



Τεχνολογικό
Πανεπιστήμιο
Κύπρου

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Οι επιπτώσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο
σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της
Κύπρου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΣΩΚΡΑΤΗ Ν. ΠΑΝΤΕΛΗ

και

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ Ν. ΠΙΣΣΑΡΙΔΗ

Επιβλέπων: Δρ. Πέτρος Αριστείδου
Λέκτορας ΤΕ.ΠΑ.Κ.

Λεμεσός, Ιούνιος 2021

Οι επιπτώσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της Κύπρου

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

των

ΣΩΚΡΑΤΗ Ν. ΠΑΝΤΕΛΗ

και

ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥ Ν. ΠΙΣΣΑΡΙΔΗ

Επιβλέπων: Δρ. Πέτρος Αριστείδου
Λέκτορας ΤΕ.ΠΑ.Κ.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 7η Ιουνίου 2021.

(Υπογραφή)

.....

Δρ. Πέτρος Αριστείδου
Λέκτορας ΤΕ.ΠΑ.Κ.

(Υπογραφή)

.....

Δρ. Χρήστος Λοίζου
Ε.Ε.Π. ΤΕ.ΠΑ.Κ.

(Υπογραφή)

.....

Φοίβος Θεράποντος
Μηχανικός Δικτύου ΑΗΚ

Λεμεσός, Ιούνιος 2021



ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΚΥΠΡΟΥ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕ-
ΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Copyright ©–All rights reserved Σωκράτης Ν. Παντελή Χαράλαμπος Ν. Πισσαρίδης,
2021.

Με την επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.

Υπεύθυνη Δήλωση

Βεβαιώνουμε ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της πτυχιακής εργασίας, και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχαμε για την προετοιμασία της είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην πτυχιακή εργασία. Επίσης έχουμε αναφέρει τις όποιες πηγές από τις οποίες κάναμε χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε αυτές αναφέρονται ακριβώς είτε παραφρασμένες. Επίσης, βεβαιώνουμε ότι αυτή η πτυχιακή εργασία προετοιμάστηκε από εμάς προσωπικά ειδικά για τις απαιτήσεις του προγράμματος σπουδών του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών του Τεχνολογικού Πανεπιστημίου Κύπρου.

(Υπογραφή)

.....
Σωκράτης Ν. Παντελή Χαράλαμπος Ν. Πισσαρίδης

Περίληψη

Το μέλλον της αυτοκινητοβιομηχανίας στρέφεται προς τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα (ΗΑ) και γενικότερα στην ηλεκτροκίνηση των μέσων μεταφοράς. Οι περισσότερες χώρες παρέχουν κίνητρα έτσι ώστε τα οχήματα μηχανών εσωτερικής καύσης να αντικατασταθούν με ηλεκτρικά. Συνεπώς, στα ηλεκτρικά δίκτυα της κάθε χώρας, θα είναι απαραίτητο να προβλεφθούν οι κατάλληλες λύσεις για τα προβλήματα που πιθανόν να προκύψουν μέσω της αυξανόμενης εισροής ηλεκτρικών αυτοκινήτων στο δίκτυο. Η εργασία παρουσιάζει μία ολοκληρωμένη δομή μοντελοποίησης ηλεκτρικών αυτοκινήτων προκειμένου να αναλύσει την ευαισθησία τους στην επιρροή τους στο δίκτυο διανομής. Η στοχαστική αυτή μοντελοποίηση εξηγείται μέσω της εφαρμογής προσομοιώσεων Monte-Carlo.

Η ανάλυση λαμβάνει υπόψη τα προφίλ οδήγησης των κατόχων ΗΑ, τον τύπο οχήματος (χωρητικότητα μπαταρίας, κατανάλωση ενέργειας), την απόσταση ταξιδιού, τις οδικές συνθήκες και προσεγγίζει την ωριαία κατανομή των ενεργειακών απαιτήσεων βάσει διαφόρων στρατηγικών φόρτισης ΗΑ. Η ανάλυση δείχνει ότι ο αριθμός των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και η ισχύς των φορτιστών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις ροής ισχύος. Επίσης, παρατηρούνται επιρροές από τη συμπεριφορά φόρτισης και τον τύπο του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, σε χαμηλότερο όμως βαθμό. Οι τεχνικές ελέγχου οι οποίες στοχεύουν τόσο στη μετατόπιση του φορτίου αιχμής όσο και στη μείωση του, πρόκειται να είναι πιο επωφελής για το δίκτυο.

Λέξεις Κλειδιά

Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα, Δίκτυο διανομής Χαμηλής Τάσης, Προφίλ φορτίου, Προσομοιώσεις Monte-Carlo

Abstract

The future of the automotive industry is focused on electric vehicles (EV) and generally at electrification of transportation. Most countries provide incentives so that the internal combustion engine vehicles to be replaced with electric ones. Therefore, the electric networks of each country, whose transmission and distribution network architectures are still focused on the traditional design and operation, it will be necessary to provide appropriate solutions to the problems that may arise through the increasing penetration of EVs into the power grid. The work presents a comprehensive electric vehicle modeling in order to analyse their sensitivity on the impact on the distribution grid. This stochastic modeling is explained through the application of Monte-Carlo simulations.

The analysis takes into account driving profiles of EV owners, type of vehicle (battery capacity, energy consumption), travelling distance, road conditions and approximates the hourly distribution of energy requirements based on different EV charging strategies. The analysis shows that the number of electric vehicles and the charging power greatly affect the power flow simulations results. Effects from the charging behaviour and the type of electric vehicle are observed as well, but to a lesser extent. The control techniques which aim both to shift the peak load and to reduce it, are set to be more beneficial to the grid

Keywords

Electric Vehicles, Low-voltage Distribution grid, Load profile, Monte-Carlo Simulations

στους γονείς μας

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή είναι μία συνεργασία μεταξύ του εργαστηρίου Αειφόρων Συστημάτων Ισχύος (Sustainable Power Systems Lab) και της Αρχής Ηλεκτρισμού Κύπρου. Πρώτα απ' όλα, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε ιδιαίτερα τον Λέκτορα Δρ. Πέτρο Αριστείδου για την καθοδήγηση και τις συμβουλές που μας προσέφερε κατά τη διάρκεια αυτής της εργασίας καθώς και για την επίβλεψη της. Υπήρξε ένας εξαιρετικός σύμβουλος τον οποίο μπορούσαμε να βασιστούμε για βοήθεια και καθοδήγηση. Επίσης, θα θέλαμε να ευχαριστήσουμε τον Καθηγητή Δρ. Χρήστο Λοΐζου για τις χρήσιμες συμβουλές που μας έδωσε και ήταν πάντοτε ανοιχτός σε νέες ιδέες τις οποίες του παρουσιάζαμε. Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα θέλαμε να δώσουμε στους Χρυσοβαλάντη Σπανιά και Φοίβο Θεράποντος για τα χρήσιμα δεδομένα και συμβουλές που μας προσέφεραν.

Περιεχόμενα

Περίληψη	1
Abstract	3
Ευχαριστίες	7
Περιεχόμενα	9
Κατάλογος Σχημάτων	13
Κατάλογος Πινάκων	15
Λίστα Ακρωνυμίων	17
1 Εισαγωγή	19
1.1 Κίνητρο	19
1.2 Στόχοι	20
1.3 Περιγραφή εργασίας	21
1.4 Δομή της εργασίας	22
2 Βιβλιογραφική ανασκόπηση	25
2.1 Στόχος μοντελοποίησης της φόρτισης ΗΑ	25
2.2 Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα προφίλ φόρτισης ΗΑ	26
2.2.1 Τοποθεσία φόρτισης	26
2.2.2 Ανάγκη για φόρτιση	27
2.2.3 Χρονική στιγμή φόρτισης	28
2.3 Τεχνικές προσομοίωσης	28
2.4 Μέθοδοι βελτιστοποίησης για το συντονισμό φόρτισης	29
2.4.1 Στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης (Stochastic optimisation)	30
2.4.2 Ισχυρή βελτιστοποίηση (Robust Optimization)	30
2.4.3 Προσεγγίσεις ελέγχου (Receding control approaches)	31
2.5 Σύνοψη	31

3	Κατασκευή ερωτηματολογίου	33
3.1	Μεθοδολογία	33
3.2	Αποτελέσματα	34
4	Μοντελοποίηση	37
4.1	Ονοματολογία	39
4.2	Μοτίβο οδήγησης	40
4.3	Τύπος ΗΑ	41
4.3.1	Σύνολο δεδομένων ηλεκτρικού οχήματος	41
4.3.2	Μοντέλα ΗΑ	41
4.4	Συμπεριφορά φόρτισης	42
4.4.1	Ώρα άφιξης και έναρξη φόρτισης	42
4.4.2	Συχνότητα φόρτισης	42
4.4.3	Μοντέλα συμπεριφορά φόρτισης	43
4.5	Τύπος φορτιστή ΗΑ	43
4.5.1	Μοντέλα φορτιστών	44
4.6	Ποσοστό διείσδυσης ΗΑ	44
4.7	Διαμόρφωση δικτύου	45
4.7.1	Μοντέλο διαμόρφωσης δικτύου	45
4.7.2	Αρχικό φορτίο	46
4.8	Τοποθέτηση ΗΑ	47
5	Προσομοίωση ροής ισχύος	49
5.1	Υπολογισμός φορτίου φόρτισης ΗΑ	49
5.2	Ανάλυση ροής ισχύος	51
5.3	MATPOWER	52
5.4	Προσομοίωση Monte-Carlo	52
5.4.1	Νόμος των μεγάλων αριθμών	52
5.4.2	Το κεντρικό οριακό θεώρημα	53
5.4.3	Εκτίμηση παραμέτρων	53
5.4.4	Χαρακτηριστικά σύγκλισης (convergence) της μεθόδου Monte-Carlo	54
5.5	Δομή προσομοιώσεων	56
6	Ανάλυση ευαισθησίας για τις διάφορες παραμέτρους και τα μοντέλα	59
6.1	Επιλογή σεναρίου	59
6.2	Μεταβολή μονής διάστασης	60
6.2.1	Φορτίο μετασχηματιστή	60
6.2.2	Φορτίο κρίσιμης γραμμής	63
6.2.3	Κρίσιμος ζυγός	65
6.3	Σενάρια κύριων διαστάσεων παραμέτρων	66
6.3.1	Φορτίο μετασχηματιστή	66
6.3.2	Κρίσιμη γραμμή	70

6.3.3	Κρίσιμος ζυγός	71
6.4	Ανάλυση φορτίου ΗΑ στο πεδίο του χρόνου	74
6.4.1	Διάρκεια φόρτισης	74
6.4.2	Απαιτούμενη ισχύς για φόρτιση των ΗΑ	75
6.5	Σύγκλιση Monte-Carlo	77
7	Τεχνικές ελέγχου φόρτισης ΗΑ	79
7.1	Σχεδιασμός τεχνικών ελέγχου	79
7.2	Τεχνική ελέγχου ανοικτού βρόχου	80
7.2.1	Προγραμματιζόμενη φόρτιση	80
7.2.1.1	Αποτελέσματα	82
7.3	Τεχνικές ελέγχου κλειστού βρόχου	84
7.3.1	Ελεγχόμενη φόρτιση μετασχηματιστή μέσω μείωσης ισχύς του φορτιστή	84
7.3.1.1	Αποτελέσματα	84
7.3.2	Ελεγχόμενη φόρτιση μετασχηματιστή με στοχαστική έναρξη φόρτισης	85
7.3.2.1	Αποτελέσματα	86
7.4	Συμπεράσματα	87
8	Επίλογος	89
8.1	Σύνοψη	89
8.2	Προοπτικές για μελλοντικές εργασίες	90
	Βιβλιογραφία	93
	Παράρτημα	99
	Α' Δομή ερωτηματολογίου	101

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά τομέα το 2016 στην Κύπρο [22]	19
1.2	Διαχωρισμός των απρόβλεπτων σφαλμάτων του δικτύου διανομής	21
2.1	Επισκόπηση των πηγών αβεβαιότητας στον προγραμματισμό ΗΑ	29
3.1	Αποτελέσματα για ερωτήσεις γνωστικού χαρακτήρα	35
3.2	ΣΠΠ για ώρα αναχώρησης και άφιξης από και προς το σπίτι (Εργάσιμες)	36
3.3	ΣΠΠ διανυόμενης απόστασης οδήγησης για εργάσιμες και μη-εργάσιμες ημέρες	36
4.1	Μοντέλο δικτύου διανομής χαμηλής τάσης για αναχώρηση μίας ενάερας γραμμής από το μετασχηματιστή	38
4.2	Δομή μοντελοποίησης ΗΑ	39
4.3	Προοπτικές για το μερίδιο αγοράς ΗΑ ανά μεγάλη περιοχή [53]	45
4.4	Τυπικά προφίλ ενεργού ισχύος αρχικού φορτίου για καθημερινές ανά μήνα, για το έτος 2016	46
5.1	Διάγραμμα υπολογισμού συνολικού φορτίου ΗΑ	50
5.2	Διαδικασία σύγκλισης σε προσομοίωση Monte-Carlo	55
5.3	Στάδια της δομής προσομοίωσης	57
6.1	Μεταβολή της καμπύλης μέσου φορτίου μετασχηματιστή για τη μεταβολή μονής διάστασης	61
6.2	Επιρροή των μεταβολών μονής διάστασης στο μέγιστο φορτίο μετασχηματιστή σε σχέση με το φορτίο χωρίς την πρόσθεση ΗΑ στον αριστερό κάθετο άξονα και με το συνολικό φορτίο στο δεξιό κάθετο άξονα	62
6.3	Επιρροή των μεταβολών μονής διάστασης στο μέγιστο φορτίο κρίσιμης γραμμής σε σχέση με το φορτίο χωρίς την πρόσθεση ΗΑ στον αριστερό κάθετο άξονα και με το συνολικό φορτίο στο δεξιό κάθετο άξονα	64
6.4	Επιρροή των μεταβολών μονής διάστασης στη μείωση τάσης κρίσιμου ζυγού σε σχέση με την τάση χωρίς την πρόσθεση ΗΑ στον αριστερό κάθετο άξονα και με την τάση κρίσιμου ζυγού στο δεξιό κάθετο άξονα	66
6.5	Φορτίο μετασχηματιστή για τα σενάρια με κύριες διαστάσεις παραμέτρων	68

6.6	Καμπύλη μέσου φορτίου του μετασχηματιστή για τα σενάρια κύριων διαστάσεων παραμέτρων	69
6.7	Φορτίο κρίσιμης γραμμής για τα σενάρια με κύριες διαστάσεις παραμέτρων . . .	71
6.8	Τάση κρίσιμου ζυγού για τα σενάρια με κύριες διαστάσεις παραμέτρων	72
6.9	Καμπύλη μέσης τάσης κρίσιμου ζυγού για τα σενάρια κύριων διαστάσεων παραμέτρων	73
6.10	Απαιτούμενη διάρκεια καθημερινής φόρτισης για κάθε υλοποίηση σεναρίου με βάση τον τύπο φορτιστή για εργάσιμες και μη-εργάσιμες ημέρες	74
6.11	Μέση τιμή φορτίου ΗΑ (μαύρη γραμμή) συμπεριλαμβανομένης της τυπικής απόκλισης (χρωματιστές περιοχές), του αρχικού φορτίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) και του προκύπτοντος μέσου συνολικού φορτίου (χρωματιστές γραμμές) για τις 300 υλοποιήσεις σεναρίου κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.	76
6.12	Σύγκλιση Monte-Carlo για το φορτίο μετασχηματιστή, φορτίο κρίσιμης γραμμής και τη τάση στον κρίσιμο ζυγό	77
7.1	Καμπύλη αρχικού φορτίου για μία εργάσιμη ημέρα του Αυγούστου	81
7.2	Καμπύλη μέσου φορτίου μετασχηματιστή για μη-ελεγχόμενη φόρτιση (αριστερή στήλη) και για προγραμματιζόμενη φόρτιση με σήμα ελέγχου (δεξιά στήλη) για εργάσιμες ημέρες	82
7.3	Καμπύλη μέγιστου φορτίου μετασχηματιστή με το ονομαστικό όριο του (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), για μη-ελεγχόμενη φόρτιση (αριστερή στήλη) και για προγραμματιζόμενη φόρτιση με σήμα ελέγχου (δεξιά στήλη), για εργάσιμες ημέρες	83
7.4	Καμπύλη μέγιστου φορτίου μετασχηματιστή με το ονομαστικό όριο του (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), για μη-ελεγχόμενη φόρτιση (αριστερή στήλη) και για ελεγχόμενη φόρτιση μετασχηματιστή μέσω μείωσης ισχύος του φορτιστή (δεξιά στήλη), για εργάσιμες ημέρες	85
7.5	Καμπύλη μέγιστου φορτίου μετασχηματιστή με το ονομαστικό όριο του (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), για μη-ελεγχόμενη φόρτιση (αριστερή στήλη) και για ελεγχόμενη φόρτιση μετασχηματιστή με στοχαστική έναρξη φόρτισης (δεξιά στήλη), για εργάσιμες ημέρες	86

Κατάλογος Πινάκων

2.1	Διαχωρισμός προσεγγίσεων σχετικά με την τοποθεσία φόρτισης που εφαρ- μόστηκαν σε προηγούμενες έρευνες	26
2.2	Διαχωρισμός προσεγγίσεων σχετικά με την ανάγκη για φόρτιση που εφαρ- μόστηκαν σε προηγούμενες έρευνες	27
2.3	Διαχωρισμός προσεγγίσεων σχετικά με τη χρονική στιγμή φόρτισης που εφαρ- μόστηκαν σε προηγούμενες έρευνες	28
4.1	Επισκόπηση για τα μεγέθη μοντελοποίησης και τα μοντέλα των ΗΑ.	40
4.2	Κατανάλωση και χωρητικότητα μπαταρίας από τα 8 πιο δημοφιλείς μοντέλα ΗΑ στην Ευρώπη το 2019	41
4.3	Τύποι φορτιστών για οικιακή χρήση	44
6.1	Επισκόπηση για τα μεγέθη μοντελοποίησης και τα μοντέλα των ΗΑ.	60

Λίστα Ακρωνυμιών

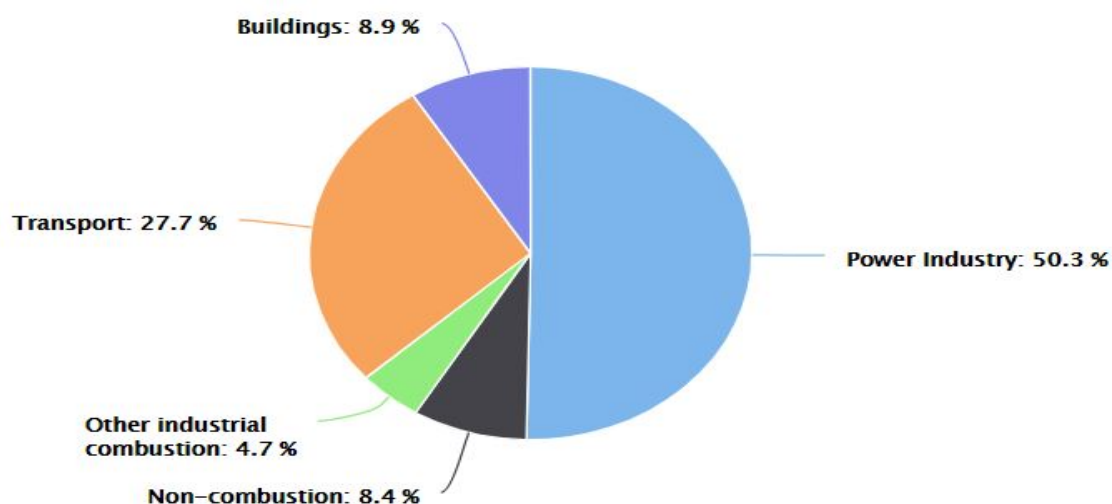
Α.Η.Κ.	Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου
ΗΑ	Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΗΕ	Ηλεκτρική Ενέργεια
ΣΠΠ	Συνάρτηση Πυκνότητας Πιθανότητας
ΚΦ	Κατάσταση Φόρτισης
ΠΔ	Ποσοστό Δείσδυσης
ΟΟΚ	Ομοιόμορφο Όριο Κατωφλίου
ΟΚ	Όριο Κατωφλίου
κλπ	και τα λοιπά
π.χ.	παραδείγματος χάρη
π.μ.	προ μεσημβρίας

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

1.1 Κίνητρο

Η κλιματική αλλαγή είναι ένα φαινόμενο το οποίο μας απασχολεί ιδιαίτερα το τελευταίο διάστημα. Ένα μεγάλο μέρος του επιστημονικού τομέα ασχολείται με την εύρεση πιθανών λύσεων της μείωσης διοξειδίου του άνθρακα το οποίο θεωρείται ως ο πιο ανασταλτικός παράγοντας της ρύπανσης του περιβάλλοντος. Γνωρίζοντας πως τα συμβατικά αυτοκίνητα εκπέμπουν τεράστιες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, συγκεκριμένα εκτιμάται ότι το 27.7% της συνολικής εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα προέρχεται από τη χρήση ιδιωτικών μέσων μεταφοράς [22], σε αντίθεση με τα ΗΑ που εκπέμπουν ελάχιστες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, ακόμη και μηδενικές σε περίπτωση που φορτίζουν μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ). Έχοντας υπόψη το παραπάνω, η Κυβέρνηση της Κύπρου έχει αρχίσει τις διαδικασίες σε συνεργασία με την Ευρωπαϊκή Ένωση ούτως ώστε να προωθήσει τα ΗΑ μέσω επιχορηγήσεων προς τους πολίτες.



Σχήμα 1.1: Εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ανά τομέα το 2016 στην Κύπρο [22]

Με την εξάπλωση όλο και περισσότερων ΗΑ οι ανάγκες για παροχή περισσότερης ηλε-

κτρικής ενέργειας (ΗΕ) καθώς και η αναβάθμιση του ήδη υπάρχοντος δικτύου διανομής είναι αναγκαία. Η διαδικασία αυτή απαιτεί αρκετό χρόνο και πάρα πολλές εργατώρες για τους υπαλλήλους για να μπορέσει υλοποιηθεί. Αυτό επιβάλλει την εξεύρεση νέων μεθόδων-τρόπων με τους οποίους θα διανέμεται ΗΕ στο δίκτυο έτσι ώστε να μην υπερφορτώνεται. Η απαιτούμενη ισχύς και ο χρόνος που χρειάζεται ένα ΗΑ να φορτιστεί είναι παράγοντες οι οποίοι πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη.

Γνωρίζοντας ότι οι φορτιστές που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι της τάξεως των 11kW και 7kW και το μέσο μη ταυτοχρονισμένο φορτίο ενός μέσου σπιτιού υπολογίζεται από την Αρχή Ηλεκτρισμού Κύπρου (Α.Η.Κ.) στα 2,5kW, είναι εμφανές ότι η απαιτούμενη ισχύς που θα χρειάζονται οι καταναλωτές θα είναι πολύ μεγαλύτερη από την υφιστάμενη.

Εκτός από την παραπάνω πρόκληση, ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο έχει και η αβεβαιότητα της τοποθεσίας του φορτιστή καθώς και της χρονικής στιγμής που θα συνδεθεί το ΗΑ για να ξεκινήσει η φόρτιση, γνωρίζοντας ότι το δίκτυο μας παρουσιάζει σημεία αιχμής σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους της ημέρας. Έτσι, ο σχεδιασμός του δικτύου απαιτεί μία ακριβής μοντελοποίηση των ΗΑ ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος καθώς και ο κίνδυνος υπερφόρτωσης των στοιχείων του δικτύου.

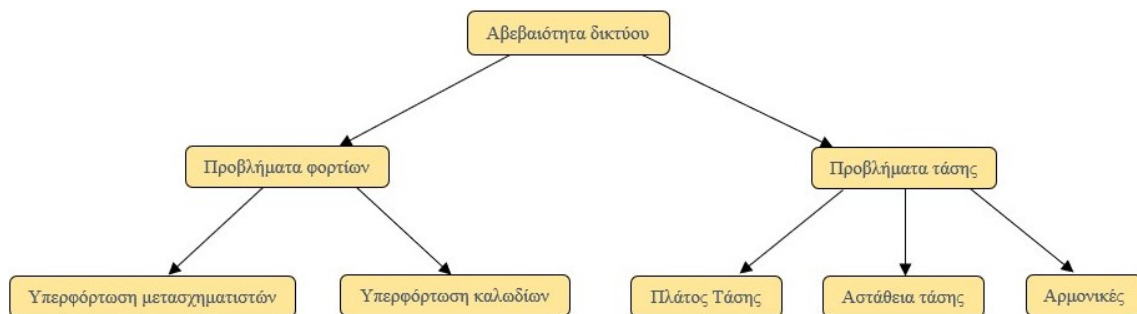
Η επιτυχής εισαγωγή ΗΑ δεν αντιπροσωπεύει μόνο μια πρόκληση για το σύστημα ισχύος, αλλά και ένα εξαιρετικό μεταφορικό μέσο για την κοινωνία. Η χρήση ΗΕ ως «καύσιμο» μεταφοράς επιτρέπει τη μείωση της εξάρτησης του τμήματος μεταφοράς από ορυκτά καύσιμα, τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα καθώς και τις εκπομπές ρύπων. Παρ' όλα αυτά, τα ΗΑ αντιπροσωπεύουν ένα πολύ υψηλό φορτίο για το δίκτυο ΗΕ και δεν πρέπει να θεωρούνται μόνο ως παθητικά στοιχεία, αλλά και ως ενεργοί πόροι. Τα ΗΑ θα μπορούν να προσαρμόσουν τα πρότυπα κατανάλωσης ΗΕ τους για να βελτιώσουν τις συνθήκες δικτύου διανομής και να βοηθήσουν στην περαιτέρω ολοκλήρωση των ΑΠΕ. Η συνεργασία μεταξύ ΗΑ και ΑΠΕ επιτρέπει την ταυτόχρονη μείωση της εξάρτησης από ορυκτά καύσιμα τόσο στην παραγωγή ΗΕ όσο και στον τομέα των μεταφορών. Ωστόσο, η επίτευξη τέτοιων φιλόδοξων σχεδίων υπονοεί ότι απομένουν λίγες μόνο δεκαετίες για τεχνολογικές εξελίξεις έτσι ώστε να αλλάξουμε ουσιαστικά το υπάρχον σύστημα ΗΕ.

1.2 Στόχοι

Σε αυτή την εργασία, αρχικά θα υπολογίσουμε το ποσοστό ηλεκτρικών αυτοκινήτων που μπορούμε να προσθέσουμε στο δίκτυο χωρίς να υπάρξει κάποιο πρόβλημα υπερφόρτωσης ή τάσης σε αυτό. Στο Σχήμα 1.2, παρουσιάζονται τα απρόβλεπτα σφάλματα δικτύου τα οποία ταξινομούνται κατά τύπο περιορισμού. Έπειτα, θα επικεντρωθούμε στις μεθόδους που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ούτως ώστε να είναι εφικτή η ομαλή διείσδυση των ΗΑ στο δίκτυο διανομής της Κύπρου καθώς και στη διερεύνηση προβλημάτων σε πρακτικό περιβάλλον διαμέσου προσομοιώσεων ροής ισχύος με τη βοήθεια λογισμικού.

Για να υπολογίσουμε το ποσοστό διείσδυσης (ΠΔ) ΗΑ το οποίο είναι ικανό να αντέξει το δίκτυο διανομής πρέπει αρχικά να γνωρίζουμε τα θερμικά όρια του δικτύου μας καθώς και την ισχύ ανά ώρα των φορτίων που είναι συνδεδεμένα σε αυτό. Τα παραπάνω δεδομένα βρίσκο-

νται στα αρχεία της Α.Η.Κ.. Στη συνέχεια θα πρέπει να κατασκευάσουμε προφίλ φόρτισης των ΗΑ με τη βοήθεια ερωτηματολογίου το οποίο έχουμε δημιουργήσει και τα αποτελέσματά του παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 3. Έχοντας τα προφίλ φόρτισης και το φορτίο που είναι ήδη συνδεδεμένο στο δίκτυο, θα πρέπει να βρούμε ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο του δικτύου στο οποίο θα τρέξουμε προσομοιώσεις με τη βοήθεια του λογισμικού προγράμματος MATLAB, μέσω του πακέτου ανοικτού κώδικα MATPOWER. Η τροποποίηση του δικτύου διανομής όπως προαναφέρθηκε, απαιτεί μία χρονοβόρα διαδικασία η οποία μοιάζει αδύνατη να επιτευχθεί στα επόμενα 10 χρόνια. Για αυτό το λόγο θα προτείνουμε εναλλακτικές λύσεις οι οποίες θα επιτρέπουν στο δίκτυο να δέχεται περισσότερα ΗΑ χωρίς να υπάρχει πρόβλημα υπερφόρτωσης του. Μία πιθανή λύση είναι η φόρτιση των ΗΑ κατά τη διάρκεια όπου δεν υπάρχει μεγάλη κατανάλωση ισχύος (π.χ. κατά τις μεσημεριανές και βραδινές ώρες). Τέλος,



Σχήμα 1.2: Διαχωρισμός των απρόβλεπτων σφαλμάτων του δικτύου διανομής

πρέπει να αναφερθεί ότι σε όλα τα σενάρια που θα τρέξουμε στο λογισμικό δεν μπορούμε να πάρουμε προσομοιώσεις για όλες τις πιθανές περιπτώσεις, καθώς είναι αδύνατο να προβλέψουμε όλα τα πιθανά σενάρια με ακρίβεια για την ώρα έναρξης της φόρτισης του αυτοκινήτου, τη διάρκεια φόρτισης του, την ισχύ του φορτιστή που θα συνδεθεί καθώς και την περιοχή που θα φορτίζεται. Συνεπώς, πρέπει να ληφθεί υπόψη και η αβεβαιότητα στις μετρήσεις μας, η οποία θα επιτευχθεί με τη βοήθεια των προσομοιώσεων Monte-Carlo. Οι προσομοιώσεις Monte-Carlo χρησιμοποιούνται ούτως ώστε να μοντελοποιούν την πιθανότητα διαφορετικών αποτελεσμάτων σε μια διαδικασία όπου είναι δύσκολο-έως αδύνατο να προβλεφθεί λόγω πολλών τυχαίων μεταβλητών.

1.3 Περιγραφή εργασίας

Η εργασία είναι χωρισμένη στα παρακάτω τρία μέρη:

Μέρος 1^ο Μια προσέγγιση μοντελοποίησης όσο αφορά τα ΗΑ ως φορτία στο δίκτυο. Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει ένα μοντέλο για τη συμπεριφορά των ατόμων ως προς την οδήγηση τους και τη φόρτιση ΗΑ, τις ιδιότητες των ΗΑ (τύπος ΗΑ και κατανάλωση) και την ισχύ των φορτιστών, τον αριθμό ΗΑ και την τοποθέτησή τους στο δίκτυο καθώς και τη διαμόρφωση δικτύου, η οποία θα είναι μόνο η ακτινωτή.

Μέρος 2^ο Δομή προσομοίωσης η οποία περιλαμβάνει τη δημιουργία και την εκτέλεση των δια-

φόρων σεναρίων με τη μέθοδο Monte-Carlo ούτως ώστε να συμπεριληφθεί και η αβεβαιότητα της μοντελοποίησης. Συνεπώς, πραγματοποιείται αξιολόγηση και παρουσίαση των αποτελεσμάτων ούτως ώστε να αναλυθούν οι ευαισθησίες των παραμέτρων ως προς τα στοιχεία του δικτύου.

Μέρος 3^ο Εφαρμόζονται τεχνικές ελέγχου ούτως ώστε να μειωθεί η επιρροή των ΗΑ στο δίκτυο διανομής.

1.4 Δομή της εργασίας

Κεφάλαιο 2 Συνοψίζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση ούτως ώστε να γίνει κατανοητός ο σκοπός όσο αφορά τη διείσδυση ΗΑ στα δίκτυα διανομής. Αρχικά, παρουσιάζεται ο στόχος μοντελοποίησης της φόρτισης ΗΑ. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη φόρτιση ΗΑ ανακαλούνται, ακολουθούμενοι από τις πιο κοινές τεχνικές προσομοίωσης που χρησιμοποιούνται. Τέλος, γίνεται παρουσίαση των μεθόδων βελτιστοποίησης για την επίτευξη συντονισμού φόρτισης με σκοπό τη μείωση της επιρροή των ΗΑ στο δίκτυο.

Κεφάλαιο 3 Γίνεται αναφορά στο ερωτηματολόγιο το οποίο δημιουργήσαμε. Αρχικά, αναλύεται η μεθοδολογία η οποία ακολουθήθηκε για τη δημιουργία του. Έπειτα, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν από αυτό μέσα από γραφήματα.

Κεφάλαιο 4 Περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία για τη μοντελοποίηση των διαφόρων παραμέτρων, ούτως ώστε να δημιουργηθούν τα προφίλ φόρτισης και να προστεθούν στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, δημιουργούνται και περιγράφονται οι μεμονωμένες παράμετροι μαζί με τα μοντέλα τους, τα οποία συνδυάζονται και ενσωματώνονται στη δομή προσομοίωσης στο Κεφάλαιο 5, για να δημιουργήσουν τα διάφορα σενάρια.

Κεφάλαιο 5 Παρέχονται οι πληροφορίες για την προσομοίωση ροής ισχύος. Αρχικά, παρουσιάζεται η μεθοδολογία για τον υπολογισμό φορτίου φόρτισης. Έπειτα, αφού επεξηγηθεί θεωρητικά ο τρόπος με τον οποίο εκτελείται μια ανάλυση ροής ισχύος, παρουσιάζεται και το λογισμικό στο οποίο θα χρησιμοποιηθεί. Ακολούθως, επεξηγείται η μέθοδος προσομοίωσης Monte-Carlo η οποία επιλύει ντετερμινιστικά προβλήματα, ούτως ώστε να επιλυθεί το πρόβλημα της αβεβαιότητας. Τέλος, παρουσιάζεται η δομή προσομοίωσης για τον διαχωρισμό της διαδικασίας προσομοίωσης σε στάδια.

Κεφάλαιο 6 Παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις των προσομοιώσεων για τις διάφορες παραμέτρους. Επίσης, βάση των αποτελεσμάτων θα διαπιστωθούν και οι αντοχές του δικτύου μετά και την ενσωμάτωση των ΗΑ σε αυτό. Τέλος, παρουσιάζονται και τα αποτελέσματα από τις μετρήσεις για τη σύγκλιση Monte-Carlo.

Κεφάλαιο 7 Εφαρμόζονται τρεις τεχνικές ελέγχου, μία ανοικτού βρόχου και δύο κλειστού

βρόχου. Έχουν ως στόχο να παρουσιάσουν πως θα είναι μία ελεγχόμενη διείσδυση των ΗΑ μέσα στο δίκτυο, μειώνοντας όσο το δυνατόν περισσότερο τις επιρροές από μη-ελεγχόμενη διείσδυση των ΗΑ στο δίκτυο.

Κεφάλαιο 8 Η συνεισφορά αυτής της εργασίας συνοψίζεται και προτείνονται προοπτικές για μελλοντικές εργασίες.

