάνει το άθροισμα  $N_T$  προβλέψεων των τιμών  $\pi_t^{WS}$  ενώ τα  $\Gamma_{wg}$  ισούνται με 1 καθώς η σχέση (4.3) περιλαμβάνει μια πρόβλεψη παραγωγής για κάθε ανεμογεννήτρια.

Η σχέση (4.17) αφορά το κόστος της συνολικής ενέργειας που εισέρχεται στο δίκτυο διανομής από το σύστημα μεταφοράς και παρουσιάζεται επιβαρυνμένη λόγω της αβεβαιότητας για τις τιμές της,  $\pi_t^{WS}$ , κάθε χρονική στιγμή  $t$ . Η σχέση (4.18) αφορά το κόστος της συνολικής ενέργειας που παρέχεται από αιολικά πάρκα και παρουσιάζεται επιβαρυνμένη λόγω της αβεβαιότητας για την αιολική παραγωγή,  $P_{wg,t}^{WG}$ . Η σχέση (4.19) παρουσιάζει την επίδραση της αβεβαιότητας για την αιολική παραγωγή στο ισοζύγιο ενεργού ισχύος. Η σχέση (4.20) αφορά τον περιορισμό των βοηθητικών μεταβλητών που σχετίζονται με την πρόβλεψη των τιμών  $\pi_t^{WS}$  από το αντίστοιχο σφάλμα,  $\pi_{t\,max}^{WS}$ , ορίζοντας ουσιαστικά το επιπρόσθετο κόστος για το διαχειριστή του ΔΔΗΕ κάθε στιγμή  $t$ , λόγω της αύξησης των τιμών. Η σχέση (4.21) αφορά τον περιορισμό των βοηθητικών μεταβλητών που σχετίζονται με την πρόβλεψη των τιμών  $P_{wg,t}^{WG}$  από το αντίστοιχο σφάλμα,  $P_{wg,t\,max}^{WG}$ , ορίζοντας την επιπρόσθετη αιολική ενέργεια που θα εγχυθεί στο δίκτυο κάθε στιγμή  $t$ . Η σχέση (4.22) αφορά τον περιορισμό των βοηθητικών μεταβλητών  $yp_{0\,t}$ , που σχετίζονται με την ενέργεια από το σύστημα μεταφοράς, από τις αντίστοιχες μεταβλητές ελέγχου,  $P_t^{WS}$ . Η σχέση (4.23) αφορά τον περιορισμό των βοηθητικών μεταβλητών  $yp_{1\,wg,t}$ , που σχετίζονται με την ενέργεια από τα αιολικά πάρκα, από την αντίστοιχη παραγωγή,  $P_{wg,t}^{WG}$ . Οι σχέσεις (4.24)–(4.27) δηλώνουν πως όλες οι βοηθητικές μεταβλητές είναι θετικές (ή μηδενικές).

Έτσι το μοντέλο εύρωστης βελτιστοποίησης για την ελαχιστοποίηση κόστους του διαχειριστή του ΔΔΗΕ αποτελείται από τις σχέσεις (3.1), (3.2), (3.4)–(3.7), (3.9), (3.10), (3.12)–(3.33) και (4.17)–(4.27).



Αντίστοιχα, το μοντέλο εύρωστης βελτιστοποίησης για τη μεγιστοποίηση κέρδους κάθε διαχειριστή οχημάτων αποτελείται από τις σχέσεις (3.1), (3.4)–(3.7), (3.9), (3.10) (3.12)–(3.35) και (4.17)–(4.27).



## **ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΤΟΥ ΔΔΗΕ ΜΕ ΤΟΥΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

### **5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Κάθε πρόβλημα, στο οποίο εμπλέκονται περισσότεροι του ενός ενδιαφερόμενοι φορείς, επιδέχεται διαφορετικές λύσεις ανάλογα με τους στόχους που ο κάθε εμπλεκόμενος φορέας (οργανισμός ή μια ομάδα) ενδιαφέρεται να επιτύχει. Με άλλα λόγια, η λύση που εξυπηρετεί τα συμφέροντα μιας εκ των ομάδων που εμπλέκονται σε ένα πρόβλημα μπορεί να είναι αρκετά διαφορετική από τη λύση που εξυπηρετεί τα συμφέροντα κάποιας από τις υπόλοιπες ομάδες.

Παραδείγματος χάρη, η βέλτιστη τιμή πώλησης ενός προϊόντος μπορεί να είναι διαφορετική από τη σκοπιά των καταναλωτών, διαφορετική από τη σκοπιά της εταιρίας που το παράγει ή από τη σκοπιά των ανταγωνιστικών εταιριών. Ακόμα, το βέλτιστο ωράριο λειτουργίας ενός γραφείου μπορεί να διαφέρει από τη σκοπιά των εργαζομένων και από τη σκοπιά των πελατών. Στο ίδιο πλαίσιο, η βέλτιστη συχνότητα δρομολογίων μιας γραμμής λεωφορείων μπορεί να είναι διαφορετική για την καλύτερη εξυπηρέτηση των επιβατών από ότι για τη μέγιστη διάρκεια ζωής των οχημάτων κ.ο.κ.

Η παρατήρηση αυτή καθιστά απαραίτητη την ανάπτυξη ενός μοντέλου συνεργασίας των εμπλεκόμενων μερών, έτσι ώστε να δοθεί η καλύτερη δυνατή λύση στο πρόβλημα. Ο σχεδιασμός του μοντέλου και η φιλοσοφία που θα ακολουθεί μπορεί να ποικίλει ανάλογα με τη φύση του προβλήματος και το βαθμό στον οποίο λαμβάνονται υπόψη τα συμφέροντα κάθε εμπλεκόμενου μέρους.

### **5.2 ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΤΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΤΟΥ ΔΔΗΕ ΜΕ ΤΟΥΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

Στην περίπτωση του προβλήματος τροφοδότησης των φορτίων του ΔΔΗΕ τα εμπλεκόμενα μέρη αποτελούν ο διαχειριστής ΔΔΗΕ και οι διαχειριστές των ηλεκτρικών οχημάτων. Τόσο ο διαχειριστής ΔΔΗΕ όσο και ο κάθε διαχειριστής οχημάτων χωριστά, έχει να προτείνει μια διαφορετική επίλυση του προβλήματος. Η απόκλιση αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι ο διαχειριστής ΔΔΗΕ επιδιώκει την ελαχιστοποίηση του κόστους τροφοδότησης των φορτίων, ενώ κάθε διαχειριστής οχημάτων επιδιώκει τη μεγιστοποίηση του δικού του οφέλους.

Σε αυτό το πλαίσιο γίνεται φανερή η ανάγκη υλοποίησης ενός μοντέλου, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη όλους τους διαχειριστές, ικανό να παρέχει λύση στο πρόβλημα συλλογικά, χωρίς να στοχεύει συγκεκριμένα στην ικανοποίηση των αναγκών ενός μόνο από τους εμπλεκόμενους διαχειριστές. Υπάρχουν περισσότεροι από ένας τρόποι να σχεδιαστεί το παραπάνω μοντέλο, ανάλογα με την αντικειμενική συνάρτηση που επιλέγεται κατά περίπτωση. Μερικές από αυτές τις αντικειμενικές συναρτήσεις παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Ελαχιστοποίηση συνολικών απωλειών ενέργειας**

Η ελαχιστοποίηση των συνολικών απωλειών ενέργειας [7] αποτελεί σύνηθες πρόβλημα των ΔΔΗΕ, το οποίο περιλαμβάνει όλους του περιορισμούς του εκάστοτε δικτύου και αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της ακόλουθης αντικειμενικής συνάρτησης:

$$F = \min \sum_t \sum_{km} (P_{km,t}^{flow} + P_{mk,t}^{flow}) \quad (5.1)$$

Διευκρινίζεται ότι το παραπάνω άθροισμα αφορά τη μέση ισχύ ανά ώρα και ότι η χρονική διάρκεια  $t$  ισούται με μία ώρα. Η επιλογή αυτής της αντικειμενικής συνάρτησης στοχεύει στο βέλτιστο αποτέλεσμα για το ίδιο το δίκτυο, αξιοποιώντας όλες τις διαθέσιμες πηγές, συμπεριλαμβανομένων των ηλεκτρικών οχημάτων.

- **Ελαχιστοποίηση περιβαλλοντικής ρύπανσης**

Η ελαχιστοποίηση της περιβαλλοντικής ρύπανσης αποτελεί σημαντικό ζήτημα των τελευταίων δεκαετιών και σαφώς σχετίζεται με την τροφοδότηση των φορτίων του ΔΔΗΕ καθώς η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται κυρίως από μονάδες λιγνίτη, ντιζελογεννήτριες κ.ο.κ. Η εύρεση της βέλτιστης λύσης προκύπτει από την ελαχιστοποίηση της παρακάτω αντικειμενικής συνάρτησης:

$$F = \min \sum_i C_i S_i \quad (5.2)$$

όπου:

$S_i$  η ενέργεια από την πηγή καυσίμου  $i$  (MWh)

$C_i$  το κόστος ρύπων από την πηγή καυσίμου  $i$  (€/MWh)

Η επιλογή αυτής της αντικειμενικής συνάρτησης στοχεύει στη χρήση περισσότερων ΑΠΕ και συνεπάγεται τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων όσο το δυνατόν περισσότερο από αυτές καθιστώντας έτσι τα οχήματα πολύ περισσότερο φιλικά προς το περιβάλλον, σε αντίθεση με την παραδοσιακή φόρτιση από πηγές καυσίμου.

- **Ορισμός τιμής εκφόρτισης οχημάτων**

Σύμφωνα με τους συγγραφείς του άρθρου [4] είναι δυνατή η υλοποίηση αλγορίθμου ο οποίος ορίζει το κόστος εκφόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων ανά ώρα με τρόπο ώστε να προτιμάται από τον διαχειριστή ΔΔΗΕ έναντι άλλων μονάδων διανεμημένης παραγωγής, φροντίζοντας παράλληλα για την αποζημίωση καταπόνησης των μπαταριών τους.

- **Ικανοποίηση οικονομικών κριτηρίων**

Η μέθοδος αυτή στοχεύει στην καλύτερη δυνατή εξυπηρέτηση των οικονομικών συμφερόντων τόσο του διαχειριστή ΔΔΗΕ όσο των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων. Αυτό επιτυγχάνεται λαμβάνοντας ως παραμέτρους εισόδου τις βέλτιστες λύσεις κάθε διαχειριστή και προτείνοντας εκείνη τη λύση, η οποία ικανοποιεί οικονομικά όσο δυνατόν περισσότερο όλους τους εμπλεκόμενους.

Η παρούσα διπλωματική εργασία επιλύει το πρόβλημα της συνεργασίας των διαχειριστών με γνώμονα την ικανοποίηση των οικονομικών κριτηρίων. Αναλυτικότερη παρουσίαση αυτής της προσέγγισης θα ακολουθήσει στις επόμενες ενότητες.

### **5.3 ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΤΟΥ ΔΔΗΕ ΜΕ ΤΟΥΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ**

Το μοντέλο βέλτιστης συνεργασίας του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων που στοχεύει στην ικανοποίηση των οικονομικών κριτηρίων περιλαμβάνει μεν όλους τους τεχνικούς περιορισμούς του δικτύου εστιάζει όμως στα οικονομικά οφέλη του κάθε διαχειριστή χωριστά και παρέχει λύση στηριζόμενη σε αυτά.

Αρχική παρατήρηση για τον σχεδιασμό αυτού του μοντέλου αποτελεί η διαφορά του κόστους για το διαχειριστή του ΔΔΗΕ με και χωρίς την εκμετάλλευση ηλεκτρικών οχημάτων για την κάλυψη των αναγκών του δικτύου. Συγκεκριμένα, το συνολικό κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ αναμένεται να μειωθεί με τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές ενέργειας. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε δύο κύριους λόγους:

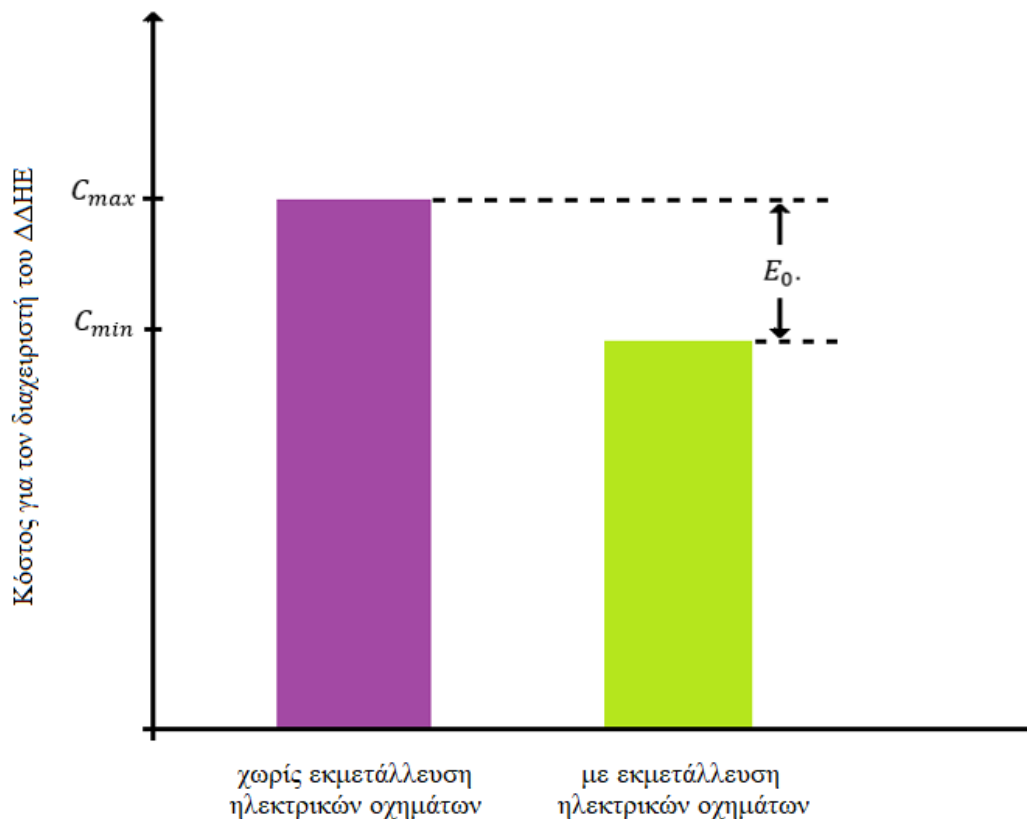
- Στην τιμή εκμετάλλευσης των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία μπορεί να είναι χαμηλότερη από τις τιμές παροχής ενέργειας άλλων μονάδων διανεμημένης παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο η ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές είναι προτιμότερη για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και αντικαθιστά την ακριβότερη διανεμημένη παραγωγή, μειώνοντας το συνολικό του κόστος.
- Στην ικανότητα των ηλεκτρικών οχημάτων να παρέχουν στο δίκτυο οποιαδήποτε ποσότητα ενέργειας είναι αναγκαία (αρκεί να μην ξεπερνά το μέγιστο όριό τους) οσοδήποτε μικρή και αν είναι. Πολλές ΜΔΠ, όπως παραδείγματος χάρη οι ντιζελογεννήτριες, έχουν κάποιο κατώτατο όριο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Η υπεροχή των ηλεκτρικών οχημάτων έγκειται στο γεγονός ότι δεν έχουν τέτοιο όριο.