Κεφάλαιο 2

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει τη βιβλιογραφική έρευνα που έγινε στα πλαίσια της εργασίας. Αυτή η έρευνα έγινε με σκοπό την πλήρη κατανόηση του θέματος όσο αφορά τη διείσδυση ΗΑ στα δίκτυα διανομής. Αρχικά, παρουσιάζει το στόχο που έχει η μοντελοποίηση της φόρτισης ΗΑ. Έπειτα, παρουσιάζονται οι βασικές παράμετροι που επηρεάζουν τα προφίλ φόρτισης των ΗΑ, ακολουθούμενη από τις τεχνικές προσομοίωσης. Τέλος, γίνεται αναφορά στις τεχνικές βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται, ούτως ώστε η διείσδυση ΗΑ να γίνει όσο το δυνατότερο πιο ομαλή μέσα στο δίκτυο.

2.1 Στόχος μοντελοποίησης της φόρτισης ΗΑ

Με τη ραγδαία αύξηση του ποσοστού ΗΑ, το σύστημα διανομής ΗΕ θα κλιθεί να αντιμετωπίσει ένα αυξημένο καθώς και μεταβαλλόμενο ηλεκτρικό φορτίο, εξαρτώμενο από τα μοτίβα φόρτισης των ΗΑ. Σύμφωνα με την έρευνα για τις διεθνείς πωλήσεις ΗΑ, στην Ευρώπη το 2019 έγιναν περίπου 1 εκατομμύριο πωλήσεις [1]. Αυτά τα μοτίβα φόρτισης θα επηρεάζουν τα συνολικά προφίλ φορτίου και θα εισάγουν νέες μεταβολές σε αυτό. Για ένα μικρό αριθμό οχημάτων, το σύστημα ΗΕ δεν θα καταπονηθεί ιδιαίτερα. Παρ' όλα αυτά, για ένα μεγάλο αριθμό οχημάτων, πιθανόν να οδηγήσουν σε προβλήματα υπότασης ή ακόμη και υπερφόρτωσης των μετασχηματιστών και των γραμμών μεταφοράς [31].

Επίσης, ανάλογα με τη μεμονωμένη συμπεριφορά οδήγησης των χρηστών ΗΑ, τις υποδομές για φόρτιση ΗΑ, τις ανάγκες φόρτισης καθώς και τις προτιμήσεις χρηστών ΗΑ, οι αιχμές φορτίου θα αυξάνονται ανάλογα. Αυτές οι αιχμές θα μπορούσαν να γίνουν αρκετά μεγάλες ειδικά σε περιπτώσεις μη-ελεγχόμενης φόρτισης όπου κάθε ΗΑ μπορεί να φορτίζει μεμονωμένα σχετικά με τη συμπεριφορά του ταξιδιού του και τις ανάγκες φόρτισης του. Συνεπώς, καθίσταται σημαντικό να δημιουργηθούν και να αναπτυχθούν μοντέλα που σχετίζονται με τη στοχαστική ατομική συμπεριφορά του αυτοκινήτου και τη φόρτιση που απαιτείται, έτσι ώστε να είναι σε θέση να μπορεί να διερευνήσει και να ποσοτικοποιήσει τον αντίκτυπο που θα έχει μια μελλοντική εισαγωγή ΗΑ.

Οι μεταβολές φορτίου θα εξαρτώνται κυρίως από: την τοποθεσία φόρτισης, την ανάγκη για φόρτιση και τη χρονική στιγμή φόρτισης. Οι πιο πάνω παράγοντες είναι βασικοί για

την εξέταση της επιρροής των ΗΑ στα προφίλ φορτίου. Επομένως, ο στόχος των μοντέλων φόρτισης ΗΑ είναι η μοντελοποίηση και ο προσδιορισμός των πιο πάνω βασικών παραγόντων καθώς και τον αντίκτυπο που έχουν τα αποτελέσματα τους στα προφίλ φορτίου.

2.2 Βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τα προφίλ φόρτισης ΗΑ

Τα προφίλ φόρτισης ΗΑ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν από τις προσεγγίσεις μοντελοποίησης ή/και τις υποθέσεις τους σχετικά με την **τοποθεσία φόρτισης**, την **ανάγκη για φόρτιση** καθώς και τη **χρονική στιγμή φόρτισης**. Οι προαναφερθείς παράγοντες θεωρούνται αναγκαίοι ούτως ώστε να είναι δυνατή η μοντελοποίηση και η εκτίμηση των προφίλ φόρτισης ΗΑ καθώς και η επιρροή τους στο σύστημα ΗΕ.

2.2.1 Τοποθεσία φόρτισης

Η τοποθεσία φόρτισης αντιπροσωπεύει το σημείο όπου συνδέεται το όχημα για φόρτιση. Η μοντελοποίηση της, μπορεί να υλοποιηθεί με διαφορετικό επίπεδο λεπτομέρειας. Για παράδειγμα, θα μπορεί να είναι μία ακριβής γεωγραφική θέση για κάθε ΗΑ στο δίκτυο διανομής, ή σε μια οικιστική, βιομηχανική ή αστική περιοχή με ένα συγκεκριμένο αριθμό ΗΑ που θα φορτίζουν.

Πίνακας 2.1: Διαχωρισμός προσεγγίσεων σχετικά με την τοποθεσία φόρτισης που εφαρμόστηκαν σε προηγούμενες έρευνες

Προσέγγιση	Δημοσίευση
Αρκετές χρονικά εξαρτώμενες τοποθεσίες κατά τη διάρκεια στοχαστικών συμβάντων στάθμευσης	[19]
Αστική και αγροτική περιοχή	[29]
Σε σπίτι ή σε κατοικημένη περιοχή	[3, 13–15, 18, 20, 23, 27, 28, 31, 32, 35, 43, 46, 55]
Σε χώρο εργασίας, δημόσια πάρκα ή μικρά γραφεία σε αστικές περιοχές	[15, 17, 27, 28, 43]
Σταθμός φόρτισης ΗΑ	[20]

Ο Πίνακας 2.1 παρουσιάζει διάφορες προσεγγίσεις σχετικά με την τοποθεσία φόρτισης που εφαρμόστηκαν σε προηγούμενες έρευνες. Παρατηρείται ότι στις περισσότερες από αυτές θεωρούν ότι η τοποθεσία φόρτισης είναι στο σπίτι ή σε κατοικημένη περιοχή. Αμέσως μετά, παρουσιάζονται οι έρευνες που θεωρούν το χώρο εργασίας ή τα δημόσια πάρκα ως τοποθεσία φόρτισης, ενώ για: σταθμό φόρτισης ΗΑ, αστική-αγροτική περιοχή, και χρονικά εξαρτώμενες τοποθεσίες κατά τη διάρκεια στοχαστικών συμβάντων στάθμευσης αναφέρονται μια έρευνα για την κάθε προσέγγιση.

2.2.2 Ανάγκη για φόρτιση

Η ανάγκη φόρτισης ΗΑ αντικατοπτρίζει την προσέγγιση για την εύρεση της ΗΕ που χρησιμοποιείται από το όχημα κατά την οδήγηση, και συνεπώς την ισχύ που θα χρειαστεί η μπαταρία από το δίκτυο όταν συνδεθεί για φόρτιση. Η ανάγκη φόρτισης εξαρτάται από την απόσταση που διάνυσε το ΗΑ καθώς και από την κατανάλωση του. Στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται διάφορες προσεγγίσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.2, ενώ οι πιο συχνές τεχνικές για την επιλογή της διανυόμενης απόστασης είναι τρεις:

- μέσω πιθανοτικής κατανομής (π.χ. ομοιόμορφη, λογαριθμική) επιλέγεται η απόσταση που θα διανύσει το ΗΑ
- μέσω δείγματος από μία βάση δεδομένων χρησιμοποιώντας προκαθορισμένη κατανομή
- μέσω μιας σταθερής τιμής όπου συνήθως από μια βάση δεδομένων υπολογίζεται ο μέσος όρος των τιμών και χρησιμοποιείται για όλους τους υπολογισμούς

Για την επιλογή της κατανάλωσης του ΗΑ χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τεχνικές:

- μέσω δείγματος από μία βάση δεδομένων χρησιμοποιώντας προκαθορισμένη κατανομή
- μέσω μιας σταθερής τιμής (π.χ. μέση τιμή) όπου γίνεται χρήση μιας τιμής κατανάλωσης για όλα τα ΗΑ

Πίνακας 2.2: Διαχωρισμός προσεγγίσεων σχετικά με την ανάγκη για φόρτιση που εφαρμόστηκαν σε προηγούμενες έρευνες

Προσέγγιση	Δημοσίευση
Δείγμα διανυόμενης απόστασης χρησιμοποιώντας κατανομή πιθανότητας υπό όρους (conditional PDF), και σταθερή κατανάλωση	[3]
Δείγμα διανυόμενης απόστασης χρησιμοποιώντας λογαριθμική-κανονική κατανομή, και σταθερή κατανάλωση	[20, 28]
Δείγμα διανυόμενης απόστασης χρησιμοποιώντας προκαθορισμένη κατανομή, και σταθερή κατανάλωση	[13, 17]
Σταθερή διανυόμενη απόσταση, και σταθερή κατανάλωση	[15, 18, 23, 27, 29, 31]
Στοχαστικοί κύκλοι οδήγησης οι οποίοι δημιουργούν χρονικά εξαρτώμενη κατανάλωση	[43, 46]

Οι δημοσιεύσεις [15, 18, 23, 27, 29, 31] υποθέτουν ότι η κατανάλωση ΗΕ είναι σταθερή, εντούτοις οι [3, 13, 17, 20, 28] χρησιμοποιούν είτε προκαθορισμένες κατανομές πιθανότητας είτε ακέραιους αριθμούς ούτως ώστε να πάρουν δείγματα για την κατανάλωση ΗΕ ή για τη διανυόμενη απόσταση πριν από τη φόρτιση. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο [3], χρησιμοποιώντας μία διαφορετική στοχαστική μέθοδο αύξησαν την ακρίβεια των προβλέψεων. Οι υποθέσεις που έγιναν στις δημοσιεύσεις [43, 46] βρίσκουν την ανάγκη για φόρτιση με βάση την κατανάλωση

ΗΕ, τις διανυόμενες αποστάσεις, τη διάρκεια των ταξιδιών, και τις ταχύτητες. Με αυτόν τον τρόπο, είναι εφικτή η εύρεση της χρονικά εξαρτώμενης κατάστασης φόρτισης (ΚΦ) όταν ένα ΗΑ φτάνει σε οποιαδήποτε θέση με δυνατότητα φόρτισης.

2.2.3 Χρονική στιγμή φόρτισης

Ο όρος χρονική στιγμή φόρτισης μπορεί να αντιπροσωπεύει τη μοντελοποίηση είτε ως προς το χρόνο έναρξης της φόρτισης είτε ως προς τη χρονική διάρκεια φόρτισης. Στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται διάφορες προσεγγίσεις οι οποίες παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.3.

Πίνακας 2.3: Διαχωρισμός προσεγγίσεων σχετικά με τη χρονική στιγμή φόρτισης που εφαρμόστηκαν σε προηγούμενες έρευνες

Προσέγγιση	Δημοσίευση
Κατανομή χρόνου έναρξης με βάση την ώρα λήξης ταξιδιών	[15]
Προκαθορισμένη χρονική στιγμή φόρτισης ή προκαθορισμένη ώρα έναρξης φόρτισης	[17, 18, 27–29, 31, 35]
Φόρτιση μετά από οποιοδήποτε ταξίδι σε χώρο στάθμευσης με δυνατότητα φόρτισης	[19, 43]
Χρόνος έναρξης χρησιμοποιώντας κατανομές πιθανότητας	[3, 13, 14, 20, 23, 38, 44, 46, 50, 55]

Στις δημοσιεύσεις [17, 18, 27–29, 31, 35] θεωρούν συγκεκριμένη στιγμή έναρξης φόρτισης είτε σταθερό χρόνο φόρτισης, επομένως η χρονική στιγμή φόρτισης είναι προκαθορισμένη. Ακόμη, ένας άλλος τρόπος προσέγγισης παρουσιάζεται στις δημοσιεύσεις [3, 13, 14, 20, 23, 38, 44, 46, 50, 55], όπου η ώρα έναρξης φόρτισης επιλέγεται μέσω μιας κατανομής πιθανότητας (π.χ. κανονική, ομοιόμορφη κλπ). Δεν μπορεί να παραλειφθεί το γεγονός πως και στις δύο περιπτώσεις ο χρόνος έναρξης φόρτισης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το χρόνο άφιξης στο σπίτι μετά από το τελευταίο ταξίδι που πραγματοποιήθηκε μέσα στην ημέρα ή από το χρόνο επιστροφής στο σπίτι από την εργασία.

2.3 Τεχνικές προσομοίωσης

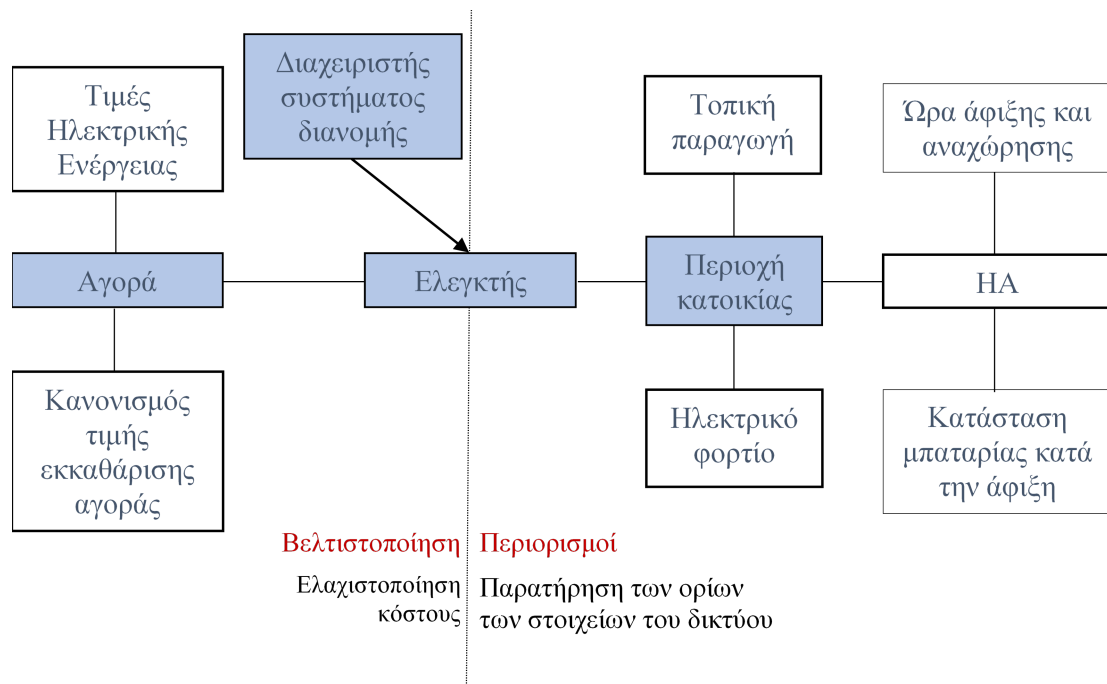
Για να είναι δυνατός ο καθορισμός για τα χαρακτηριστικά των προσομοιώσεων, υπάρχουν συγκεκριμένες λεπτομέρειες που πρέπει να οριστούν. Αρχικά, είναι η επεξεργασία των δεδομένων, έπειτα η εξομοίωση των παραμέτρων και εν τέλει η εξομοίωση οδηγικής συμπεριφοράς η οποία αναλύθηκε στην Ενότητα 2.2.

Λαμβάνοντας υπόψη την επεξεργασία δεδομένων, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι μοντέλων προσομοίωσης ούτως ώστε να προσομοιώνουν τη ζήτηση φόρτισης ΗΑ με την πιο χρησιμοποιούμενη να είναι ένα είδος μοντέλου μικρής κλίμακας που προσομοιώνει ταυτόχρονες λειτουργίες και αλληλεπιδράσεις πολλαπλών παραγόντων για την πρόβλεψη σύνθετων φαινο-

μένων, γνωστή και ως 'agent-based'. Διαφορετικά παραδείγματα μελετών παρουσιάζονται στα [9, 12, 26].

Όσον αφορά την εξομοίωση παραμέτρων, ορισμένα μοντέλα χρησιμοποιούν στοχαστικές μεταβλητές ενώ κάποια άλλα ντετερμινιστικές. Η ντετερμινιστική μέθοδος λαμβάνει υπόψη μόνο τις μέσες τιμές παραμέτρων ενώ η στοχαστική χρησιμοποιεί συναρτήσεις κατανομής πιθανότητας. Η μέθοδος Monte Carlo χρησιμοποιείται για την προσομοίωση στοχαστικών μεταβλητών. Η πλειονότητα των μελετών καθορίζει μια ντετερμινιστική προσέγγιση, παρ' όλα αυτά μερικές από αυτές περιλαμβάνουν στοχαστικές μεταβλητές [4, 21, 40, 41] εκ των οποίων ορισμένες να χρησιμοποιούν τη μέθοδο Monte Carlo για την προσομοίωση της συνολικής ζήτησης.

2.4 Μέθοδοι βελτιστοποίησης για το συντονισμό φόρτισης



Σχήμα 2.1: Επισκόπηση των πηγών αβεβαιότητας στον προγραμματισμό ΗΑ

Προηγούμενες εργασίες υποστηρίζουν τη σημασία της διερεύνησης για το συντονισμό φόρτισης. Όπως παρουσιάζεται και στο Σχήμα 2.1, πέρα από την αβεβαιότητα των ωρών άφιξης και αναχώρησης, υπάρχει αβεβαιότητα σχετικά με την ΚΦ της μπαταρίας κατά την άφιξη, τα οικιακά φορτία, την τοπική παραγωγή ανανεώσιμων πηγών καθώς και τις τιμές αγοράς. Συνεπώς, ο συντονισμός φόρτισης πρέπει να ενσωματώσει πιθανά σφάλματα πρόβλεψης όσο αφορά τη βελτιστοποίηση. Η βιβλιογραφία προσφέρει ένα ευρύ φάσμα μεθόδων για αντιμετώπιση αυτής της αβεβαιότητας χρησιμοποιώντας: στοχαστική βελτιστοποίηση, ισχυρές βελτιστοποιήσεις

και προσεγγίσεις ελέγχου που εφαρμόζονταν στο παρελθόν.

2.4.1 Στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης (Stochastic optimisation)

Στοχαστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης ονομάζονται οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που παράγουν και χρησιμοποιούν τυχαίες μεταβλητές. Περιλαμβάνουν τις μεθόδους επίλυσης στοχαστικών προβλημάτων, δηλαδή προβλημάτων που εμφανίζουν τυχαίες μεταβλητές στην ίδια τη διατύπωσή τους και μεθόδους επίλυσης μη-στοχαστικών προβλημάτων χρησιμοποιώντας τυχαίες επαναλήψεις. Ορισμένες μεθοδολογίες στοχαστικής βελτιστοποίησης χρησιμοποιούν τυχαίες επαναλήψεις για την επίλυση στοχαστικών προβλημάτων, συνδυάζοντας και τις δύο έννοιες της στοχαστικής βελτιστοποίησης [45].

Σύμφωνα με τους [8, 25], για τη διαχείριση του κινδύνου εσόδων του ελεγκτή HA (EV aggregator) που προκαλείται από το κενό πληροφοριών μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών HE χρησιμοποιείται μια προσέγγιση βασισμένη στη θεωρία της απόφασης (information gap decision). Η προτεινόμενη θεωρία μπορεί να προσφέρει αποτελεσματικές στρατηγικές για να εγγυηθεί το προκαθορισμένο κέρδος αποφάσεων για τους υπεύθυνους λήψης των αποφάσεων ώστε να αποφύγουν τον κίνδυνο αυτό. Στο [56], χρησιμοποιείται βελτιστοποίηση Lyapunov ούτως ώστε να ελαχιστοποιηθεί το κόστος με άγνωστη τροφοδοσία, οι τιμές του ηλεκτρικού δικτύου και η κινητικότητα των HA.

Μία διαφορετική μέθοδος για την αντιμετώπιση της αβεβαιότητας επιτυγχάνεται με τη χρήση της διαδικασίας απόφασης Markov η οποία χρησιμοποιήθηκε στα [47, 51] ούτως ώστε να προβλεφθούν και να μοντελοποιηθούν οι τιμές της HE με άγνωστες πιθανότητες μετάβασης. Με άλλα λόγια, το μοντέλο αυτό εκτιμά την επίδραση των μελλοντικών τιμών HE και της τρέχουσας λειτουργίας ελέγχου στα μακροπρόθεσμα κέρδη.

Ακόμη μία μέθοδος η οποία χρησιμοποιείται στη βιβλιογραφία είναι η μέθοδος Monte-Carlo [5, 38]. Με αυτό το τρόπο δημιουργείται μια πλήρως στοχαστική μέθοδος μοντελοποίησης των μοτίβων μεταφοράς που έχει ως κρίσιμες μεταβλητές τη στιγμή που το όχημα φεύγει από το σπίτι, τη στιγμή που έρχεται το όχημα στο σπίτι, και την απόσταση που διανύθηκε με το όχημα.

2.4.2 Ισχυρή βελτιστοποίηση (Robust Optimization)

Ισχυρή βελτιστοποίηση εφαρμόζεται σε προβλήματα βελτιστοποίησης όπου αναζητείται ένα ορισμένο μέτρο ευρωστίας και υπάρχει κάποιος βαθμός αβεβαιότητας σε ορισμένες από τις σχετικές μεταβλητές. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι εφαρμογής της ισχυρής βελτιστοποίησης και η επιλογή της είναι χαρακτηριστική του προβλήματος που θα επιλυθεί.

Οι Bai και Qiao [54] χρησιμοποιώντας ένα μεικτού-ακεραίου τετραγωνικού προγραμματισμού μοντέλο, παρουσιάζουν το όφελος των ελεγκτών HA οι οποίοι συμμετέχουν στη μείωση της αβεβαιότητας του κόστους λειτουργίας του δικτύου. Επίσης, η ανάπτυξη μιας προσέγγισης βασισμένη σε μια ισχυρή βελτιστοποίηση δύο επιπέδων (bi-level optimisation) χρησιμοποιείται από το [7] με σκοπό την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων χειρότερης πρόβλεψης τιμών.

2.4.3 Προσεγγίσεις ελέγχου (Receding control approaches)

Προσεγγίσεις ελέγχου χρησιμοποιούνται βάση προηγούμενων γνώσεων καθώς και ενημερωμένων προβλέψεων για την προσαρμογή βελτιστοποιημένων προγραμμάτων.

Στο [6], χρησιμοποιούν τη μέθοδο πολλαπλών περιόδων με μία μη ισορροπημένη ροή φορτίου και βελτιστοποίηση κύλισης έτσι ώστε να ελαχιστοποιήσουν το κόστος φόρτισης. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση αλγορίθμου για διαδοχικό τετραγωνικό προγραμματισμό (sequential quadratic programming). Μια εναλλακτική μέθοδος κατεύθυνσης των πολλαπλασιαστών (Alternating Direction Method of Multipliers) προτείνεται στο [30] με στόχο το συντονισμό της φόρτισης των ΗΑ.

Χρησιμοποιώντας ένα παράδειγμα προγνωστικού ελέγχου και ενός εκτιμητή παραμέτρων βασισμένο σε πραγματικές υλοποιήσεις [10], ανέπτυξαν ένα πλαίσιο πρόβλεψης προγραμματισμού το οποίο υπολογίζει περιοδικά τις πιο οικονομικές λύσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις εκτιμήσεις παραμέτρων με τη βοήθεια του προσαρμοσμένου εκτιμητή παραμέτρων για βελτιωμένη ακρίβεια.

2.5 Σύνοψη

Συνοψίζοντας, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία τα μοντέλα φόρτισης ΗΑ καθορίζονται από τις παρακάτω παραμέτρους:

1. **Κατανάλωση ΗΑ:** η πλειονότητα των εργασιών θεωρεί ότι η κατανάλωση που έχουν τα ΗΑ αντιπροσωπεύει το μέσο όρο κατανάλωσης μίας ομάδας ΗΑ.
2. **Ώρα άφιξης και διανυόμενη απόσταση του ΗΑ:** η πλειονότητα των ερευνών χρησιμοποιεί δημόσια δεδομένα σύμφωνα με τη χώρα που αναλύθηκε.
3. **Χωρητικότητα μπαταρίας:** η πιο κοινή απλοποίηση η οποία συναντάται στη βιβλιογραφία θεωρεί μια σταθερή απαιτούμενη ισχύ. Επίσης, πολύ συχνά συναντάται η προσέγγιση μέσω ενός ορίου κατωφλίου και της ισχύος που καταναλώθηκε.
4. **Ισχύς φορτιστή:** η πλειονότητα των ερευνών θεωρούν αργή φόρτιση.
5. **Τεχνική προσομοίωσης:** η πλειονότητα των μελετών χρησιμοποιεί ντετερμινιστική προσέγγιση.
6. **Ανάλυση της επιρροής στο σύστημα ισχύος:** μερικές εργασίες προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν τις φορτίσεις ΗΑ ώστε να επιτύχουν μεγαλύτερο ΠΔ ΗΑ στο δίκτυο. Οι περισσότερες εργασίες όμως αποφεύγουν τη βελτιστοποίηση αυτή.

Κεφάλαιο 3

Κατασκευή ερωτηματολογίου

Το κεφάλαιο αυτό περιγράφει τη μεθοδολογία που ακολουθήσαμε για την κατασκευή ενός αντιπροσωπευτικού, ως προς τα Κυπριακά δεδομένα, ερωτηματολογίου. Λόγω του ότι δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα μέσω προηγούμενων ερευνών για τα μοντέλα οδήγησης των Κύπριων οδηγών, δημιουργήσαμε ένα ερωτηματολόγιο μέσα από το οποίο θα εξάγουμε τις κατάλληλες πληροφορίες που χρειαζόμαστε.

3.1 Μεθοδολογία

Στόχος του ερωτηματολογίου είναι να εξαχθούν οι παρακάτω πληροφορίες:

- Είναι κάτοχος ή όχι ιδιωτικού οχήματος
- Ποιο είναι το μεταφορικό μέσο που χρησιμοποιεί κατά τη μετάβαση του στην εργασία
- Ποια είναι η ώρα αναχώρησης από το σπίτι
- Ποια είναι η ώρα άφιξης στο σπίτι
- Πόση απόσταση διανύει κατά τις εργάσιμες ημέρες (Δευτέρα - Παρασκευή) και τις μη-εργάσιμες ημέρες (Σάββατο - Κυριακή)

Το ερωτηματολόγιο δημιουργήθηκε μέσω της πλατφόρμας Google forms [48] και αναρτήθηκε μέσω των προσωπικών μέσων κοινωνικής δικτύωσης καθώς και μέσω της Πανεπιστημιακής κοινότητας. Αφού το κοινοποιήσαμε, δεχόμασταν απαντήσεις για περίπου 50 ημέρες και ξεκινήσαμε την ανάλυση των απαντήσεων με τη βοήθεια του προγράμματος της Excel.

Συλλογή έγκυρων δεδομένων

Αρχικά για να αποφύγουμε πολλαπλές απαντήσεις από το ίδιο άτομο, ζητήθηκε η διεύθυνση ηλεκτρονικού ταχυδρομείου. Επίσης, με τη χρήση του ηλεκτρονικού ταχυδρομείου θα είναι δυνατή η επικοινωνία του ατόμου που απάντησε στο ερωτηματολόγιο εάν χρειαστεί. Η επόμενη ερώτηση είχε σκοπό να εξακριβώσει εάν το άτομο είναι κάτοχος ιδιωτικού οχήματος. Αυτή η ερώτηση αποτελεί μια από τις πιο κρίσιμες για την εργασία ερωτήσεις καθώς τα δεδομένα

που μας ενδιαφέρουν πρέπει να προέρχονται από κατόχους ιδιωτικών αυτοκινήτων. Ακόμα μία βασική ερώτηση για την εργασία είναι το μεταφορικό μέσο που χρησιμοποιεί το άτομο για τη μετάβαση του από και προς το χώρο εργασίας του, καθώς εάν χρησιμοποιεί άλλο όχημα εκτός από το ιδιωτικό του αυτοκίνητο δεν θα μας ενδιαφέρουν τα δεδομένα που θα μας δώσει.

Ώρα αναχώρησης, ώρα άφιξης και απόσταση οδήγησης

Οι επόμενες ερωτήσεις αφορούν τα δεδομένα που θα θέλαμε να εξάγουμε από το ερωτηματολόγιο. Η ώρα αναχώρησης και η ώρα άφιξης στο σπίτι μετά την εργασία έχουν ως στόχο την εύρεση της ώρας κατά την οποία ένα ΗΑ θα προστεθεί στο δίκτυο για φόρτιση. Τελευταίο ερώτημα ήταν η απόσταση που διανύει καθημερινά από την αρχή της ημέρας μέχρι το τέλος που θα φθάσει σπίτι. Το δεδομένο αυτό θα βρει χρήση στον υπολογισμό του ποσοστού κατανάλωσης μπαταρίας του ΗΑ και επομένως του χρόνου φόρτισης του.

Κατοχή ΗΑ

Τέλος, ερωτήθηκε εάν είναι ιδιοκτήτης ΗΑ για να δοθεί κάποια περαιτέρω βαρύτητα στις απαντήσεις που μας έδωσε το συγκεκριμένο άτομο, καθώς επίσης να ζητηθεί και η συχνότητα φόρτισης του ΗΑ για να υπολογιστεί ένα ρεαλιστικό σενάριο σχετικά με τη συχνότητα φόρτισης των ΗΑ. Παρ' όλα αυτά, λόγω των ελάχιστων πωλήσεων ΗΑ μέχρι τώρα στην Κύπρο, δεν λάβαμε καμία θετική απάντηση στο ερώτημα αυτό.

3.2 Αποτελέσματα

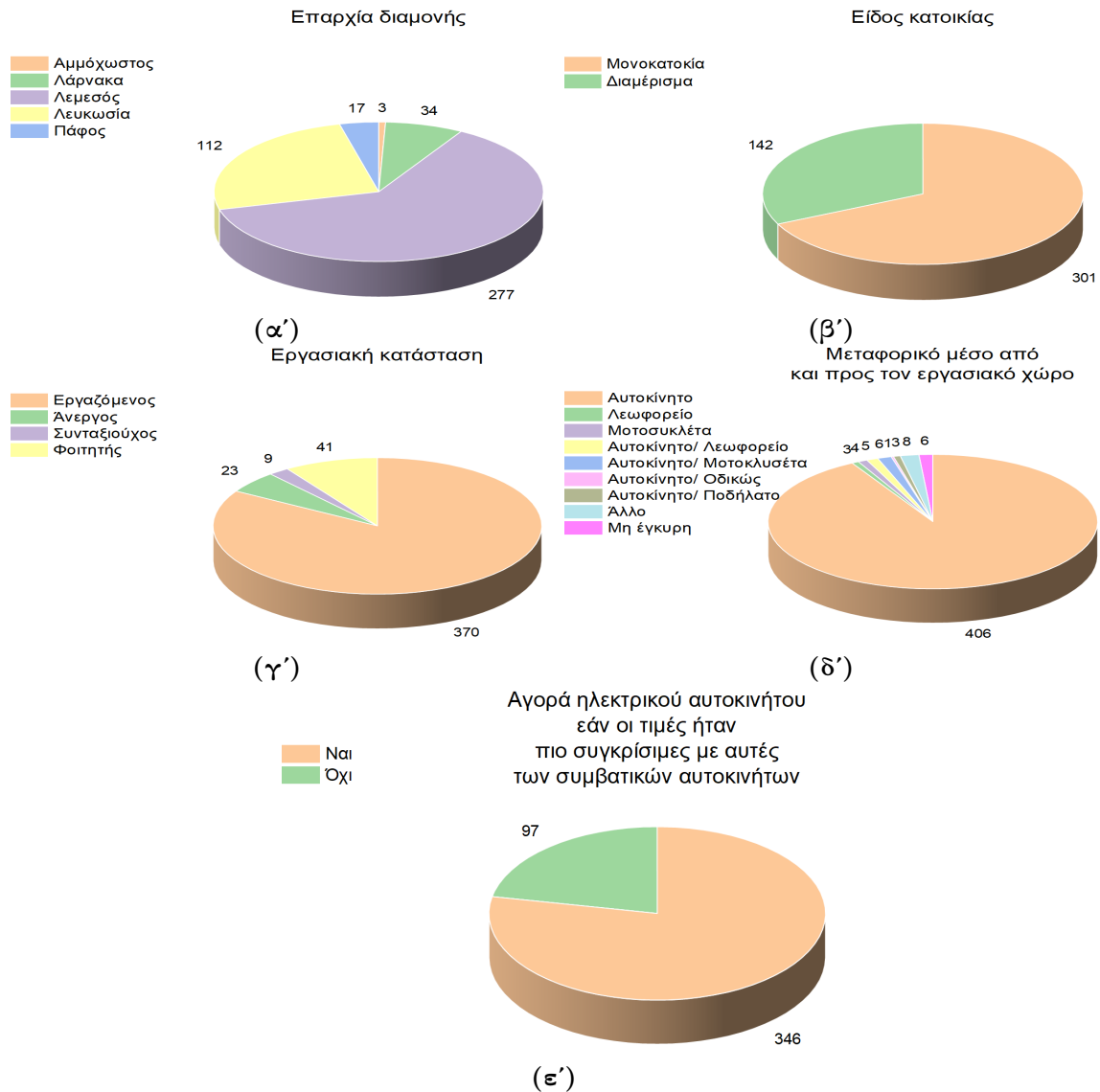
Όπως προαναφέρθηκε και προηγουμένως, δεχόμασταν απαντήσεις στο ερωτηματολόγιο για περίπου 50 ημέρες. Με το πέρας αυτού του χρονικού περιθωρίου, απαιτείτο να ακολουθηθεί σωστή ανάλυση των δεδομένων για να μπορέσουν τα αποτελέσματα να είναι όσο το δυνατόν πιο αντιπροσωπευτικά γίνεται. Οι συνολικές απαντήσεις ήταν 463, εκ των οποίων μερικές περιείχαν λανθασμένες απαντήσεις και μερικές ακόμη να ήταν διπλές, επομένως, καταλήξαμε να έχουμε συνολικά 443 απαντήσεις.

Στο Σχήμα 3.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις απαντήσεις που δόθηκαν, παρ' όλα αυτά, δεν είναι τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν ως βάση για τις υλοποιήσεις μας. Τα δεδομένα αυτά είναι περισσότερο γνωστικού χαρακτήρα ούτως ώστε να παρουσιαστούν γενικές πληροφορίες για τους ερωτηθέντες. Συνεπώς, δεν θα γίνει κάποια επιπλέον ανάλυση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3.1.

Ωστόσο, για τη δημιουργία των προφίλ φόρτισης είναι απαραίτητες οι πληροφορίες που συλλέξαμε από τις εναπομείναντες ερωτήσεις οι οποίες παρουσιάζουν την οδηγική συμπεριφορά του δειγματικού πληθυσμού. Για τα δεδομένα που θα συμπεριλάβουμε έτσι ώστε να επιτύχουμε τους υπολογισμούς μας (ώρα αναχώρησης-άφιξης και απόσταση οδήγησης για Εργάσιμες και Μη-εργάσιμες ημέρες), δημιουργήσαμε Συναρτήσεις Πυκνότητας Πιθανότητας (ΣΠΠ) ακολουθώντας την κανονική κατανομή με τη χρήση του λογισμικού Origin.

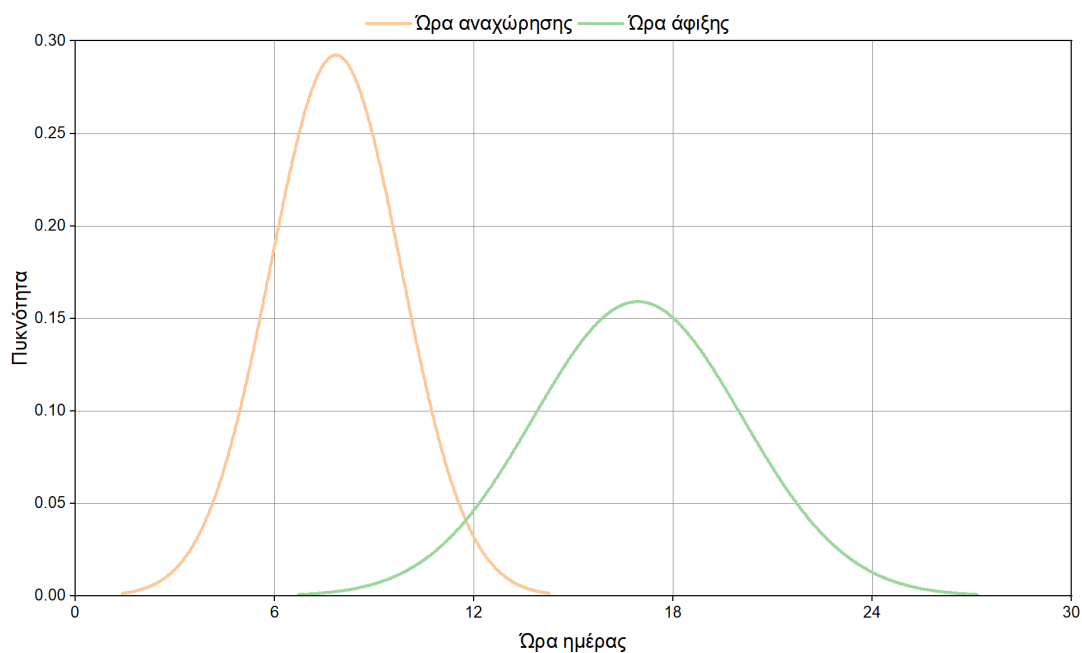
Το Σχήμα 3.2 παρουσιάζει τη ΣΠΠ για τις ώρες αναχώρησης και άφιξης. Παρατηρούμε, όπως ήταν αναμενόμενο, η μεγαλύτερη πιθανότητα να αναχωρήσει κάποιος από το σπίτι προς

το χώρο εργασίας του είναι περίπου στις 8:00 π.μ., δηλαδή έχει μέση τιμή ίση με 8 και τυπική απόκλιση περίπου 2. Αντίστοιχα, η μεγαλύτερη πιθανότητα να προσέλθει κάποιος στο σπίτι από το χώρο εργασίας του είναι περίπου στις 17:00, με μέση τιμή ίση με 17 και τυπική απόκλιση περίπου 3. Αυτό ενδεχομένως να μας προκαλέσει προβλήματα υπερφόρτωσης, καθώς το μέγιστο της καμπύλης του ημερήσιου φορτίου συμπίπτει με την ώρα άφιξης των περισσότερων ατόμων στο σπίτι.

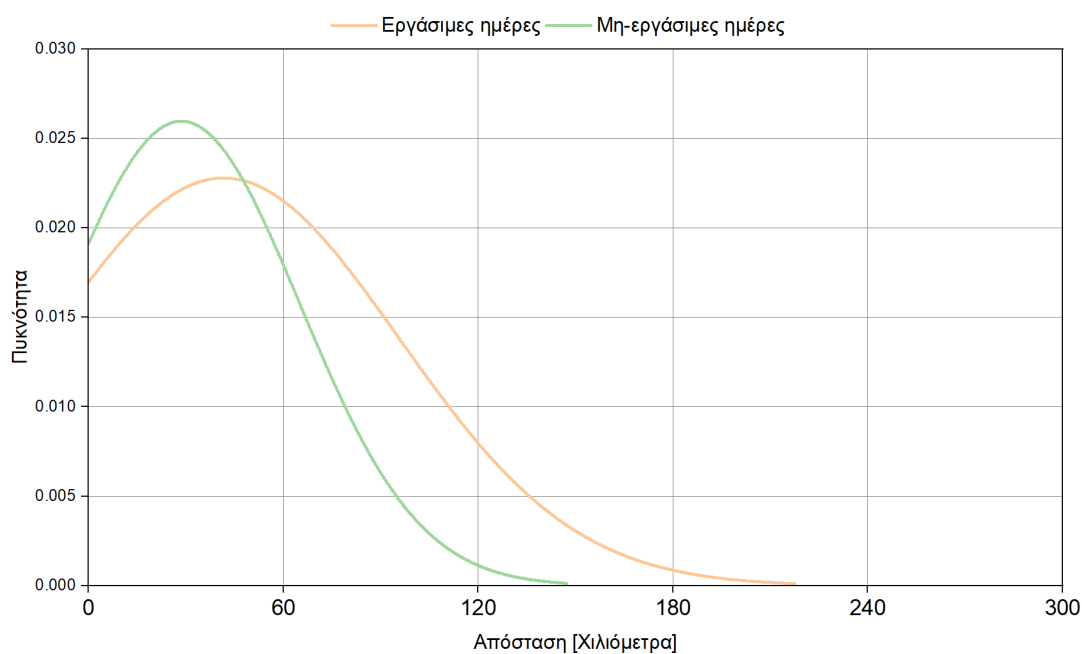


Σχήμα 3.1: Αποτελέσματα για ερωτήσεις γνωστικού χαρακτήρα

Τέλος, το Σχήμα 3.3 παρουσιάζει τη ΣΠΠ για την απόσταση οδήγησης των ατόμων που χρησιμοποιούν ως μεταφορικό μέσο το ιδιωτικό τους αυτοκίνητο για τις εργάσιμες και τις μη-εργάσιμες ημέρες. Όσο αφορά τις εργάσιμες ημέρες έχουμε μια μεγαλύτερη τυπική απόκλιση, συνεπώς έχουμε μεγαλύτερη πιθανότητα να πάρουμε τιμές πιο μακριά από τη μέση τιμή μας, η οποία μέση τιμή κυμαίνεται περίπου στα 40 χιλιόμετρα με τυπική απόκλιση 57. Αντίστοιχα, όσο αφορά τις μη-εργάσιμες ημέρες, έχουμε τυπική απόκλιση ίση με 36 και μέση τιμή περίπου στα 28 χιλιόμετρα.



Σχήμα 3.2: ΣΠΠ για ώρα αναχώρησης και άφιξης από και προς το σπίτι (Εργάσιμες)



Σχήμα 3.3: ΣΠΠ διανυόμενης απόστασης οδήγησης για εργάσιμες και μη-εργάσιμες ημέρες

Κεφάλαιο 4

Μοντελοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή των επτά παραμέτρων οι οποίοι θα μας παρέχουν τις εισόδους για τη δημιουργία των προφίλ φορτίων φόρτισης και την τοποθέτηση τους πάνω στο δίκτυο. Το κάθε μοντέλο περιγράφεται στο κεφάλαιο αυτό, ενώ ο συνδυασμός και η ενσωμάτωση τους στη δομή προσομοίωσής καλύπτεται στο Κεφ. 5.

Για τη μελέτη χρησιμοποιήσαμε ένα μοντέλο δικτύου διανομής χαμηλής τάσης το οποίο μας παρέδωσε η Α.Η.Κ.. Ο μετασχηματιστής είναι ονομαστικής ισχύς 630kVA ο οποίος συνδέει το δίκτυο μέσης τάσης 11kV με το δίκτυο χαμηλής τάσης 400V. Το μοντέλο δικτύου που έχουμε αφορά συνολικά 40 ζυγούς από τους οποίους οι 27 είναι οικιακά φορτία και θεωρούμε ότι και στα 27 μπορούν να τοποθετηθούν ΗΑ. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το μονογραμμικό διάγραμμα που αντιπροσωπεύει το δίκτυο διανομής της Α.Η.Κ., καθώς και οι ονομαστικές τιμές ρεύματος για τις εναέριες γραμμές μεταφοράς. Επίσης, βάση των δεδομένων που μας έδωσε η Α.Η.Κ., στον υποσταθμό τον οποίο βρίσκεται ο μετασχηματιστής είναι συνδεδεμένες 6 γραμμές αναχώρησης όπου η κάθε μία έχει παρόμοιο φορτίο με το μοντέλο δικτύου διανομής που μας έδωσε. Για τη μείωση του χρόνου υπολογισμού ροής ισχύος καθώς και για την απλοποίηση του κώδικα, θα γίνει ανάλυση στη μία γραμμή αναχώρησης και στη συνέχεια η ισχύς που τροφοδοτεί ο μετασχηματιστής θα πολλαπλασιαστεί έξι φορές, ούτως ώστε να μας δώσει τη συνολική ισχύ που θα παρέχει στα φορτία. Επομένως, αφού τα 27 οικιακά φορτία αναφέρονται σε αναχώρηση μίας εναέριας γραμμής, πολλαπλασιάζοντας με το έξι έχουμε συνολικά 162 οικιακά φορτία.

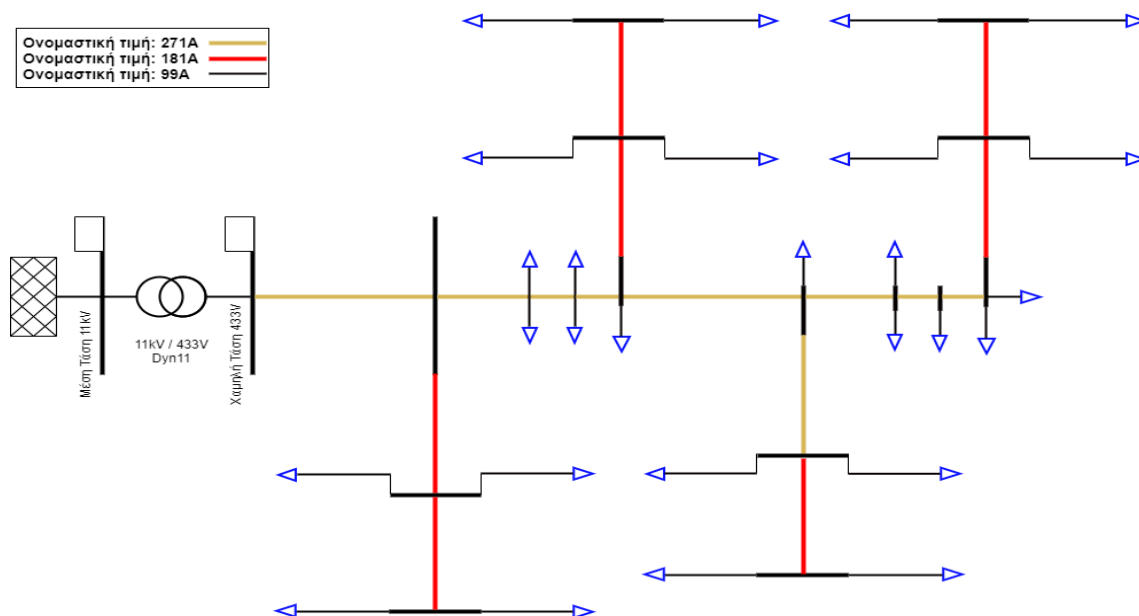
Επιπρόσθετα, για το αρχικό φορτίο κάθε σπιτιού χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα τα οποία μας δόθηκαν από την Α.Η.Κ. τα οποία αφορούσαν μία μέση κατανάλωση ενός οικιακού φορτίου. Τα δεδομένα αυτά είχαν συχνότητα δειγματοληψίας 30 λεπτών. Από τη στιγμή που η πιο κρίσιμη περίοδος και οι πιο ψηλές μετρήσεις είναι κατά τη διάρκεια του μήνα Αυγούστου, επιλέξαμε για την ανάλυση αυτό το μήνα θεωρώντας τον ως τη χειρότερη περίπτωση ούτως ώστε να μειώσουμε τους χρόνους υπολογισμού σε σύγκριση με μία προσομοίωση ενός έτους.

Υποθέτοντας ότι η οικιακή φόρτιση κατά πάσα πιθανότητα θα είναι και η κύρια μέθοδος φόρτισης, το φορτίο των ΗΑ προστίθεται στο αρχικό φορτίο, και ως εκ τούτου η συνολική ενέργεια θα είναι το αρχικό φορτίο αθροισμένο με το φορτίο των ΗΑ. Το σχήμα 4.2 απεικονίζει τη δομή της μοντελοποίησης και εξηγεί εν συντομία τον αλγόριθμο που εφαρμόστηκε ούτως ώστε να διευκολυνθεί η κατανόηση των ακόλουθων ενοτήτων.

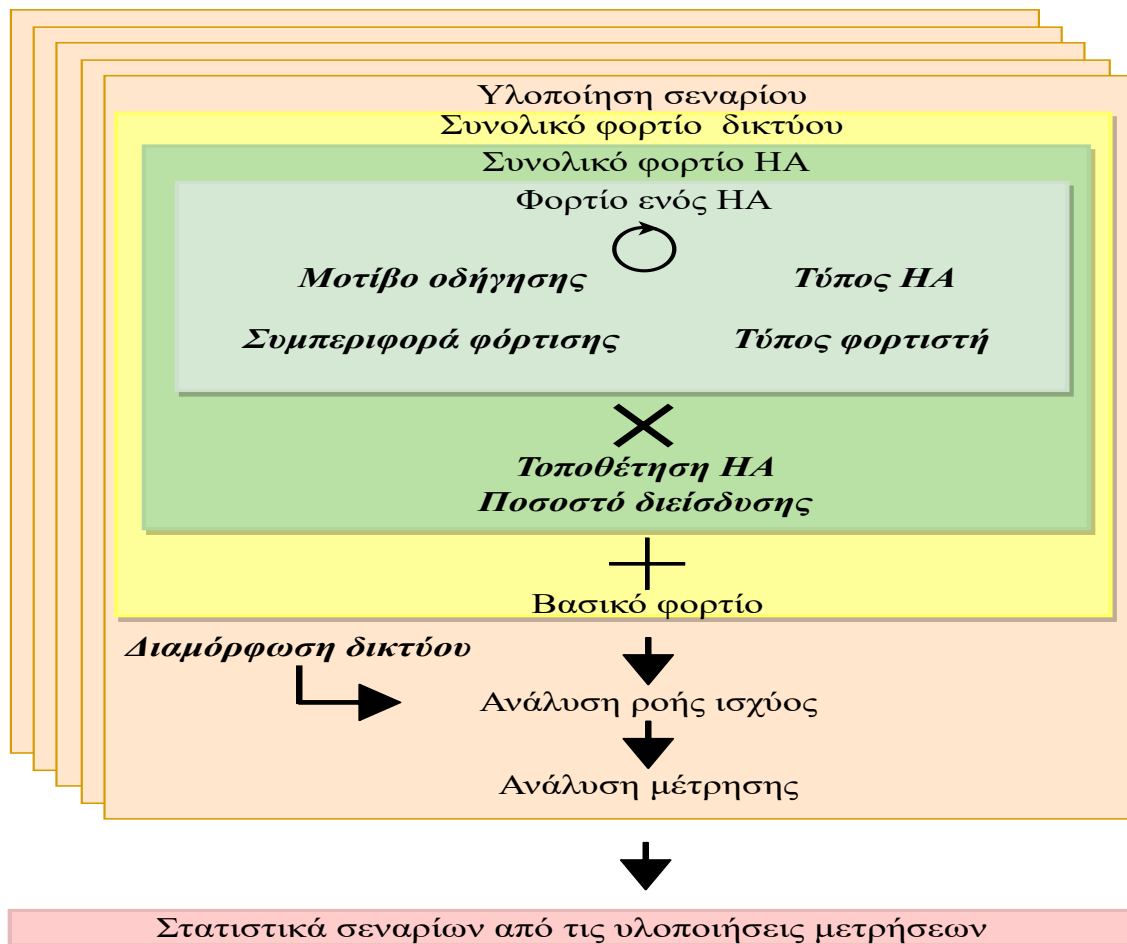
Η μελέτη για το προφίλ φόρτισης αρχίζει με το *μοτίβο οδήγησης* ενός αυτοκινήτου. Όπως αναφέρθηκε στο Κεφ. 3, τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία του μοτίβου οδήγησης συγκεντρώθηκαν μέσω του ερωτηματολογίου [48]. Για να προσδιορίσουμε την ενέργεια που κατανάλωσε εντός της ημέρας το ΗΑ χρειαζόμαστε την κατανάλωση που έχει το όχημα καθώς και την απόσταση που διένυσε κατά τη διάρκεια της ημέρας. Για τον προσδιορισμό της ΚΦ του ΗΑ απαιτούνται η κατανάλωση ανά χιλιόμετρο καθώς και η χωρητικότητα της μπαταρίας, τα οποία καθορίζονται από τον *Τύπο ΗΑ*.

Όσο αφορά την απόφαση για το αν θα συνδεθεί το αυτοκίνητο για φόρτιση δημιουργήθηκαν δύο πιθανές υποθέσεις, οι οποίες καθορίζονται ως *Συμπεριφορά φόρτισης*. Η μια θεωρεί ότι δεν θα συνδεθεί για φόρτιση κανένα ΗΑ προτού το ποσοστό ενέργειας στη μπαταρία του φθάσει κάτω από το 50% και νοουμένου ότι τέλειωσε και το τελευταίο ταξίδι του εντός της ημέρας. Η δεύτερη υπόθεση θεωρεί ότι όλα τα ΗΑ θα συνδέονται για φόρτιση μετά το πέρας κάθε τελευταίου ταξιδιού που πραγματοποιήθηκε εντός της ημέρας. Ο *Τύπος φορτιστή* καθορίζει τη συνολική κατανάλωση ισχύος. Τα προφίλ φόρτισης που προέκυψαν κατανέμονται τυχαία στο δίκτυο και προσθέτονται στο βασικό φορτίο. Το ποσοστό των προφίλ που περιέχουν εκτός από το βασικό φορτίο και το φορτίο ΗΑ ορίζεται ως *ΠΔ ΗΑ* και υποδεικνύει όλα τα ΗΑ που υπάρχουν τοποθετημένα στο δίκτυο. Η *διαμόρφωση δικτύου*, είναι ακόμη μία παράμετρος που επηρεάζει τις ροές ισχύος και πρέπει να ληφθεί υπόψη. Αφού ρυθμιστούν όλα τα πιο πάνω μοντέλα, καθίσταται δυνατή η εκτέλεση προσομοίωσης ροής ισχύος.

Εκφράζοντας τα προφίλ φόρτισης βάση των μοτίβων οδήγησης, τον τύπο ΗΑ, τη συμπεριφορά φόρτισης και το είδος φορτιστή είναι ευκολότερη η τροποποίηση των προφίλ για μελλοντικές προσομοιώσεις που αφορούν τη μοντελοποίηση ΗΑ. Αυτό είναι απαραίτητο καθώς στο μέλλον, βάση και της ραγδαίας εξέλιξης των ΗΑ, ενδέχεται να μεταβληθούν κάποια δεδομένα σχετικά με τα ΗΑ (π.χ. ισχύς φορτιστή, χωρητικότητα μπαταρίας [2]).



Σχήμα 4.1: Μοντέλο δικτύου διανομής χαμηλής τάσης για αναχώρηση μίας εναέριας γραμμής από το μετασχηματιστή



Σχήμα 4.2: Δομή μοντελοποίησης ΗΑ

4.1 Ονοματολογία

Για μία σαφέστερη περιγραφή, είναι σημαντικό να προσδιοριστούν οι ονομασίες οι οποίες θα χρησιμοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας εντός της μοντελοποίησης.

Διάσταση παραμέτρου: Είναι μια έννοια στη μοντελοποίηση της επιρροής των ΗΑ στο δίκτυο διανομής. Οι επτά διαστάσεις παραμέτρων που θα χρησιμοποιηθούν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

Μοντέλο παραμέτρου: Κάθε διάσταση παραμέτρου μπορεί να έχει πολλαπλά μοντέλα παραμέτρων. Για παράδειγμα στη διάσταση παραμέτρου *ΠΔ ΗΑ*: ένα μοντέλο παραμέτρου είναι ότι χρησιμοποιείται ΠΔ 20% ενώ ένα άλλο μοντέλο μπορεί να θεωρηθεί το ΠΔ 40%, 60% ή 80%.

Σενάριο: Είναι η επιλογή ενός μοντέλου παραμέτρου για κάθε διάσταση παραμέτρου. Το σύνολο πιθανών σεναρίων καθορίζεται από όλους τους συνδυασμούς μοντέλων παραμέτρων με την προϋπόθεσή ότι ένα και μόνο ένα μοντέλο παραμέτρου μπορεί να επιλεγεί ανά διάσταση

παραμέτρου.

Υλοποίηση σεναρίου: Για κάθε διάσταση παραμέτρου επιλέγεται ένα μοντέλο παραμέτρου που στη συνέχεια σχηματίζεται μία υλοποίηση σεναρίου. Οι πολλαπλές υλοποιήσεις σεναρίων είναι η βάση για τη μέθοδο Monte-Carlo και τα αποτελέσματα συνοψίζονται για να δώσουν τις μετρήσεις ενός σεναρίου.

Υλοποίηση μέτρησης: Κάθε υλοποίηση σεναρίου επιστρέφει ένα αποτέλεσμα ροής ισχύος για κάθε χρονικό βήμα. Τα αποτελέσματα αυτά αξιολογούνται σε σχέση με μία μέτρηση (π.χ. φόρτιση μετασχηματιστή, μέγιστη φόρτιση γραμμής).

Μέτρηση σεναρίου: Οι υλοποιήσεις μετρήσεων μέσω της ανάλυσης Monte-Carlo συνοψίζονται σχηματίζοντας μία μέτρηση σεναρίου. Έτσι, η μέτρηση σεναρίου ερμηνεύεται ως σύνοψη των πιθανών καταστάσεων του δικτύου.

Πίνακας 4.1: Επισκόπηση για τα μεγέθη μοντελοποίησης και τα μοντέλα των ΗΑ.

Διάσταση	Προκαθορισμένο μοντέλο	Επιπλέον μοντέλα	Ακρώνυμο
Μοτίβο οδήγησης (Ενότητα 4.2)	Δεδομένα από ερωτηματολόγιο	—	—
Τύπος ΗΑ (Ενότητα 4.3)	Βάση πωλήσεων	Βάση Κατανάλωσης ΗΑ: Χαμηλή-Μέτρια-Ψηλή	BK
Συμπεριφορά φόρτισης (Ενότητα 4.4)	Καθημερινή φόρτιση	Ομοιόμορφο όριο κατωφλίου	OOK
Τύπος φορτιστή (Ενότητα 4.5)	33% 3.7kW, 67% 7.4kW	33% 3.7kW, 7.4kW, 11kW 33% 7.4kW, 67% 11kW 100% 11kW	Φ1 Φ2 Φ3
Ποσοστό διείσδυσης ΗΑ (Ενότητα 4.6)	20%	40% 60% 80%	ΠΔ1 ΠΔ2 ΠΔ3
Διαμόρφωση δικτύου (Ενότητα 4.7)	Ακτινωτό	—	—
Τοποθέτηση ΗΑ (Ενότητα 4.8)	Ομοιόμορφη κατανομή	—	—

4.2 Μοτίβο οδήγησης

Στην ενότητα αυτή περιγράφεται η δημιουργία μοτίβου οδήγησης που αντιπροσωπεύει τη χρονική στιγμή που θα φθάσει σπίτι το όχημα και της διανυόμενης απόστασης. Οι δύο αυτές μεταβλητές αντιπροσωπεύουν το μοτίβο οδήγησης ενός οχήματος, το οποίο χαρακτηρίζει την οδηγική του συμπεριφορά. Αυτά τα μοτίβα οδήγησης κατά τη διάρκεια υπολογισμού φορτίου φόρτισης, επιλέγονται τυχαία ούτως ώστε να σχηματίσουν την οδηγική συμπεριφορά όλων των οχημάτων. Ο όρος "μοτίβο οδήγησης" χρησιμοποιείται για αναφορά σε ταξίδια με ιδιωτικά αυτοκίνητα που σταθμεύουν σπίτι, καθώς η εργασία μας επικεντρώνεται στην οικιακή φόρτιση.

Σε περιπτώσεις όπου δεν είναι διαθέσιμες λεπτομερείς πληροφορίες, επιλέγονται μοτίβα οδήγησης με διαφορετικές μεθόδους [19,24]. Στην εργασία μας, χρησιμοποιήσαμε τα δεδομένα από το ερωτηματολόγιο, τα οποία παρουσιάζονται στο Κεφ. 3, και θα χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία των μοτίβων οδήγησης ως το μοναδικό μοντέλο μοτίβου οδήγησης.

4.3 Τύπος ΗΑ

Στο πλαίσιο της ανάλυσης ευαισθησίας θα διερευνηθεί πως οι δυο παράμετροι, χωρητικότητα μπαταρίας και κατανάλωση ενέργειας, επηρεάζουν το αποτέλεσμα της προσομοίωσης ροής ισχύος. Ο τύπος ΗΑ, επηρεάζει τη συνολική ενέργεια που απαιτείται για τη φόρτιση, ενώ η χωρητικότητα μπαταρίας σε συνδυασμό με τη συμπεριφορά φόρτισης επηρεάζει τη χρονική διάρκεια που απαιτείται όταν είναι αναγκαία η φόρτιση. Οι δύο πιο κοινές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούνται των δύο αυτών παραμέτρων είναι είτε η υπόθεση μέσων τιμών [42] είτε ο ορισμός κατηγοριών οχημάτων με συγκεκριμένες παραμέτρους [24], όπως χαμηλής, μεσαίας και ψηλής κατανάλωσης.

4.3.1 Σύνολο δεδομένων ηλεκτρικού οχήματος

Λόγω του περιορισμένου αριθμού των ΗΑ που έχουν πωληθεί στην Ευρώπη μέχρι στιγμής, τα ακόλουθα στοιχεία παρέχουν μια συνοπτική εικόνα για τη μέχρι στιγμής αγορά, παρ' όλα αυτά λόγω της ραγδαίας εξέλιξης των ΗΑ, μπορεί να καταργηθεί πολύ γρήγορα. Ο Πίνακας 4.2 παρουσιάζει τα 8 ΗΑ με τις περισσότερες πωλήσεις στην Ευρώπη το 2020 [37] καθώς και τα αντίστοιχα τεχνικά χαρακτηριστικά για το κάθε ΗΑ όσο αφορά την ενεργειακή κατανάλωση και τη χωρητικότητα της μπαταρίας του [16]. Ενώ τα αυτοκίνητα που εμφανίζονται αντιπροσωπεύουν ένα μεγάλο ποσοστό της αγοράς, παρ' όλα αυτά ο πίνακας δεν είναι πλήρης. Ωστόσο, είναι χρήσιμος για τη σύγκριση των μοντέλων που θα χρησιμοποιηθούν.

Πίνακας 4.2: Κατανάλωση και χωρητικότητα μπαταρίας από τα 8 πιο δημοφιλείς μοντέλα ΗΑ στην Ευρώπη το 2019

Μοντέλο	Κατανάλωση ενέργειας [kWh/100km]	Χωρητικότητα μπαταρίας [kWh]	Πωλήσεις
Tesla Model 3	15.2	50.0	64043
Renault Zoe	16.5	52.0	34775
BMW i3	16.1	37.9	24547
Nissan Leaf	16.4	36.0	24488
Volkswagen e-Golf	16.8	32.0	19680
Hyundai kona EV	16.0	64.0	16964
Jaguar i-Pace	23.2	84.7	9540
KIA e-Niro	17.3	64.0	8060
Μέσος όρος κατανάλωσης:	16.4		Σύνολο: 202097

4.3.2 Μοντέλα ΗΑ

Τα δύο μοντέλα που θα επιλεγθούν θα βοηθήσουν σε μια λεπτομερέστερη αξιολόγηση της επιρροής των μοντέλων σε σύγκριση με ένα απλό μοντέλο.

- 1) **Βάση πωλήσεων** - οι ιδιότητες των ΗΑ λαμβάνονται σύμφωνα με τις πωλήσεις.

2) Βάση κατανάλωσης ΗΑ - το μοντέλο αυτό λαμβάνει υπόψη την κατανάλωση του ΗΑ και διαχωρίζεται σε:

- Χαμηλή - Tesla Model 3
- Μεσαία - Nissan Leaf
- Ψηλή - Jaguar i-Pace

Τα προαναφερθέντα μοντέλα δεν λαμβάνουν υπόψη τις εποχιακές παραλλαγές που θα έχουν αντίκτυπο στην κατανάλωση λόγω θερμότητας στο αυτοκίνητο ούτε και την υποβάθμιση της μπαταρίας. Αυτό γίνεται ούτως ώστε οι αναλύσεις να παρέχουν το βασικό νόημα για το πως τα μοντέλα αυτά επηρεάζουν τα αποτελέσματα. Διάφορα επιπλέον μοντέλα μπορούν να προκύψουν αυξομειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας και αυξάνοντας τη χωρητικότητα της μπαταρίας. Με αυτό το τρόπο θα είναι δυνατή η εξέταση περισσότερων μοντέλων ούτως ώστε να αξιολογηθεί η επιρροή των αλλαγών των οποίων πιθανόν να οφείλονται είτε από τις εποχιακές παραλλαγές είτε από τις τεχνολογικές προόδους στις μπαταρίες. Παρ' όλα αυτά, στα πλαίσια της εργασίας δεν θα γίνει η επιπλέον ανάλυση μοντέλων για σκοπούς απλότητας των μοντέλων.

4.4 Συμπεριφορά φόρτισης

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει τις επιλογές μοντελοποίησης για τη συμπεριφορά φόρτισης, η οποία εκτός από το γεγονός ότι εξαρτάται από την ώρα άφιξης στο σπίτι, εξαρτάται και από το αν αποφασίσει το άτομο να φορτίσει το ΗΑ.

4.4.1 Ώρα άφιξης και έναρξη φόρτισης

Παρόλο που το ερωτηματολόγιο μας παρέχει όλα τα δεδομένα σχετικά με την οδηγική συμπεριφορά, δεν είναι δυνατή η άντληση επαρκή πληροφοριών όσο αφορά τη συμπεριφορά φόρτισης. Μέσω του ερωτηματολογίου μπορούμε να αντλήσουμε πληροφορίες σχετικά με τη χρονική διάρκεια της φόρτισης. Για το χρόνο έναρξης φόρτισης, υποθέτουμε ότι το ΗΑ θα αρχίσει τη φόρτιση στο αμέσως επόμενο ημίωρο αφού φθάσει σπίτι. Για παράδειγμα, αν επιστρέψει στο σπίτι η ώρα 16:10 θα αρχίσει τη φόρτιση του στις 16:30. Ωστόσο, αυτή η προσέγγιση εξαρτάται και από το εάν το άτομο αποφασίσει να φορτίσει το ΗΑ ή όχι. Για την ελαχιστοποίηση πολυπλοκότητας της μοντελοποίησης, στην εργασία μας θα χρησιμοποιήσουμε μόνο την υπόθεση που προαναφέραμε πιο πάνω, ότι δηλαδή το άτομο θα φορτίζει στο επόμενο ημίωρο μετά την άφιξη του στο σπίτι.

4.4.2 Συχνότητα φόρτισης

Ακόμη, μία απρόβλεπτη πτυχή της συμπεριφοράς φόρτισης είναι η συχνότητα φόρτισης καθώς είναι αδύνατο να προβλέψουμε πότε οι ιδιοκτήτες ΗΑ αποφασίσουν να φορτίσουν τα οχήματά τους. Οι γρήγορες τεχνολογικές εξελίξεις στους φορτιστές και τις μπαταρίες σε συνδυασμό με τις λίγες έρευνες και δεδομένα τα οποία υπάρχουν καθιστούν την πρόβλεψη αυτής της

συμπεριφοράς δυσκολότερη. Επίσης, η συμπεριφορά φόρτισης των ατόμων μπορεί εύκολα να αλλάξει όντας διεισδύσουν περισσότερα ΗΑ στις ζωές μας (π.χ. η εξέλιξη των κινητών τηλεφώνων). Η μέθοδος που επιλέχθηκε για τον προσδιορισμό της συχνότητας φόρτισης είναι ο καθορισμός ενός συγκεκριμένου ορίου κατωφλίου της ΚΦ της μπαταρίας κάτω από το οποίο οι χρήστες ΗΑ θα ξεκινούν να φορτίζουν τα οχήματά τους. Η ΚΦ κυμαίνεται μεταξύ του 0 και του 1. Το 0 αντικατοπτρίζει άδεια μπαταρία και το 1 πλήρη μπαταρία. Ένα χαμηλό όριο κατωφλίου (OK), π.χ. 0,2, οδηγεί σε μικρότερη συχνότητα φόρτισης, ενώ ένα μεγαλύτερο OK, π.χ. 0,7, οδηγεί σε μεγαλύτερη συχνότητα φόρτισης.

Μεταξύ του 2011 και 2013, συλλέχθηκαν δεδομένα σχετικά με την οδήγηση και τη ζήτηση ΗΑ σε μια μελέτη που διεξήχθη στην Ευρώπη [11]. Η μέση ΚΦ της μπαταρίας ήταν 60% όταν οι χρήστες την επαναφόρτιζαν, γεγονός που δείχνει ότι οι χρήστες δεν αφήνουν τη μπαταρία να αποφορτιστεί πλήρως για να την επαναφορτίσουν. Σύμφωνα με το [49], το 65% των χρηστών αποφασίζει να φορτίσει το ΗΑ όταν η ΚΦ είναι μεγαλύτερη του 40%, δηλαδή να είναι μεγαλύτερη από 0,4. Λαμβάνοντας υπόψη τις παραπάνω μελέτες, στα πλαίσια της εργασίας θα χρησιμοποιηθεί ως OK η τιμή 0,5, θεωρώντας την ως ιδανική τιμή που θα οδηγεί συνήθως σε μέση συχνότητα φόρτισης.

4.4.3 Μοντέλα συμπεριφορά φόρτισης

Τα δύο μοντέλα που θα επιλεγθούν, βάση και των αναλύσεων που αναφέρθηκαν, είναι:

- 1) **Καθημερινή φόρτιση** - το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι το OK είναι 1 για όλα τα ΗΑ, επομένως οι χρήστες φορτίζουν μετά από κάθε τελευταίο ταξίδι.
- 2) **Ομοιόμορφο όριο κατωφλίου** - το μοντέλο αυτό υποθέτει ότι το OK είναι 0,5 για όλα τα ΗΑ, επομένως οι χρήστες φορτίζουν εάν η ΚΦ είναι μικρότερη από 0,5.