Συνεπώς δεν υποχρεώνουν τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ να προμηθευτεί περισσότερη ενέργεια από όση χρειάζεται αποτελώντας έτσι οικονομικότερη λύση.

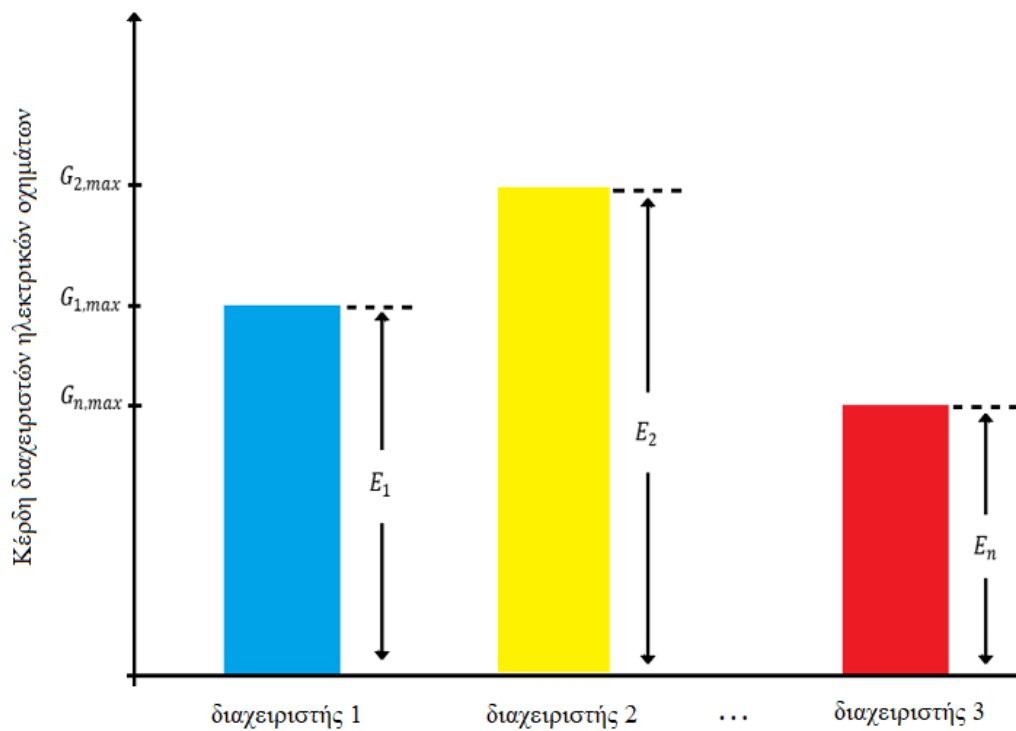
Συνεπώς, η διαφορά του ελαχίστου κόστους για το διαχειριστή του ΔΔΗΕ με την χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές,  $C_{min}$ , από το ελάχιστο κόστος χωρίς την χρήση τους ως πηγές,  $C_{max}$ , μπορεί να παρασταθεί ποιοτικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1. Παρατηρώντας το διάγραμμα εξάγεται το λογικό συμπέρασμα ότι οι αποδεκτές λύσεις για τη συνεργασία του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές των ηλεκτρικών οχημάτων θα πρέπει να κυμαίνονται στην περιοχή του εύρους  $E_0$ .

Από την άλλη πλευρά, δηλαδή την πλευρά των διαχειριστών των ηλεκτρικών οχημάτων, τα μέγιστα κέρδη του κάθε διαχειριστή,  $G_{i,max}$ , μπορούν να παρασταθούν ποιοτικά, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2. Παρατηρώντας, λοιπόν, το Σχήμα 5.2 εξάγεται το λογικό συμπέρασμα ότι οι αποδεκτές λύσεις για τη συνεργασία ενός διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων με τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ θα πρέπει να κυμαίνονται στην περιοχή του εύρους  $E_i$ .

Με βάση τις παραπάνω απαιτήσεις είναι δυνατό να συγκροτηθεί το βασικό προσχέδιο του μοντέλου συνεργασίας των διαχειριστών, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Το Σχήμα 5.3 παρουσιάζει ουσιαστικά τα τέσσερα στάδια που ακολουθούνται για την επίλυση του προβλήματος και αναλύονται ως εξής:



**Σχήμα 5.1 :** Ποιοτικό διάγραμμα σύγκρισης κόστους για διαχειριστή του ΔΔΗΕ με/χωρίς τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές ενέργειας.



Σχήμα 5.2 : Ποιοτικό διάγραμμα κερδών των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων.

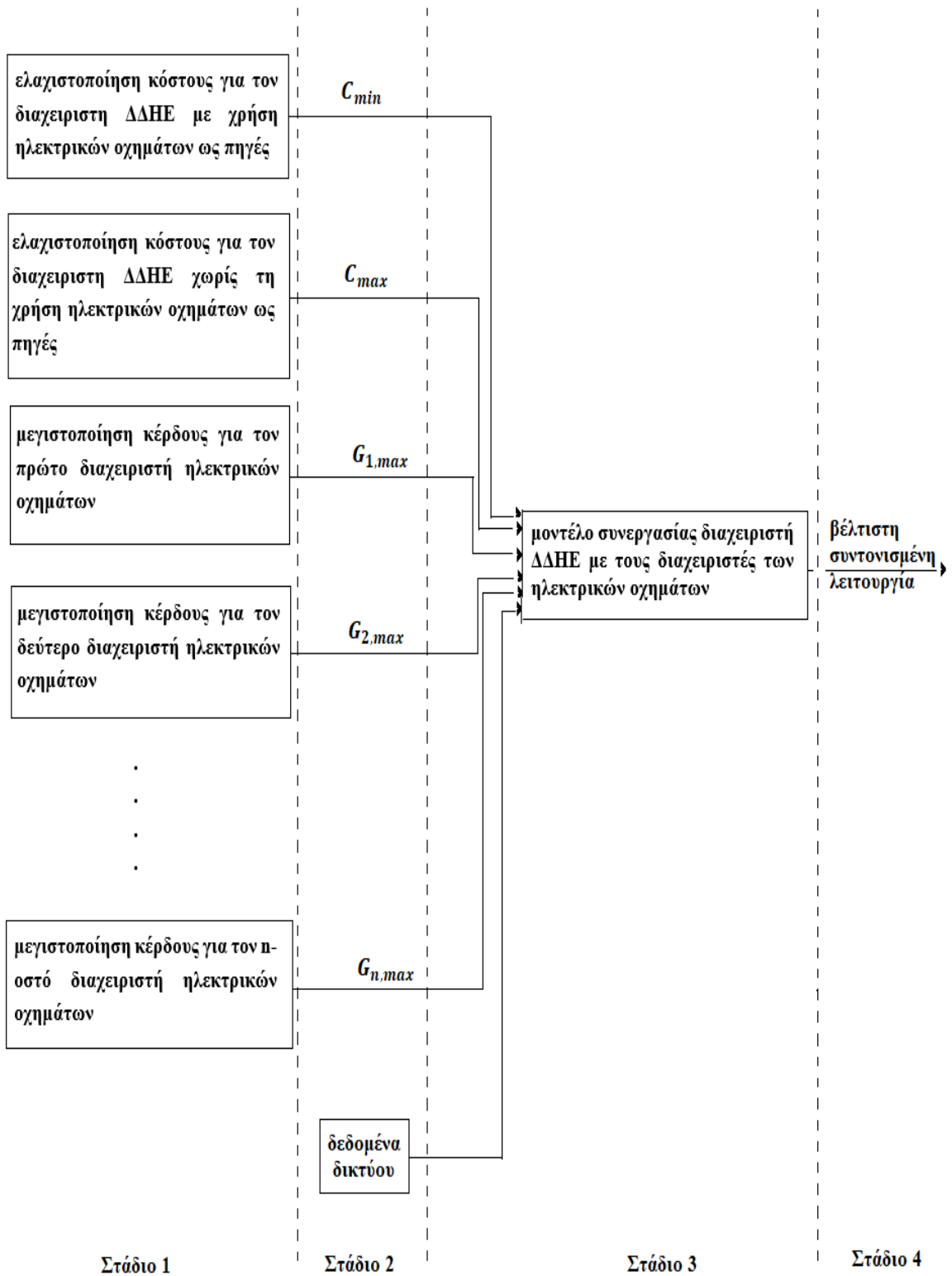
- **Στάδιο 1**

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η επίλυση του προβλήματος ελαχιστοποίησης του κόστους για το διαχειριστή του ΔΔΗΕ με και χωρίς τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές για την τροφοδότηση των φορτίων, καθώς επίσης η επίλυση του προβλήματος μεγιστοποίησης των κερδών κάθε διαχειριστή.

- **Στάδιο 2**

Στο δεύτερο στάδιο τα αποτελέσματα της επίλυσης των προηγούμενων προβλημάτων εισάγονται ως παράμετροι στο μοντέλο συνεργασίας των διαχειριστών. Επιπλέον, εισάγονται ως παράμετροι όλα τα χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητα για την περιγραφή του δικτύου, των ΜΔΠ, της ζήτησης των φορτίων, των τιμών της ενέργειας κλπ.

- **Στάδιο 3**



Σχήμα 5.3 : Διάγραμμα για τη συνεργασία του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές των ηλεκτρικών οχημάτων



Στο τρίτο στάδιο πραγματοποιείται η επίλυση του μοντέλου, το οποίο ως τώρα παραμένει ένα «μαύρο κουτί», δηλαδή μια άγνωστη ακόμα διαδικασία, η οποία αναμένεται να προσδιοριστεί με σαφήνεια στη συνέχεια.

- **Στάδιο 4**

Το τέταρτο στάδιο αποτελεί το τελευταίο στάδιο της επίλυσης του προβλήματος. Πρόκειται ουσιαστικά για την παρουσίαση της βέλτιστης συντονισμένης συνεργασίας μεταξύ του διαχειριστή του ΔΔΗΕ και των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία προκύπτει από την επίλυση του μοντέλου του τρίτου σταδίου. Περιλαμβάνει το βέλτιστο πρόγραμμα τροφοδότησης των φορτίων, το κόστος της βέλτιστης συντονισμένης λειτουργίας για το διαχειριστή του ΔΔΗΕ και τα κέρδη της βέλτιστης συντονισμένης λειτουργίας για κάθε διαχειριστή οχημάτων.

Η επίλυσή του προβλήματος της βέλτιστης συντονισμένης λειτουργίας στοχεύει στην όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ικανοποίηση των οικονομικών συμφερόντων τόσο του διαχειριστή του ΔΔΗΕ, όσο και των διαχειριστών των ηλεκτρικών οχημάτων. Συνεπώς, αναμένεται να αποδώσει το βέλτιστο συνδυασμό χαμηλού κόστους για το διαχειριστή του ΔΔΗΕ και υψηλών κερδών για τους διαχειριστές των ηλεκτρικών οχημάτων.

Σε αυτό το σημείο έχουν συλλεχθεί αρκετά στοιχεία τόσο για τις επιθυμητές εισόδους όσο για τις επιθυμητές εξόδους του μοντέλου συνεργασίας των διαχειριστών. Συνεπώς, το μόνο που απομένει είναι ο μαθηματικός σχεδιασμός του μοντέλου ώστε να ικανοποιεί τις παραπάνω απαιτήσεις. Υπάρχουν περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις που θα μπορούσαν να δώσουν ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα, οι κυριότερες των οποίων παρουσιάζονται αναλυτικότερα παρακάτω:

- **Απλή βελτιστοποίηση**

Στην περίπτωση της απλής βελτιστοποίησης η αντικειμενική συνάρτηση διατυπώνεται ως εξής:

$$F = \min((C - C_{min}) + \sum_i (G_{i,max} - G_i)) \quad (5.3)$$

όπου:

- $C$  η μεταβλητή απόφασης του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ
- $C_{min}$  το ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ
- $G_i$  η μεταβλητή απόφασης του κέρδους του  $i$  διαχειριστή οχημάτων
- $G_{i,max}$  το μέγιστο κέρδος του  $i$  διαχειριστή οχημάτων

Στην απλή βελτιστοποίηση ελαχιστοποιείται το άθροισμα των αποκλίσεων των μεταβλητών απόφασης που σχετίζονται με το κόστος για το διαχειριστή του ΔΔΗΕ,  $C$ , και τα κέρδη των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων,  $G_i$ , από τις ιδανικές τους τιμές,  $C_{min}$  και  $G_{i,max}$ , αντίστοιχα.

- **Βελτιστοποίηση με συντελεστές βαρύτητας**

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης με συντελεστές βαρύτητας η αντικειμενική συνάρτηση διατυπώνεται ως εξής:

$$F = \min(a_0(C - C_{min}) + \sum_i a_i(G_{i,max} - G_i)) \quad (5.4)$$

όπου:

$a_0$  ο συντελεστής βαρύτητας του διαχειριστή του ΔΔΗΕ

$a_i$  ο συντελεστής βαρύτητας του  $i$  διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων

Η βελτιστοποίηση με συντελεστές βαρύτητας δίνει τη δυνατότητα εστίασης στα οικονομικά συμφέροντα κάποιου ή κάποιων από τους διαχειριστές. Η χρήση αυτής της αντικειμενικής συνάρτησης είναι ιδανική στην περίπτωση που θα ήταν επιθυμητή η ανάπτυξη των διαχειριστών οχημάτων και η εισαγωγή περισσότερων ηλεκτρικών οχημάτων (ως πηγές) στο σύστημα.