Συγκρίνοντας τα δύο μοντέλα, το ομοιόμορφο όριο κατωφλίου (OOK) φαίνεται να είναι πιο ρεαλιστικό από αυτό της καθημερινής φόρτισης, ωστόσο εξυπηρετούν σε καλύτερη ανάλυση της ευαισθησίας ως προς τη συμπεριφορά φόρτισης. Το δεύτερο μοντέλο, θεωρείται πιο ακραίο όπου οι άνθρωποι θα συνδέουν το ΗΑ τους καθημερινά όταν φτάνουν στο σπίτι. Υπολογίζοντας βάση και της μέσης τιμής της απόστασης που παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.3, μία μέση κατανάλωση ενέργειας θα είναι περίπου 6-7kWh την ημέρα, χρησιμοποιώντας κατανάλωση ΗΑ περίπου $16 \frac{kWh}{100km}$. Συνεπώς, η φόρτιση ενδέχεται να μην διαρκέσει πολύ, ωστόσο, όταν επιστρέφουν στο σπίτι πολλά ΗΑ ταυτόχρονα και ξεκινούν τη φόρτιση, αυτό θα οδηγήσει σε μεγαλύτερη ζήτηση ενέργειας.

4.5 Τύπος φορτιστή ΗΑ

Η ισχύς των φορτιστών καλύπτει ένα μεγάλο εύρος με τιμές που κυμαίνονται από 3.7kW μέχρι 50kW στην Κύπρο [36], οι οποίοι συναντώνται σε δημόσιους σταθμούς φόρτισης. Ωστόσο, οι πιο κοινοί φορτιστές ιδιωτικής χρήσης έχουν ονομαστική ισχύ 3.7kW, 7.4kW και 11kW. Υπάρχει επίσης και η δυνατότητα χρήσης φορτιστή 22kW, παρ' όλα αυτά, ένας τόσο μεγάλος φορτιστής πιθανόν να απαιτεί και ένα επιπλέον σημείο σύνδεσης στο δίκτυο. Για οικιακή

χρήση, οι φορτιστές που είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.3. Οι συνήθως διαθέσιμοι φορτιστές είναι αυτοί των 3.7kW, 7.4kW και 11kW και επομένως θα είναι αυτοί που θα χρησιμοποιηθούν στα μοντέλα φορτιστών. Το πρόγραμμα προσομοίωσης MATPOWER θεωρεί όλα τα φορτία τριφασικά. Οι μονοφασικοί φορτιστές ενδεχομένως να προκαλέσουν ασυμμετρία στο δίκτυο, ωστόσο στην εργασία μας θα επικεντρωθούμε στην ανάλυση ροής ισχύος, όπου δεν λαμβάνονται υπόψη οι πιθανές ασυμμετρίες του δικτύου.

Πίνακας 4.3: Τύποι φορτιστών για οικιακή χρήση

Ονομαστικό ρεύμα Τύπος σύνδεσης	16A	32A
Μονοφασικό	3.7kW	7.4kW
Τριφασικό	11kW	22kW

4.5.1 Μοντέλα φορτιστών

Τα τέσσερα μοντέλα που θα επιλεγθούν, βάση των τριών τύπων φορτιστών που είναι πιθανότερο να χρησιμοποιηθούν, είναι:

- 1) 33% 3.7kW, 67% 7.4kW
- 2) 33% 3.7kW, 33% 7.4kW, 33% 11kW
- 3) 33% 7.4kW, 67% 11kW
- 4) 100% 11kW

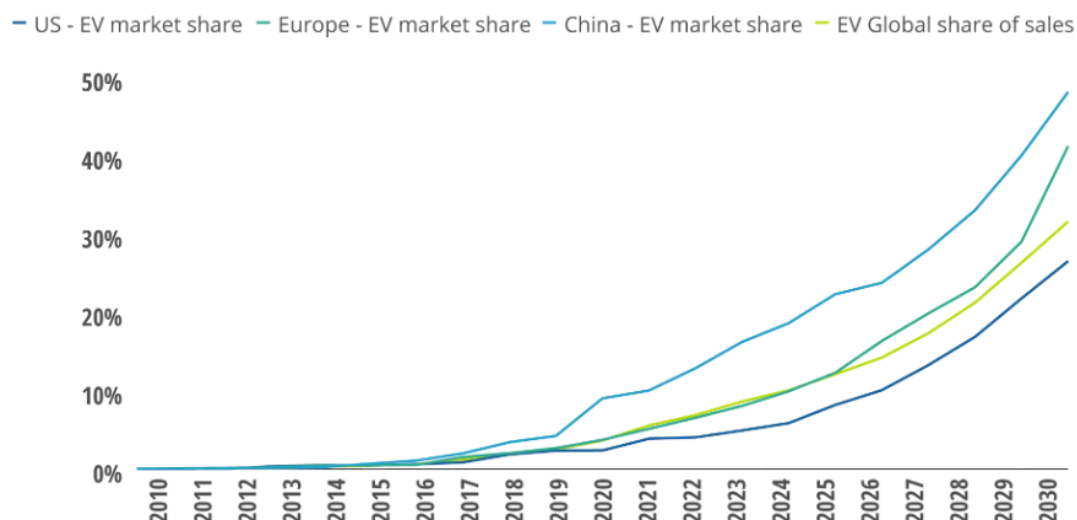
Υπολογίζοντας το υψηλό κόστος εγκατάστασης φορτιστών 11kW, η χρήση μόνο αυτών είναι η λιγότερη πιθανή επιλογή. Παρ' όλα αυτά, είναι μία περίπτωση που δείχνει την πρόκληση για μεγαλύτερη ισχύ φόρτισης και παράλληλα την επίπτωση που θα μπορούσαν να έχουν αυτοί οι φορτιστές στο δίκτυο διανομής. Δεδομένου ότι θα αναλύσουμε ροή ισχύος, ένα σημαντικό μέρος της ενέργειας που καταναλώνεται από το δίκτυο είναι η άεργος ισχύς. Για το κομμάτι των φορτιστών στην εργασία, θεωρείται ότι έχουν συντελεστή ισχύος μονάδα. Επομένως, οι φορτιστές HA δεν καταναλώνουν καθόλου άεργο ισχύ.

4.6 Ποσοστό διείσδυσης HA

Ένας ακόμη βασικός παράγοντας, είναι ο συνολικός αριθμός των HA που θα συνδεθούν στο σύστημα. Αρκετές μελέτες προσπαθούν να προβλέψουν την εξέλιξη του μεριδίου HA στη νέα αγορά. Μια πρόσφατη μελέτη που διεξήχθη, προβλέπει αυτό το μερίδιο και τα αποτελέσματα της παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.3 [53].

Το εύρος αυτών των προβλέψεων, δηλαδή του χρόνου και της πρόβλεψης του ΠΔ HA είναι μεγάλο, γεγονός που δείχνει ότι μια μακροπρόθεσμη πρόβλεψη για τα HA είναι σχεδόν αδύνατη. Το ΠΔ HA σχετίζεται με τον αριθμό οικιακών καταναλωτών (μέγιστο 162) που

υπάρχουν στο δίκτυο ως βάση και ερμηνεύεται ως το ποσοστό από τα σπίτια στο οποίο θα φορτίζει ένα ΗΑ.



Σχήμα 4.3: Προοπτικές για το μερίδιο αγοράς ΗΑ ανά μεγάλη περιοχή [53]

Τα επιλεγμένα ΠΔ είναι:

- 1) 20% ή 32 ΗΑ
- 2) 40% ή 65 ΗΑ
- 3) 60% ή 97 ΗΑ
- 4) 80% ή 130 ΗΑ

Όπως προαναφέρθηκε, ένα ΠΔ 80% μπορεί να μην επιτευχθεί σύντομα, εντούτοις είναι μία περίπτωση η οποία καλύπτει τις πιο ακραίες περιπτώσεις. Τα υπόλοιπα μοντέλα είναι πιο πιθανόν να συμβούν συντομότερα.

4.7 Διαμόρφωση δικτύου

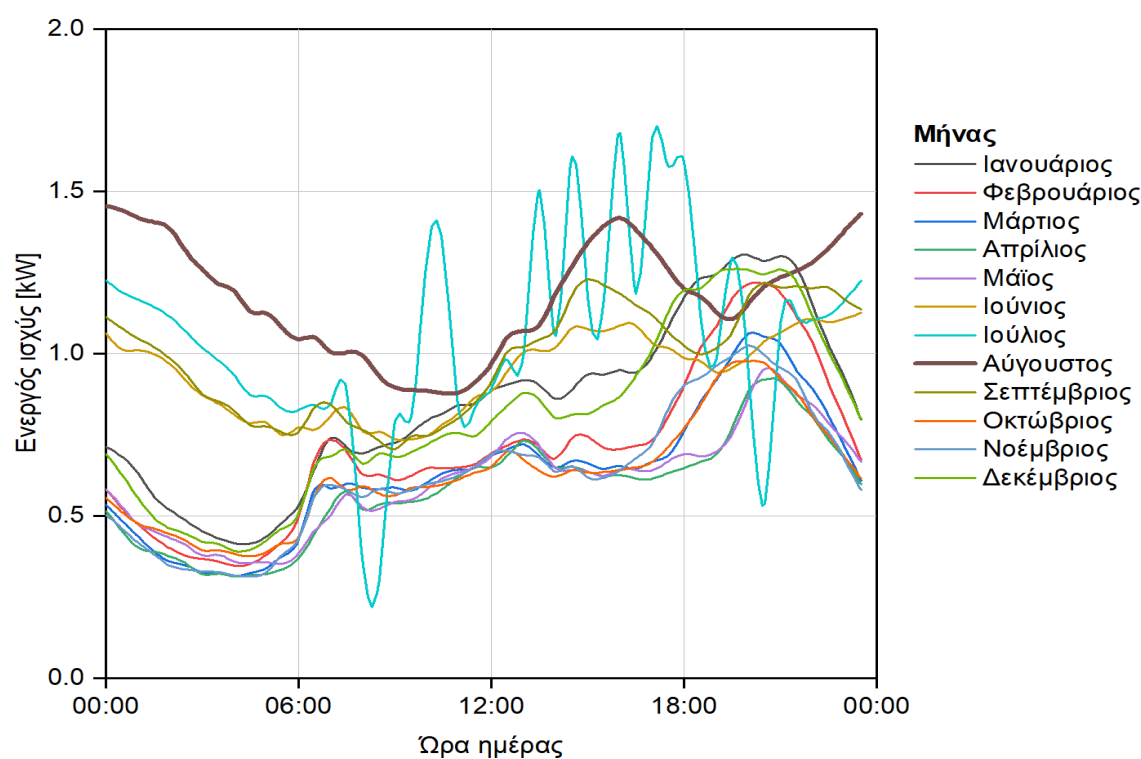
Το χρησιμοποιημένο δίκτυο χαμηλής τάσης βρίσκεται στην Κύπρο και λειτουργεί από την Α.Η.Κ.. Ο μετασχηματιστής συνδέεται στα 11kV και τροφοδοτεί τα οικιακά φορτία στα 400V. Η διαμόρφωση του δικτύου μας είναι ακτινωτή, του οποίου η διαμόρφωση παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Επιπλέον, η διαμόρφωση δικτύου θα μπορούσε να έχει τη μορφή δακτυλίου (meshed), παρ' όλα αυτά το δίκτυο που μας παραδόθηκε δεν έχει αυτή τη δυνατότητα.

4.7.1 Μοντέλο διαμόρφωσης δικτύου

Για να εκτελεστεί ένας υπολογισμός ροής ισχύος, είναι αναγκαίο να παραχθεί μαθηματική αναπαράσταση του δικτύου με τη μορφή των ηλεκτρικών παραμέτρων του μετασχηματιστή και των γραμμών. Το χρησιμοποιούμενο μοντέλο είναι το ισοδύναμο π μοντέλο και επομένως κάθε

γραμμή αναπαριστάται με: την ηλεκτρική αντίσταση ως Ω/km , την επαγωγική αντίσταση ως mH/km χωρητική αντίσταση $\mu\text{F}/\text{km}$. Συνδυάζοντας αυτά με το μήκος της κάθε γραμμής, είναι εφικτή η πλήρης μοντελοποίηση του συστήματος μας. Ο μετασχηματιστής, όπως αναφέρθηκε έχει ονομαστική τιμή 630kVA και ρυθμίστηκε έτσι ώστε να παρέχει μία τάση στα 400V με δυνατότητα μιας μικρής αύξησης μέχρι και 3% , δηλαδή 412V ή 1.03 ανά μονάδα $p.u.$. Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι η τάση βρίσκεται εντός της επιτρεπτής ζώνης ($1p.u. \pm 0.1p.u.$). Επιπλέον, μια υψηλότερη τάση απαιτεί χαμηλότερο ρεύμα και συνεπώς μικρότερες απώλειες για την ίδια ισχύ.

4.7.2 Αρχικό φορτίο



Σχήμα 4.4: Τυπικά προφίλ ενεργού ισχύος αρχικού φορτίου για καθημερινές ανά μήνα, για το έτος 2016

Γνωρίζοντας ότι το φορτίο των ΗΑ θα προστεθεί στο ήδη υπάρχον δίκτυο διανομής, απαιτείται η γνώση του "αρχικού φορτίου". Στην αναφορά της Α.Η.Κ. [33] παρουσιάζονται τα δεδομένα των τυπικών προφίλ ενεργού ισχύος ανά μήνα για οικιακούς καταναλωτές, μέσω δείγματος από 68 έξυπνους μετρητές. Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζονται τα τυπικά προφίλ ενεργού ισχύος αρχικού φορτίου για τις εργάσιμες ημέρες ανά μήνα για το έτος 2016. Για να ελαχιστοποιήσουμε το χρόνο προσομοίωσης, επιλέξαμε το μήνα Αύγουστο λόγω του υψηλότερου αρχικού φορτίου στο δίκτυο. Το αρχικό φορτίο είναι πανομοιότυπο για όλα τα σενάρια και τις υλοποιήσεις σεναρίων.

4.8 Τοποθέτηση ΗΑ

Στην ενότητα αυτή καλύπτεται ο τρόπος τοποθέτησης των ΗΑ στο δίκτυο, πιο συγκεκριμένα σε πιο ζυγό τα επιπλέον φορτία θα συνδέονται. Θεωρείται ότι ένα ΗΑ πάντα επιστρέφει και φορτίζει στην ίδια θέση στο δίκτυο, συνεπώς η τοποθέτηση ΗΑ και των φορτιστών είναι πα- νομοιότυπη. Καθώς είναι δύσκολο να προβλέψουμε τους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες που πιθανόν να επηρεάσουν την τοποθέτηση ΗΑ στο δίκτυο, θεωρούμε ότι όλα τα σπίτια έχουν ίση πιθανότητα τοποθέτησης ΗΑ. Επομένως όλοι οι διαθέσιμοι ζυγοί στο δίκτυο έχουν $1/27$ πιθανότητα να τοποθετηθεί ΗΑ σε αυτούς. Να σημειωθεί πως εφόσον τοποθετηθεί ΗΑ σε έναν ζυγό, δεν μπορεί να τοποθετηθεί και δεύτερο ΗΑ στον ίδιο ζυγό. Αυτή η προσέγγιση παρουσιάζεται και στον Πίνακα 4.1 ως ομοιόμορφη κατανομή. Απαιτεί λιγότερες παραδοχές και δεν λαμβάνει υπόψη τους κοινωνικοοικονομικούς παράγοντες.

Κεφάλαιο 5

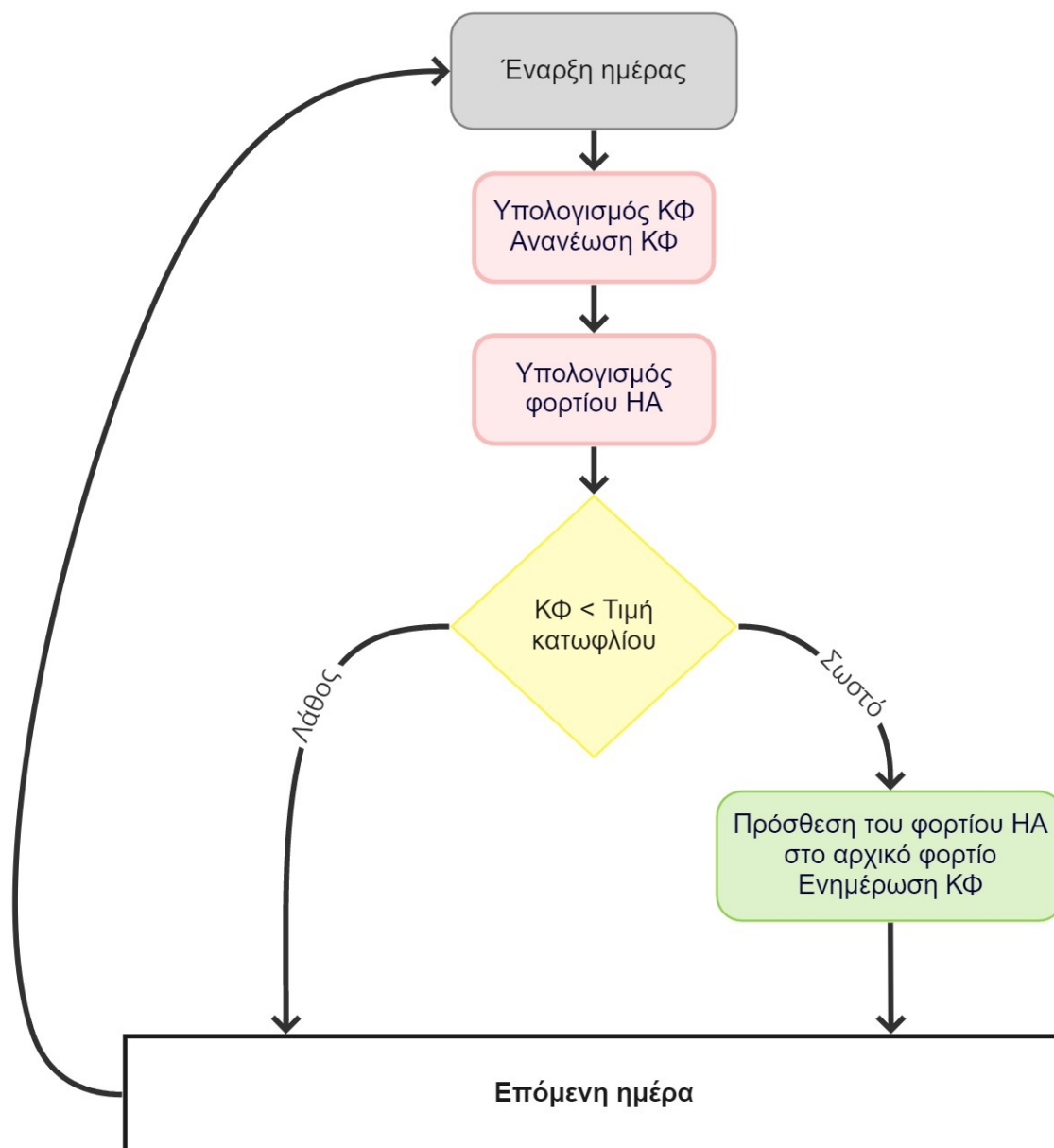
Προσομοίωση ροής ισχύος

Καθώς στο Κεφάλαιο 4 αναλύθηκαν οι διάφορες πτυχές μοντελοποίησης, στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η ενσωμάτωση τους στο πρόγραμμα προσομοίωσης ροής ισχύος ούτως ώστε να προσδιορίσουμε την επιρροή των φορτίων φόρτισης στο δίκτυο. Επίσης, παρουσιάζεται και η τεχνική προσομοίωσης Monte-Carlo καθώς και ο αλγόριθμος που θα ακολουθήσουμε ούτως ώστε να πραγματοποιήσουμε μια προσομοίωση ροής ισχύος.

5.1 Υπολογισμός φορτίου φόρτισης ΗΑ

Ο υπολογισμός φορτίου φόρτισης αποτελεί το κυριότερο μέρος της προσομοίωσης καθώς το φορτίο ΗΑ ενδέχεται να επηρεάσει σε μεγάλο βαθμό το αποτέλεσμα ροής ισχύος. Το λογικό διάγραμμα στο Σχήμα 5.1 απεικονίζει τη διαδικασία αυτή.

Αρχικά, επιλέγεται το κατώφλι στο οποίο εάν το ποσοστό μπαταρίας του ΗΑ πέσει κάτω από αυτό, θα συνδέεται για φόρτιση. Έπειτα, βάση του ΠΔ υπολογίζεται ο αριθμός των ΗΑ που θα προστεθούν στο δίκτυο και στη συνέχεια επιλέγονται οι ζυγοί που θα τοποθετηθούν. Επόμενο βήμα είναι η επιλογή τύπου ΗΑ, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 4, η επιλογή του ΗΑ θα γίνει τυχαία μέσω των 8 δημοφιλέστερων σε πωλήσεις ΗΑ. Από το βήμα αυτό επιλέγονται η κατανάλωση και το μέγεθος μπαταρίας που έχει το κάθε ΗΑ. Αφού επιλεγεί το είδος ΗΑ για κάθε όχημα, επιλέγεται ο φορτιστής με τον οποίο θα συνδέεται το όχημα στο δίκτυο. Στη συνέχεια, μέσω κατανομών πιθανότητας επιλέγονται η απόσταση που θα διανύει το όχημα καθημερινά καθώς και η ώρα άφιξης του οχήματος στο σπίτι. Για να ξεκινήσει προσομοίωση ροής ισχύος, πρέπει να υπολογιστεί η συνολική ενέργεια που κατανάλωσε το κάθε ΗΑ και στη συνέχεια ο χρόνος που χρειάζεται ώστε να φορτίσει πλήρως, ανάλογα και με την ισχύ του φορτιστή με τον οποίο θα συνδεθεί στο δίκτυο. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται κάθε αρχή μίας ημέρας ούτως ώστε να υπολογιστεί το ποσοστό της μπαταρίας που έχει απομείνει από την προηγούμενη ημέρα για να συγκριθεί με την τιμή κατωφλίου που έχει προσδιοριστεί. Εάν η ΚΦ έχει χαμηλότερη τιμή από αυτή την τιμή, τότε η μπαταρία του ΗΑ φορτίζεται πλήρως.



Σχήμα 5.1: Διάγραμμα υπολογισμού συνολικού φορτίου ΗΑ

5.2 Ανάλυση ροής ισχύος

Αυτή η ενότητα περιγράφει εν συντομία την ανάλυση ροής ισχύος και έχει ως βάση της το δωρεάν πακέτο MATPOWER [39].

Εφαρμόζοντας τον Νόμο των ρευμάτων του Kirchhoff σε κάθε ζυγό, η ανάλυση ροής ισχύος μπορεί να εκφραστεί ως ένα άθροισμα μιγαδικών ρευμάτων. Ο νόμος αυτός, στηρίζεται στην Αρχή διατήρησης της ενέργειας, όπου ζήτηση και παραγωγή σε ένα σύστημα, πρέπει να ισούνται. Με τη διαμόρφωση του ισοζυγίου ρευμάτων σε κάθε ζυγό, είναι δυνατή η δημιουργία ενός συστήματος από εξισώσεις. Σε ένα τέτοιο σύστημα, εισάγονται συνδετικά στοιχεία (γραμμές και μετασχηματιστές) για τη διασύνδεση των διαφόρων ζυγών, τα οποία λαμβάνουν υπόψη και τις απώλειες που σημειώνονται. Το προκύπτον σύστημα εξισώσεων παρουσιάζεται συνήθως με τη μορφή:

$$\mathbf{I}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus}\mathbf{V} \quad (5.1)$$

όπου: \mathbf{I}_{bus} είναι το διάνυσμα μιγαδικών ρευμάτων που εισέρχεται σε κάθε ζυγό, \mathbf{Y}_{bus} είναι η μήτρα αγωγιμοτήτων και \mathbf{V} το διάνυσμα μιγαδικής τάσης του κάθε ζυγού. Για να επιλύσουμε αυτό το σύστημα, χωρίζουμε τις εξισώσεις σε πραγματικό (ενεργός ισχύς) και φανταστικό (άεργος ισχύς) μέρος, όπου σε κάθε ζυγό έχουμε τις τέσσερις παρακάτω μεταβλητές:

- 1) V_m : ενεργός τιμή τάσης
- 2) θ : γωνία τάσης
- 3) P_g : Ενεργός ισχύ που εισέρχεται στο ζυγό
- 4) Q_g : Άεργος ισχύ που εισέρχεται στο ζυγό

Οι ζυγοί στο δίκτυο χωρίζονται στις τρεις παρακάτω κατηγορίες:

- 1) Ζυγός φορτίου (PQ bus) - Συνήθως χρησιμοποιείται για ζυγούς με φορτία χωρίς έλεγχο τάσης. Η ενεργός και άεργος ισχύς είναι γνωστοί ενώ το πλάτος και η γωνία τάσης οι άγνωστοι.
- 2) Ζυγός παραγωγής (PV bus) - Ζυγοί με συνδεδεμένη γεννήτρια για έλεγχο τάσης. Η ενεργός ισχύς και το πλάτος τάσης είναι γνωστά ενώ η άεργος ισχύς και η γωνία τάσης οι άγνωστοι.
- 3) Ζυγός αναφοράς (slack bus) - Ο ζυγός όπου είναι ενωμένη η γεννήτρια στην πλευρά υψηλή τάσης του μετασχηματιστή. Το πλάτος και η γωνία τάσης είναι γνωστοί.

Είναι αναγκαία η επιλογή 'slack bus' όπου θα δίνεται το πλάτος και η γωνία της τάσης ενώ η ενεργός και άεργος ισχύς θα είναι οι μεταβλητές που θα πρέπει να υπολογιστούν. Ο ζυγός που επιλέγεται ως 'slack bus' είναι συνδεδεμένος στην πλευρά υψηλής τάσης του μετασχηματιστή. Όλοι οι υπόλοιποι ζυγοί του δικτύου είναι PQ. Το σύστημα που προκύπτει είναι μη-γραμμικό και για την επίλυση του χρησιμοποιείται μια επαναλαμβανόμενη μέθοδος. Ο προεπιλεγμένος αλγόριθμος που εφαρμόζεται από το MATPOWER είναι ο Newton-Raphson, ο οποίος είναι και ο αλγόριθμος που θα χρησιμοποιήσουμε σε αυτή την εργασία.

5.3 MATPOWER

Η λύση των προβλημάτων ροής ισχύος σε αυτή την εργασία γίνεται με το πακέτο MATPOWER του λογισμικού MATLAB. Είναι ένα εξαιρετικά προσαρμόσιμο εργαλείο με πολύ μεγάλη απόδοση. Η απαιτούμενη είσοδος είναι ένα αρχείο MATLAB το οποίο περιλαμβάνει τους πίνακες για τους ζυγούς, τις διακλαδώσεις (γραμμές μεταφοράς-μετασχηματιστές) και τις γεννήτριες. Αυτή η δομή αναφέρεται ως 'case file' και μαζί με τις επιλογές ροής ισχύος είναι έτοιμο για επίλυση.

Για όλους του ζυγούς, το πλάτος και η γωνία τάσης καθώς και η ενεργός και άεργος ισχύς αποθηκεύονται σε ένα πίνακα στο MATLAB. Ανάλογα με την κατηγορία ζυγού (PQ, PV, slack), οι γνωστές μεταβλητές καθορίζονται από την αρχή ενώ οι άγνωστες συμπληρώνονται κατά τη διαδικασία επίλυσης ροής ισχύος. Ανάλογη είναι και η περίπτωση ρύθμισης του πίνακα για τις διακλαδώσεις (branches). Ο πίνακας αυτός περιλαμβάνει παραμέτρους γραμμής και μετασχηματιστή, δηλαδή την ωμική αντίσταση, την επαγωγική και τη χωρητική αντίδραση, την ονομαστική τιμή ισχύος καθώς και τον αριθμό περιελίξεων (ισούται με 0 για τις γραμμές). Αφού γίνει σωστή διευθέτηση των δεδομένων σε ένα αρχείο "case", έπειτα δημιουργούμε ένα αρχείο MATLAB όπου αρχικά φορτώνεται το αρχείο 'case' και στη συνέχεια για τον υπολογισμό φορτίου φόρτισης ακολουθείται ο αλγόριθμος που περιγράφεται στην Ενότητα 5.1.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ένα αρχείο "case" στο MATPOWER αντιπροσωπεύει μία στατική κατάσταση δικτύου. Συνεπώς, για να προσομοιώσουμε πολλαπλά χρονικά βήματα (π.χ. μία ολόκληρη ημέρα), η διάρκεια μας χωρίζεται σε διαστήματα 30 λεπτών και για κάθε βήμα υπολογίζεται ξεχωριστός υπολογισμός ροής ισχύος.

5.4 Προσομοίωση Monte-Carlo

Οι προηγούμενες ενότητες περιέγραψαν τον υπολογισμό φορτίου φόρτισης και την ανάλυση ροής ισχύος, ωστόσο η μοντελοποίηση ΗΑ, βασίζεται εν μέρη σε κατανομές πιθανότητας. Δημιουργώντας ένα προκαθορισμένο αριθμό δειγμάτων N (υλοποιήσεις σεναρίων) το πρόβλημα μπορεί να διαχωριστεί σε επιλύσιμα υπό-προβλήματα. Τα αποτελέσματα της υλοποίησης μπορούν να αναλυθούν στατιστικά και να συνοψιστούν ούτως ώστε να δώσουν μία γενικότερη εικόνα σε μορφή πιθανοτικής κατανομής όπως μία αναμενόμενη τιμή και μία τυπική απόκλιση. Αυτά τα αποτελέσματα μπορεί να προέρχονται από τις ροές φορτίου, π.χ. φορτίο γραμμής ή φορτίο μετασχηματιστή. Ο αριθμός των πιθανών σεναρίων υλοποίησης είναι πολύ μεγάλος για να προσομοιώσει όλα τα πιθανά σεναρία, επομένως χρησιμοποιούμε ένα τυχαίο υποσύνολο των σεναρίων υλοποίησης. Οι προσομοιώσεις Monte-Carlo χρησιμοποιούν ένα τέτοιο υποσύνολο, όπου η αναμενόμενη τιμή και η τυπική απόκλιση που προκύπτουν από αυτό, συγκλίνουν προς τις θεωρητικές τιμές με ρυθμό $\frac{1}{\sqrt{N}}$. Παρακάτω περιγράφεται η μαθηματική προσέγγιση για τη μέθοδο καθώς και πως καθορίζεται ο απαραίτητος αριθμός υλοποιήσεων.

5.4.1 Νόμος των μεγάλων αριθμών

Ο Νόμος των μεγάλων αριθμών είναι ένα θεώρημα το οποίο περιγράφει το αποτέλεσμα της

εκτέλεσης του ίδιου πειράματος επανειλημμένα, επιτρέποντας τη χρήση των μεθόδων Monte-Carlo. Θεωρώντας N ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές X_1, X_2, \dots, X_N οι οποίες ακολουθούν την ίδια κατανομή και $E(X_i) = \mu$, επομένως για ένα αρκετά μικρό θετικό αριθμό ϵ

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P \left[\left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N X_n - \mu \right| < \epsilon \right] = 1.0 \quad (5.2)$$

Ο Νόμος των μεγάλων αριθμών δείχνει ότι όταν το N είναι πολύ μεγάλο, ο αριθμητικός μέσος όρος μίας ομάδας τυχαίων μεταβλητών πλησιάζει την αναμενόμενη τιμή με πολύ μεγάλη πιθανότητα.

5.4.2 Το κεντρικό οριακό θεώρημα

Το κεντρικό οριακό θεώρημα δηλώνει ότι για ανεξάρτητες τυχαίες μεταβλητές οι οποίες ακολουθούν την ίδια κατανομή $X_n, n \in [1, 2, \dots, N]$ και $E(X_n) = \mu, V(X_n) = \sigma^2$, τότε

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P \left[\frac{\left| \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (X_n - \mu) \right|}{\frac{\sigma}{\sqrt{N}}} \leq x \right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt \quad (5.3)$$

Το θεώρημα αυτό υποδεικνύει ότι όταν το N είναι αρκετά μεγάλο, τότε ο αριθμητικός μέσος όρος ακολουθεί κατά προσέγγιση κανονική κατανομή. Εάν το αποτέλεσμα της κάθε μεταβλητής X_n είναι ομοιόμορφα μικρό, το κεντρικό οριακό θεώρημα ισχύει ακόμη και αν αυτές οι τυχαίες μεταβλητές δεν ακολουθούν την ίδια κατανομή [52].

5.4.3 Εκτίμηση παραμέτρων

Ο υπολογισμός ενός δείκτη αξιοπιστίας χρησιμοποιώντας τη μέθοδο Monte-Carlo, είναι ένα πρόβλημα εκτίμησης παραμέτρων. Σε ένα σύνολο υλοποιήσεων σεναρίων \mathcal{Y} κάθε υλοποίηση σεναρίου v_i

$$v_1, v_2, \dots, v_N \in \mathcal{Y} \quad (5.4)$$

οδηγεί σε μία υλοποίηση μέτρησης $\tau_i \in T$, με T να ορίζεται το σύνολο των μετρήσεων υλοποίησης, όπου η καθεμία μέτρηση αντιπροσωπεύεται από ένα και μόνο ένα αριθμό

$$\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_N \in T \quad (5.5)$$

που ακολούθως αποτελούν τη βάση για την εκτίμηση της δειγματικής μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης. Η μέση τιμή καθορίζεται ως

$$\bar{\mu}_T = \frac{1}{N} \sum_{\tau_i \in T} \tau_i \quad (5.6)$$

και η τυπική απόκλιση ως

$$\bar{\sigma}_T = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{\tau_i \in T} (\tau_i - \bar{\mu}_T)^2} \quad (5.7)$$

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων δεν ακολουθούν πάντα την κανονική κατανομή. Ένας από τους απλούστερους τρόπους ελέγχου κανονικότητας μιας κατανομής είναι ο έλεγχος Jarque-Bera (JB). Η μέθοδος Jarque-Bera ελέγχει κατά πόσο η ασυμμετρία και η κύρτωση του δείγματος ταιριάζουν με μία κανονική κατανομή. Η ασυμμετρία (S) και η κύρτωση (K) δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις

$$S = \frac{\frac{1}{N} \sum_{\tau_i \in T} (\tau_i - \bar{\mu}_T)^3}{\bar{\sigma}_T^3} \quad (5.8)$$

$$K = \frac{\frac{1}{N} \sum_{\tau_i \in T} (\tau_i - \bar{\mu}_T)^4}{\bar{\sigma}_T^4} \quad (5.9)$$

Για να θεωρείται ότι οι τιμές των αποτελεσμάτων ακολουθούν την κανονική κατανομή, πρέπει ιδανικά η ασυμμετρία να έχει την τιμή 0 και η κύρτωση την τιμή 3. Ωστόσο, για μη ιδανικές συνθήκες μπορούμε να εφαρμόσουμε τη στατιστική Jarque-Bera ούτως ώστε να βρούμε τον βαθμό ομοιότητας.

$$JB = \frac{N}{6} \left(S^2 + \frac{1}{4}(K-3)^2 \right) \quad (5.10)$$

Εάν η τιμή JB είναι μικρότερη από 6 τότε η υπόθεση ότι υπάρχει μια κανονικά κατανεμημένη μεταβλητή, είναι αποδεκτή με βαθμό σιγουριάς (confidence level) 95%. Για όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις όπου η υπόθεση δεν ισχύει, η ανάλυση χρήζει ιδιαίτερης προσοχής και η ασυμμετρία και η κύρτωση είναι χρήσιμοι δείκτες για την κατανομή.

5.4.4 Χαρακτηριστικά σύγκλισης (convergence) της μεθόδου Monte-Carlo

Διαδικασία σύγκλισης

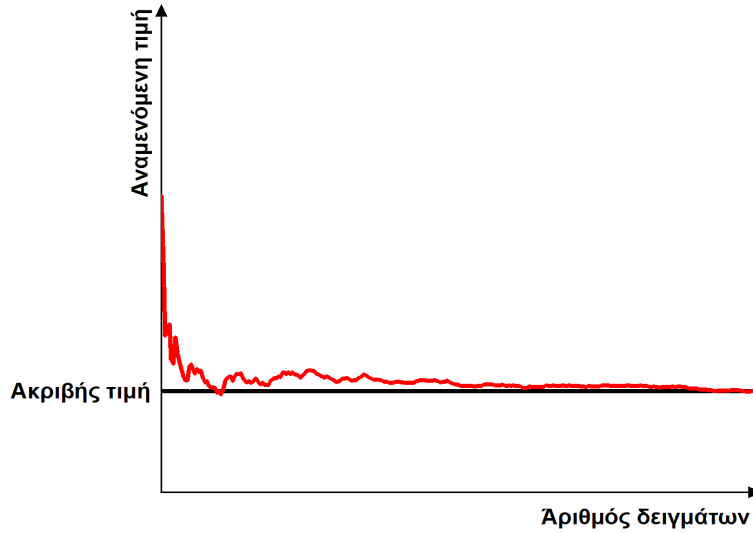
Η προσομοίωση Monte-Carlo δημιουργεί μία διαδικασία κυμαινόμενης σύγκλισης η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2. Δεν υπάρχει καμία βεβαιότητα ότι περισσότερα δείγματα θα οδηγήσουν σίγουρα σε μικρότερο σφάλμα. Παρ' όλα αυτά, με την αύξηση των δειγμάτων ισχύει ότι το όριο σφάλματος ή το εύρος εμπιστοσύνης μειώνεται αισθητά.

Ακρίβεια σύγκλισης

Η τυπική απόκλιση της εκτίμησης μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\sigma^2}}{\sqrt{N}} \quad (5.11)$$

Αυτό αποδεικνύει ότι δύο μετρήσεις μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση της τυπικής απόκλισης σε μία προσομοίωση Monte-Carlo, είτε η μείωση της διακύμανσης του δείγματος είτε η αύξηση του αριθμού δειγμάτων. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας τεχνικές βελτίωσης της διακύμανσης, η τιμή της δεν μπορεί να μειωθεί στο μηδέν και ως εκ τούτου είναι απαραίτητο να χρησιμοποιείται ένας αρκετά μεγάλος αριθμός δειγμάτων.



Σχήμα 5.2: Διαδικασία σύγκλισης σε προσομοίωση Monte-Carlo

Κριτήρια σύγκλισης

Το επίπεδο ακρίβειας της προσομοίωσης Monte-Carlo μπορεί να εκφραστεί από το συντελεστή διακύμανσης, ο οποίος ορίζεται ως

$$\text{συντελεστής διακύμανσης } (\Sigma\Delta) = \frac{\bar{\sigma}_T}{\bar{\mu}_T} \quad (5.12)$$

με το A να χαρακτηρίζει το συντελεστή ακρίβειας. Ο συντελεστής διακύμανσης συχνά χρησιμοποιείται ως κριτήριο σύγκλισης στις προσομοιώσεις Monte-Carlo. Επομένως, ο συντελεστής διακύμανσης θα πρέπει να διασφαλίζει μία λογική ακρίβεια σε μια μελέτη πολλαπλών μετρήσεων.

Στην αρχή της υπό-ενότητας, υποθέσαμε ότι ακολουθούμε κανονική κατανομή χρησιμοποιώντας το κεντρικό οριακό θεώρημα. Για να ακολουθηθεί κανονική κατανομή, πρέπει να είναι γνωστή η τιμή της διακύμανσης, παρ' όλα αυτά, στη δική μας εργασία η διακύμανση δεν είναι γνωστή και θα πρέπει να εκτιμηθεί. Η σημασία της διακύμανσης είναι στον προσδιορισμό της μεταβλητότητας της μέσης τιμής του δείγματος. Αυτή η επιπλέον μεταβλητότητα αυξάνει το μέγεθος του διαστήματος εμπιστοσύνης (confidence interval). Συνεπώς, χρησιμοποιούμε μια κατανομή η οποία ονομάζεται κατανομή t-Student, και είναι παρόμοια με μια κανονική κατανομή με τη μόνη διαφορά να είναι μία ελαφρώς μεγαλύτερη διακύμανση. Για να δημιουργήσουμε διαστήματα εμπιστοσύνης χρειαζόμαστε τις τιμές που σχετίζονται με την κατανομή t-Student οι οποίες ορίζονται με τον ίδιο τρόπο όπως ορίζονται οι τιμές z σε μία κανονική κατανομή.

Σύμφωνα με την υπόθεση κανονικά κατανευμένων δεδομένων και άγνωστη διακύμανσης, το διάστημα εμπιστοσύνης $1 - \alpha$ για το μέσο όρο ορίζεται ως

$$\left(\bar{\mu}_T - t_{(n-1, \alpha/2)} \frac{\bar{\sigma}_T}{\sqrt{N}}, \bar{\mu}_T + t_{(n-1, \alpha/2)} \frac{\bar{\sigma}_T}{\sqrt{N}} \right) \quad (5.13)$$

όπου N ο αριθμός των υλοποιήσεων σεναρίων, $\bar{\mu}_T$ και $\bar{\sigma}_T$ είναι ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση δείγματος χρησιμοποιώντας τις υλοποιήσεις σεναρίου N , και $t_{(n-1, \alpha/2)}$ είναι μια συγκεκριμένη τιμή με βάση την κατανομή t-Student με το t να εξαρτάται από την απαίτηση εμπιστοσύνης. Συνεπώς

$$F_N(t) = P\left(\bar{\mu}_T - t_{(n-1, \alpha/2)} \frac{\bar{\sigma}_T}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq \bar{\mu}_T + t_{(n-1, \alpha/2)} \frac{\bar{\sigma}_T}{\sqrt{N}}\right) \quad (5.14)$$

Αντικαθιστώντας με το $\Sigma\Delta$ έχουμε

$$F_N(t) = P\left(\bar{\mu}_T - t_{(n-1, \alpha/2)} \frac{\Sigma\Delta * \bar{\mu}_T}{\sqrt{N}} \leq \mu \leq \bar{\mu}_T + t_{(n-1, \alpha/2)} \frac{\Sigma\Delta * \bar{\mu}_T}{\sqrt{N}}\right) \quad (5.15)$$

$$F_N(t) = P\left(-t_{(n-1, \alpha/2)} \frac{\Sigma\Delta * \bar{\mu}_T}{\sqrt{N}} \leq \frac{\mu - \bar{\mu}_T}{\bar{\mu}_T} \leq t_{(n-1, \alpha/2)} \frac{\Sigma\Delta * \bar{\mu}_T}{\sqrt{N}}\right)$$

Το σχετικό σφάλμα δ της μέσης τιμής για 300 υλοποιήσεις ($N = 300$) και για 95% διάστημα εμπιστοσύνης με $\alpha = 0.05$ το $t = 1.968$ ακολουθεί την παρακάτω σχέση με τον αντίστοιχο $\Sigma\Delta$

$$\begin{aligned} \delta_\mu &= \left| 1 - \frac{\mu}{\bar{\mu}_T} \right| \leq \frac{1.986 * \Sigma\Delta}{\sqrt{300}} \\ &= \left| 1 - \frac{\mu}{\bar{\mu}_T} \right| \leq 0.1136 * \Sigma\Delta \end{aligned} \quad (5.16)$$

Αν $\Sigma\Delta \leq 0.3$, το σχετικό σφάλμα της εκτιμώμενης μέσης τιμής είναι εντός του 3.41%. Το όριο αυτό για το $\Sigma\Delta$ επιλέγεται και ως κριτήριο σύγκλισης που μπορεί να επιτευχθεί με σχετικά μικρό αριθμό υλοποιήσεων, και ταυτοχρόνως να αποδώσει μικρά διαστήματα εμπιστοσύνης ούτως ώστε να μπορούν να βρεθούν σημαντικές διαφορές στις εκτιμώμενες παραμέτρους σεναρίων. Στην εργασία μας, επιλέχθηκαν $N = 300$ υλοποιήσεις σεναρίων ως ο προεπιλεγμένος αριθμός σεναρίων. Στην Ενότητα 6.5 παρέχονται οι πληροφορίες σχετικά με τα επιτευχθέντα επίπεδα του Συντελεστή Διακύμανσης.

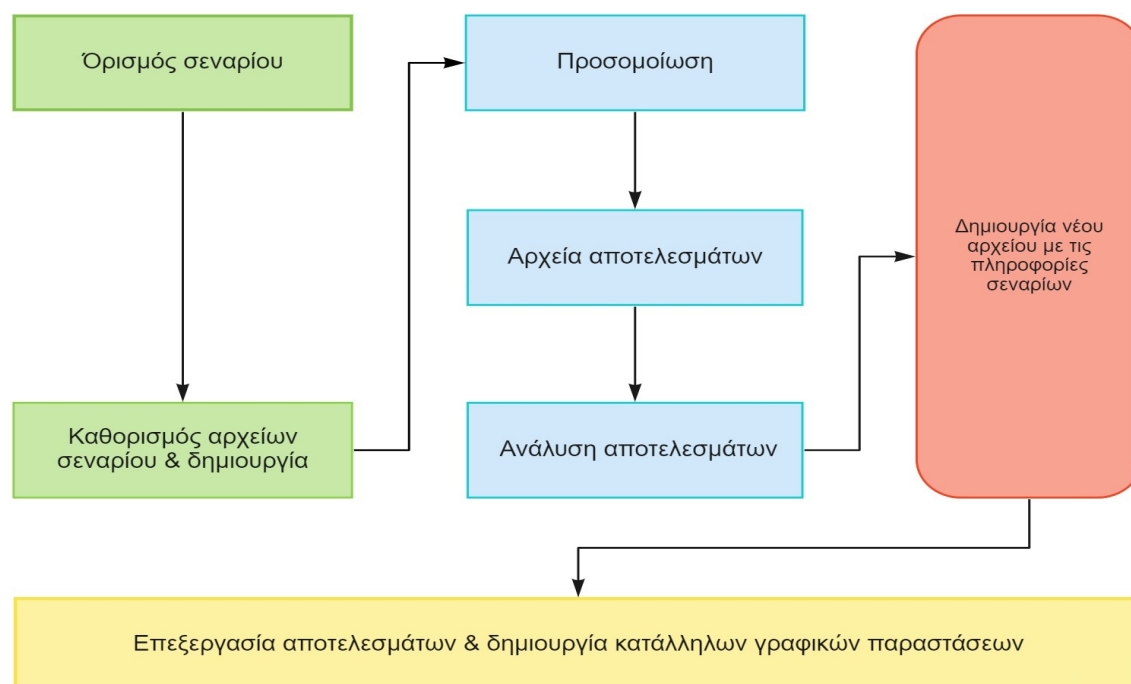
5.5 Δομή προσομοιώσεων

Η πολυπλοκότητα της διαδικασίας για τη ρύθμιση και προσομοίωση των ενοτήτων που περιγράφηκαν προηγουμένως καθώς και η επεξεργασία των δεδομένων απαιτεί μια σαφή δομή. Συνεπώς, η δομή προσομοίωσης χωρίζει τη διαδικασία σε στάδια, επιτρέποντας μια πιο αποτελεσματική και ευέλικτη ροή. Τα στάδια παρουσιάζονται στο Σχήμα 5.3.

Αρχικά, ορίζουμε όλα τα σενάρια τα οποία θα πραγματοποιηθούν που περιέχουν τους κατάλληλους συνδυασμούς μοντέλων παραμέτρων. Έπειτα, καθορίζονται και δημιουργούνται τα αρχεία σεναρίων με τους συνδυασμούς μοντέλων παραμέτρων που επιλέξαμε. Με τη δημιουργία των κατάλληλων αρχείων για τα σενάρια, είναι πλέον εφικτή η αναπαραγωγή των αποτελεσμάτων από τις υλοποιήσεις σεναρίων. Δημιουργούμε ξεχωριστά αρχεία για το κάθε σενάριο μεταβάλλοντας τα μοντέλα παραμέτρων που χρειαζόμαστε. Η συνάρτηση προσομοίωσης είναι ένα αρχείο MATLAB, το οποίο προσομοιώνει όλες τις υλοποιήσεις σεναρίου αποθηκεύοντας

τις σχετικές τιμές για κάθε υλοποίηση.

Μετά την αποθήκευση των αποτελεσμάτων, εφαρμόζονται μέθοδοι ανάλυσης αξιολογώντας τα αποτελέσματα σε σχέση με συγκεκριμένες μετρήσεις, για παράδειγμα η εύρεση μέγιστης τιμής φόρτισης μετασχηματιστή για μια υλοποίηση σεναρίου. Τελευταίο βήμα, αφού έχει δημιουργηθεί αρχείο με τις πληροφορίες των σεναρίων, είναι η παρουσίαση αποτελεσμάτων με τη χρήση λογισμικού Origin [34] σε μορφή γραφικών παραστάσεων για να γίνει η σύγκριση τους. Χρησιμοποιώντας αυτήν τη μεθοδολογία, αν υπάρχει ανάγκη για ανάλυση μιας διαφορετικής μέτρησης, το σενάριο με βάση το αρχείο που δημιουργήθηκε θα μπορούσε να προσομοιωθεί ξανά. Με την ολοκλήρωση της ανάλυσης μετρήσεων των υλοποιήσεων σεναρίων πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση των δεδομένων για τη σύγκλιση Monte-Carlo όπως περιγράφηκε στην Ενότητα 5.4.



Σχήμα 5.3: Στάδια της δομής προσομοίωσης

Κεφάλαιο 6

Ανάλυση ευαισθησίας για τις διάφορες παραμέτρους και τα μοντέλα

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης αναλύοντας τις μετρήσεις καθώς και την επιρροή των διαφόρων μοντέλων σε αυτά, έτσι ώστε να διαπιστώσουμε τις ‘αδυναμίες’ του δικτύου.

6.1 Επιλογή σεναρίου

Στο Κεφ.4 προτάθηκαν τα μοντέλα παραμέτρων για κάθε διάσταση παραμέτρου. Για να επιτευχθεί μία ολοκληρωμένη ανάλυση όλων των συνδυασμών, πρέπει να γίνει προσομοίωση ενός σημαντικού αριθμού σεναρίων. Παρ’ όλα αυτά, ο απαιτούμενος χώρος αποθήκευσης και ο συνολικός χρόνος προσομοίωσης, καθιστούν την ανάλυση αυτή σχεδόν αδύνατη. Το τελευταίο, θεωρείται και το πιο σοβαρό από τα δύο προβλήματα. Εάν όλα τα προτεινόμενα μοντέλα προσομοιωθούν, ο αριθμός των σεναρίων καθορίζεται από το συνδυασμό των μοντέλων παραμέτρων, ένα για κάθε διάσταση παραμέτρου. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα αυτά με βάση και τον Πίνακα 6.1 (προστέθηκε δεύτερη φορά για διευκόλυνση):

- 1 μοντέλο μοτίβου οδήγησης
- 2 μοντέλα τύπων ΗΑ
- 2 μοντέλα συμπεριφοράς φόρτισης
- 4 μοντέλα τύπων φορτιστή
- 4 μοντέλα ποσοστών διείσδυσης
- 1 μοντέλο διαμόρφωσης δικτύου
- 1 μοντέλο τοποθέτησης ΗΑ

Για να ελαχιστοποιήσουμε τον αριθμό σεναρίων, θα προσομοιώσουμε το προκαθορισμένο σενάριο (Πίνακα 6.1 - Στήλη 2) και στη συνέχεια θα μεταβάλουμε ένα μοντέλο ανά προσομοίωση. Στην επόμενη υπό-ενότητα περιγράφεται αναλυτικά αυτή η διαδικασία.

Πίνακας 6.1: Επισκόπηση για τα μεγέθη μοντελοποίησης και τα μοντέλα των ΗΑ.

Διάσταση	Προκαθορισμένο μοντέλο	Επιπλέον μοντέλα	Ακρώνυμο
Μοτίβο οδήγησης (Ενότητα 4.2)	Δεδομένα από ερωτηματολόγιο	—	—
Τύπος ΗΑ (Ενότητα 4.3)	Βάση πωλήσεων	Βάση Κατανάλωσης ΗΑ: Χαμηλή-Μέτρια-Ψηλή	BK
Συμπεριφορά φόρτισης (Ενότητα 4.4)	Καθημερινή φόρτιση	Ομοιόμορφο όριο κατωφλίου	OOK
Τύπος φορτιστή (Ενότητα 4.5)	33% 3.7kW, 67% 7.4kW	33% 3.7kW, 7.4kW, 11kW 33% 7.4kW, 67% 11kW 100% 11kW	Φ1 Φ2 Φ3
Ποσοστό διείσδυσης ΗΑ (Ενότητα 4.6)	20%	40% 60% 80%	ΠΔ1 ΠΔ2 ΠΔ3
Διαμόρφωση δικτύου (Ενότητα 4.7)	Ακτινωτό	—	—
Τοποθέτηση ΗΑ (Ενότητα 4.8)	Ομοιόμορφη κατανομή	—	—

6.2 Μεταβολή μονής διάστασης

Όπως προαναφέρθηκε, για τον εντοπισμό των ευαίσθητων σημείων, θα αναλύσουμε ένα σύνολο σεναρίων για τη λήψη μεταγενέστερων αποφάσεων. Η δημιουργία αυτών των σεναρίων, υλοποιείται αρχικά με το προκαθορισμένο σενάριο, και στη συνέχεια μεταβάλλοντας μία παράμετρο από μία διάσταση για κάθε προσομοίωση. Η επιλογή των παραμέτρων του προκαθορισμένου σεναρίου, στηρίζεται κυρίως σε μοντέλα κοντινότερα προς την πραγματικότητα. Αυτό οδήγησε στην επιλογή των παρακάτω παραμέτρων:

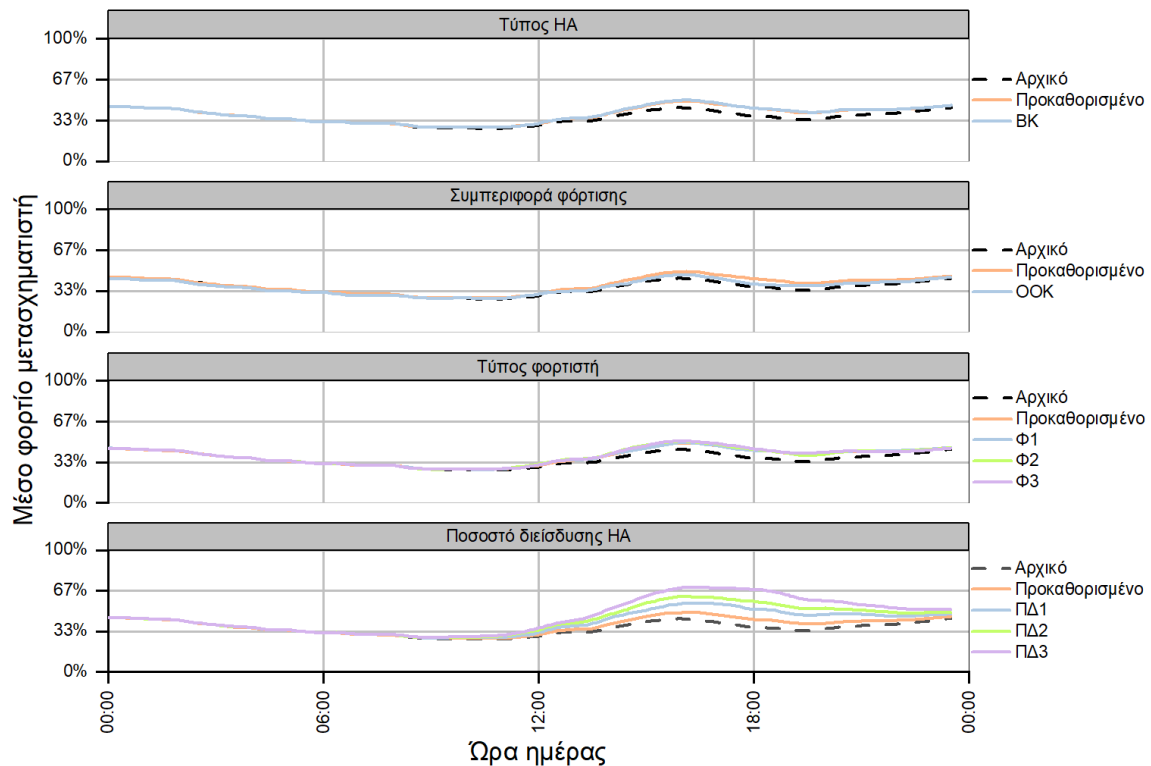
- Δεδομένα από ερωτηματολόγιο
- Βάση πωλήσεων
- Καθημερινή φόρτιση
- Φορτιστές 33% 3.7kW και 67% 7.4kW
- ΠΔ 20%
- Ακτινωτό δίκτυο
- Ομοιόμορφη κατανομή ΗΑ

6.2.1 Φορτίο μετασχηματιστή

Δεδομένου ότι ο μετασχηματιστής τροφοδοτεί το δίκτυο χαμηλής τάσης, η φόρτιση του αντιπροσωπεύει όλα τα φορτία του δικτύου (αρχικό φορτίο, φορτία ΗΑ) καθώς και τις απώλειες του δικτύου σε κάθε χρονική στιγμή. Επομένως, ο μετασχηματιστής θα φορτώνεται με το

άθροισμα όλων των φορτίων από όλα τα στοιχεία του δικτύου. Αυτό τον καθιστά ένα από πιο τα ευάλωτα στοιχεία στο δίκτυο. Το Σχήμα 6.1 παρουσιάζει το μέσο όρο φορτίου του μετασχηματιστή για τις 300 υλοποιήσεις σεναρίου ανά 30 λεπτά, για τα μοντέλα που έχουν προσομοιωθεί. Όλα τα προσομοιωμένα μοντέλα αναφέρονται σε εργάσιμες ημέρες, εκτός από το μοντέλο του ΟΟΚ το οποίο περιλαμβάνει εργάσιμες και μη-εργάσιμες ημέρες, αναλύει δηλαδή μία ολόκληρη εβδομάδα.

Το επιπλέον φορτίο που προστίθεται από τα ΗΑ μετατοπίζει την καμπύλη φορτίου συνολικά προς τα πάνω. Βάση των προφίλ οδήγησης τα περισσότερα ΗΑ προστέθηκαν για φόρτιση κατά τις ώρες με υψηλή ζήτηση. Επίσης, βάση του Σχήματος 6.1, παρατηρείται ότι περισσότερη επιρροή στο μετασχηματιστή παρουσιάζει το ΠΔ ΗΑ, δηλαδή ο αριθμός των συνολικών ΗΑ που θα προστεθούν στο δίκτυο. Εκτός από τον αριθμό των ΗΑ, αύξηση προκαλεί και ο τύπος φορτιστή που χρησιμοποιείται, με τη μεγαλύτερη επιρροή να προκαλείται από τη χρήση του μοντέλου όπου υπάρχουν μόνο φορτιστές ισχύς 11kW.

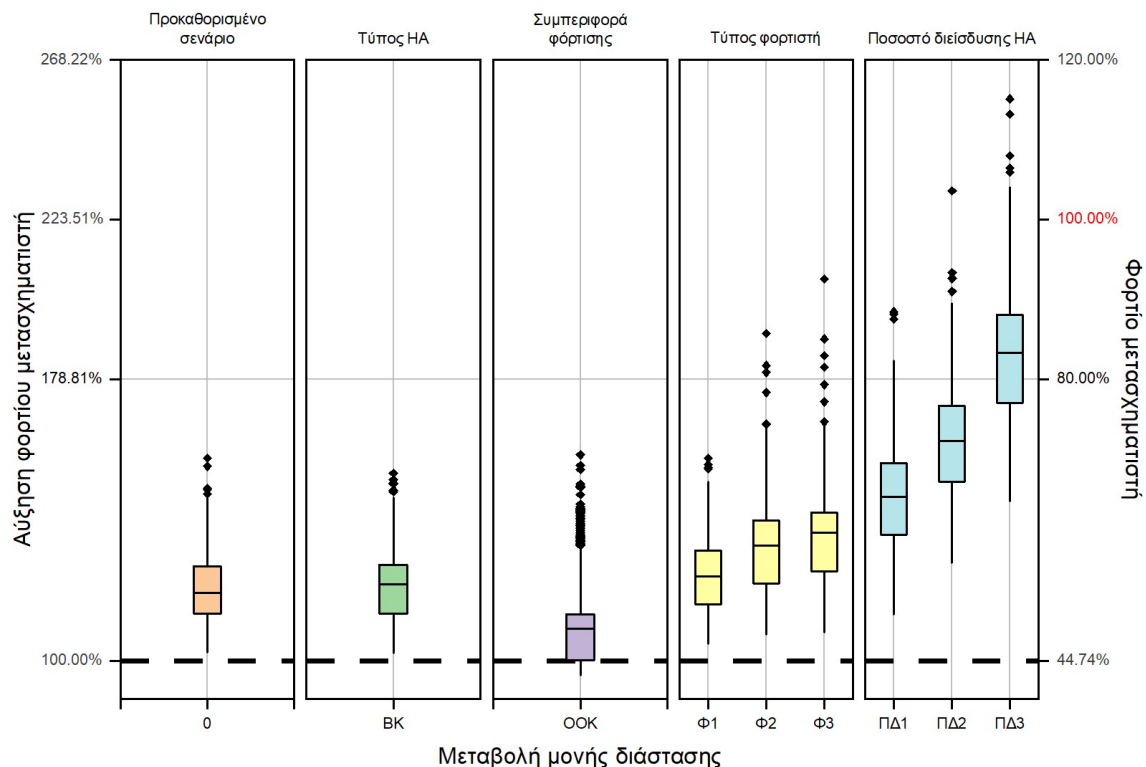


Σχήμα 6.1: Μεταβολή της καμπύλης μέσου φορτίου μετασχηματιστή για τη μεταβολή μονής διάστασης

Μέγιστο φορτίο μετασχηματιστή

Το Σχήμα 6.2 απεικονίζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μεταβάλλοντας μία μόνο διάσταση σε σχέση με την προκαθορισμένη περίπτωση για να ενισχύσουν τη διαίσθηση της επιρροής κάθε διάστασης. Η συντομογραφία που χρησιμοποιήθηκε μπορεί να βρεθεί στον Πίνακα 6.1. Η αύξηση φορτίου του μετασχηματιστή σε σχέση με το αρχικό φορτίο υποδεικνύεται στον αριστερό άξονα-Υ και το συνολικό του φορτίο στο δεξιό άξονα, ενώ η μαύρη

διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει το μέγιστο φορτίο μετασχηματιστή χωρίς την πρόσθεση ΗΑ (αρχικό φορτίο). Τα θηκογράμματα (1.5 IQR) αντιπροσωπεύουν την κατανομή των $N=300$ υλοποιήσεων σεναρίων. Οι τιμές που απεικονίζονται στο Σχήμα 6.2 αντιπροσωπεύουν τη μέγιστη τιμή κάθε υλοποίησης σεναρίου.



Σχήμα 6.2: Επιρροή των μεταβολών μονής διάστασης στο μέγιστο φορτίο μετασχηματιστή σε σχέση με το φορτίο χωρίς την πρόσθεση ΗΑ στον αριστερό κάθετο άξονα και με το συνολικό φορτίο στο δεξιό κάθετο άξονα

Αρχίζοντας με το προκαθορισμένο σενάριο, παρατηρούμε μια σημαντική αύξηση στο φορτίο του μετασχηματιστή η οποία ήταν αναμενόμενη. Συγκεκριμένα, η μέση τιμή του αυξήθηκε από 44.74% που ήταν η τιμή με το αρχικό φορτίο, σε 58.51% και με τη μέγιστη τιμή του είναι 78.18%. Το προκαθορισμένο σενάριο δεν προκαλεί υπερφόρτωση στο μετασχηματιστή, παρ' όλα αυτά, ακόμη και με μικρής ισχύς φορτιστές και χαμηλό ΠΔ ΗΑ, προκαλείται αισθητή αύξηση της φόρτισης του μετασχηματιστή. Το μοντέλο BK παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το προκαθορισμένο σενάριο καθώς η κατανάλωση ΗΑ που αναλύθηκε στο μοντέλο BK επιλέχθηκε ως αντιπροσωπευτική για μεγάλο εύρος τύπων ΗΑ.

Παρατηρώντας το μοντέλο OOK, η μέση τιμή σε σύγκριση με το προκαθορισμένο σενάριο μειώθηκε, ενώ οι μέγιστες τιμές παρέμειναν περίπου στα ίδια επίπεδα. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς δεν διεξαγόταν καθημερινή φόρτιση, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώσει το μέσο όρο. Παρ' όλα αυτά, οι μέγιστες τιμές οι οποίες παρέμειναν περίπου στα ίδια επίπεδα οφείλονται στο γεγονός ότι πιθανόν μερικές ημέρες να διεξαγόταν ταυτόχρονη φόρτιση για περισσότερα από ένα ΗΑ.

Αντ' αυτού, ο τύπος φορτιστή επιφέρει αρκετή αύξηση στο φορτίο του μετασχηματιστή.

Συγκεκριμένα, τα μοντέλα Φ1, Φ2 και Φ3 αυξάνουν τις μέσες τιμές των θηκογραμμάτων από 54.00% που ήταν στο προκαθορισμένο σενάριο, σε 55.00%, 59.00% και 60.00% αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, με τη χρήση φορτιστών μεγαλύτερης ισχύς αυξάνονται και οι μέγιστες τιμές φόρτισης του μετασχηματιστή. Παρατηρώντας το μοντέλο φορτιστή Φ3, οι μέγιστες τιμές φθάνουν μέχρι και το 92.00% φόρτισης του μετασχηματιστή, ελάχιστα πιο κάτω από το επιτρεπτό όριο, που είναι 100%. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο Φ3 χρησιμοποιεί μόνο φορτιστές ισχύς 11kW, επομένως, κατά τη φόρτιση των ΗΑ προστίθεται μεγαλύτερο φορτίο στο δίκτυο. Ακολούθως, το ΠΔ ΗΑ όπως ήταν αναμενόμενο, προκαλεί τη μεγαλύτερη αύξηση στο φορτίο του μετασχηματιστή. Συγκριτικά με το προκαθορισμένο μοντέλο, τα μοντέλα ΠΔ1, ΠΔ2 και ΠΔ3 αυξάνουν τη μέση τιμή των θηκογραμμάτων σε 65.30%, 72.31% και 83.51% αντίστοιχα. Για τα μοντέλα ΠΔ1 και ΠΔ2, παρόλο που οι μέσες τιμές βρίσκονται κάτω από το όριο αντοχής του μετασχηματιστή, υπάρχουν και αρκετές οι οποίες βρίσκονται πολύ κοντά σε αυτό και μία εξ' αυτών του μοντέλου ΠΔ2 να το υπερβαίνει. Για το μοντέλο ΠΔ3 παρατηρούνται αρκετές τιμές οι οποίες υπερβαίνουν το επιτρεπτό όριο. Συγκεκριμένα, οι μέγιστες τιμές για τα μοντέλα ΠΔ1, ΠΔ2 και ΠΔ3 είναι 85.00%, 104.00% και 115.10% αντίστοιχα.

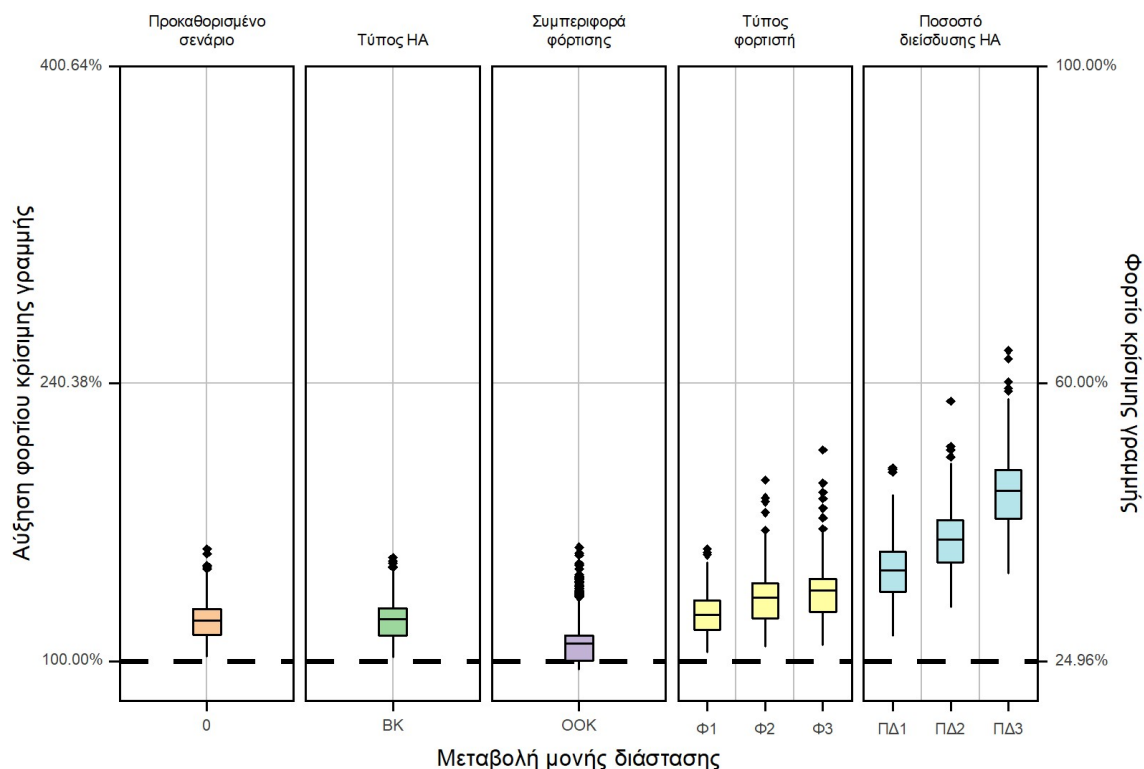
Γενικότερα, οι υψηλότερες φορτωμένες περιπτώσεις δείχνουν σαφώς ότι δύο διαστάσεις παραμέτρων προκαλούν σημαντικές αυξήσεις στη φόρτιση του μετασχηματιστή συγκριτικά με το προκαθορισμένο σενάριο: οι τύποι φορτιστών και το ΠΔ ΗΑ. Αντιθέτως, το μοντέλο ΟΟΚ προκαλεί μείωση της μέσης τιμής σε σχέση με το προκαθορισμένο σενάριο. Για τον τύπο ΗΑ όπως αναφέραμε και πιο πάνω δεν παρατηρείται ιδιαίτερη διαφορά.

6.2.2 Φορτίο κρίσιμης γραμμής

Αφού έγινε η ανάλυση φορτίου μετασχηματιστή, το επόμενο στοιχείο του δικτύου που χρήζει ανάλυσης είναι οι γραμμές μεταφοράς. Προτού παρουσιαστούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, είναι σημαντικό να γίνει κατανοητός ο όρος "κρίσιμη γραμμή". Στα πλαίσια της εργασίας, η κρίσιμη γραμμή θεωρείται η γραμμή με το μεγαλύτερο ποσοστό φόρτισης. Για παράδειγμα, σε μια υλοποίηση σεναρίου όπου χωρίζεται η ανάλυση σε 48 διαφορετικά ημίωρα, για κάθε ημίωρο βρίσκουμε τη μέγιστη φόρτιση γραμμής από τις συνολικά 43 γραμμές του δικτύου. Αφού προσομοιωθούν και οι 300 υλοποιήσεις σεναρίων, όπως πράξαμε και στο μετασχηματιστή, βρίσκουμε τη μεγαλύτερη φόρτιση γραμμής για κάθε υλοποίηση σεναρίου.