- **Βελτιστοποίηση με ποσοστά**

Στην περίπτωση της βελτιστοποίησης με ποσοστά η αντικειμενική συνάρτηση διατυπώνεται ως εξής:

$$F = \min((C - C_{min})/C_{min} + \sum_i (G_{i,max} - G_i)/G_{i,max}) \quad (5.5)$$

Η βελτιστοποίηση με ποσοστά δίνει ίδια αξία στα συμφέροντα όλων των διαχειριστών. Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζονται εξίσου τα οικονομικά συμφέροντα των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων είτε αυτοί ελέγχουν περισσότερα είτε λιγότερα οχήματα από άλλους διαχειριστές και τα οικονομικά συμφέροντα του διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας επιλέγεται η ανάπτυξη του μοντέλου με βάση την απλή βελτιστοποίηση. Η επιλογή αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι θεωρούνται όλοι οι εμπλεκόμενοι διαχειριστές ισότιμοι, δηλαδή δε δίνει κάποιο ειδικό βάρος στα οικονομικά συμφέροντα κάποιων από αυτούς (σε αντίθεση με τη βελτιστοποίηση με συντελεστές βαρύτητας). Επίσης, δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην μείωση των μεγαλύτερων αποκλίσεων, σε αντίθεση με την βελτιστοποίηση με ποσοστά.

Επιπλέον, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι η εφαρμογή του μοντέλου συντονισμένης λειτουργίας για τη βέλτιστη συνεργασία του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να γίνει είτε με είτε χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι αβεβαιότητες του προβλήματος (δηλαδή το μοντέλο μπορεί να είναι ή όχι εύρωστο έναντι των

αβεβαιοτήτων). Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας επιλέγεται η ενσωμάτωση του μοντέλου εύρωστης βελτιστοποίησης.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η μαθηματική διατύπωση του μοντέλου βέλτιστης συνεργασίας αποτελείται από την ακόλουθη αντικειμενική συνάρτηση:

$$F = \min((C^{rob} - C_{min}^{rob}) + \sum_i (G_{i,max}^{rob} - G_i^{rob})) \quad (5.6)$$

όπου:

- $C^{rob}$  η μεταβλητή ελέγχου κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ (με εύρωστη βελτιστοποίηση)
- $G_i^{rob}$  η μεταβλητή ελέγχου κέρδους για τον  $i$  διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων (με εύρωστη βελτιστοποίηση)
- $C_{min}^{rob}$  το ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ με χρήση των οχημάτων ως πηγές (με εύρωστη βελτιστοποίηση)
- $G_{i,max}^{rob}$  το μέγιστο κέρδος για τον  $i$  διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων (με εύρωστη βελτιστοποίηση)

Με τους περιορισμούς (3.1), (3.4)–(3.7), (3.9), (3.10), (3.12)–(3.33), (4.17)–(4.27) και τους πρόσθετους περιορισμούς:

$$C^{rob} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 + F_6 \quad (5.7)$$

$$C^{rob} \leq C_{max}^{rob} \quad (5.8)$$

$$G_i^{rob} = \sum_{t=1}^{N_T} D_{i,t} (P_{e,t}^{dch}) \quad (5.9)$$

όπου:

- $C_{max}^{rob}$  το ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ χωρίς τη χρήση των οχημάτων ως πηγές (με εύρωστη βελτιστοποίηση)

Ο περιορισμός της σχέσης (5.7) ορίζει το συνολικό κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ. Ο περιορισμός της σχέσης (5.8) εξασφαλίζει πως το συνολικό κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ βρίσκεται εντός των επιτρεπτών ορίων. Ο περιορισμός της σχέσης (5.9) ορίζει το κέρδος κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων.



## ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ–ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

### 6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών των μαθηματικών μοντέλων για τη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων στο ΔΔΗΕ, όπως περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικά δίκτυα:

- Δίκτυο διανομής 14 κόμβων
- Δίκτυο διανομής 33 κόμβων

Συγκεκριμένα σε κάθε ένα από αυτά τα δίκτυα έγινε η εφαρμογή των ακόλουθων σεναρίων:

- **Σενάριο 1**

Στο σενάριο αυτό ελαχιστοποιείται το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση, χωρίς τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές ενέργειας, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.

- **Σενάριο 2**

Στο σενάριο αυτό ελαχιστοποιείται το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση, με τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές ενέργειας, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.

- **Σενάριο 3**

Στο σενάριο αυτό ελαχιστοποιείται το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ με εύρωστη βελτιστοποίηση, χωρίς τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές ενέργειας, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.

- **Σενάριο 4**

Στο σενάριο αυτό ελαχιστοποιείται το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ με εύρωστη βελτιστοποίηση, με τη χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές ενέργειας, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.

- **Σενάριο 5**

Στο σενάριο αυτό μεγιστοποιείται το κέρδος κάθε ενός από τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων με εύρωστη βελτιστοποίηση, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 4.

- **Σενάριο 6**

Το σενάριο αυτό αφορά τη συνεργασία του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων, με εύρωστη βελτιστοποίηση, όπως παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 5.

Όλες οι εφαρμογές των παραπάνω μοντέλων υλοποιήθηκαν στο περιβάλλον GAMS. Όλα τα παραπάνω προβλήματα αποτελούν προβλήματα μικτού ακέραιου μη γραμμικού προγραμματισμού ή αλλιώς mixed integer nonlinear programming (MINLP), αφού περιλαμβάνουν:

- Πραγματικές μεταβλητές, όπως για παράδειγμα τη ροή ενεργού ισχύος,  $P_{km}^{flow}$ , στη γραμμή διανομής που συνδέει τον κόμβο  $k$  με τον κόμβο  $m$ .
- Δυαδικές μεταβλητές, όπως για παράδειγμα τη μεταβλητή της ένταξης μιας ντιζελογεννήτριας στο σύστημα,  $u_{ON}$ .
- Μη γραμμικούς περιορισμούς, όπως για παράδειγμα τις μη γραμμικές εξισώσεις του ισοζυγίου ενεργού και αέργου ισχύος στους κόμβους του δικτύου διανομής.

Για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης χρησιμοποιήθηκε ο εμπορικός επιλύτης BONMIN, ο οποίος είναι διαθέσιμος στο περιβάλλον GAMS και επιλύει προβλήματα MINLP. Η εισαγωγή δεδομένων έγινε με τη χρήση EXCEL.

Όλες οι εφαρμογές των μοντέλων που ακολουθούν έγιναν σε H/Y με τα ακόλουθα τεχνικά χαρακτηριστικά:

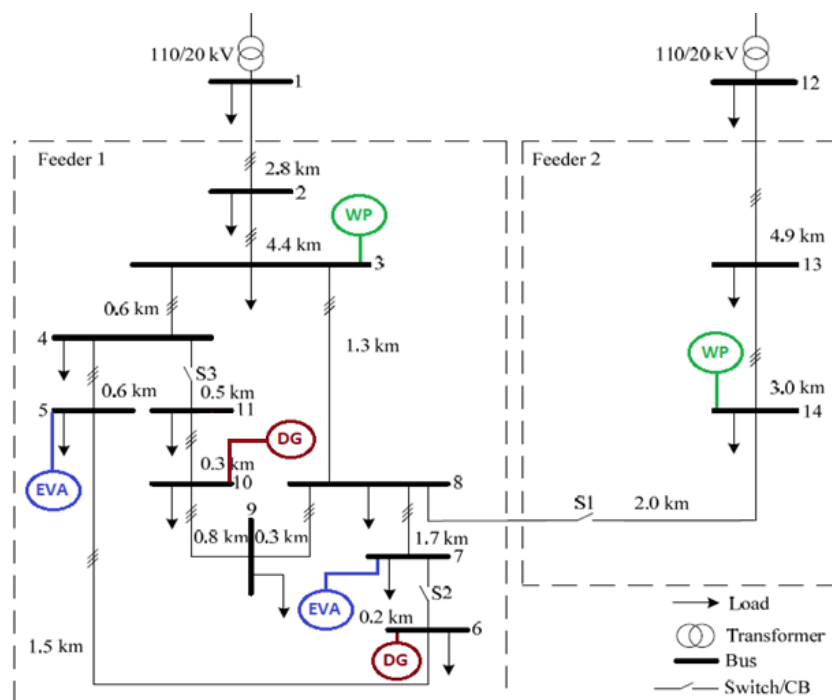
- Επεξεργαστής AMD A12-9720P RADEON R7, 12 COMPUTE CORES 4C+8G 2.70 GHz
- Μνήμη RAM 6,00 GB
- Λειτουργικό σύστημα Windows 10

## 6.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 14 ΚΟΜΒΩΝ

Το ΔΔΗΕ των 14 κόμβων που εμφανίζεται στο Σχήμα 6.1 [6] είναι ένα ακτινικό δίκτυο διανομής με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- δύο υποσταθμούς ΥΤ/ΜΤ στους κόμβους 1 και 12
- μια ντιζελογεννήτρια στον κόμβο 6
- μια ντιζελογεννήτρια στον κόμβο 10
- ένα αιολικό πάρκο, το οποίο αποτελείται από τέσσερις ανεμογεννήτριες, στον κόμβο 3
- ένα αιολικό πάρκο, το οποίο αποτελείται από τέσσερις ανεμογεννήτριες, στον κόμβο 14
- έναν διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος διαχειρίζεται 400 οχήματα, στον κόμβο 5
- έναν διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος διαχειρίζεται 400 οχήματα, στον κόμβο 7

Τα δεδομένα των κόμβων, των γραμμών και των ΜΔΠ του δικτύου, καθώς επίσης τα δεδομένα των οχημάτων κάθε διαχειριστή παρουσιάζονται στους Πίνακες 6.1 έως 6.5.



Σχήμα 6.1 : Τοπολογία του δικτύου 14 κόμβων [6].

Στον Πίνακα 6.1 απεικονίζεται η μέγιστη ενεργός ισχύς κάθε κόμβου, η οποία χωρίζεται σε οικιακή και βιομηχανική. Στο Σχήμα 6.2 απεικονίζονται οι καμπύλες των οικιακών και των βιομηχανικών φορτίων στη διάρκεια μιας ημέρας.

**Πίνακας 6.1 :** Φορτία του δικτύου 14 κόμβων

Κόμβος	Οικιακό φορτίο [kW]	Βιομηχανικό φορτίο [kW]
N1	40483	13082
N2	0	0
N3	745	608
N4	1166	0
N5	1966	405
N6	1480	0
N7	405	208
N8	1585	0
N9	0	1550
N10	1283	184
N11	891	0
N12	40484	13082
N13	0	92
N14	564	896



**Σχήμα 6.2 :** Ημερήσιες καμπύλες των οικιακών και βιομηχανικών φορτίων [6].



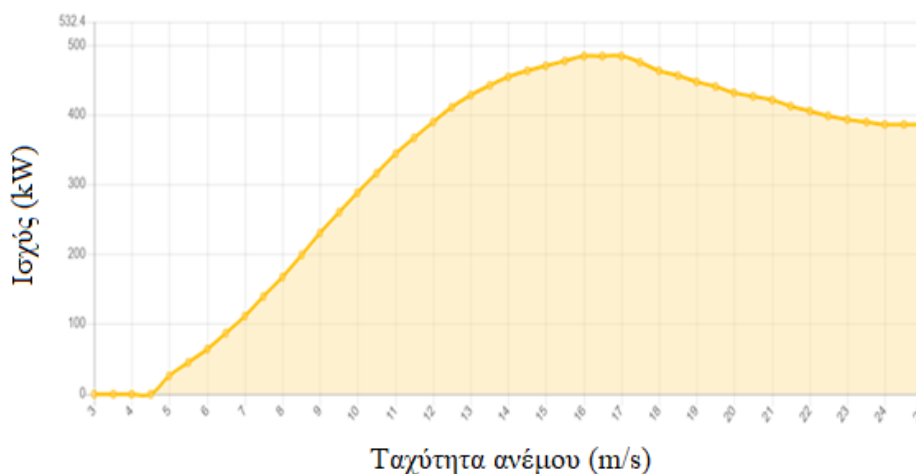
Στον Πίνακα 6.2 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των γραμμών διανομής του δικτύου ανά μονάδα, με βάσεις  $S_B=1$  MVA και  $V_B=20$  kV. Στον Πίνακα 6.3 [13] παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών των αιολικών πάρκων. Στο Σχήμα 6.3 [13] απεικονίζεται η καμπύλη παραγωγής κάθε ανεμογεννήτριας.

**Πίνακας 6.2 :** Σύνθετες αγωγιμότητες (ανά μονάδα) των γραμμών του ΔΔΗΕ [6].

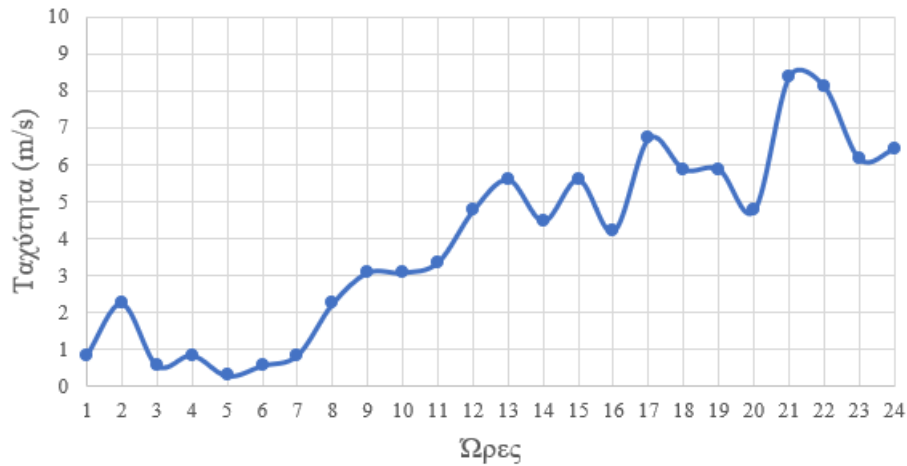
Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Αγωγιμότητα (G)	Επιδεκτικότητα (B)
N1	N2	94	134
N2	N3	60	85
N3	N4	437	625
N4	N5	437	625
N5	N6	175	250
N3	N7	202	288
N7	N9	875	1250
N7	N8	154	221
N9	N10	328	469
N10	N11	875	1250
N12	N13	106	76
N13	N14	173	124

**Πίνακας 6.3 :** Χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών [13].

$P_n$	450 kW
$w_{in}$	4.5 m/s
$w_{out}$	28 m/s
$C_{wg}$	100 €/MWh



**Σχήμα 6.3 :** Καμπύλη παραγωγής ανεμογεννήτριας [13].



Σχήμα 6.4 : Πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου [14].