Το Σχήμα 6.3 απεικονίζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μεταβάλλοντας μία μόνο διάσταση σε σχέση με την προκαθορισμένη περίπτωση, όπως έγινε και στην ανάλυση του μετασχηματιστή. Η αύξηση φορτίου κρίσιμης γραμμής υποδεικνύεται στον αριστερό άξονα-Υ ενώ οι απόλυτες του τιμές στο δεξιό. Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει το μέγιστο φορτίο κρίσιμης χωρίς την πρόσθεση ΗΑ. Τα θηκογράμματα (1.5 IQR) αντιπροσωπεύουν την κατανομή των N=300 υλοποιήσεων σεναρίων.

Αρχικά, στο προκαθορισμένο σενάριο, παρατηρούμε μια σημαντική αύξηση στο φορτίο της κρίσιμης γραμμής σε σύγκριση με το αρχικό φορτίο, συγκεκριμένα, η μέση τιμή του θηκογράμματος αυξήθηκε από 24.96% σε 30.11%, ενώ η μέγιστη τιμή φθάνει το 39.11%. Το προκαθορισμένο σενάριο δεν προκαλεί πρόβλημα υπερφόρτωσης στην κρίσιμη γραμμή, παρ'



Σχήμα 6.3: Επιρροή των μεταβολών μονής διάστασης στο μέγιστο φορτίο κρίσιμης γραμμής σε σχέση με το φορτίο χωρίς την πρόσθεση ΗΑ στον αριστερό κάθετο άξονα και με το συνολικό φορτίο στο δεξιό κάθετο άξονα

όλα αυτά, παρατηρείται μικρή αύξηση. Παρομοίως, το μοντέλο BK παρουσιάζει παρόμοια συμπεριφορά με το προκαθορισμένο σενάριο, όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 6.2.1 για το μετασχηματιστή.

Παρατηρώντας το μοντέλο ΟΟΚ, η μέση τιμή σε σύγκριση με το προκαθορισμένο σενάριο μειώθηκε σε 27.96% ενώ οι μέγιστες τιμές παρέμειναν περίπου στα ίδια επίπεδα. Το γεγονός αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς δεν διεξαγόταν καθημερινή φόρτιση, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μειώσει τη μέση τιμή, όπως ακριβώς έγινε και στην περίπτωση του μετασχηματιστή. Παρ' όλα αυτά, οι μέγιστες τιμές οι οποίες παρέμειναν περίπου στα ίδια επίπεδα με το προκαθορισμένο σενάριο, οφείλεται στο γεγονός ότι πιθανόν μερικές ημέρες να διεξαγόταν ταυτόχρονη φόρτιση για περισσότερα από ένα ΗΑ.

Αντιθέτως, ο τύπος φορτιστή προκαλεί αρκετή αύξηση στο φορτίο της κρίσιμης γραμμής. Συγκεκριμένα, τα μοντέλα Φ1, Φ2 και Φ3 αυξάνουν τη μέση τιμή από 30.11% που ήταν στο προκαθορισμένο σενάριο, σε 31.00%, 33.00% και 34.00% αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, με τη χρήση φορτιστών μεγαλύτερης ισχύς αυξάνονται και οι μέγιστες τιμές φόρτισης της κρίσιμης γραμμής. Παρατηρώντας το μοντέλο φορτιστή Φ3, οι μέγιστες τιμές φθάνουν μέχρι και το 46.50% φόρτισης της κρίσιμης γραμμής, γεγονός που επεξηγήθηκε και στην Ενότητα 6.2.1.

Ακολούθως, το ΠΔ ΗΑ όπως ήταν αναμενόμενο, προκαλεί τη μεγαλύτερη αύξηση στο φορτίο της κρίσιμης γραμμής. Συγκριτικά με το προκαθορισμένο σενάριο, τα μοντέλα ΠΔ1, ΠΔ2 και ΠΔ3 αυξάνουν τη μέση τιμή των θηκογραμμμάτων σε 36.40%, 40.33% και 46.15% αντίστοιχα. Επίσης, οι μέγιστες τιμές για τα προαναφερθέντα μοντέλα είναι 46.24%, 57.73%

και 64.15% αντίστοιχα.

Συνοψίζοντας, η συμπεριφορά που παρουσιάζει η κρίσιμη γραμμή κατά τη μεταβολή των παραμέτρων είναι όμοια με αυτήν του μετασχηματιστή. Ωστόσο, δεν παρουσιάζεται σε καμία περίπτωση υπερφόρτωση σε κάποια γραμμή του δικτύου. Επίσης, αξίζει να αναφερθεί ότι η γραμμή η οποία συνδέει την πλευρά χαμηλής τάσης του μετασχηματιστή με τον αμέσως επόμενο ζυγό του δικτύου, είναι συνήθως η περισσότερο φορτωμένη γραμμή, βάση και των αποτελεσμάτων που είχαμε από τις αναλύσεις ροής ισχύος.

6.2.3 Κρίσιμος ζυγός

Μετά την ανάλυση του μετασχηματιστή και της κρίσιμης γραμμής, το τελευταίο στοιχείο του δικτύου που θα αναλύσουμε είναι ο κρίσιμος ζυγός. Ο όρος 'κρίσιμος ζυγός' στα πλαίσια της εργασίας, θεωρείται ως ο ζυγός με τη μικρότερη τάση για κάθε υλοποίηση σεναρίου. Για παράδειγμα, σε μια υλοποίηση σεναρίου όπου χωρίζεται η ανάλυση σε 48 διαφορετικά ημίωρα, για κάθε ημίωρο βρίσκουμε τη ελάχιστη τάση από τους συνολικά 46 ζυγούς του δικτύου, και αφού προσομοιωθούν οι 300 υλοποιήσεις σεναρίων, όπως πράξαμε και στην Ενότητα 6.2.2, βρίσκουμε τη μικρότερη τάση ζυγού για κάθε υλοποίηση σεναρίου.

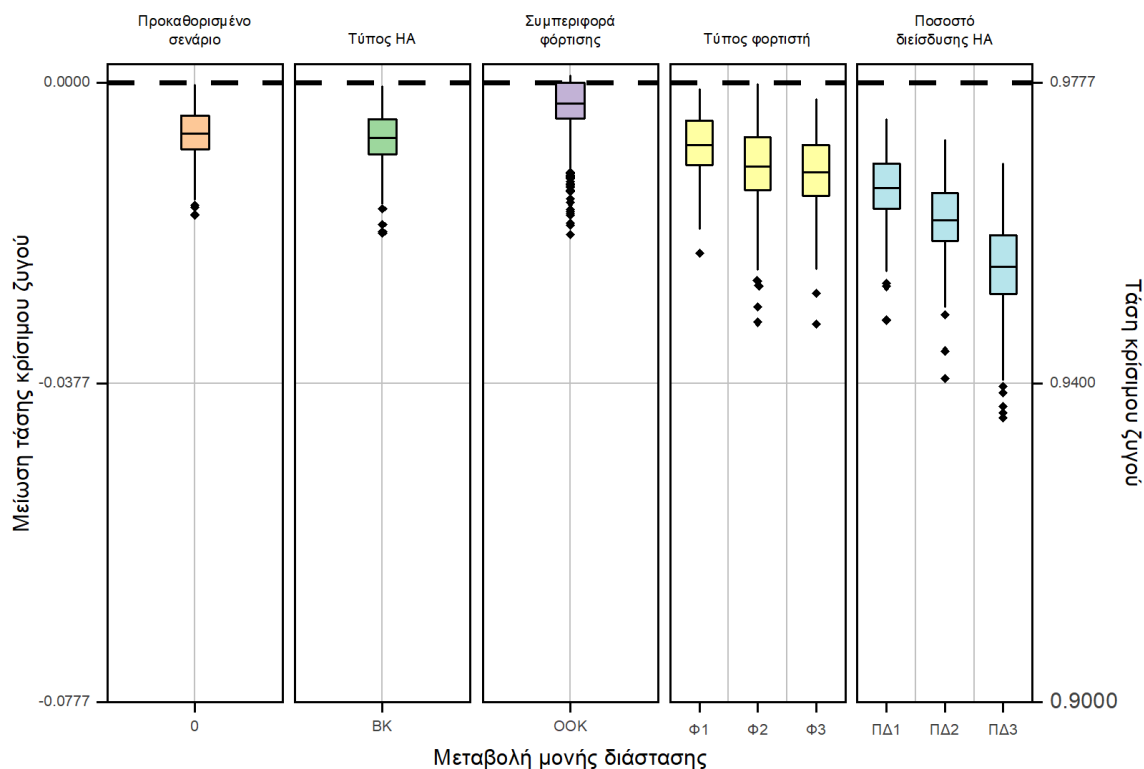
Το Σχήμα 6.4 απεικονίζει τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μεταβάλλοντας μία μόνο διάσταση σε σχέση με την προκαθορισμένη περίπτωση, όπως έγινε και στις Ενότητες 6.2.1, 6.2.2. Η μείωση τάσης κρίσιμου ζυγού υποδεικνύεται στον αριστερό άξονα-Υ ενώ στο δεξιό άξονα υποδεικνύονται οι τιμές τάσης στο ανά μονάδα σύστημα. Η μαύρη διακεκομμένη γραμμή υποδεικνύει την ελάχιστη τιμή τάσης χωρίς την πρόσθεση ΗΑ (αρχικό φορτίο). Γενικότερα, αποδεκτές τιμές τάσης θεωρούνται οι τιμές που κυμαίνονται από 0.90 p.u. μέχρι 1.1 p.u.. Τα θηκογράμματα (1.5 IQR) αντιπροσωπεύουν την κατανομή των 300 υλοποιήσεων σεναρίων.

Παρατηρώντας το Σχήμα 6.4 στο προκαθορισμένο σενάριο, όπως ήταν αναμενόμενο, παρουσιάζεται αρκετή μείωση της τάσης στο δίκτυο συγκριτικά με το αρχικό φορτίο. Κατ' ακρίβεια, η μέση τιμή των θηκογραμμάτων από 0.977 p.u. μειώθηκε σε 0.971 p.u. και η ελάχιστη τιμή τάσης ήταν 0.960 p.u.. Ομοίως, ο τύπος ΗΑ έχει μέση τιμή τάσης 0.971 p.u. και ελάχιστη 0.958 p.u. αποτέλεσμα το οποίο εξηγεί ότι έχει παρόμοια συμπεριφορά με το προκαθορισμένο σενάριο όπως αναφέρθηκε και στις Ενότητες 6.2.1, 6.2.2. Το μοντέλο ΟΟΚ όπως ήταν αναμενόμενο, παρουσίασε μικρότερη μέση τιμή πτώσης τάσης συγκριτικά με το προκαθορισμένο σενάριο, η τιμή της οποίας είναι 0.975 p.u.. Παρ' όλα αυτά, οι ελάχιστες τιμές του δεν παρουσίασαν ιδιαίτερη διαφορά με αυτές του προκαθορισμένου σεναρίου.

Οι τύποι φορτιστών παρουσιάζουν σημαντική πτώση τάσης, η οποία ήταν αναμενόμενη, καθώς ανάλογη συμπεριφορά παρουσιάστηκε στο μετασχηματιστή και στην κρίσιμη γραμμή. Για την ακρίβεια, οι μέσες τιμές των θηκογραμμάτων για τα μοντέλα Φ1, Φ2 και Φ3 ήταν 0.970 p.u., 0.968 p.u. και 0.966 p.u. αντίστοιχα. Οι ελάχιστες τιμές πτώσης τάσης για τα τρία μοντέλα είναι 0.956 p.u., 0.947 p.u. και 0.946 p.u., γεγονός που αποδεικνύει μικρές αλλά εμφανής διαφορές μεταξύ τους.

Ακολούθως το ΠΔ ΗΑ προκαλεί τη μεγαλύτερη πτώση τάσης. Συγκριτικά με το προκαθορισμένο σενάριο, τα μοντέλα ΠΔ1, ΠΔ2 και ΠΔ3 έχουν μέση τιμή σε 0.964 p.u., 0.960 p.u.

και 0.954p.u αντίστοιχα. Επιπρόσθετα, οι ελάχιστες τιμές για τα προαναφερθέντα μοντέλα είναι 0.948p.u, 0.941p.u και 0.935p.u αντίστοιχα. Συμπεραίνοντας βάση και των προηγούμενων αποτελεσμάτων, όλες οι μέσες τιμές καθώς και όλες οι ελάχιστες βρίσκονται εντός του επιτρεπτού ορίου το οποίο είναι $\pm 10\%$.



Σχήμα 6.4: Επιρροή των μεταβολών μονής διάστασης στη μείωση τάσης κρίσιμου ζυγού σε σχέση με την τάση χωρίς την πρόσθεση HA στον αριστερό κάθετο άξονα και με την τάση κρίσιμου ζυγού στο δεξιό κάθετο άξονα

6.3 Σενάρια κύριων διαστάσεων παραμέτρων

Ακολουθώντας την προηγούμενη πρώτη συλλογή αναλύσεων, για τη μεταβολή φορτίων και τάσεων οι κύριοι παράγοντες είναι το ΠΔ HA, ο τύπος φορτιστή και η συμπεριφορά φόρτισης. Αυτές οι διαστάσεις παραμέτρων αναφέρονται ως κύριες διαστάσεις παραμέτρων. Οι συνδυασμοί των παραμέτρων αποτελούν τη βάση για το μεγαλύτερο αριθμό προσομοιώσεων που θα ακολουθήσει. Η επιρροή που έχει η διάσταση τύπος HA, μέσω και των αποτελεσμάτων, αποδεικνύει ότι δεν προκαλεί ιδιαίτερη μεταβολή, οπότε και δεν θα διεξαχθεί περαιτέρω ανάλυση γι' αυτό το μοντέλο. Για να μελετηθεί πως οι κύριες διαστάσεις επηρεάζουν η μία την άλλη, θα προσομοιωθούν όλοι οι δυνατοί 32 συνδυασμοί, σύμφωνα και με τη λίστα στην Ενότητα 6.1.

6.3.1 Φορτίο μετασχηματιστή

Η φόρτιση του μετασχηματιστή φανερώνει τη γενική επιρροή που έχουν τα προφίλ φόρτισης

στο δίκτυο. Το Σχήμα 6.5 επιβεβαιώνει την επιρροή των μοντέλων όπως προσδιορίστηκε προηγουμένως. Το ΠΔ ΗΑ και η ισχύς των φορτιστών αυξάνουν τη φόρτιση του μετασχηματιστή, παρ' όλα αυτά σε συνδυασμό με το ΟΟΚ παρατηρείται μείωση στο μέσο όρο του φορτίου. Αντ' αυτού, η μέγιστη τιμή φορτίου και για τα δύο μοντέλα, όσο αφορά τη συμπεριφορά φόρτισης, δεν παρουσιάζει ιδιαίτερη αλλαγή. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων ροής ισχύος του μοντέλου ΟΟΚ, υπάρχουν μερικές ημέρες στις οποίες συνδέονται για φόρτιση αρκετά ΗΑ και μερικές στις οποίες συνδέονται λιγότερα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του μέσου όρου φορτίου του μετασχηματιστή χωρίς όμως να επηρεάζονται οι μέγιστες τιμές σε σύγκριση με το μοντέλο καθημερινής φόρτισης.

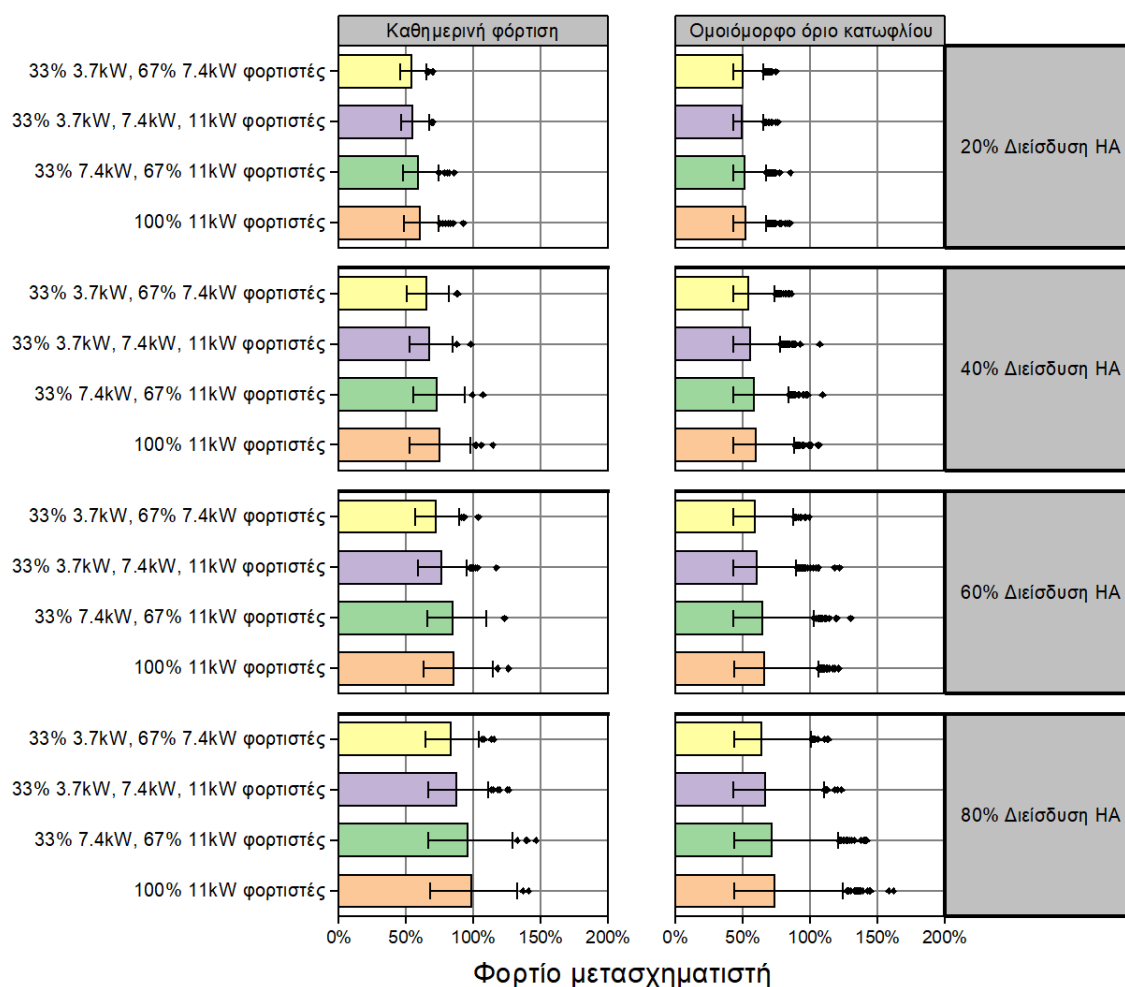
Μέγιστο φορτίο

Αρχικά, για την 1^η ομάδα αποτελεσμάτων, δηλαδή για 20% διείσδυση ΗΑ, παρατηρούμε ότι όλες οι τιμές βρίσκονται εντός του επιτρεπτού ορίου το οποίο είναι το 100%. Συγκρίνοντας τώρα ως προς τη συμπεριφορά φόρτισης, όπως ήταν αναμενόμενο οι μέσες τιμές για το μοντέλο ΟΟΚ σε σχέση με αυτό της καθημερινής φόρτισης, είναι μειωμένες περίπου κατά 10% για όλα τα μοντέλα φορτιστών. Παρ' όλα αυτά, οι μέγιστες τιμές φόρτισης του μετασχηματιστή και για τα 2 μοντέλα ως προς την παράμετρο συμπεριφοράς φόρτισης, βρίσκονται στα ίδια περίπου επίπεδα.

Έπειτα, για τη 2^η ομάδα αποτελεσμάτων, δηλαδή για 40% διείσδυση ΗΑ, παρατηρείται ότι ο μετασχηματιστής αρχίζει και επιβαρύνεται περισσότερο, ωστόσο, οι μέσες τιμές των θηκογραμμάτων εξακολουθούν να βρίσκονται κάτω από το επιτρεπτό όριο φόρτισης του μετασχηματιστή. Παρ' όλα αυτά, παρουσιάζονται ορισμένες τιμές οι οποίες υπερβαίνουν το επιτρεπτό όριο φόρτισης του μετασχηματιστή, όπως για παράδειγμα στα μοντέλα Φ2 και Φ3.

Στη συνέχεια, όσο αφορά την 3^η και 4^η ομάδα αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με το μοντέλο καθημερινής φόρτισης, παρατηρείται ακόμη περισσότερη αύξηση στη φόρτιση του μετασχηματιστή. Οι τιμές είναι αρκετά εκτός του επιτρεπτού ορίου φόρτισης του μετασχηματιστή, εξαιρουμένου του μοντέλου όπου δεν υπάρχουν καθόλου 11kW φορτιστές, με τη χειρότερη περίπτωση να παρουσιάζεται, όπως ήταν αναμενόμενο, στη χρήση των μοντέλων Φ2 και Φ3, όπου γίνεται χρήση κυρίως φορτιστών ισχύος 11kW. Παρατηρώντας τώρα τις ίδιες ομάδες αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με το ΟΟΚ, τα αποτελέσματα διαφέρουν όσο αφορά τις μέσες τιμές και τη διασπορά τους, ωστόσο, οι μέγιστες τιμές παραμένουν περίπου στα ίδια επίπεδα με αυτά του μοντέλου καθημερινής φόρτισης, ενώ υπάρχουν και ορισμένες τιμές που ξεπερνούν και το μοντέλο καθημερινής φόρτισης.

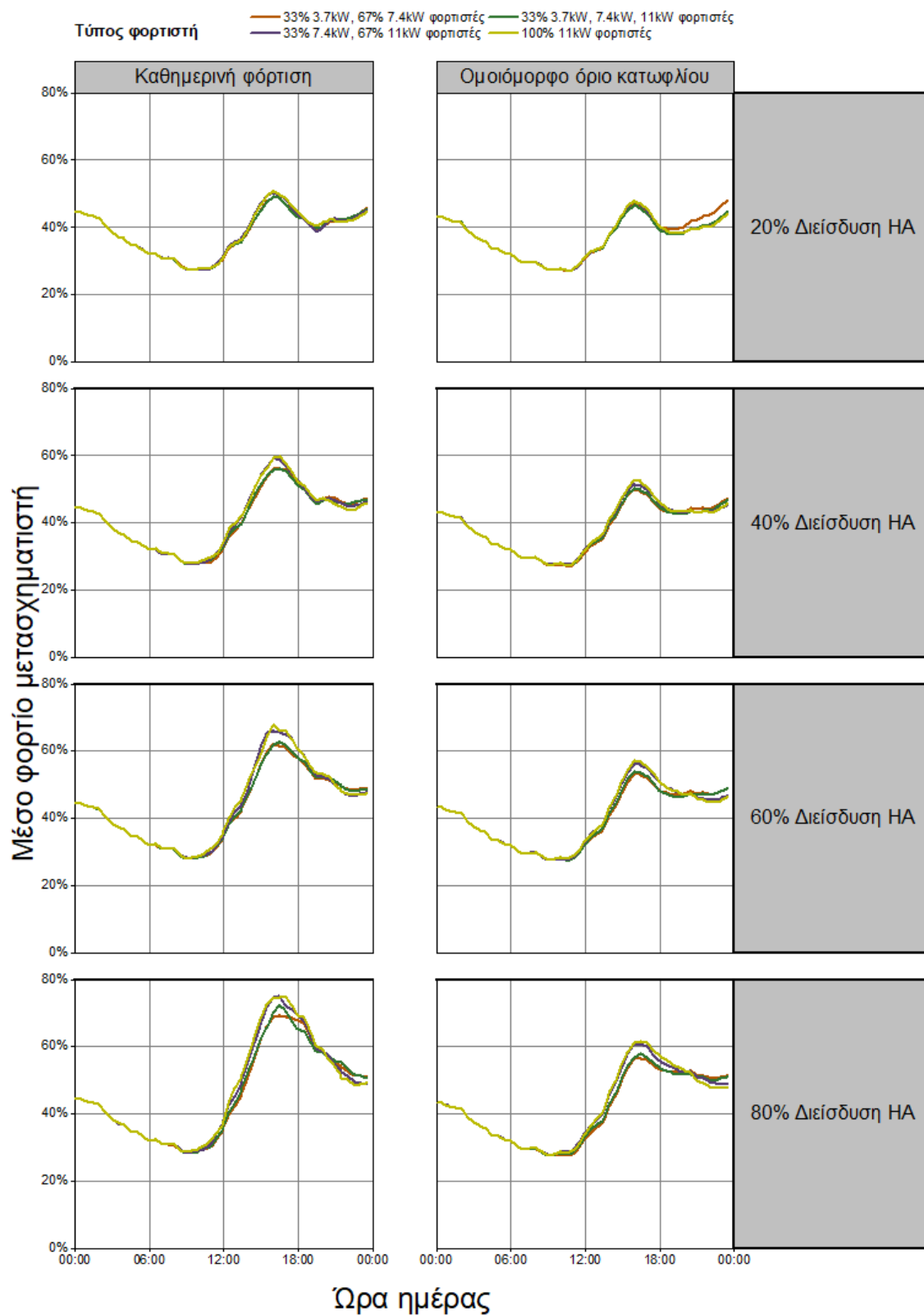
Συμπερασματικά, η 1^η ομάδα αποτελεσμάτων είναι και η μόνη ομάδα στην οποία καταλήξαμε ότι βρισκόμαστε σε όλες τις περιπτώσεις εντός του επιτρεπτού ορίου φόρτισης του μετασχηματιστή. Προχωρώντας στις επόμενες ομάδες, οι αδυναμίες του δικτύου άρχισαν εμφανίζονται, εφόσον αυξάνονταν τα προστιθέμενα ΗΑ στο δίκτυο, ειδικά στη 4^η ομάδα αποτελεσμάτων με 80% ΠΔ ΗΑ, όπου οι μετρήσεις για τη φόρτιση του μετασχηματιστή είναι σχεδόν ημιδιπλάσιες από το επιτρεπτό όριο του.



Σχήμα 6.5: Φορτίο μετασχηματιστή για τα σενάρια με κύριες διαστάσεις παραμέτρων

Καμπύλη μέσου φορτίου

Ενώ προηγουμένως έγινε παρουσίαση για τις μέγιστες τιμές φόρτισης του μετασχηματιστή ανά υλοποίηση σεναρίου, στο Σχήμα 6.6 παρουσιάζονται οι καμπύλες φορτίου του μετασχηματιστή για τις κύριες διαστάσεις παραμέτρων. Όπως και στο Σχήμα 6.1, παρουσιάζεται ο μέσος όρος φορτίου του μετασχηματιστή ανά 30 λεπτά για τις συνολικά 300 υλοποιήσεις σεναρίων που προσομοιώσαμε.



Σχήμα 6.6: Καμπύλη μέσου φορτίου του μετασχηματιστή για τα σενάρια κύριων διαστάσεων παραμέτρων

Αρχίζοντας από την 1^η ομάδα αποτελεσμάτων, οι διαφορές μεταξύ των δύο μοντέλων για τη συμπεριφορά φόρτισης δεν είναι αισθητές καθώς ο μέσος όρος τιμών κυμαίνεται περίπου στα ίδια επίπεδα. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς με 20% ΠΔ ΗΑ δεν περιμέναμε ότι οι τιμές θα ανέβαιναν πολύ περισσότερο.

Ακολούθως, για τη 2^η και 3^η ομάδα αποτελεσμάτων αρχίζουν να φαίνονται εντονότερα οι διαφορές ανάμεσα στο μέσο όρο τιμών των δύο μοντέλων. Εκτός από αυτό, αρχίζουν να φαίνονται και οι διαφορές στη διασπορά των τιμών. Χρησιμοποιώντας το μοντέλο καθημερινής φόρτισης, παρουσιάζεται μεγαλύτερη αιχμή κατά τη μέγιστη ζήτηση από τις απογευματινές ώρες και μετά. Αντιθέτως, το μοντέλο ΟΟΚ παρουσιάζει μικρότερη αιχμή και μεγαλύτερη διασπορά των τιμών, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι οι χρήστες ΗΑ δεν φορτίζουν το όχημα τους παρά μόνο αν η ΚΦ βρίσκεται κάτω από το ΟΚ, δηλαδή το 50% της χωρητικότητας της μπαταρίας.

Κλείνοντας με την 4^η ομάδα αποτελεσμάτων και το μοντέλο καθημερινής φόρτισης, η μέση τιμή που παρουσιάζεται κατά την ώρα αιχμής βρίσκεται περίπου στο 75% φόρτισης του μετασχηματιστή σε συνδυασμό με το μοντέλο Φ3. Το γεγονός αυτό επαληθεύει και την καμπύλη που παρουσιάζεται στην Ενότητα 3 στο Σχήμα 3.1, ότι δηλαδή ο περισσότερος κόσμος επιστρέφει σπίτι περίπου στις 17:00, όπου είναι και η ώρα αιχμής του αρχικού φορτίου. Βασισμένοι σε όλα τα πιο πάνω, είναι εμφανές πως η λήψη τεχνικών βελτιστοποίησης κρίνεται αναγκαία ούτως ώστε να προτρέψουμε το δίκτυο από πιθανές υπερφορτώσεις του μετασχηματιστή.

6.3.2 Κρίσιμη γραμμή

Στην υπό-ενότητα αυτή θα αναλυθεί η επιρροή των κύριων παραμέτρων ως προς την κρίσιμη γραμμή του δικτύου. Στο Σχήμα 6.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις που εκτελέστηκαν.

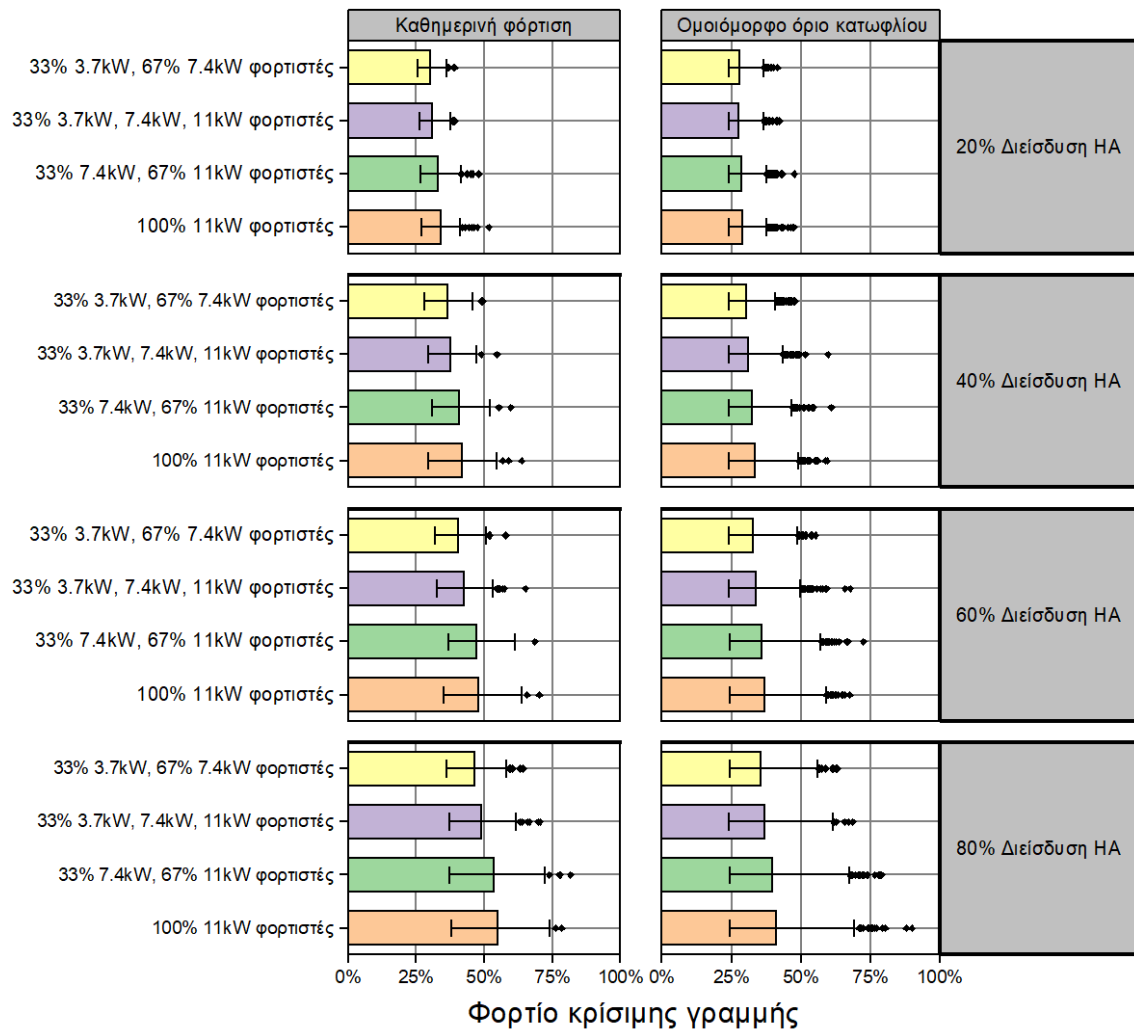
Μέγιστο φορτίο

Αρχικά, για την 1^η ομάδα αποτελεσμάτων, δηλαδή για 20% διείσδυση ΗΑ, παρατηρούμε ότι όλες οι τιμές βρίσκονται κατά πολύ εντός του επιτρεπτού ορίου φόρτισης, όπως ακριβώς συνέβηκε και για τις τιμές του μετασχηματιστή προηγούμενως. Συγκρίνοντας ως προς τη συμπεριφορά φόρτισης, όπως ήταν αναμενόμενο οι μέσες τιμές των θηκογραμμάτων για το μοντέλο ΟΟΚ σε σχέση με αυτό της καθημερινής φόρτισης, είναι μειωμένες περίπου 3% για όλα τα μοντέλα φορτιστών. Παρ' όλα αυτά, οι μέγιστες τιμές φόρτισης της κρίσιμης γραμμής και για τα 2 μοντέλα συμπεριφοράς φόρτισης, βρίσκονται περίπου στα ίδια επίπεδα.

Έπειτα, για τη 2^η και 3^η ομάδα αποτελεσμάτων, δηλαδή για 40% και 60% διείσδυση ΗΑ αντίστοιχα, παρατηρείται ότι η κρίσιμη γραμμή αρχίζει και επιβαρύνεται περισσότερο, παρ' όλα αυτά, όλες οι μέσες τιμές των θηκογραμμάτων εξακολουθούν να βρίσκονται πιο κάτω από το επιτρεπτό όριο φόρτισης. Ωστόσο, για τη 3^η ομάδα αποτελεσμάτων σε συνδυασμό με τα μοντέλα Φ2 και Φ3, παρουσιάζονται μέγιστες τιμές κοντά στο 75% φόρτισης της κρίσιμης γραμμής. Ομοίως με την 1^η ομάδα αποτελεσμάτων, το μοντέλο ΟΟΚ προκαλεί αισθητή μείωση της μέσης τιμής και ταυτόχρονα αύξηση της διασποράς των τιμών συγκριτικά με το μοντέλο

καθημερινής φόρτισης, ωστόσο υπάρχουν και μέγιστες τιμές οι οποίες υπερβαίνουν τις μέγιστες τιμές του μοντέλου καθημερινής φόρτισης.