Πίνακας 6.4 : Χαρακτηριστικά των ντιζελογεννητριών [4].

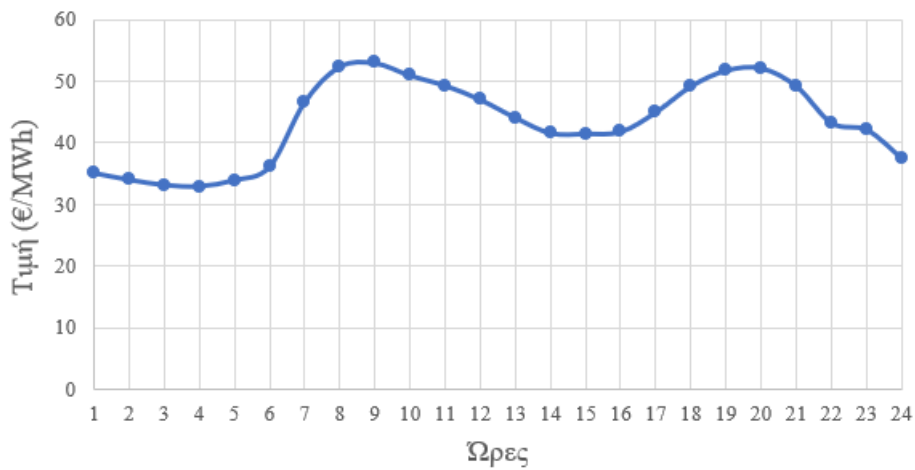
$p^{DG,max}$	μέγιστη ισχύς γεννήτριας	3 MW
$p^{DG,min}$	τεχνικό ελάχιστο γεννήτριας	0.75 MW
$UR$	όριο αύξησης της παραγωγής από μία ώρα στην επόμενη	1.5 MW/h
$DR$	όριο μείωσης της παραγωγής από μία ώρα στην επόμενη	1.5 MW/h
$UT$	ελάχιστος χρόνος λειτουργίας	1 h
$DT$	ελάχιστος χρόνος εκτός λειτουργίας	1 h
$SUC$	κόστος εκκίνησης της γεννήτριας	10 €
$SDC$	κόστος παύσης της γεννήτριας	10 €
$a$	συντελεστής κόστους παραγωγής δεύτερου βαθμού	0.0035 €/MWh <sup>2</sup>
$b$	συντελεστής κόστους παραγωγής πρώτου βαθμού	87 €/MWh
$c$	σταθερός συντελεστής κόστους παραγωγής	25 €

Στο Σχήμα 6.4 [14] απεικονίζεται η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου για κάθε ώρα στη διάρκεια μιας ημέρας. Στον Πίνακα 6.4 [4] παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ντιζελογεννητριών. Στον Πίνακα 6.5 [4] παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών οχημάτων. Σημειώνεται πως ο διαχειριστής του κόμβου 5 διαθέτει 400 οχήματα τα οποία μπορεί να ελέγχει τις ώρες 7:00–16:00 ενώ ο διαχειριστής του κόμβου 7 διαθέτει 200 οχήματα τα οποία μπορεί να ελέγχει τις ώρες 7:00–16:00 και 200 οχήματα τα οποία μπορεί να ελέγχει τις ώρες 16:00–24:00. Στο Σχήμα 6.5 [15] απεικονίζεται η πρόβλεψη της τιμής χονδρικής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σχετικά με τα σφάλματα που αφορούν τα μοντέλα που επιλύονται με εύρωστη βελτιστοποίηση, έχει θεωρηθεί σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με 10%, καθώς επίσης και σφάλμα στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής ίσο με 20%.

**Πίνακας 6.5 :** Χαρακτηριστικά των ηλεκτρικών οχημάτων [4].

$E_e^{B,max}$	ονομαστική χωρητικότητα μπαταρίας	38 kWh
$E_e^{B,min}$	ελάχιστο επίπεδο φόρτισης μπαταρίας	2 kWh
$C_e^{B,inv}$	κόστος αγοράς μπαταρίας	50 €/kWh
$LT_e$	κύκλος ζωής της μπαταρίας (πλήθος ολοκληρωμένων φορτίσεων/εκφορτίσεων της μπαταρίας)	1000
$p_e^{ch,max}$	μέγιστη ισχύς φόρτισης	6,4 kW
$p_e^{dch,max}$	μέγιστη ισχύς εκφόρτισης	6,4 kW
$\eta$	συντελεστής απόδοσης μπαταρίας	90%
$d_{max}$	αυτονομία οχήματος	150 km
$d_{DoD,e}$	βάθος εκφόρτισης μπαταρίας	80%

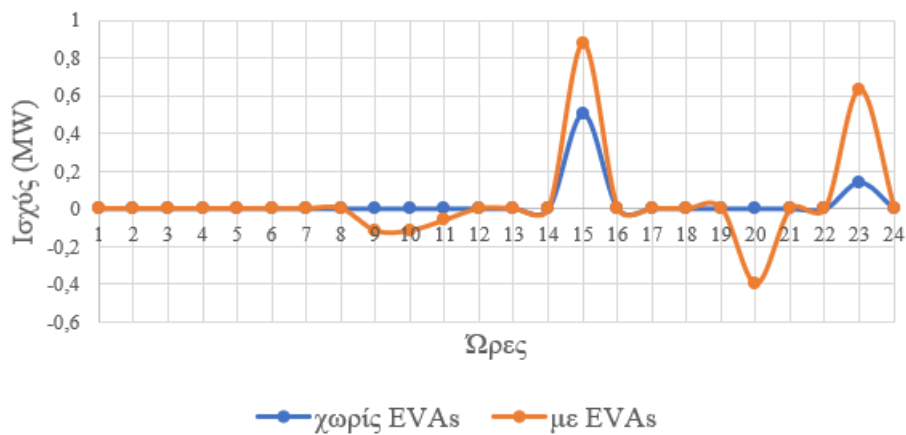
**Σχήμα 6.5 :** Πρόβλεψη τιμής χονδρικής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας [15].

### 6.2.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΤΟΥ ΔΔΗΕ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 14 ΚΟΜΒΩΝ

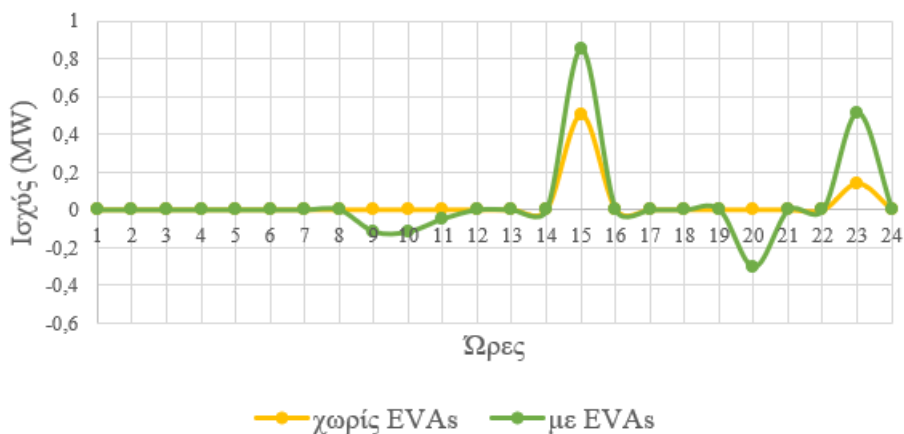
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ελαχιστοποίησης κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ για το δίκτυο διανομής των 14 κόμβων.

Αρχικά, στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες κατανάλωσης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων με και χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων όταν σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ. Διευκρινίζεται πως οι θετικές τιμές αφορούν την φόρτιση ενώ οι αρνητικές την εκφόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων.

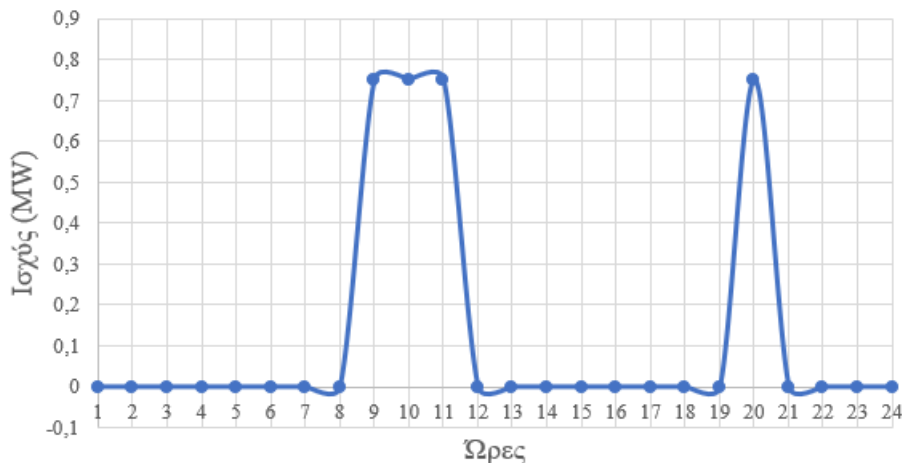
Παρατηρείται ότι τα οχήματα εκφορτίζονται κατά τις πρωινές ώρες 9:00–11:00 και το απόγευμα στις 20:00, τις ώρες δηλαδή που κορυφώνεται το βιομηχανικό και το οικιακό φορτίο, αντίστοιχα. Επιπλέον, παρατηρείται ότι φορτίζονται κατά τις ώρες 15:00 και 23:00, κατά τη διάρκεια των οποίων η πρόβλεψη της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή, επιτυγχάνοντας έτσι την ελαχιστοποίηση του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.



**Σχήμα 6.6 :** Καμπύλες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με και χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.



**Σχήμα 6.7 :** Καμπύλες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με και χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων σύμφωνα με τα μοντέλα εύρωστης βελτιστοποίησης.



**Σχήμα 6.8 :** Παραγωγή από ντιζελογεννήτριες.

Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζονται οι καμπύλες κατανάλωσης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων με και χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων σύμφωνα με τα εύρωστα μοντέλα όταν σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

Συγκρίνοντας το Σχήμα 6.6 με το Σχήμα 6.7 παρατηρείται μικρή μείωση της εκφόρτισης των οχημάτων την ώρα 20:00 (συνοδευόμενη από την αντίστοιχη φόρτιση την ώρα 23:00). Η διαφορά αυτή οφείλεται στο σφάλμα της αιολικής παραγωγής. Συγκεκριμένα, το μοντέλο εύρωστης βελτιστοποίησης θεωρεί αύξηση της αιολικής παραγωγής κατά εκείνη την ώρα με αποτέλεσμα το δίκτυο να τροφοδοτείται από αυτήν και να υπάρχει μικρότερη ανάγκη για ενέργεια από ηλεκτρικά οχήματα. Στο σημείο αυτό είναι σημαντικό να τονιστεί ότι, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η, σε κάθε χρονική στιγμή, διαθέσιμη αιολική παραγωγή αξιοποιείται πλήρως από το δίκτυο διανομής, το οποίο σημαίνει ότι έχει γίνει η υπόθεση ότι δεν επιτρέπεται η περικοπή της ενεργού ισχύος της αιολικής παραγωγής από τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

Η καμπύλη παραγωγής των ντιζελογεννητριών, όταν εξετάζεται η λειτουργία του δικτύου χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων, απεικονίζεται στο Σχήμα 6.8 και παραμένει ίδια με και χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση. Αξίζει να σημειωθεί πως όταν εξετάζεται η λειτουργία του δικτύου με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων, η παραγωγή από τις ντιζελογεννήτριες υποκαθίσταται πλήρως από την παραγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων, είτε με είτε χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση.

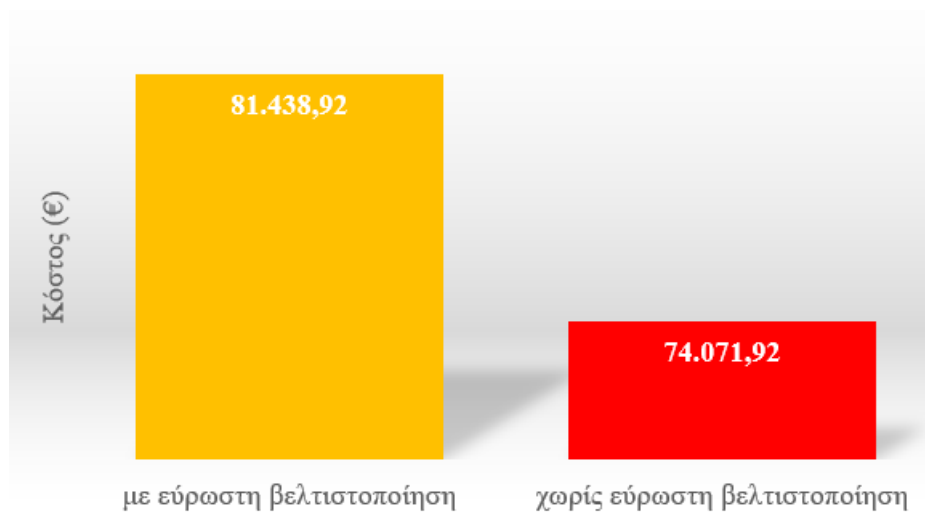
Η σύγκριση του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ που προκύπτει για κάθε μια από τις παραπάνω λειτουργίες παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.6. Στο Σχήμα 6.9 απεικονίζονται τα κόστη με και χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση, χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων. Στο Σχήμα 6.10 απεικονίζονται τα κόστη με και χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση, με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.

Η αισθητή αύξηση του κόστους στα μοντέλα με εύρωστη βελτιστοποίηση οφείλεται κυρίως στο σφάλμα της πρόβλεψης των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο ισούται με 10%, και διαπιστώνεται πως οι αποκλίσεις του Πίνακα 6.6 κυμαίνονται κοντά σε αυτή την τιμή.

Ακόμα, η μείωση του κόστους που παρατηρείται στα μοντέλα με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων από τα αντίστοιχα μοντέλα χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων οφείλεται στο γεγονός ότι η χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές ενέργειας αποτελεί συχνά οικονομικότερη λύση από άλλες πηγές για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

**Πίνακας 6.6 :** Κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

Κόστος διαχειριστή του ΔΔΗΕ	Με εύρωστη βελτιστοποίηση	Χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση	Διαφορά
Χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων	81.438,92 €	74.071,92 €	9,95%
Με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων	81.263,81 €	73.922,80 €	9,93%

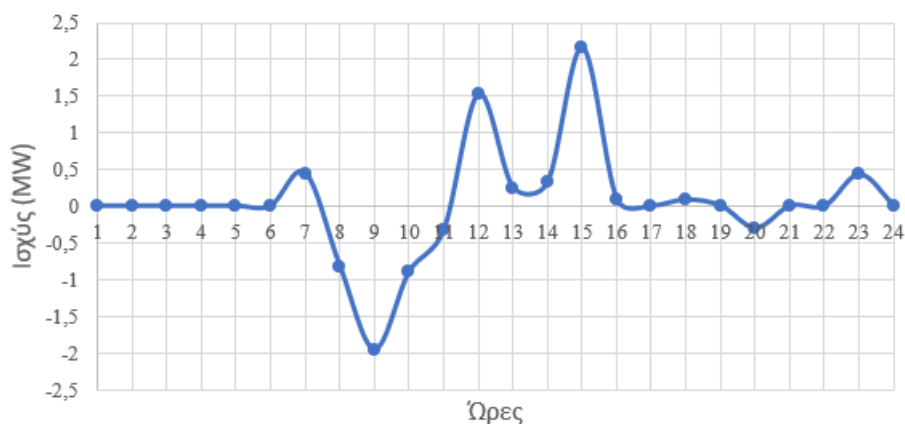
**Σχήμα 6.9 :** Κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.**Σχήμα 6.10 :** Κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.

## 6.2.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΕΡΔΩΝ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 14 ΚΟΜΒΩΝ

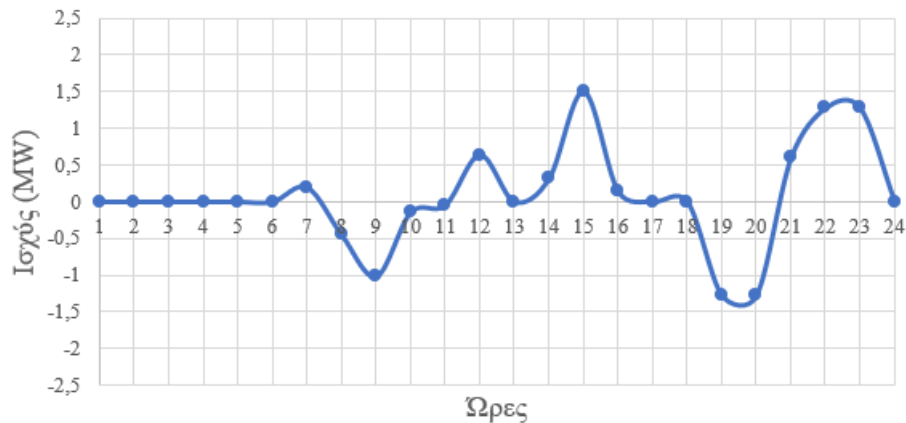
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εύρωστης βελτιστοποίησης κέρδους για κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων χωριστά. Επισημαίνεται ότι η μεγιστοποίηση του κέρδους κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται υπό τον περιορισμό (3.35) που ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3. Σύμφωνα με αυτόν τον περιορισμό το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ δεν μπορεί να ξεπερνά μια προκαθορισμένη τιμή,  $DNO_{cost}$ . Στο πλαίσιο αυτής της εφαρμογής, η τιμή αυτή επιλέγεται να είναι ίση με το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ για τη λειτουργία του δικτύου χωρίς την ύπαρξη διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων, με εύρωστη βελτιστοποίηση. Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.6, η τιμή αυτή είναι 81.438,92 €.

Στο Σχήμα 6.11 απεικονίζεται η λειτουργία που μεγιστοποιεί τα κέρδη του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκεται στον κόμβο 5. Σύμφωνα με τη λειτουργία αυτή σημειώνονται μεγάλες εκφορτίσεις στο διάστημα 8:00–11:00. Οι μεγάλες αυτές εκφορτίσεις οφείλονται στο ότι ο διαχειριστής του κόμβου 5 έχει στη διάθεσή του τα οχήματα που ελέγχει μόνο κατά τις ώρες 7:00–16:00. Οι εκφορτίσεις αυτές συνοδεύονται από τις αντίστοιχες μεγάλες φορτίσεις, ώστε να αναπληρωθεί η ενέργεια που δαπανήθηκε από τις μπαταρίες των οχημάτων. Τις υπόλοιπες ώρες τις ημέρας, που ο διαχειριστής του κόμβου 5 δεν έχει στη διάθεσή του τα οχήματα που ελέγχει, παρατηρείται ότι οι εκφορτίσεις των οχημάτων που ελέγχονται από τον άλλο διαχειριστή είναι μόνο οι απολύτως απαραίτητες για την ομαλή λειτουργία του δικτύου. Το μέγιστο κέρδος για τον διαχειριστή του κόμβου 5 προκύπτει ίσο με 164,25 €.

Στο Σχήμα 6.12 απεικονίζεται η λειτουργία που μεγιστοποιεί τα κέρδη του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκεται στον κόμβο 7. Σύμφωνα με τη λειτουργία αυτή σημειώνονται σχετικά μεγάλες εκφορτίσεις στο διάστημα 8:00–9:00 και 19:00–20:00. Οι εκφορτίσεις αυτές συνοδεύονται από τις αντίστοιχες σχετικά μεγάλες φορτίσεις, ώστε να αναπληρωθεί η ενέργεια που δαπανήθηκε από τις μπαταρίες των οχημάτων.



**Σχήμα 6.11 :** Καμπύλη φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για μεγιστοποίηση του κέρδους του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκεται στον κόμβο 5.



**Σχήμα 6.12 :** Καμπύλη φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για μεγιστοποίηση του κέρδους του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκεται στον κόμβο 7.

Οι εκφορτίσεις που σημειώνονται οφείλονται στο ότι ο διαχειριστής του κόμβου 7 έχει στη διάθεσή του κάποια από τα οχήματα που μπορεί να ελέγχει κατά τις ώρες 7:00-16:00 και κάποια άλλα κατά τις ώρες 16:00-24:00. Με αυτόν τον τρόπο έχει την δυνατότητα να συνεργάζεται περισσότερες ώρες της ημέρας με τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ από ότι ο διαχειριστής του κόμβου 5. Από την άλλη, συγκρίνοντας την καμπύλη του Σχήματος 6.12 με την καμπύλη του Σχήματος 6.11 παρατηρείται πως τις πρωινές ώρες 8:00-10:00 οι εκφορτίσεις που απεικονίζονται στο Σχήμα 6.12 είναι αρκετά μικρότερες από τις εκφορτίσεις που απεικονίζονται στο Σχήμα 6.11. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στο ότι κατά εκείνες τις ώρες ο διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων του κόμβου 7 έχει στη διάθεσή του τα μισά μόνο οχήματα από αυτά που έχει στη διάθεσή του ο διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων του κόμβου 5. Συνεπώς δεν έχει την δυνατότητα για τις μεγάλες εκφορτίσεις που παρατηρούνται στο Σχήμα 6.11. Παρ' όλ' αυτά, στο τέλος ο διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων του κόμβου 7 έχει τη δυνατότητα επίτευξης μεγαλύτερου κέρδους από τον διαχειριστή του κόμβου 5 αφού η συνολική ενέργεια που εγχέει στο δίκτυο διανομής είναι μεγαλύτερη, πράγμα που συνεπάγεται μεγαλύτερο κέρδος και οφείλεται κυρίως στο ότι έχει την δυνατότητα να συνεργαστεί με τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ για πολύ περισσότερες ώρες της ημέρας. Το μέγιστο κέρδος για τον διαχειριστή του κόμβου 5 προκύπτει ίσο με 186,19 €. Συνοπτικά τα μέγιστα δυνατά κέρδη κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.7.

**Πίνακας 6.7 :** Μέγιστα δυνατά κέρδη κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων.

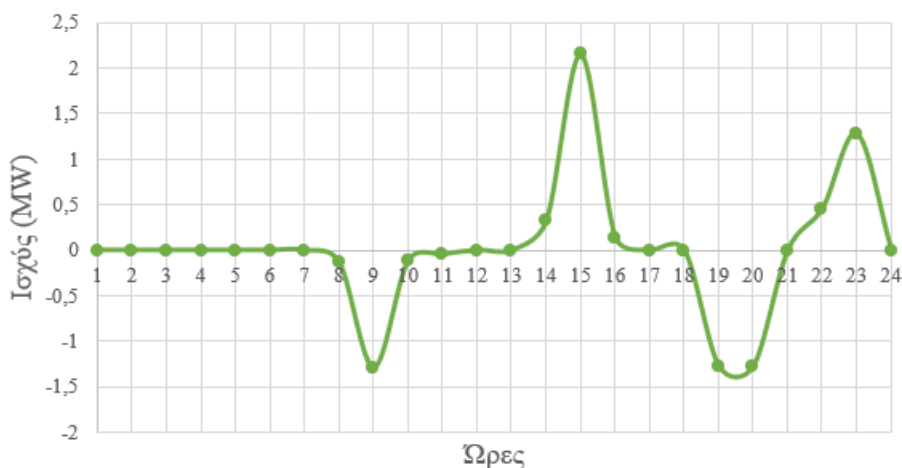
Διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων του κόμβου 5 ( $EVA_1$ )	164,25 €
Διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων του κόμβου 7 ( $EVA_2$ )	186,19 €



### 6.2.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 14 ΚΟΜΒΩΝ

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εύρωστης βελτιστοποίησης για την συνεργασία του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων. Προκειμένου να έχει αξία η συνεργασία αυτή, είναι σημαντικό το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ να μην ξεπερνά το ελάχιστο κόστος λειτουργίας του δικτύου χωρίς την ύπαρξη διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων. Το κόστος αυτό περιορίζεται από τον περιορισμό (5.8) που ορίστηκε στο Κεφάλαιο 5 με τη σταθερά  $C_{max}^{rob}$ . Συνεπώς στο πλαίσιο αυτής της εφαρμογής η σταθερά  $C_{max}^{rob}$  λαμβάνει σύμφωνα με τον Πίνακα 6.6 την τιμή 81.438,92 €. Επιπλέον, χρειάζεται να οριστούν οι σταθερές της αντικειμενικής συνάρτησης της εύρωστης βελτιστοποίησης της συνεργασίας που ορίστηκε στη σχέση (5.6) του κεφαλαίου 5,  $C_{min}^{rob}$ ,  $G_{i,max}^{rob}$ . Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.6, το ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ για εύρωστη λειτουργία του δικτύου διανομής με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων,  $C_{min}^{rob}$ , ισούται με 81.263,81 €. Τέλος, τα μέγιστα δυνατά κέρδη των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων  $G_{i,max}^{rob}$ , λαμβάνονται από τον Πίνακα 6.7. Συνεπώς η σταθερά  $G_{1,max}^{rob}$  λαμβάνει την τιμή 164,25 € και η σταθερά  $G_{2,max}^{rob}$  λαμβάνει την τιμή 186,19 €.

Στο Σχήμα 6.13 παρουσιάζεται η βέλτιστη καμπύλη διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων για τη συντονισμένη λειτουργία του δικτύου. Παρατηρούνται για μια ακόμη φορά εκφορτίσεις των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων στις ώρες αιχμής των φορτίων και φορτίσεις κατά τις ώρες που η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει χαμηλές τιμές. Επίσης, παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι τα σημεία αυτής της καμπύλης βρίσκονται κάπου στο ενδιάμεσο των αντίστοιχων σημείων των καμπυλών των Σχημάτων 6.7, 6.11 και 6.12. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση επιδιώκει μια μέση λύση ανάμεσα στο ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και στη μεγιστοποίηση του κέρδους για τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.



**Σχήμα 6.13 :** Καμπύλη βέλτιστης διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων για τη συντονισμένη λειτουργία του δικτύου.

Στον Πίνακα 6.8 παρουσιάζεται το κόστος αυτής της συνεργασίας για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και τα κέρδη των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων. Σημειώνεται πως το άθροισμα των διαφορών που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.8 είναι στην ουσία η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της εύρωστης συνεργασίας του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων. Στο Σχήμα 6.14 συγκρίνεται το κόστος της βέλτιστης συνεργασίας με το ελάχιστο δυνατό κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ. Στο Σχήμα 6.15 συγκρίνονται τα κέρδη της βέλτιστης συνεργασίας των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων με τα μέγιστα δυνατά κέρδη τους. Διαπιστώνεται τόσο στο Σχήμα 6.14 όσο και στο Σχήμα 6.15 πως η διαφορές είναι σχετικά μικρές και ικανοποιούνται σε ένα βαθμό τα συμφέροντα όλων.

**Πίνακας 6.8 :** Κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και κέρδη για τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.

Κόστος ΔΔΗΕ	Ελάχιστο κόστος (€)	Μέγιστο κόστος (€)	Κόστος βέλτιστης συνεργασίας (€)	Διαφορά από το ελάχιστο (€)
ΔΔΗΕ	81.263,81	81.438,92	81.355,16	91,35
Κέρδη διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων	Ελάχιστο κέρδος (€)	Μέγιστο κέρδος (€)	Κέρδος βέλτιστης συνεργασίας (€)	Διαφορά από το μέγιστο (€)
Διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων κόμβου 5 ( $EVA_1$ )	0	164,25	44,72	119,53
Διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων κόμβου 7 ( $EVA_7$ )	0	186,19	75,71	110,48
			Άθροισμα διαφορών (€)	321,36



**Σχήμα 6.14 :** Σύγκριση κόστους της βέλτιστης συνεργασίας με το ελάχιστο δυνατό κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.