Τέλος, όσο αφορά την 4^η ομάδα αποτελεσμάτων για το μοντέλο καθημερινής φόρτισης, παρατηρείται ακόμη περισσότερη αύξηση στη φόρτιση της κρίσιμης γραμμής. Οι μέγιστες τιμές για όλα τα μοντέλα φορτιστών βρίσκονται εντός των επιτρεπτών ορίων φόρτισης της γραμμής. Η χειρότερη περίπτωση παρουσιάζεται και πάλι στη χρήση των μοντέλων Φ2 και Φ3, δηλαδή με φορτιστές ισχύος 11kW, όπου σε αυτή την περίπτωση οι μέγιστες τιμές ξεπέρασαν το επιτρεπτό όριο. Παρατηρώντας τώρα σε συνδυασμό με το μοντέλο ΟΟΚ, τα αποτελέσματα ακολουθούν την ίδια σειρά όπως και προηγουμένως, παρουσιάζεται δηλαδή μείωση μέσης τιμής, αύξηση διασποράς των τιμών και τις μέγιστες τιμές στα ίδια περίπου επίπεδο με το μοντέλο καθημερινής φόρτισης.



Σχήμα 6.7: Φορτίο κρίσιμης γραμμής για τα σενάρια με κύριες διαστάσεις παραμέτρων

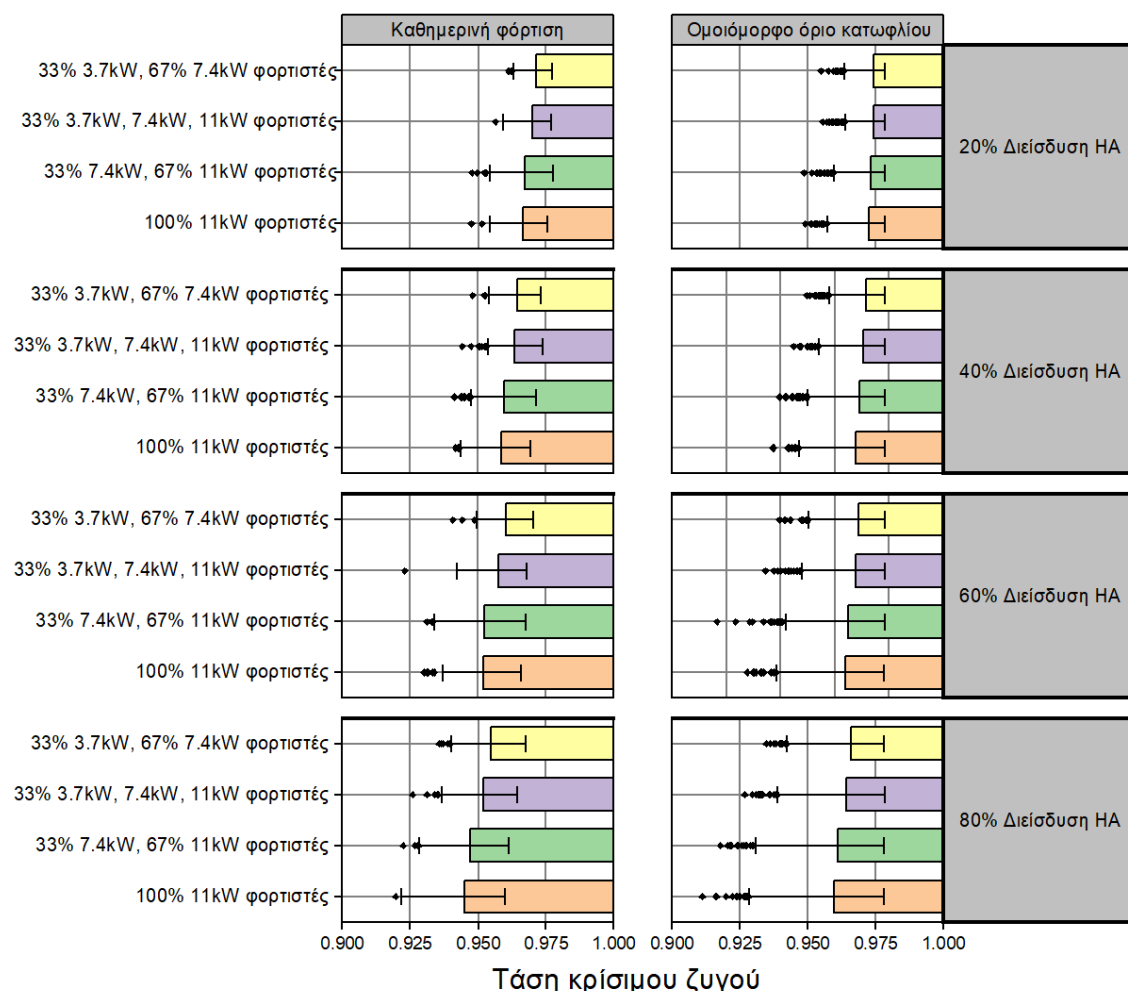
6.3.3 Κρίσιμος ζυγός

Στην προηγούμενη υπό-ενότητα αναλύθηκε η επιρροή των κύριων παραμέτρων στο μετασχηματιστή και στην κρίσιμη γραμμή. Σε αυτή την υπό-ενότητα θα αναλυθεί η επιρροή τους ως

προς την τάση του κρίσιμου ζυγού. Στο Σχήμα 6.8 παρουσιάζεται η τάση του κρίσιμου ζυγού για τη μεταβολή των κύριων παραμέτρων. Όπως και στο το φορτίο του μετασχηματιστή, συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του μοντέλου ΟΟΚ με αυτό της καθημερινής φόρτισης παρατηρείται μια μείωση της μέσης τιμής τάσης, ωστόσο οι μέγιστες τιμές βρίσκονται περίπου στα ίδια επίπεδα.

Ελάχιστη τάση

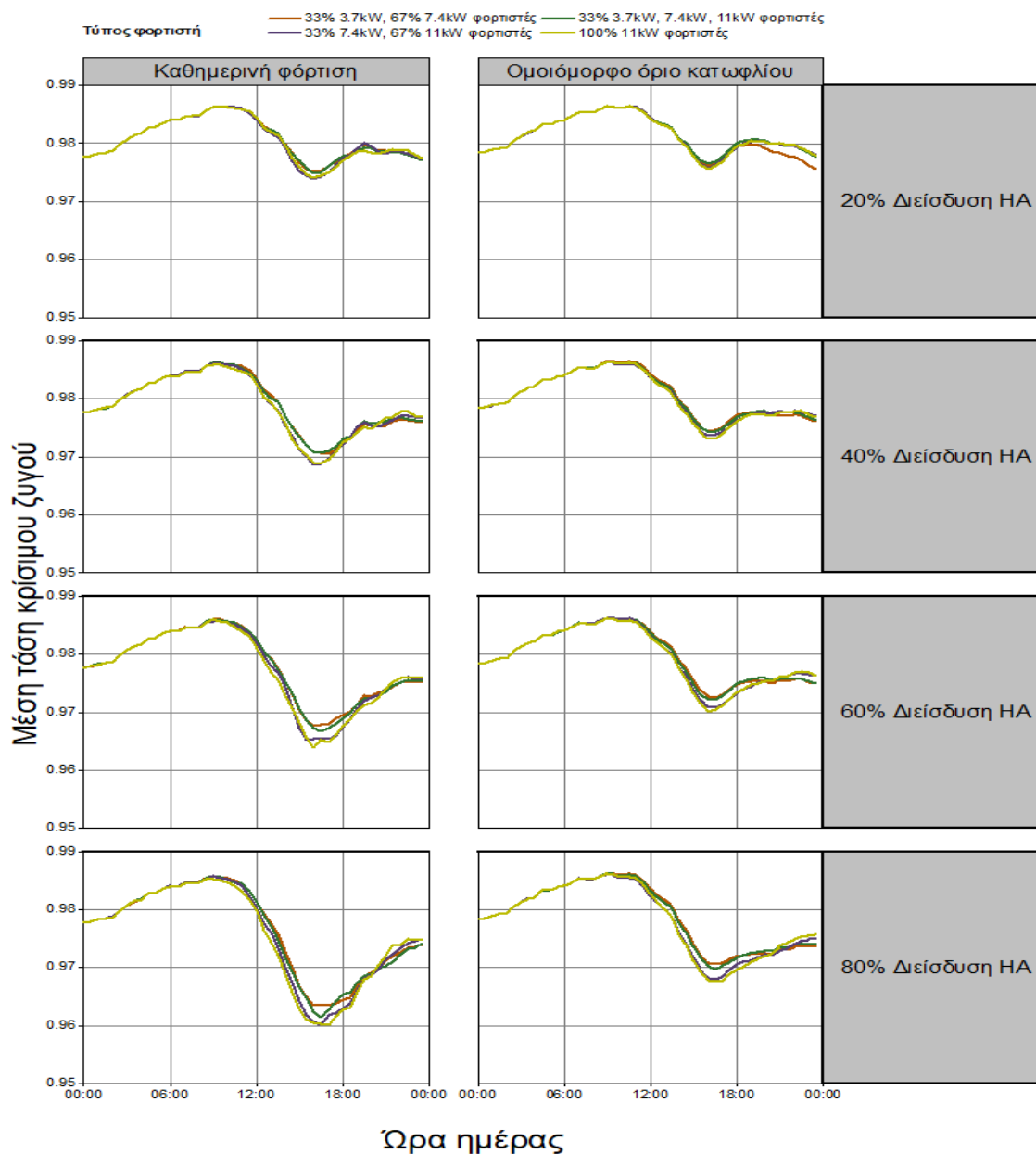
Όπως αναλύθηκε και στην Ενότητα 6.2.3, οι τιμές τάσης με βάση το Σχήμα 6.8 δεν παραβιάζουν το κριτήριο $\pm 10\%$ σε καμία από τις υλοποιήσεις. Για την 1^η, 2^η ομάδα αποτελεσμάτων με ΠΔ 20%, 40% αντίστοιχα και σε συνδυασμό με όλους τους τύπους φορτιστών, οι τιμές τάσης κυμαίνονται από 0.975p.u. με 0.943p.u.. Για την 3^η και 4^η ομάδα αποτελεσμάτων οι τιμές αρχίζουν και ελαττώνονται ακόμη περισσότερο, όπου σε συνδυασμό με τα μοντέλα Φ2 και Φ3 φθάνουν μέχρι και 0.91p.u..



Σχήμα 6.8: Τάση κρίσιμου ζυγού για τα σενάρια με κύριες διαστάσεις παραμέτρων

Καμπύλη μέσης τάσης

Στο Σχήμα 6.9 παρουσιάζονται οι καμπύλες μέσης τάσης κρίσιμου ζυγού για τις κύριες διαστάσεις παραμέτρων που υλοποιήσαμε. Όπως και στο Σχήμα 6.1, παρουσιάζεται ο μέσος όρος τάσης ανά 30 λεπτά για τα συνολικά 300 σενάρια που προσομοιώσαμε. Συγκρίνοντας τις δύο στήλες του Σχήματος 6.9, ομοίως με όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις όπου συγκρίναμε τα μοντέλα για τη συμπεριφορά φόρτισης, έτσι και εδώ, για το ΟΟΚ παρατηρείται μεγαλύτερη διασπορά των τιμών τάσης και μικρότερες ελάχιστες μέσες τιμές σε όλες τις υλοποιήσεις.



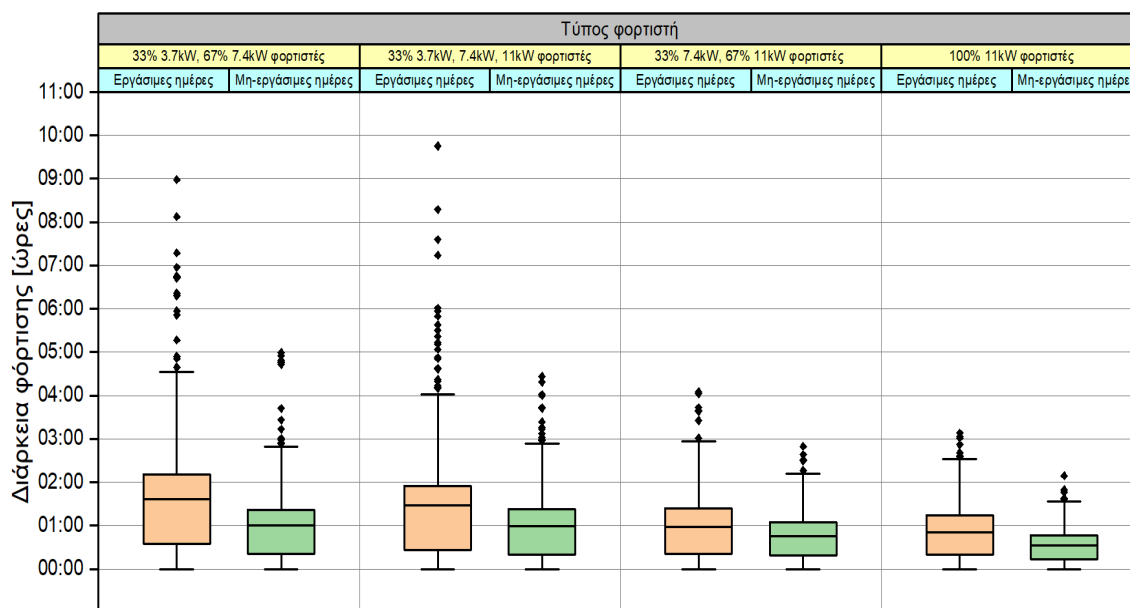
Σχήμα 6.9: Καμπύλη μέσης τάσης κρίσιμου ζυγού για τα σενάρια κύριων διαστάσεων παραμέτρων

6.4 Ανάλυση φορτίου ΗΑ στο πεδίο του χρόνου

Στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου, παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις ροής ισχύος με σκοπό να μελετήσουμε την επιρροή των διαφόρων παραμέτρων στα στοιχεία του δικτύου (μετασχηματιστής, γραμμές, ζυγοί). Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζονται πληροφορίες σχετικά με τη διάρκεια φόρτισης των ΗΑ καθώς και με τη συνολική ενέργεια που καταναλώνουν τα ΗΑ με σκοπό να δώσουν γενικότερα αποτελέσματα για την συμπεριφορά των ΗΑ.

6.4.1 Διάρκεια φόρτισης

Ο υπολογισμός διάρκειας φόρτισης υπολογίζεται ούτως ώστε να αντιληφθούμε τη διάρκεια που χρειάζονται τα ΗΑ ωσότου φορτιστούν πλήρως. Να αναφερθεί πως για τις μετρήσεις επιλέξαμε το μοντέλο καθημερινής φόρτισης το οποίο προκαλεί μεγαλύτερη αύξηση φορτίου από το μοντέλο ΟΟΚ. Η διάρκεια φόρτισης ενός ΗΑ εξαρτάται κυρίως από την ισχύ του φορτιστή που θα συνδεθεί για να φορτίσει, από την κατανάλωση του ΗΑ καθώς και από τη διανυόμενη απόσταση μετά την άφιξη του στο σπίτι.



Σχήμα 6.10: Απαιτούμενη διάρκεια καθημερινής φόρτισης για κάθε υλοποίηση σεναρίου με βάση τον τύπο φορτιστή για εργάσιμες και μη-εργάσιμες ημέρες

Μια μέση διάρκεια φόρτισης για ένα ΗΑ όπου: διανύει απόσταση 50km (Σχήμα 3.3), έχει μέση κατανάλωση 0.164kWh/km (Πίνακας 4.2) διαρκεί περίπου 130, 75 και 45 λεπτά με τη χρήση 3.7kW, 7.4kW και 11kW φορτιστών αντίστοιχα. Το Σχήμα 6.10 παρουσιάζει τη διάρκεια φόρτισης που χρειάστηκαν τα ΗΑ κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης μέχρι να φορτιστούν πλήρως, για τις εργάσιμες και μη εργάσιμες ημέρες, βάση των τεσσάρων μοντέλων που χρησιμοποιήσαμε με βάση την παράμετρο 'Τύπος φορτιστή' (δες Πίνακα 6.1).

Αρχικά, παρατηρείται ότι για το μοντέλο φορτιστών 33% 3.7kW-67% 7.4kW όσο αφορά τις εργάσιμες ημέρες, ο μέσος χρόνος φόρτισης είναι 1:36. Επίσης, λόγω του ότι στο

μοντέλο υπάρχει φορτιστής ισχύος 3.7kW ο οποίος είναι μικρότερης ισχύς από τους άλλους δύο, παρουσιάζονται αρκετές ακραίες τιμές (ουτλιερς), συνεπώς μεγαλύτερης διάρκειας φορτίσεις. Ομοίως για το μοντέλο φορτιστών 33% 3.7kW, 7.4kW, 11kW παρατηρείται μια ελαφρώς χαμηλότερη μέση διάρκεια φόρτισης, συγκεκριμένα 1:28, η οποία οφείλεται στο γεγονός ότι αντικαταστήσαμε τον έναν από τους τρεις φορτιστές του προηγούμενου μοντέλου από 7.4kW σε 11kW. Χάρη σε αυτό, ορισμένα HA χρειάστηκαν λιγότερο χρόνο για να φορτιστούν πλήρως.

Επιπρόσθετα, για τα μοντέλα φορτιστών 33% 7.4kW-67% 11kW και 100% 11kW, παρατηρείται αισθητή μείωση στη μέση διάρκεια φόρτισης σε σύγκριση με τα δύο προηγούμενα μοντέλα, με τιμές 56 και 49 λεπτά αντίστοιχα. Ακόμη, εξαιτίας της χρήσης μεγάλης ισχύς φορτιστών, οι ακραίοι χρόνοι φόρτισης που παρουσιάζονταν στα προηγούμενα μοντέλα έχουν μειωθεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι τιμές τους να φθάνουν περίπου μέχρι τις 4 και 3 ώρες αντιστοίχως. Συγκρίνοντας τις εργάσιμες με τις μη εργάσιμες ημέρες, τα αποτελέσματα από τα αντίστοιχα μοντέλα παρουσιάζουν παρόμοια συμπεριφορά, ωστόσο, βάση του Σχήματος 3.3 η διανυόμενη απόσταση των HA έχει μικρότερη μέση τιμή, με αποτέλεσμα να απαιτείται και μικρότερη διάρκεια φόρτισης.

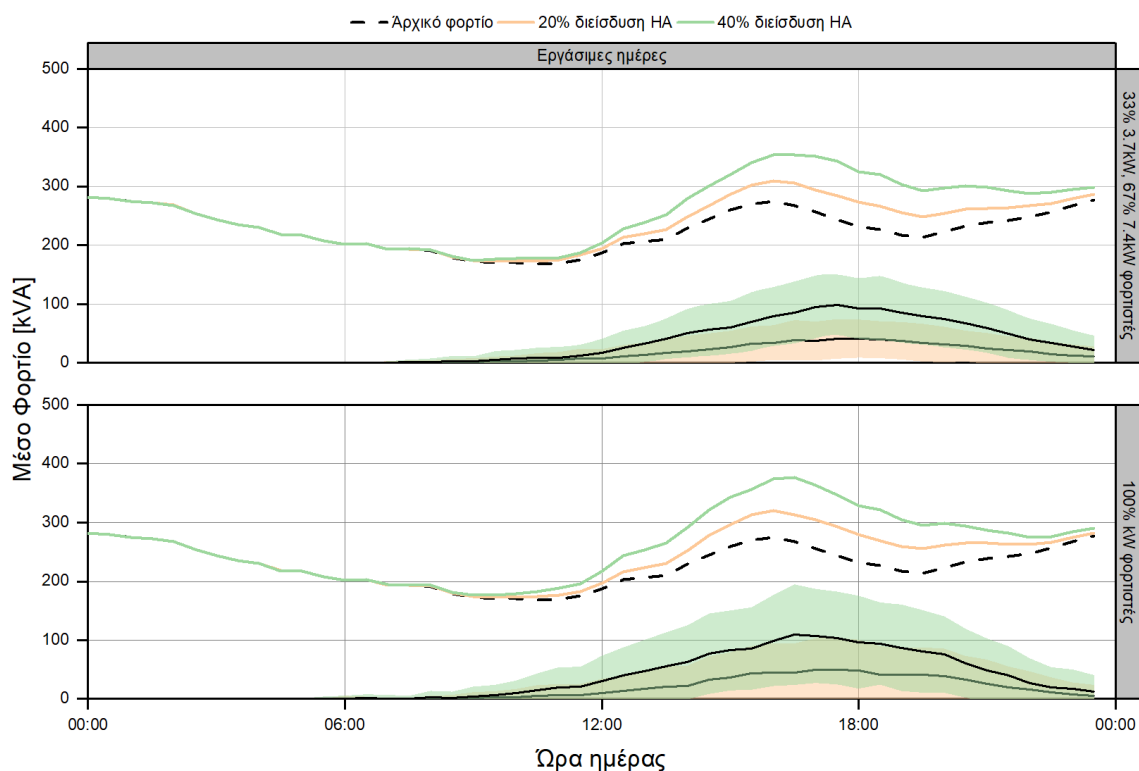
Συμπερασματικά, ο φορτιστής που θα χρησιμοποιηθεί για φόρτιση του HA επηρεάζει σημαντικά τη διάρκεια φόρτισης, ταυτόχρονα όμως επηρεάζει και το φορτίο του δικτύου. Ένας φορτιστής μικρής ισχύς θα προσθέτει μικρό φορτίο στο δίκτυο για αρκετό χρονικό διάστημα, σε αντίθεση με ένα φορτιστή μεγαλύτερης ισχύς ο οποίος θα προσθέτει μεγαλύτερο φορτίο για μικρότερο χρονικό διάστημα.

6.4.2 Απαιτούμενη ισχύς για φόρτιση των HA

Ο υπολογισμός συνολικής ισχύς υπολογίζεται έτσι ώστε να παρουσιαστεί μια γενική εικόνα κατανάλωσης ισχύς για ένα χαμηλής τάσης τυπικό δίκτυο διανομής. Τα σενάρια που επιλέξαμε να παρουσιάσουμε έχουν ως κύριο στόχο την ανάδειξη των πιο κοντινών ως προς την πραγματοποίηση τους σεναρίων πιο σύντομα. Γι' αυτό το λόγο θεωρήσαμε αναγκαία την ανάλυση συγκεκριμένων σεναρίων, καταλήγοντας στη μεταβολή των παρακάτω παραμέτρων για τη δημιουργία τους και χρησιμοποιώντας το μοντέλο καθημερινής φόρτισης σταθερό:

- 1) 20% διείσδυση HA - 33% 3.7kW, 67% 7.4kW φορτιστές
- 2) 40% διείσδυση HA - 33% 3.7kW, 67% 7.4kW φορτιστές
- 3) 20% διείσδυση HA - 100% 11kW φορτιστές
- 4) 40% διείσδυση HA - 100% 11kW φορτιστές

Στο Σχήμα 6.11 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για τα σενάρια με τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν. Οι χρωματιστές γραμμές παρουσιάζουν το συνολικό μέσο φορτίο ανά 30 λεπτά ενώ οι μαύρες γραμμές παρουσιάζουν το μέσο φορτίο HA με το σκιασμένο χρωματιστό μέρος που τους περικλείει να απεικονίζει την τυπική απόκλιση που είχαν οι τιμές τους. Όλες οι παραπάνω τιμές υπολογίστηκαν από τις 300 υλοποιήσεις σεναρίων που υλοποιήθηκαν.



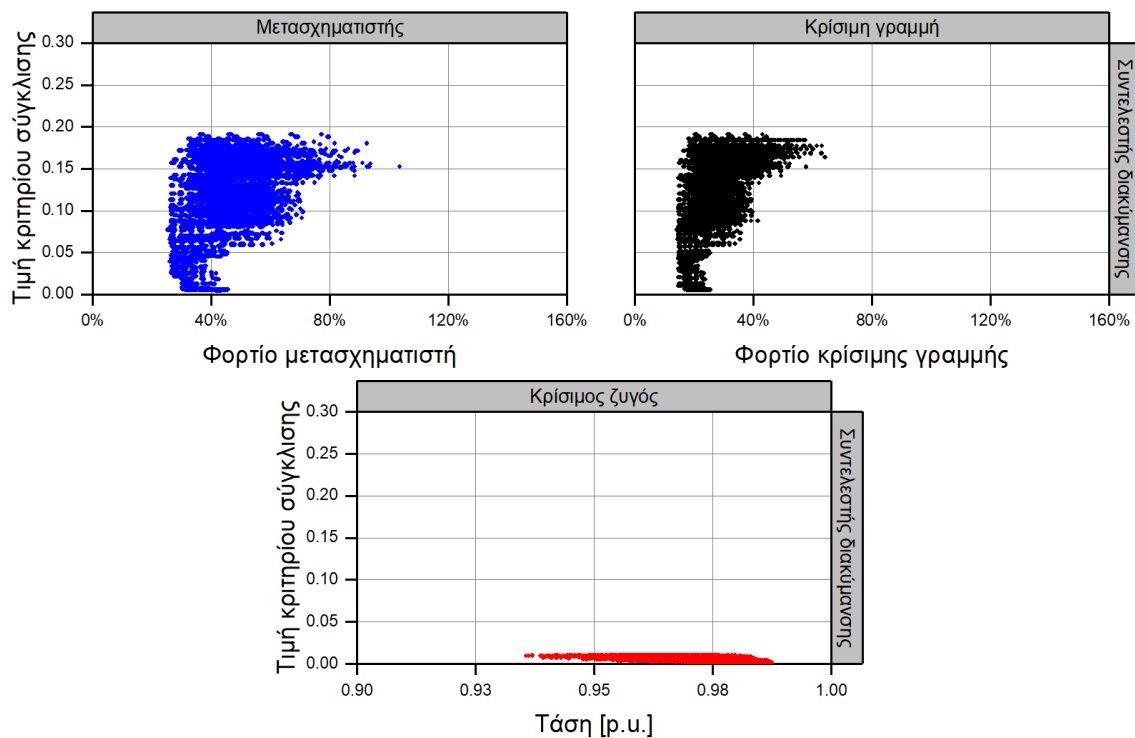
Σχήμα 6.11: Μέση τιμή φορτίου ΗΑ (μαύρη γραμμή) συμπεριλαμβανομένης της τυπικής απόκλισης (χρωματιστές περιοχές), του αρχικού φορτίου (μαύρη διακεκομμένη γραμμή) και του προκύπτοντος μέσου συνολικού φορτίου (χρωματιστές γραμμές) για τις 300 υλοποιήσεις σεναρίου κατά τη διάρκεια μίας εργάσιμης ημέρας.

Συγκρίνοντας τα δύο γραφήματα, επαληθεύονται και τα αποτελέσματα των προηγούμενων ενοτήτων όπου με τη χρήση μεγαλύτερης ισχύος φορτιστές, οι μέγιστες τιμές της καμπύλης φορτίου αυξάνονται αισθητά. Επιπρόσθετα, στις καμπύλες φορτίου των ΗΑ παρουσιάζονται μέγιστες τιμές μέσου φορτίου περίπου στις 16:00-18:00, οι οποίες για το πρώτο γράφημα είναι περίπου 150kVA και για το δεύτερο γράφημα περίπου 200kVA. Αυτό επαληθεύει και τα αποτελέσματα του ερωτηματολογίου, όπου η μέση τιμή άφιξης των πολιτών στο σπίτι ήταν στις 18:00, συνεπώς αυτήν την ώρα θα προσθέτονται και τα ΗΑ για φόρτιση. Αυτές οι μέγιστες τιμές είναι πολύ κοντά με τη μέγιστη τιμή της καμπύλης φορτίου των οικιακών καταναλωτών (αρχικό φορτίο), η οποία είναι περίπου στις 16:00.

Για τον υπολογισμό του συνολικού φορτίου, το αρχικό φορτίο προστίθεται με το φορτίο ΗΑ. Λόγω του ότι οι μέγιστες τιμές σχεδόν συμπίπτουν χρονικά, προκαλείται μεγαλύτερο συνολικό φορτίο στο δίκτυο. Για το πρώτο γράφημα όπου δεν χρησιμοποιούνται 11kW φορτιστές, υπάρχει μεγαλύτερο εύρος του φορτίου, με τις μέγιστες τιμές να φθάνουν περίπου στα 310kVA για 20% διείσδυση, και 350kVA για 40% διείσδυση. Αντιθέτως, για το δεύτερο γράφημα όπου χρησιμοποιούνται μόνο 11kW φορτιστές, το εύρος του φορτίου μειώνεται αισθητά, παρ' όλα αυτά παρουσιάζονται μεγαλύτερες μέγιστες τιμές. Οι τιμές αυτές φθάνουν περίπου τα 350kVA για 20% διείσδυση και τα 390kVA για 40% διείσδυση.

6.5 Σύγκλιση Monte-Carlo

Για να εξασφαλιστεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, πρέπει οι μετρήσεις σύγκλισης να είναι όσο το δυνατόν κοντά πιο στη μέση τιμή. Από πρακτική άποψη, σύγκλιση σημαίνει πως δεν θα πάρουμε ποτέ μια ακριβής τιμή από προσομοιώσεις Monte-Carlo αλλά όσο αυξάνεται το δείγμα τόσο καλύτερες θα είναι οι προσεγγίσεις. Για αυτό το λόγο, όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 5.4, χρησιμοποιούμε το Νόμο των μεγάλων αριθμών και το Κεντρικό οριακό θεώρημα. Οι μετρήσεις σύγκλισης για το μετασχηματιστή, την κρίσιμη γραμμή και τον κρίσιμο ζυγό απεικονίζονται στο Σχήμα 6.12, οι οποίες είναι ίδιες με αυτές των σεναρίων που υλοποιήθηκαν και στην Ενότητα 6.2. Είναι εμφανές ότι όλες οι τιμές του συντελεστή διακύμανσης βρίσκονται μέσα στο επιτρεπτό όριο, με αποτέλεσμα το δείγμα των 300 υλοποιήσεων σεναρίων να κρίνεται αρκετά ικανοποιητικό.



Σχήμα 6.12: Σύγκλιση Monte-Carlo για το φορτίο μετασχηματιστή, φορτίο κρίσιμης γραμμής και τη τάση στον κρίσιμο ζυγό

Κεφάλαιο 7

Τεχνικές ελέγχου φόρτισης ΗΑ

Σε αυτό το κεφάλαιο εφαρμόζονται τεχνικές ελέγχου οι οποίες έχουν ως κύριο στόχο να παρουσιάσουν πως θα είναι μια μελλοντική ελεγχόμενη διείσδυση των ΗΑ, χωρίς την αλλαγή των υπαρχόντων στοιχείων του δικτύου. Με άλλα λόγια, να μπορεί να δεχθεί περισσότερα ΗΑ χωρίς να υπάρξουν παραβιάσεις στην τάση του δικτύου ή υπερφόρτωση σε κάποιο από τα στοιχεία του. Αφενός, μπορεί να μειώσει τη γήρανση των στοιχείων κατά την υψηλή φόρτιση, αφετέρου μειώνει τον κίνδυνο αιχμών του αρχικού φορτίου και των φορτίων ΗΑ στο ίδιο χρονικό σημείο. Ακόμη, εκτός από την πρόσθεση φορτίων ΗΑ στο δίκτυο, είναι πιθανόν να προστεθούν και άλλα νέα φορτία. Γι' αυτό το λόγο, είναι σημαντική η δημιουργία κατάλληλων συστημάτων ελέγχου ΗΑ ούτως ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν στο δίκτυο.

7.1 Σχεδιασμός τεχνικών ελέγχου

Οι τεχνικές ελέγχου που συνήθως ακολουθούνται, χαρακτηρίζονται από: *απαιτούμενη γνώση του συστήματος, την απαραίτητη υποδομή επικοινωνίας, και την τοποθεσία όπου υπολογίζεται η είσοδος ελέγχου*. Οι τεχνικές ελέγχου που θα υλοποιήσουμε δεν λαμβάνουν υπόψη τους περιορισμούς ελεγχσιμότητας και την επικοινωνία φορτίου-δικτύου. Μία από τις πιο αξιόπιστες λύσεις αλλά αρκετά πιο περίπλοκη, είναι η έξυπνη φόρτιση (smart charging) όπου το ΗΑ και η συσκευή φόρτισης του, μοιράζονται δεδομένα με τον διαχειριστή συστήματος διανομής, όπου ο διαχειριστής παρακολουθεί, διαχειρίζεται και περιορίζει τη χρήση των συσκευών τους με σκοπό τη βελτιστοποίηση της κατανάλωσης ενέργειας. Επιπρόσθετα, η τεχνολογία 'Vehicle-to-Grid (V2G)' είναι μία ακόμη αξιόπιστη τεχνική που χρησιμοποιείται. Με τον τρόπο αυτό δεν μεταφέρεται ενέργεια μόνο από το δίκτυο προς τα ΗΑ αλλά και το αντίστροφο (αμφίδρομη φόρτιση), όπου το δίκτυο σε στιγμές μέγιστης ζήτησης απορροφά ενέργεια από τις μπαταρίες των ΗΑ με σκοπό την ομαλότερη λειτουργία του. Παρ' όλα αυτά, στην εργασία μας, θα επικεντρωθούμε σε τεχνικές όπου:

- δεν απαιτείται αμφίδρομη επικοινωνία μεταξύ διαχειριστή συστήματος και φορτίου
- υπάρχει η δυνατότητα υλοποίησης εφόσον, ο εξοπλισμός είναι διαθέσιμος και πολύ πιο οικονομικός

και οι οποίες διαχωρίζονται σε δύο κατηγορίες: ανοικτού και κλειστού βρόγχου.