**Σχήμα 6.15 :** Σύγκριση κερδών της βέλτιστης συνεργασίας με τα μέγιστα δυνατά κέρδη για τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.

### 6.3 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ ΤΩΝ 33 ΚΟΜΒΩΝ

Το ΔΔΗΕ των 33 κόμβων που εμφανίζεται στο Σχήμα 6.16 [4] είναι ένα ακτινικό δίκτυο διανομής με τα παρακάτω χαρακτηριστικά:

- έναν υποσταθμό ΥΤ/ΜΤ στον κόμβο 1
- μια ντιζελογεννήτρια στον κόμβο 26

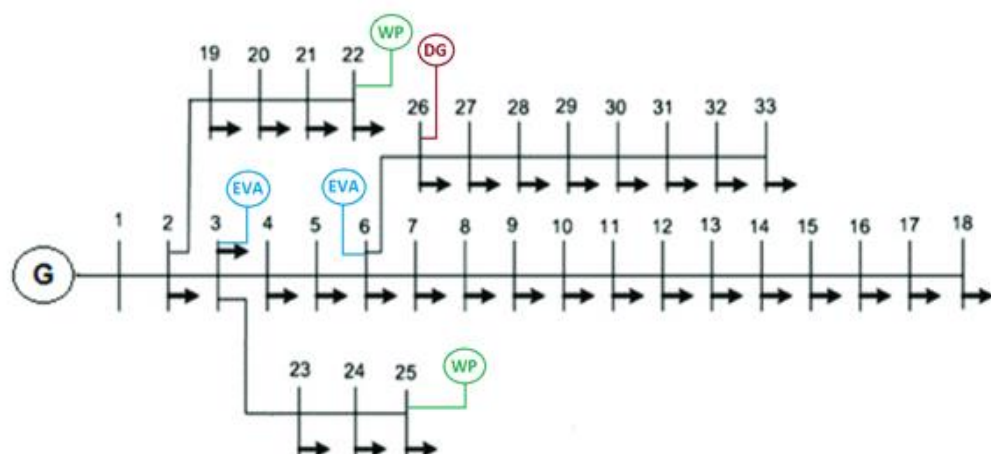
- ένα αιολικό πάρκο, το οποίο αποτελείται από δύο ανεμογεννήτριες, στον κόμβο 22
- ένα αιολικό πάρκο, το οποίο αποτελείται από δύο ανεμογεννήτριες, στον κόμβο 25
- έναν διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος διαχειρίζεται 400 οχήματα, στον κόμβο 3
- έναν διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος διαχειρίζεται 400 οχήματα, στον κόμβο 6

Τα δεδομένα των κόμβων και των γραμμών του δικτύου παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες.

Στον Πίνακα 6.9 απεικονίζεται η μέγιστη ενεργός ισχύς κάθε κόμβου, η οποία θεωρείται οικιακή. Στον Πίνακα 6.10 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των γραμμών διανομής του δικτύου ανά μονάδα, με βάσεις  $S_B=1$  MVA και  $V_B=12.66$  kV.

Τα χαρακτηριστικά των ΜΔΠ και οι προβλέψεις λαμβάνονται ίσα με αυτά που χρησιμοποιήθηκαν στην προηγούμενη ενότητα. Πιο συγκεκριμένα τα χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών λαμβάνονται από τον Πίνακα 6.3, οι καμπύλες φόρτισης των ανεμογεννητριών λαμβάνονται από το Σχήμα 6.3, τα χαρακτηριστικά των ντιζελογεννητριών λαμβάνονται από τον Πίνακα 6.4, τα χαρακτηριστικά των οχημάτων λαμβάνονται από τον Πίνακα 6.5, οι καμπύλες των φορτίων λαμβάνονται από το Σχήμα 6.2, η πρόβλεψη της τιμής χονδρικής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνεται από το Σχήμα 6.5, η πρόβλεψη της ταχύτητας του ανέμου κάθε ώρα της ημέρας λαμβάνεται από το Σχήμα 6.4. Σημειώνεται πως ο διαχειριστής του ζυγού 3 διαθέτει 400 οχήματα τα οποία μπορεί να ελέγχει τις ώρες 7:00-16:00 ενώ ο διαχειριστής του ζυγού 6 διαθέτει 200 οχήματα τα οποία μπορεί να ελέγχει τις ώρες 7:00-16:00 και 200 οχήματα τα οποία μπορεί να ελέγχει τις ώρες 16:00-24:00.

Σχετικά με τα σφάλματα που αφορούν τα μοντέλα που επιλύονται με εύρωστη βελτιστοποίηση, έχει θεωρηθεί σφάλμα στην πρόβλεψη της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας ίσο με 10% καθώς επίσης και σφάλμα στην πρόβλεψη της αιολικής παραγωγής ίσο με 20%.



Σχήμα 6.16 : Τοπολογία του δικτύου 33 κόμβων [4].

**Πίνακας 6.9 :** Φορτία του δικτύου 33 κόμβων.

Κόμβος	Οικιακό φορτίο [kW]
N1	0
N2	300
N3	570
N4	360
N5	180
N6	480
N7	60
N8	60
N9	180
N10	180
N11	135
N12	180
N13	180
N14	360
N15	180
N16	180
N17	180
N18	270
N19	270
N20	270
N21	270
N22	270
N23	270
N24	1260
N25	1260
N26	180
N27	180
N28	180
N29	360
N30	60
N31	450
N32	630
N33	180

**Πίνακας 6.10 :** Σύνθετες αγωγιμότητες των γραμμών ΔΔΗΕ.

Κόμβος αναχώρησης	Κόμβος άφιξης	Αγωγιμότητα (G)	Επιδεκτικότητα (B)
N1	N2	1371	709
N2	N3	258	131
N3	N4	348	177
N4	N5	334	170
N5	N6	112	97
N6	N7	72	237
N7	N8	62	44
N8	N9	103	74
N9	N10	102	73
N10	N11	735	243
N11	N12	386	128
N12	N13	67	53
N13	N14	108	143
N14	N15	151	135
N15	N16	140	102
N16	N17	45	60
N17	N18	136	106
N2	N19	512	488
N19	N20	59	53
N20	N21	166	193
N21	N22	82	109
N3	N23	242	165
N23	N24	110	87
N24	N25	111	87
N6	N26	627	319
N26	N27	448	228
N27	N28	85	75
N28	N29	113	99
N29	N30	251	128
N30	N31	83	82
N31	N32	219	255
N32	N33	138	214

### 6.3.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΛΑΧΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΟΣΤΟΥΣ ΓΙΑ ΤΟΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗ ΤΟΥ ΔΔΗΕ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 33 ΚΟΜΒΩΝ

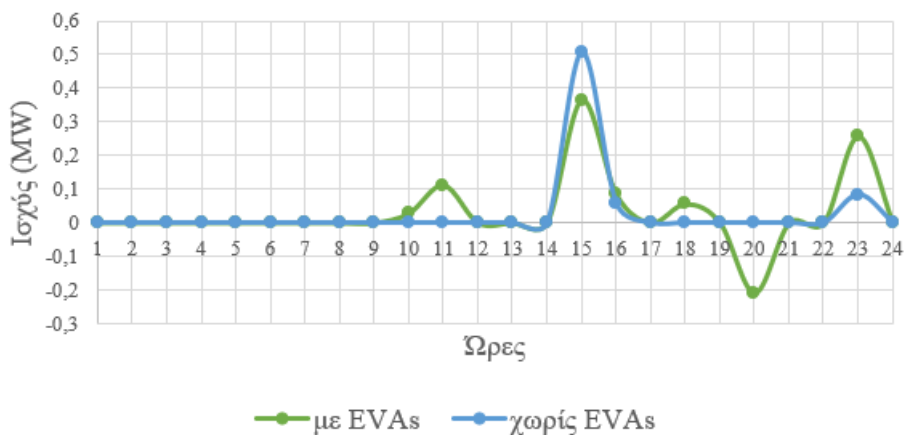
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα ελαχιστοποίησης κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ για δίκτυο 33 κομβών.

Αρχικά στο Σχήμα 6.17 παρουσιάζονται οι καμπύλες κατανάλωσης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων με και χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων όταν σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

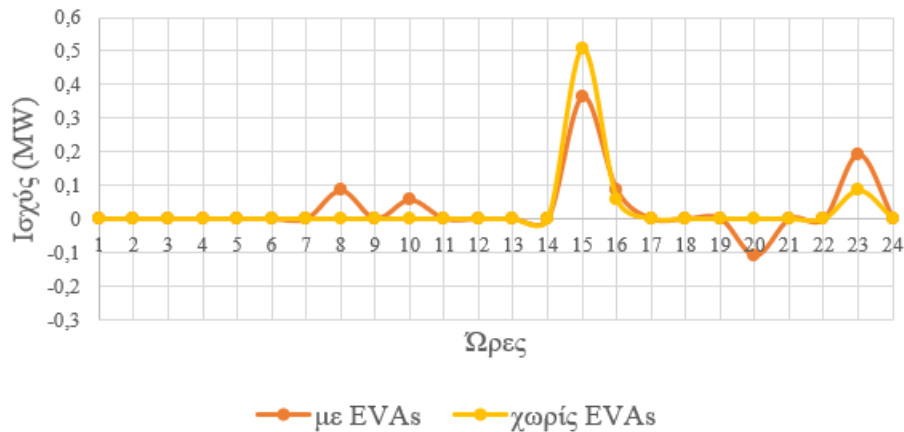
Παρατηρείται ότι τα οχήματα εκφορτίζονται το απόγευμα στις 20:00, την ώρα δηλαδή που κορυφώνεται το οικιακό φορτίο. Επιπλέον παρατηρείται ότι φορτίζονται κυρίως κατά τις ώρες 15:00 και 23:00, κατά τη διάρκεια των οποίων η πρόβλεψη της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή, επιτυγχάνοντας έτσι την ελαχιστοποίηση του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

Στο Σχήμα 6.18 παρουσιάζονται οι καμπύλες κατανάλωσης ενέργειας των ηλεκτρικών οχημάτων με και χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων σύμφωνα με τα εύρωστα μοντέλα όταν σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

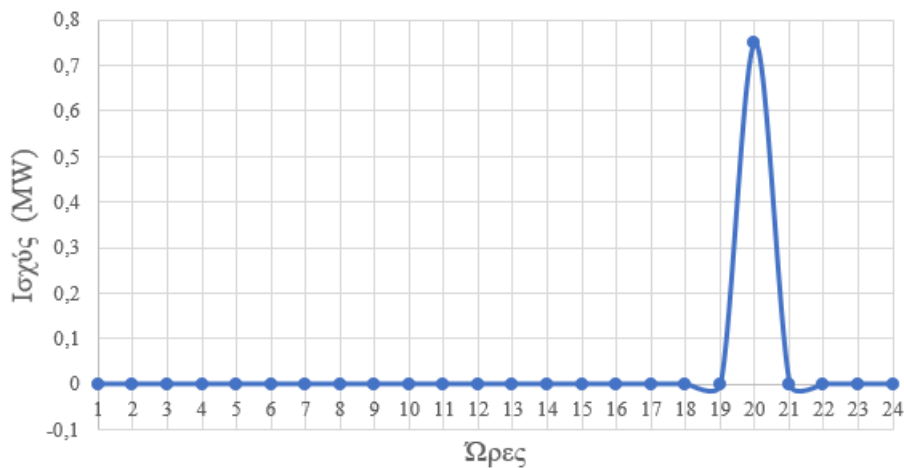
Συγκρίνοντας το Σχήμα 6.17 με το Σχήμα 6.18 παρατηρείται μικρή μείωση της εκφόρτισης των οχημάτων την ώρα 20:00 (συνοδευόμενη από την αντίστοιχη φόρτιση την ώρα 23:00). Η διαφορά αυτή οφείλεται στο σφάλμα της αιολικής παραγωγής. Συγκεκριμένα το μοντέλο εύρωστης βελτιστοποίησης θεωρεί αύξηση της αιολικής παραγωγής κατά εκείνη την ώρα με αποτέλεσμα το δίκτυο να τροφοδοτείται από αυτήν και να υπάρχει μικρότερη ανάγκη για ενέργεια από ηλεκτρικά οχήματα. Στο σημείο αυτό είναι κρίσιμο να τονιστεί ότι, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 3, η αιολική παραγωγή στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής χρησιμοποιείται στο μέγιστο, δεν μπορεί δηλαδή να περιοριστεί από τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.



**Σχήμα 6.17 :** Καμπύλες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με και χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.



**Σχήμα 6.18 :** Καμπύλες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων με και χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων σύμφωνα με τα μοντέλα εύρωστης βελτιστοποίησης.



**Σχήμα 6.19 :** Παραγωγή ντιζελογεννήτριας.

Η καμπύλη παραγωγής της ντιζελογεννήτριας όταν εξετάζεται η λειτουργία του δικτύου χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων απεικονίζεται στο Σχήμα 6.19 και παραμένει ίδια με και χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση. Αξίζει να σημειωθεί πως όταν εξετάζεται η λειτουργία του δικτύου με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων, η παραγωγή από την ντιζελογεννήτρια υποκαθίσταται πλήρως από την παραγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων, είτε με είτε χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση.

Η σύγκριση του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ που προκύπτει για κάθε μια από τις παραπάνω λειτουργίες παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.11. Στο Σχήμα 6.20 απεικονίζονται τα κόστη λειτουργίας με και χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση, χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων. Στο Σχήμα 6.21 απεικονίζονται τα κόστη λειτουργίας με και χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση, με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.

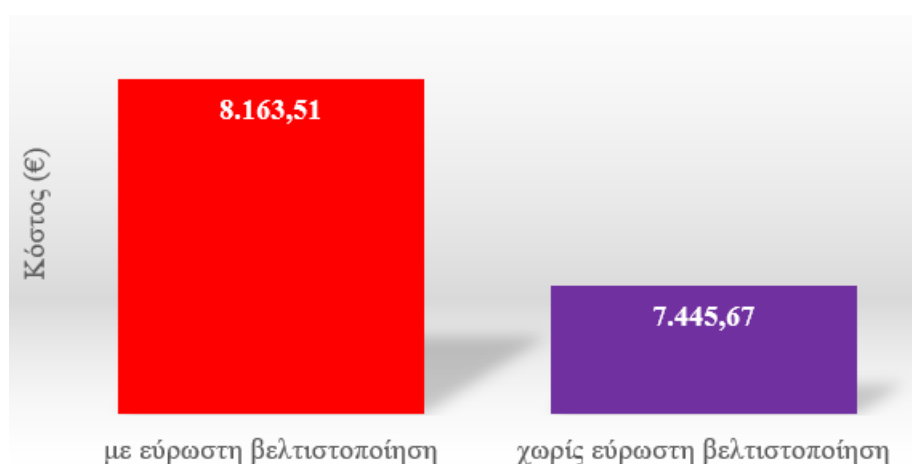
Η αισθητή αύξηση του κόστους στα μοντέλα που περιλαμβάνουν εύρωστη βελτιστοποίηση οφείλεται κυρίως στο σφάλμα της πρόβλεψης των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο ισούται με 10%, εξού και η παρατήρηση πως οι αποκλίσεις του Πίνακα 6.11 κυμαίνονται κοντά σε αυτήν την τιμή.



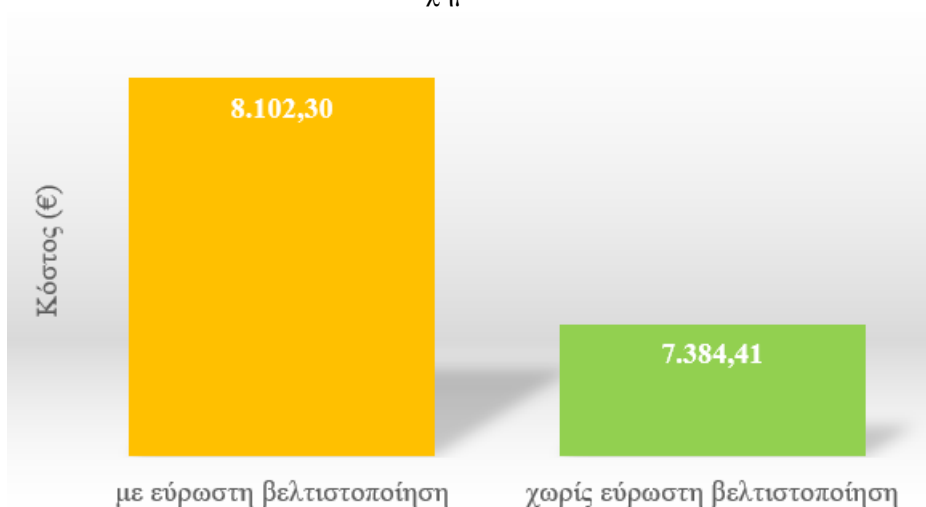
Ακόμα, η μείωση του κόστους που παρατηρείται στα μοντέλα με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων από τα αντίστοιχα μοντέλα χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων οφείλεται στο γεγονός ότι η χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές ενέργειας αποτελεί συχνά οικονομικότερη λύση από άλλες πηγές για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

**Πίνακας 6.11 :** Ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.

Κόστος διαχειριστή του ΔΔΗΕ	Με εύρωστη βελτιστοποίηση	Χωρίς εύρωστη βελτιστοποίηση	Διαφορά
Χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων	8.163,51 €	7.445,67€	9,6%
Με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων	8.102,30 €	7.384,41€	9,7%



**Σχήμα 6.20 :** Κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.



**Σχήμα 6.21 :** Κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.

### 6.3.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΕΓΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΕΡΔΩΝ ΓΙΑ ΤΟΥΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΕΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 33 ΚΟΜΒΩΝ

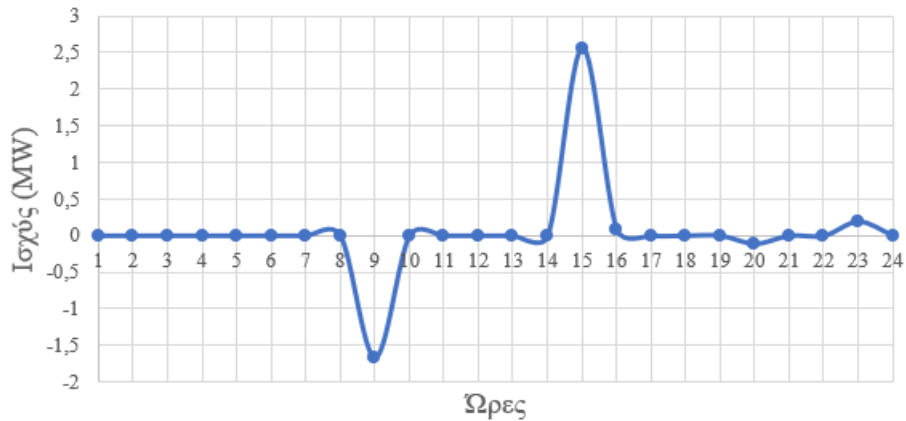
Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα εύρωστης βελτιστοποίησης κέρδους για κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων χωριστά. Επισημαίνεται ότι η μεγιστοποίηση του κέρδους κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων γίνεται υπό τον περιορισμό (3.35) που ορίστηκε στο Κεφάλαιο 3. Σύμφωνα με αυτόν τον περιορισμό το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ δεν μπορεί να ξεπερνά μια προκαθορισμένη τιμή,  $DNO_{cost}$ . Στο πλαίσιο αυτής της εφαρμογής, η τιμή αυτή επιλέγεται να είναι ίση με το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ για τη λειτουργία του δικτύου χωρίς την ύπαρξη διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων, με εύρωστη βελτιστοποίηση. Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.11 η τιμή είναι 8.163,51 €.

Στο Σχήμα 6.22 απεικονίζεται η λειτουργία που μεγιστοποιεί τα κέρδη του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκεται στον κόμβο 3. Σύμφωνα με τη λειτουργία αυτή σημειώνεται μεγάλη εκφόρτιση την ώρα 9:00. Η εκφόρτιση αυτή συνοδεύεται από την αντίστοιχη μεγάλη φόρτιση την ώρα 15:00 που το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλό. Με αυτόν τον τρόπο αναπληρώνεται η ενέργεια που δαπανήθηκε από τις μπαταρίες των οχημάτων με το ελάχιστο δυνατό κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ ώστε να μένουν όσο το δυνατόν περισσότερα διαθέσιμα χρήματα για το κέρδος του διαχειριστή των ηλεκτρικών οχημάτων. Το μέγιστο κέρδος για τον διαχειριστή του κόμβου 3 προκύπτει ίσο με 66,60 €.

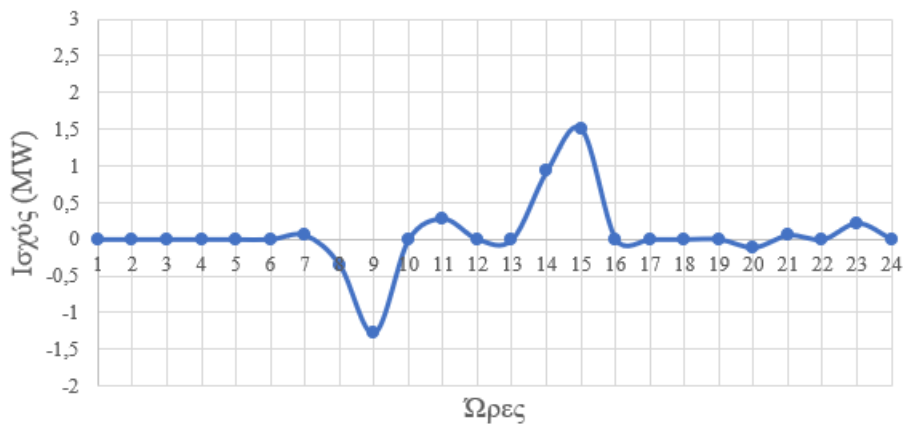
Στο Σχήμα 6.23 απεικονίζεται η λειτουργία που μεγιστοποιεί τα κέρδη του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκεται στον κόμβο 6. Σύμφωνα με τη λειτουργία αυτή σημειώνονται σχετικά μεγάλες εκφορτίσεις στο διάστημα 8:00-9:00. Οι εκφορτίσεις αυτές συνοδεύονται από τις σχετικά μεγάλες φορτίσεις τις ώρες 14:00 και 15:00, ώστε να αναπληρωθεί η ενέργεια που δαπανήθηκε από τις μπαταρίες των οχημάτων, για τους ίδιους ακριβώς λόγους που αναδύθηκαν στην μεγιστοποίηση του κέρδους του πρώτου διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων. Όπως παρατηρείται συγκρίνοντας τις καμπύλες των Σχημάτων 6.22 και 6.23, οι φορτίσεις και οι εκφορτίσεις είναι παρόμοιες. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται κυρίως στο ότι οι δύο διαχειριστές είναι εγκατεστημένοι σε πολύ κοντινούς ζυγούς. Η βασική τους διαφορά είναι ότι στην πρώτη καμπύλη οι εκφορτίσεις γίνονται από τα οχήματα του πρώτου διαχειριστή ενώ στην δεύτερη καμπύλη οι εκφορτίσεις γίνονται από τα οχήματα του δεύτερου διαχειριστή. Το μέγιστο κέρδος για τον διαχειριστή του κόμβου 6 προκύπτει ίσο με 69,60 €. Συνοπτικά τα μέγιστα δυνατά κέρδη κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.12.

**Πίνακας 6.12 :** Τα μέγιστα δυνατά κέρδη κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων.

Διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων του κόμβου 5 ( $EVA_1$ )	66,60 €
Διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων του κόμβου 7 ( $EVA_2$ )	69,60 €



**Σχήμα 6.22 :** Καμπύλες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για μεγιστοποίηση του κέρδους του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκεται στον κόμβο 3.



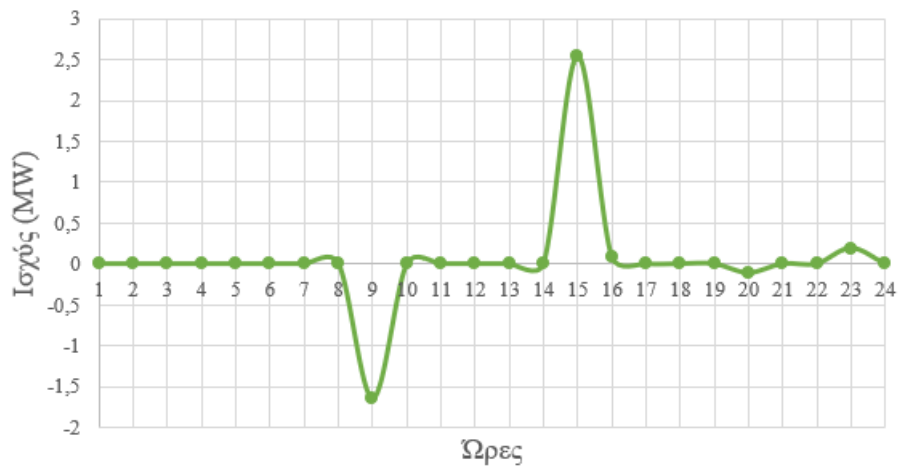
**Σχήμα 6.23 :** Καμπύλες φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων για μεγιστοποίηση του κέρδους του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων που βρίσκεται στον κόμβο 6.

### 6.3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΜΟΝΤΕΛΟΥ ΒΕΛΤΙΣΤΗΣ ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑΣ ΣΤΟ ΔΙΚΤΥΟ 33 ΚΟΜΒΩΝ

Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εύρωστης βελτιστοποίησης για την συνεργασία του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων. Προκειμένου να έχει αξία η συνεργασία αυτή, είναι σημαντικό το κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ να μην ξεπερνά το ελάχιστο κόστος λειτουργίας του δικτύου χωρίς την ύπαρξη διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων. Το κόστος αυτό περιορίζεται από τον περιορισμό (5.8) που ορίστηκε στο Κεφάλαιο 5 με τη σταθερά  $C_{max}^{rob}$ . Συνεπώς στο πλαίσιο αυτής της εφαρμογής η σταθερά  $C_{max}^{rob}$  λαμβάνει σύμφωνα με τον Πίνακα 6.11 την τιμή 8.163,51 €.

Επιπλέον χρειάζεται να οριστούν οι σταθερές της αντικειμενικής συνάρτησης της εύρωστης βελτιστοποίησης της συνεργασίας που ορίστηκε στη σχέση (5.6) του Κεφαλαίου 5,  $C_{min}^{rob}, G_{i,max}^{rob}$ . Σύμφωνα με τον Πίνακα 6.11, το ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ για εύρωστη λειτουργία του δικτύου διανομής με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων,  $C_{min}^{rob}$ , ισούται με 8.102,30 €. Τέλος τα μέγιστα δυνατά κέρδη των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων

$G_{i,max}^{rob}$ , λαμβάνονται από τον Πίνακα 6.12. Συνεπώς η σταθερά  $G_{1,max}^{rob}$  λαμβάνει την τιμή 66,6 € και η σταθερά  $G_{2,max}^{rob}$  λαμβάνει την τιμή 69,6 €.



**Σχήμα 6.24 :** Βέλτιστη καμπύλη διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων για τη συντονισμένη λειτουργία του δικτύου.

**Πίνακας 6.13 :** Κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και κέρδη για τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.

Κόστος ΔΔΗΕ	Ελάχιστο κόστος (€)	Μέγιστο κόστος (€)	Κόστος βέλτιστης συνεργασίας (€)	Διαφορά από το ελάχιστο (€)
ΔΔΗΕ	8.102,30	8.163,51	8.163,50	61,20
Κέρδη διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων	Ελάχιστο κέρδος (€)	Μέγιστο κέρδος (€)	Κέρδος βέλτιστης συνεργασίας (€)	Διαφορά από το μέγιστο (€)
Διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων κόμβου 3 ( $EVA_1$ )	0	66,60	66,10	0,50
Διαχειριστής ηλεκτρικών οχημάτων κόμβου 6 ( $EVA_7$ )	0	69,60	66,10	3,50
			Άθροισμα διαφορών (€)	65,20



**Σχήμα 6.25 :** Σύγκριση κόστους της βέλτιστης συνεργασίας με το ελάχιστο δυνατό κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ.



**Σχήμα 6.26 :** Σύγκριση κερδών της βέλτιστης συνεργασίας με τα μέγιστα δυνατά κέρδη για τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.

Στο Σχήμα 6.24 παρουσιάζεται η βέλτιστη καμπύλη διαχείρισης των ηλεκτρικών οχημάτων για τη συντονισμένη λειτουργία του δικτύου. Παρατηρείται, όπως ήταν αναμενόμενο, ότι τα σημεία αυτής της καμπύλης βρίσκονται κάπου στο ενδιάμεσο των αντίστοιχων σημείων των καμπυλών των Σχημάτων 6.18, 6.22 και 6.23. Το αποτέλεσμα αυτό είναι λογικό καθώς η αντικειμενική συνάρτηση επιδιώκει μια μέση λύση ανάμεσα στο ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και στην μεγιστοποίηση του κέρδους για τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων.

Στον Πίνακα 6.13 παρουσιάζεται το κόστος αυτής της συνεργασίας για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και τα κέρδη των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων. Σημειώνεται πως το άθροισμα των διαφορών που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6.13 είναι στην ουσία η βέλτιστη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης της εύρωστης βελτιστοποίησης της συνεργασίας του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων. Στο Σχήμα 6.25

συγκρίνεται το κόστος της βέλτιστης συνεργασίας με το δυνατό ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ. Στο Σχήμα 6.26 συγκρίνονται τα κέρδη της βέλτιστης συνεργασίας των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων με τα μέγιστα δυνατά κέρδη τους. Διαπιστώνεται τόσο στο Σχήμα 6.25 όσο και στο Σχήμα 6.26 πως η διαφοράς είναι σχετικά μικρές και ικανοποιούνται σε ένα βαθμό τα συμφέροντα όλων, με τη λύση να βρίσκεται περισσότερο κοντά στα συμφέροντα του διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων του κόμβου 3.

## ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

### 7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε το πρόβλημα της ένταξης των ηλεκτρικών οχημάτων στο δίκτυο διανομής όχι μόνο ως φορτία αλλά και ως πηγές ενέργειας. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η δυνατότητα αξιοποίησης των μπαταριών των ηλεκτρικών οχημάτων ως μονάδες διανεμημένης παραγωγής για την κάλυψη ενός τμήματος της ζήτησης των φορτίων ενός ΔΔΗΕ. Για την επίτευξη αυτού του εγχειρήματος κρίνεται απαραίτητη η συγκρότηση διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων, οι οποίοι έχουν τον ρόλο του μεσολαβητή ανάμεσα στον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και τους ιδιοκτήτες των ηλεκτρικών οχημάτων. Γίνεται η υπόθεση ότι οι διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων γνωρίζουν αφενός τις ώρες κατά τις οποίες τα ηλεκτρικά οχήματα είναι στη διάθεσή τους, καθώς και τα επιθυμητά επίπεδα φόρτισής τους, αφετέρου γνωρίζουν τις ανάγκες του ηλεκτρικού δικτύου σε ενέργεια, την προβλεπόμενη τιμή χονδρικής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και τα λοιπά δεδομένα του ΔΔΗΕ. Συνεπώς, είναι σε θέση να προγραμματίσουν τη φόρτιση και εκφόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων που έχουν υπό τον έλεγχό τους.

Ένα βασικό ερώτημα που τίθεται είναι με ποιά κριτήρια θα πρέπει να γίνει αυτός ο προγραμματισμός της φόρτισης και εκφόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Για αυτό τον σκοπό, στην παρούσα διπλωματική εργασία σχεδιάστηκαν διάφορα μοντέλα, τα οποία εξυπηρετούν τη μοντελοποίηση διαφορετικών σεναρίων για διαφορετικά συμφέροντα των εμπλεκόμενων μερών, δηλαδή του διαχειριστή του ΔΔΗΕ και των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων.

Αρχικά, παρουσιάστηκε το μοντέλο λειτουργίας του δικτύου διανομής με διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων, με γνώμονα την ελαχιστοποίηση του κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ, καθώς και το αντίστοιχο μοντέλο χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων, όπου τα ηλεκτρικά οχήματα αντιμετωπίζονται μόνο ως φορτία.

Στην συνέχεια, παρουσιάστηκε το μοντέλο λειτουργίας του δικτύου διανομής με γνώμονα τη μεγιστοποίηση του κέρδους κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων. Σημειώνεται πως η λειτουργία του ΔΔΗΕ για τη μεγιστοποίηση του κέρδους ενός διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων διαφέρει από τη λειτουργία του ΔΔΗΕ για τη μεγιστοποίηση του κέρδους ενός άλλου διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων.

Στο σημείο αυτό τονίζεται πως όλα τα παραπάνω μοντέλα στηρίζονται σε προβλέψεις, οι οποίες θεωρήθηκε πως δεν έχουν σφάλμα. Καθώς η προσέγγιση αυτή μπορεί να απέχει από την πραγματικότητα, για όλα τα παραπάνω μοντέλα δημιουργήθηκαν αντίστοιχα μοντέλα εύρωστης βελτιστοποίησης, στα οποία λαμβάνονται υπόψη τα δυσμενέστερα σενάρια

σφάλματος στις προβλέψεις. Τα μοντέλα αυτά λαμβάνουν υπόψη τα σφάλματα των προβλέψεων τόσο για τις τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και για την αιολική παραγωγή. Έτσι, θεωρούν το δυσμενέστερο σενάριο των προβλέψεων και βελτιστοποιούν την αντικειμενική τους συνάρτηση λαμβάνοντας υπόψη τις αβεβαιότητες.

Παρατηρώντας πως όλα τα παραπάνω μοντέλα στοχεύουν στη βελτιστοποίηση διαφορετικών αντικειμενικών συναρτήσεων κρίθηκε αναγκαίος ο σχεδιασμός ενός μοντέλου συνεργασίας του διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τους διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων. Το μοντέλο αυτό στοχεύει στην εύρεση της λειτουργίας εκείνης που προσεγγίζει όσο το δυνατόν περισσότερο το ελάχιστο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ και τα μέγιστα κέρδη των διαχειριστών ηλεκτρικών οχημάτων. Το μοντέλο συνεργασίας λαμβάνει επίσης υπόψη τις αβεβαιότητες.

Τα προβλήματα μοντελοποιήθηκαν με χρήση του λογισμικού GAMS και η επίλυσή τους έγινε με χρήση του επιλύτη BONMIN. Για την εισαγωγή δεδομένων στο λογισμικό αλλά και την εξαγωγή αποτελεσμάτων από αυτό χρησιμοποιήθηκαν αρχεία Excel, τα οποία διευκόλυναν την επεξεργασία των πληροφοριών.

Στη συνέχεια, τα προτεινόμενα μοντέλα εφαρμόστηκαν σε δύο δίκτυα, ένα δίκτυο 14 κόμβων και ένα δίκτυο 33 κόμβων. Έγινε η σύγκριση των αποτελεσμάτων των μοντέλων ελαχιστοποίησης κόστους για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ με και χωρίς διαχειριστές ηλεκτρικών οχημάτων και διαπιστώθηκε πως η χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων ως πηγές αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα. Επίσης, έγινε η σύγκριση των αντίστοιχων εύρωστων βελτιστοποιήσεων, από την οποία προέκυψε το ίδιο συμπέρασμα. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκε σύγκριση κάθε μοντέλου με το αντίστοιχο μοντέλο εύρωστης βελτιστοποίησης και διαπιστώθηκε ότι σε κάθε περίπτωση το κόστος του μοντέλου εύρωστης βελτιστοποίησης είναι αυξημένο, πράγμα αναμενόμενο καθώς τα μοντέλα εύρωστης βελτιστοποίησης λαμβάνουν υπόψη τα δυσμενέστερα σενάρια για τις τυχαίες παραμέτρους του προβλήματος.

Στη συνέχεια, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των εύρωστων μοντέλων μεγιστοποίησης κέρδους κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων. Από τα αποτελέσματα αυτά διαπιστώθηκε πόσο διαφορετικές λειτουργίες προτείνουν όλα τα παραπάνω μοντέλα τονίζοντας έτσι ακόμα περισσότερο την ανάγκη για ένα μοντέλο συνεργασίας.

Επιπλέον, εφαρμόστηκε το μοντέλο εύρωστης βελτιστοποίησης για τη συνεργασία των διαχειριστών του ΔΔΗΕ και των ηλεκτρικών οχημάτων σε καθένα από τα παραπάνω δίκτυα διανομής και παρουσιάστηκε τόσο η προτεινόμενη διαχείριση των ηλεκτρικών οχημάτων όσο και το αναμενόμενο κόστος για τον διαχειριστή του ΔΔΗΕ με τα αντίστοιχα κέρδη για κάθε διαχειριστή ηλεκτρικών οχημάτων. Όπως ήταν αναμενόμενο, η προτεινόμενη διαχείριση ήταν τέτοια ώστε τα οικονομικά συμφέροντα όλων των εμπλεκόμενων μερών να ικανοποιούνται σε σημαντικό βαθμό.

## 7.2 ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Επέκταση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας θα μπορούσε να αποτελεί η εξέταση και η μελέτη του παρόντος προβλήματος σε ένα πιο περίπλοκο και μεγαλύτερο ΔΔΗΕ που ανταποκρίνεται περισσότερο στα πραγματικά δίκτυα διανομής.



Επίσης, σαν επόμενο στάδιο, χρήσιμη προσθήκη στην εργασία, από άποψη ευρωστίας, θα ήταν και η εισαγωγή αβεβαιοτήτων σε επιπλέον παραμέτρους του δικτύου και των ηλεκτρικών οχημάτων. Ενδεικτικά αναφέρονται μερικές από τις παραμέτρους αυτές:

- Οικιακό και βιομηχανικό φορτίο κάθε κόμβου
- Ωρες κατά τις οποίες κάθε ηλεκτρικό όχημα είναι διαθέσιμο στο δίκτυο
- Αρχική αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία κάθε ηλεκτρικού οχήματος
- Επιθυμητό επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας κάθε οχήματος

Επίσης, ενδιαφέρουσα επέκταση της συγκεκριμένης εργασίας θα αποτελούσε η συγκρότηση διαχειριστών και για άλλες ΜΔΠ. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να μελετηθεί η συγκρότηση διαχειριστών ΑΠΕ, φωτοβολταϊκών πάρκων ή/και ανεμογεννητριών. Οι διαχειριστές αυτοί θα μπορούσαν επίσης να ενταχθούν στο μοντέλο εύρωστης βελτιστοποίησης της συνεργασίας των διαχειριστών που παρουσιάστηκε σε αυτήν την διπλωματική εργασία ώστε να λαμβάνονται υπόψη και τα δικά τους οικονομικά συμφέροντα για τον προγραμματισμό λειτουργίας του ΔΔΗΕ.



**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] Κ. Βουρνάς, Γ. Κονταξής, *Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας*. Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2006.
- [2] Β. Κ. Παπαδιάς, *Ανάλυση Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας, τόμ. Ι, Μόνιμη Κατάσταση Λειτουργίας*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 1985.
- [3] Π. Βουγιουκλάκης, Μ. Κοντογιώργης, *Ηλεκτρικό αυτοκίνητο*, Διπλωματική εργασία, 2012
- [4] Maryam Mohiti, Hassan Monsef, Hamid Lesani, “A decentralized robust model for coordinated operation of smart distribution network and electric vehicle aggregators,” *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 104, pp. 853-867, 2019.
- [5] Β. Α. Ευαγγελόπουλος, *Βέλτιστος σχεδιασμός διεσπαρμένης παραγωγής στα δίκτυα διανομής λαμβάνοντας υπόψη αβεβαιότητες*, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2013.
- [6] Cigre, *Benchmark Systems for Network Integration of Renewable and Distributed Energy Resources*, Απρίλιος 2014.
- [7] Π.Σ. Γεωργυλάκης, *Σύγχρονα Συστήματα Μεταφοράς και Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας*, Ηλεκτρονικό Βιβλίο, Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών (ΣΕΑΒ), Αθήνα, 2015.  
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <http://repository.kallipos.gr/handle/11419/2013>
- [8] Κ. Βουρνάς, Β. Κ. Παπαδιάς, Κ. Ντελκής, *Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας Έλεγχος και Ευστάθεια Συστήματος*. Αθήνα: Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 2010.
- [9] Θ. Ρ. Βιολάντης, *Καταμερισμός ισχύος μεταξύ ανεξάρτητων πηγών στη διανεμημένη παραγωγή*, Διπλωματική εργασία, 2018.
- [10] Υπουργείο Ανάπτυξης, Γενική Γραμματεία Υπουργείου Ανάπτυξης, Τομέας Ενέργειας και Φυσικών Πόρων, *Τεχνολογίες ΑΠΕ*.  
Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: [http://www.cres.gr/energy-saving/technologies\\_technologies\\_ape.htm](http://www.cres.gr/energy-saving/technologies_technologies_ape.htm)
- [11] Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.helgilibrary.com/charts/how-much-might-battery-for-electric-vehicle-fall/>
- [12] Bhargav Prasanna Swaminathan. *Operational Planning of Active Distribution Networks – Convex Relaxation under Uncertainty. Electric power*. Université Grenoble Alpes, 2017
- [13] Datasheet Bonus B35/450.

Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/122-bonus-b35-450>

- [14] Government of Canada, Environment and natural resources, Weather, Climate and Hazard, *Past weather and climate*.

Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: [http://climate.weather.gc.ca/climate\\_data/generate\\_chart\\_e.html](http://climate.weather.gc.ca/climate_data/generate_chart_e.html)

- [15] Epex spot, Market data, *European electricity index (ELIX)*.

Διαθέσιμο στην ιστοσελίδα: <https://www.epexspot.com/en/market-data/elix>

---

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ  
Α

---

ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΔΗΕ	Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΔΕΠ	Διανεμημένοι Ενεργειακοί Πόροι
ΕΥΤ	Εξαιρετικά υψηλή τάση
ΜΔΠ	Μονάδες Διανεμημένης Παραγωγής
ΜΤ	Μέση Τάση
ΣΑΚ	Συνάρτηση Αθροιστικής Κατανομής
ΣΗΕ	Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΣΜΠ	Συνάρτηση Μάζας Πιθανότητας
ΣΠΠ	Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας
ΥΣ	Υποσταθμός
ΥΤ	Υψηλή Τάση
ΥΥΤ	Υπερυψηλή Τάση
ΧΤ	Χαμηλή Τάση

**ΑΓΓΛΙΚΑ ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ**

EVA

Electrical Vehicle Aggregator