7.2 Τεχνική ελέγχου ανοικτού βρόχου

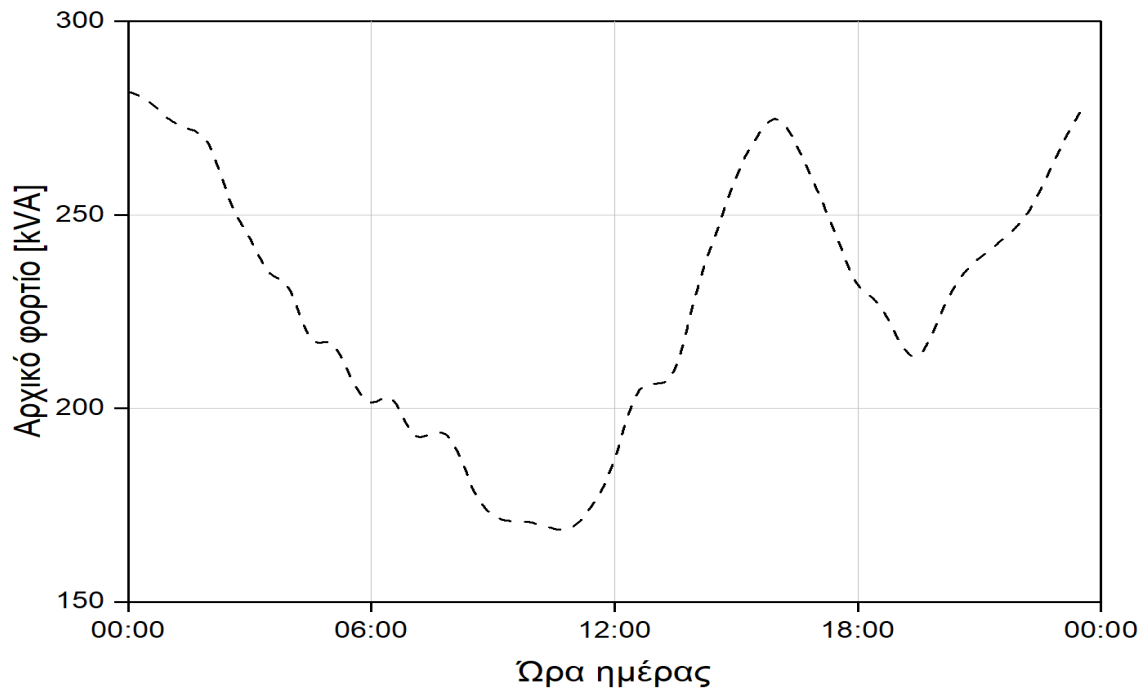
Οι τεχνικές ελέγχου ανοικτού βρόχου ελέγχουν την είσοδο του συστήματος χωρίς να γνωρίζουν την επιρροή που έχουν οι μεταβολές τους στην έξοδο. Για παράδειγμα, η τεχνική της προγραμματιζόμενης φόρτισης μπορεί να ρυθμίζει την ώρα έναρξης της φόρτισης κάθε ΗΑ γνωρίζοντας μόνο την ημερήσια καμπύλη φορτίου, και αναλόγως της ώρας άφιξης να μετατοπίζει την έναρξη φόρτισης σε περιόδους όπου το αρχικό φορτίο είναι χαμηλό. Το μειονέκτημα της τεχνικής αυτής, είναι ότι εάν μεταβληθεί η καμπύλη του αρχικού φορτίου, υπάρχει η πιθανότητα να προκαλέσει αντίθετα αποτελέσματα από τα αναμενόμενα, επομένως, απαιτείται καλή γνώση και τακτικός έλεγχος του αρχικού φορτίου.

7.2.1 Προγραμματιζόμενη φόρτιση

Μελετώντας τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις ροής ισχύος παρατηρούμε ότι, η φόρτιση των ΗΑ συμπίπτει με τις ώρες αιχμής του αρχικού φορτίου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγάλα φορτία, όπως αναφέρθηκε και στην Ενότητα 6.4.2. Η τεχνική ελέγχου της προγραμματιζόμενης φόρτισης έχει ως στόχο τη μετατόπιση της φόρτισης των ΗΑ, έτσι ώστε να μεταφερθεί το φορτίο αυτό σε ώρες όπου δεν υπάρχει αυξημένη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Αναλόγως της ώρας άφιξης στο σπίτι και αφότου συνδεθεί το ΗΑ για φόρτιση, θα μετατοπίζεται η ώρα έναρξης της φόρτισης. Η μετατόπιση της ώρας έναρξης της φόρτισης εξαρτάται από:

- το αρχικό φορτίο
- την ώρα άφιξης των ΗΑ

Στο Σχήμα 7.1 παρουσιάζεται η καμπύλη αρχικού φορτίου για μία τυπική εργάσιμη ημέρα του Αυγούστου. Παρατηρώντας την καμπύλη αξίζει να σημειωθεί ότι διακρίνονται δύο χρονικές περίοδοι αιχμής της καμπύλης, από τις 16:00-17:00 και από 23:00-2:00. Με βάση τα παραπάνω, υλοποιήθηκε ο Αλγόριθμος 1 που έχει ως στόχο να προσθέσει την πλειονότητα των ΗΑ για φόρτιση στις περιόδους όπου δεν υπάρχει μεγάλη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και να εξομαλύνει όσο το δυνατό περισσότερο την καμπύλη φορτίου. Να σημειωθεί ότι η εντολή $\text{randi}([x,y])$, επιστρέφει έναν ακέραιο αριθμό που προέρχεται από την ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ του διαστήματος $x-y$.



Σχήμα 7.1: Καμπύλη αρχικού φορτίου για μία εργάσιμη ημέρα του Αυγούστου

Algorithm 1: Time delay for EV charging

Input: Arrival time

Output: Delayed arrival time

```

if arrival time > 00 : 00 && arrival time ≤ 15 : 00 then
  | arrival time ← arrival time
else if arrival time > 15 : 00 && arrival time ≤ 17 : 00 then
  | arrival time ← randi([17:00,19:30])
else if arrival time > 17 : 00 && arrival time ≤ 19 : 30 then
  | arrival time ← randi([19:30,21:30])
else
  | arrival time ← randi([00:30,02:30])
end

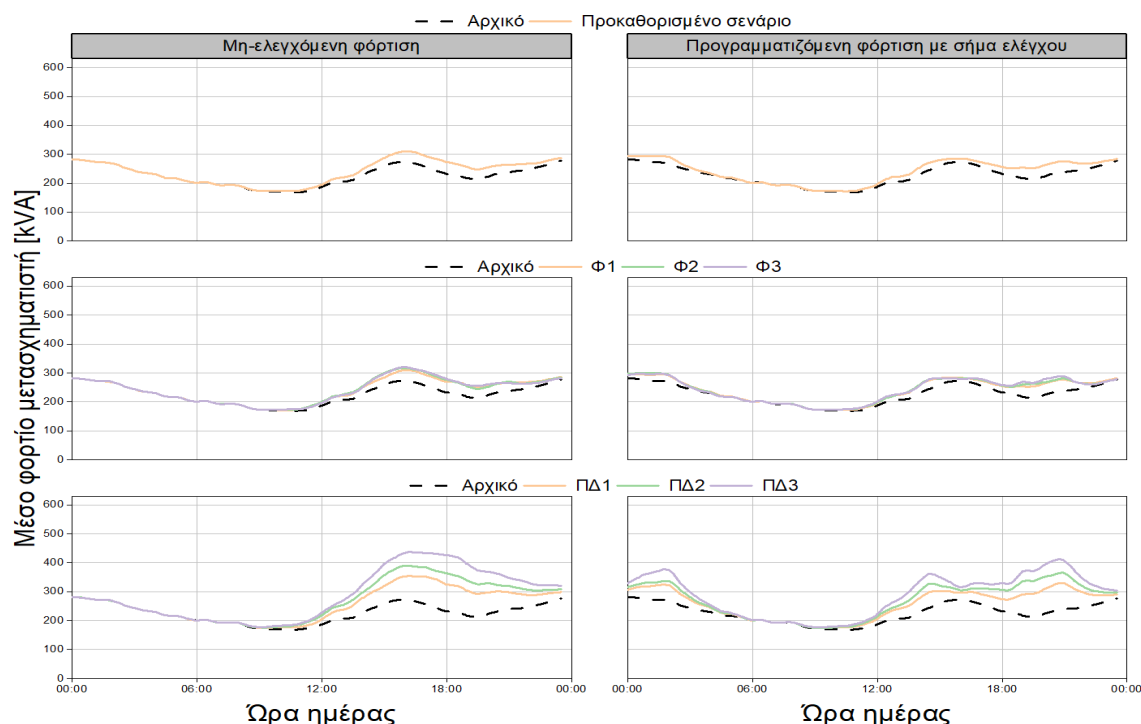
```

7.2.1.1 Αποτελέσματα

Για τη μελέτη της επιρροής που θα έχει η τεχνική ελέγχου προγραμματιζόμενης φόρτισης με τυχαίο σήμα ελέγχου στη φόρτιση του μετασχηματιστή, υλοποιήσαμε τα ίδια σενάρια με αυτά της Ενότητας 6.2, εξαιρουμένου των μοντέλων BK και OOK στα οποία δεν παρατηρήθηκε αρνητική μεταβολή στις τιμές μας. Να σημειωθεί ότι, η ανάλυση των τεχνικών ελέγχου θα εφαρμοστεί μόνο στο φορτίο του μετασχηματιστή, εφόσον ήταν το μοναδικό στοιχείο που παρουσίασε παραβιάσεις στις προσομοιώσεις του Κεφαλαίου 6. Αρχικά, θα παρουσιαστούν οι καμπύλες μέσων τιμών για μία γενικότερη εικόνα, ενώ θα ακολουθήσουν οι καμπύλες μεγίστων τιμών ούτως ώστε να αναλυθούν οι πραγματικές αντοχές του δικτύου, εφόσον θα λαμβάνουμε υπόψη τη χειρότερη τιμή για κάθε χρονική περίοδο.

Μέσο φορτίο μετασχηματιστή

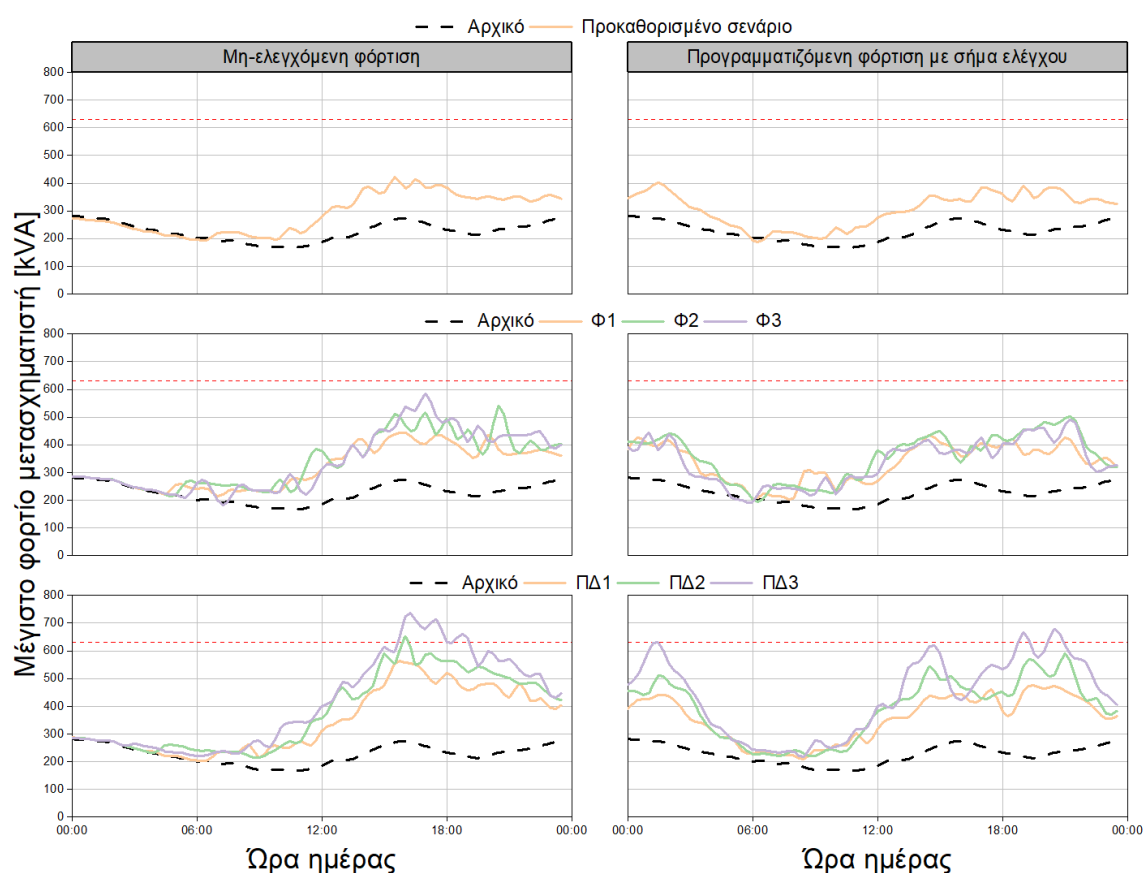
Αρχικά, στο προκαθορισμένο σενάριο και στα σενάρια με τα μοντέλα φορτιστών (Φ1, Φ2, Φ3) παρατηρούνται μικρής κλίμακας μεταβολές στο φορτίο του μετασχηματιστή. Αυτό συμβαίνει διότι δεν υπάρχουν αρκετά ΗΑ στο δίκτυο ούτως ώστε να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος περισσότερες φορές και να προκαλέσει αισθητές αλλαγές. Ακολούθως, για το Σχήμα 7.2, παρατηρώντας τα μοντέλα με διαφορετικά ΠΔ, είναι εμφανές ότι επιτυγχάνεται μείωση στη μέγιστη ζήτηση ενέργειας κατά τις περιόδους αιχμής, ειδικότερα για το μοντέλο ΠΔ3 όπου για μη-ελεγχόμενη φόρτιση φθάνει μέχρι και 440kVA (70% φόρτιση), εν αντιθέσει με την προγραμματιζόμενη φόρτιση όπου δεν ξεπερνάει τα 410kVA (65% φόρτιση).



Σχήμα 7.2: Καμπύλη μέσου φορτίου μετασχηματιστή για μη-ελεγχόμενη φόρτιση (αριστερή στήλη) και για προγραμματιζόμενη φόρτιση με σήμα ελέγχου (δεξιά στήλη) για εργάσιμες ημέρες

Μέγιστο φορτίο μετασχηματιστή

Αντίστοιχη ανάλυση παρουσιάζεται στο Σχήμα: 7.3 για τις μέγιστες τιμές φορτίου μετασχηματιστή. Ομοίως με τις μέσες τιμές, στο προκαθορισμένο σενάριο καθώς και στα μοντέλα φορτιστών Φ1 και Φ2 παρατηρούνται μικρές κλίμακας μεταβολές, παρ' όλα αυτά, συγκρίνοντας το μοντέλο Φ3, επιτυγχάνεται μείωση στο μέγιστο φορτίο του μετασχηματιστή περίπου 80kVA (ή 12.6%). Παρατηρώντας τώρα τα μοντέλα ΠΔ1, ΠΔ2 και ΠΔ3 όπου έχουμε το μεγαλύτερο φορτίο, παρατηρούμε ότι οι μέγιστες τιμές φόρτισης κατά τη διάρκεια της ημέρας μειώνονται αισθητά. Αξίζει να σημειωθεί ότι στο μοντέλο ΠΔ2, με μη-ελεγχόμενη φόρτιση το σύστημα μας παραβιάζεται εφόσον ο μετασχηματιστής ξεπερνά το επιτρεπτό όριο αντοχής του και φθάνει μέχρι τα 640kVA, σε αντίθεση με την προγραμματιζόμενη φόρτιση όπου η μέγιστη τιμή φορτίου του μετασχηματιστή δεν ξεπερνά τα 580kVA.



Σχήμα 7.3: Καμπύλη μέγιστου φορτίου μετασχηματιστή με το ονομαστικό όριο του (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), για μη-ελεγχόμενη φόρτιση (αριστερή στήλη) και για προγραμματιζόμενη φόρτιση με σήμα ελέγχου (δεξιά στήλη), για εργάσιμες ημέρες

7.3 Τεχνικές ελέγχου κλειστού βρόχου

Οι τεχνικές ελέγχου κλειστού βρόχου, αντίθετα με αυτές του ανοικτού βρόχου, μπορούν να ελέγχουν την είσοδο του συστήματος λαμβάνοντας υπόψη και την έξοδο του. Το πλεονέκτημα των συστημάτων αυτών έναντι των συστημάτων ανοικτού βρόχου είναι πως, σε περίπτωση όπου η έξοδος δεν έχει το επιθυμητό αποτέλεσμα, το σύστημα κλειστού βρόχου θα ανταποκρίνεται ανάλογα ούτως ώστε να προσπαθήσει να διορθώσει το σφάλμα στην έξοδο.

Να σημειωθεί ότι η ανάλυση των χρονικών διαστημάτων από 30 λεπτά, μετατράπηκε σε χρονικά διαστήματα των 5 λεπτών. Γνωρίζοντας ότι με τον καθορισμό περισσότερων χρονικών διαστημάτων ο χρόνος προσομοίωσης αυξάνεται, ως εκ τούτου, θα επιτρέψει πολύ καλύτερη ανάλυση του χρόνου φόρτισης καθώς και της ακρίβειας που θα έχουν οι τεχνικές μας. Για να γίνουμε πιο σαφής, εάν στο Κεφάλαιο 6 η ώρα άφιξης ήταν μεταξύ 17:01-17:30 τότε αυτόματα αυτό το άτομο θα ξεκινούσε φόρτιση στις 17:30, γεγονός που προσθέτει περισσότερα ΗΑ να φορτίζουν σε μία χρονική στιγμή. Αντιθέτως, καθορίζοντας χρονικά διαστήματα 5 λεπτών, δημιουργούμε μικρότερα περιθώρια για έναρξη φόρτισης, για παράδειγμα εάν η ώρα άφιξης είναι 17:01-17:05, τότε το συγκεκριμένο ΗΑ θα ξεκινήσει φόρτιση 17:05, ενώ προηγουμένως θα ξεκινούσε τη φόρτιση του στις 17:30. Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται οι δύο τεχνικές που χρησιμοποιήσαμε στην εργασία μας, χρησιμοποιώντας τα σενάρια κύριων παραμέτρων με καθημερινή φόρτιση και όλα τα μοντέλα φορτιστών σε συνδυασμό με τα μοντέλα 60% και 80% ΠΔ.

7.3.1 Ελεγχόμενη φόρτιση μετασχηματιστή μέσω μείωσης ισχύος του φορτιστή

Η πρώτη τεχνική ελέγχου που υλοποιήσαμε ελέγχει τη φόρτιση του μετασχηματιστή και όταν υπερβεί ένα συγκεκριμένο όριο, τότε δίνει εντολή σε όλους τους συνδεδεμένους φορτιστές να μειώσουν την ισχύ τους προς τα ΗΑ. Η συνολική ισχύς που αποκόπηκε για κάθε ΗΑ, υπολογίζεται ούτως ώστε να προστεθεί επιπλέον χρόνος φόρτισης, για να εξασφαλισθεί η πλήρης φόρτιση του ΗΑ. Ο καθορισμός του επιτρεπτού ορίου φόρτισης του μετασχηματιστή καθώς και του ποσοστού μείωσης της ισχύος των φορτιστών, επιλέχθηκαν πειραματικά. Αρχικά, θέσαμε ότι το όριο φόρτισης του μετασχηματιστή είναι 80% και το ποσοστό μείωσης της ισχύος των φορτιστών είναι 25%. Παρ' όλα αυτά, παρατηρήσαμε πως η φόρτιση του μετασχηματιστή σε ορισμένες περιπτώσεις υπερέβαινε αρκετά το ονομαστικό όριο του. Υλοποιήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί των δύο παραμέτρων, ούτως ώστε να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός, με τον οποίο δεν θα υπερβαίνεται το ονομαστικό όριο φόρτισης του μετασχηματιστή και ταυτόχρονα τα ΗΑ θα προλαβαίνουν να φορτίζουν πλήρως προτού αναχωρήσουν από το σπίτι την επόμενη ημέρα περίπου στις 6:00 π.μ.. Σύμφωνα με τα παραπάνω, οι τιμές που επιλέχθηκαν είναι: 55% για το όριο του μετασχηματιστή και 50% για το ποσοστό μείωσης της ισχύος των φορτιστών.

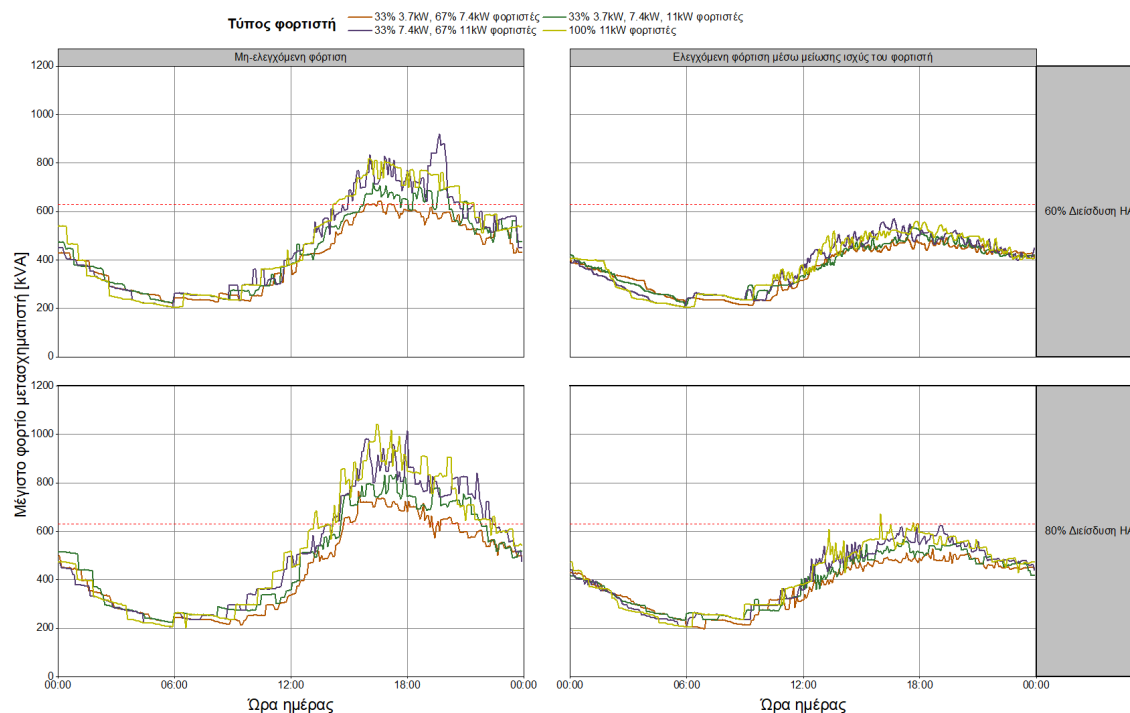
7.3.1.1 Αποτελέσματα

Για τη μελέτη της επιρροής που θα έχει η τεχνική ελεγχόμενης φόρτισης μετασχηματιστή μέσω μείωσης ισχύος του φορτιστή, θα δημιουργηθούν οι καμπύλες μέγιστου φορτίου του

μετασχηματιστή, ούτως ώστε να παρουσιαστούν πιο ξεκάθαρα οι βελτιώσεις που προκύπτουν μετά από την υλοποίηση της.

Στο Σχήμα 7.4 παρουσιάζονται οι καμπύλες μέγιστου φορτίου του μετασχηματιστή, πριν και μετά την τεχνική που υλοποιήσαμε. Η αριστερή στήλη παρουσιάζει τα αποτελέσματα με μη-ελεγχόμενη φόρτιση, ενώ η δεξιά στήλη παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα μετά και την εφαρμογή της τεχνικής ελέγχου.

Στην περίπτωση όπου έχουμε μη-ελεγχόμενη φόρτιση παρατηρούμε ότι σε όλα τα σενάρια υπάρχουν παραβιάσεις στο ονομαστικό φορτίο του μετασχηματιστή. Αντιθέτως, μετά και την εφαρμογή της τεχνικής ελέγχου, οι μέγιστες τιμές των καμπυλών εξαιρουμένου του σεναρίου με τα μοντέλα Φ3, ΠΔ3 δεν υπερβαίνουν το ονομαστικό όριο του μετασχηματιστή, δηλαδή τα 630KVA. Σύμφωνα με αυτό, οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι θα μπορούσαμε να μειώσουμε ακόμη περισσότερο το όριο φόρτισης του μετασχηματιστή, ωστόσο, παραμονεύει το πρόβλημα ότι ορισμένα ΗΑ πιθανόν να μην φορτίζονταν πλήρως.



Σχήμα 7.4: Καμπύλη μέγιστου φορτίου μετασχηματιστή με το ονομαστικό όριο του (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), για μη-ελεγχόμενη φόρτιση (αριστερή στήλη) και για ελεγχόμενη φόρτιση μετασχηματιστή μέσω μείωσης ισχύος του φορτιστή (δεξιά στήλη), για εργάσιμες ημέρες

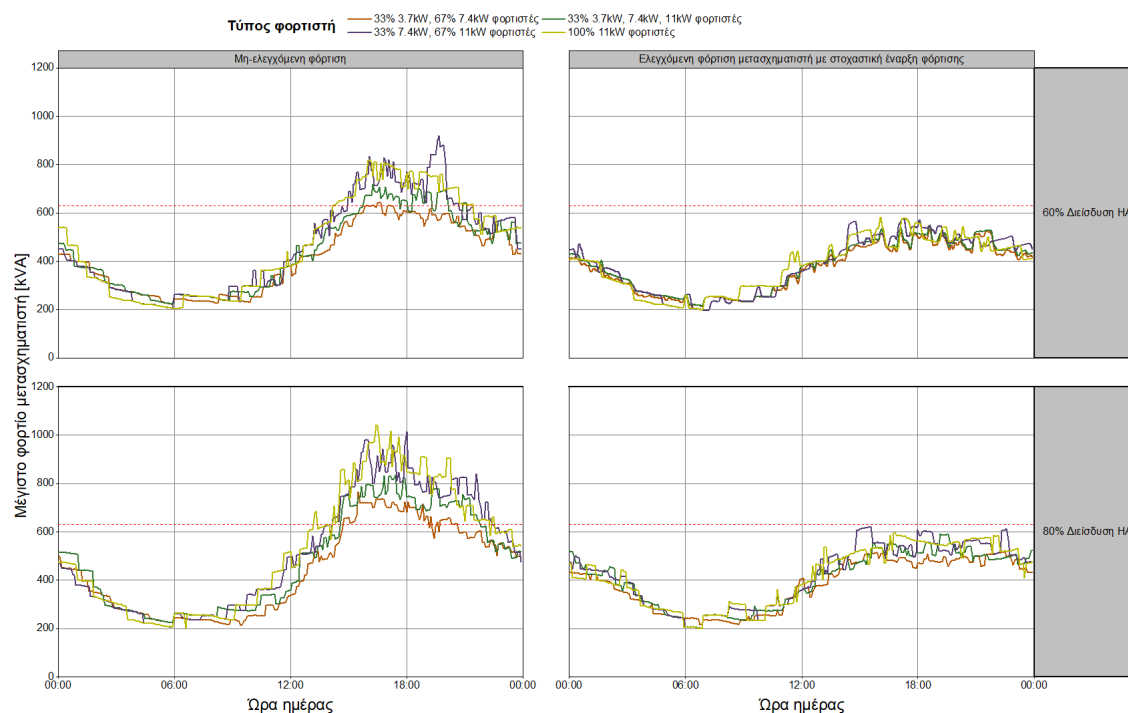
7.3.2 Ελεγχόμενη φόρτιση μετασχηματιστή με στοχαστική έναρξη φόρτισης

Η δεύτερη τεχνική ελέγχου κλειστού βρόχου, ομοίως με την πρώτη, αρχικά ελέγχει το φορτίο του μετασχηματιστή αν ξεπερνά ένα συγκεκριμένο όριο φόρτισης. Εάν και εφόσον δεν ξεπερνά το όριο, στέλνει σήμα προς όλους τους φορτιστές των ΗΑ επιτρέποντας ένα ποσοστό τους

να συνδεθούν για φόρτιση. Αντίθετα, εάν το φορτίο του μετασχηματιστή ξεπερνά αυτό το όριο, τότε ο φορτιστής ΗΑ λαμβάνει σήμα μη-επιτρέποντας του να συνδεθεί για φόρτιση τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή. Τα ΗΑ τα οποία δεν συνδέθηκαν για φόρτιση, μετατοπίζουν το φορτίο τους στην επόμενη χρονική στιγμή. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται για κάθε χρονική στιγμή.

Ο καθορισμός του επιτρεπτού ορίου φόρτισης του μετασχηματιστή καθώς και του ποσοστού ΗΑ που θα συνδέονται στο δίκτυο, δεδομένου ότι το σήμα επίτρεψης είναι μονάδα επιλέχθηκαν πειραματικά, όπως και στην Ενότητα 7.3.1. Αρχικά, θέσαμε ότι το όριο φόρτισης του μετασχηματιστή είναι 85% και το ποσοστό ΗΑ που θα συνδέονται είναι 25%. Παρ' όλα αυτά, παρατηρήσαμε πως η φόρτιση του μετασχηματιστή υπερέβαινε κατά πολύ το ονομαστικό του όριο. Αφού υλοποιήθηκαν διάφοροι συνδυασμοί των δύο παραμέτρων, με στόχο το ονομαστικό όριο φόρτισης του μετασχηματιστή να μην υπερβαίνεται και ταυτόχρονα τα ΗΑ να προλαβαίνουν να φορτίσουν προτού αναχωρήσουν από το σπίτι την επόμενη ημέρα, καταλήξαμε στις τιμές: 60% ορίου φόρτισης του μετασχηματιστή και 15% ποσοστού σύνδεσης ΗΑ για φόρτιση.

7.3.2.1 Αποτελέσματα



Σχήμα 7.5: Καμπύλη μέγιστου φορτίου μετασχηματιστή με το ονομαστικό όριο του (κόκκινη διακεκομμένη γραμμή), για μη-ελεγχόμενη φόρτιση (αριστερή στήλη) και για ελεγχόμενη φόρτιση μετασχηματιστή με στοχαστική έναρξη φόρτισης (δεξιά στήλη), για εργάσιμες ημέρες

Στο Σχήμα 7.5 παρουσιάζονται οι καμπύλες μέγιστου φορτίου του μετασχηματιστή, πριν και μετά την τεχνική που υλοποιήσαμε. Η αριστερή στήλη παρουσιάζει τα αποτελέσματα με μη-ελεγχόμενη φόρτιση, ενώ η δεξιά στήλη παρουσιάζει τα αντίστοιχα αποτελέσματα μετά και την

εφαρμογή της τεχνικής ελέγχου. Παρατηρώντας τα αποτελέσματα, μετά και την εφαρμογή της τεχνικής ελέγχου, οι μέγιστες τιμές των καμπυλών σε όλες τις περιπτώσεις, δεν ξεπερνούν το ονομαστικό όριο φόρτισης του μετασχηματιστή.

7.4 Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας, οι τεχνικές ελέγχου που υλοποιήθηκαν, μειώνουν αισθητά την επιρροή των ΗΑ στο δίκτυο, κυρίως οι τεχνικές κλειστού βρόγχου. Από τη μία πλευρά, η τεχνική ελέγχου ανοικτού βρόγχου είναι μία αρκετά οικονομική λύση για να υλοποιηθεί και στην πραγματικότητα, ωστόσο, απαιτείται ταχτικός και ακριβής έλεγχος αρχικού φορτίου καθώς και της ώρας άφιξης των χρηστών ΗΑ. Από την άλλη πλευρά, οι τεχνικές ελέγχου κλειστού βρόγχου, παρόλο που ότι είναι λιγότερο οικονομικές, ωστόσο, προσφέρουν μία περισσότερο αξιόπιστη και ακριβέστερη λύση. Η πρώτη τεχνική, είναι κοινωνικά πιο δίκαιη εφόσον όλα τα ΗΑ συνδέονται για φόρτιση με μειωμένη ισχύ, ενώ στη δεύτερη τεχνική παρόλο που υπάρχει η πιθανότητα ένα ΗΑ να μην συνδεθεί για φόρτιση, ωστόσο, τα αποτελέσματα της προσφέρουν καλύτερο έλεγχο του φορτίου των ΗΑ.

Κεφάλαιο 8

Επίλογος

Η εργασία αυτή περιγράφει μια ολοκληρωμένη δομή μοντελοποίησης ΗΑ μαζί με τα φορτία τους σε ένα δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης. Τα συμπεράσματα τα οποία ακολουθούν, παρέχουν τη θεμελιώδη βάση για μελλοντικές εργασίες σχετικά με τις παραμέτρους της μοντελοποίησης οι οποίες έχουν την υψηλότερη επιρροή (ή ευαισθησία) στα αποτελέσματα.

8.1 Σύνοψη

Η μοντελοποίηση της συμπεριφοράς οδήγησης αποτελεί τη βάση για τη διαδικασία δημιουργίας του φορτίου φόρτισης. Είναι το πιο σύνθετο στοιχείο για τη μοντελοποίηση ΗΑ και γι' αυτό απαιτείται προσοχή στο σχεδιασμό. Το μοναδικό μοντέλο που χρησιμοποιήσαμε στην εργασία βασίζεται στα δεδομένα από το ερωτηματολόγιο. Θεωρήσαμε αυτό το μοντέλο ως το πιο αποτελεσματικό όσο αφορά την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων, εφόσον βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα.

Ακολούθως, η μοντελοποίηση ΗΑ δείχνει ότι η ταξινόμηση των αυτοκινήτων που χρησιμοποιείται συνήθως δεν προκαλεί σημαντικές διαφορές στις μετρήσεις. Τα αποτελέσματα σχετικά με τη συμπεριφορά φόρτισης δείχνουν ότι η καθημερινή φόρτιση έχει μεγαλύτερη επιρροή από το ΟΟΚ όπου τα ΗΑ φορτίζουν πιο σπάνια.

Επιπρόσθετα, ο Τύπος φορτιστή που χρησιμοποιείται σχηματίζει μία πολύ σημαντική διάσταση παραμέτρου μοντελοποίησης. Ο κύριος λόγος είναι ότι οι υψηλότερες ισχύος φορτιστές προκαλούν μεγαλύτερα φορτία στο δίκτυο. Παρ' όλο που οι φορτιστές 11kW απαιτούν μικρό χρόνο φόρτισης, εντούτοις εξακολουθούν να φορτίζουν για σχετικά μεγάλο χρονικό διάστημα έτσι ώστε κατά τις απογευματινές ώρες που υπάρχει μεγάλη ζήτηση φόρτισης ΗΑ, να συσσωρεύεται μεγάλη ζήτηση ΗΕ προκαλώντας μεγάλες αιχμές.

Το ΠΔ ΗΑ, όπως ήταν αναμενόμενο, επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα μας, τόσο στη φόρτιση του μετασχηματιστή και της γραμμής όσο και στην τάση των ζυγών. Για την τοποθέτηση ΗΑ, η οποία δεν επηρεάζει γενικότερα τη φόρτιση του μετασχηματιστή αλλά κυρίως επηρεάζει τη φόρτιση των γραμμών και την τάση των ζυγών, είχαμε μόνο την ομοιόμορφη κατανομή. Ενδεχομένως, αν χρησιμοποιούσαμε μοντέλο που τοποθετούσε τα ΗΑ μαζεμένα, να υπήρχαν διαφοροποιήσεις στη φόρτιση των γραμμών καθώς και στις τάσεις των ζυγών. Ωστόσο, για μεγάλα ΠΔ ΗΑ, τα ΗΑ ήδη τοποθετούνται αρκετά πυκνά στο δίκτυο και συνεπώς

δεν επιλέξαμε επιπλέον μοντέλα, τα οποία δεν θα προσέφεραν ουσιαστικά αποτελέσματα παρά μόνο επιπλέον χρόνο προσομοίωσης.

Ανακεφαλαιώνοντας, όλα τα μοντέλα πρέπει να εξετασθούν ως προς τις επιρροές τους στα παρακάτω σημεία:

- 1) Όταν το αρχικό φορτίο συμπίπτει με το φορτίο HA, προκαλώντας ένα νέο, κατά πάσα πιθανότητα ανεπιθύμητο, μέγιστο φορτίο
- 2) Στο συγχρονισμό φόρτισης των HA
- 3) Συγκεντρωτικά ως επιπλέον φορτία στη φόρτιση του μετασχηματιστή, και σε τοπικό επίπεδο ως προς την τάση ζυγών και της φόρτισης των γραμμών

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω τρία σημεία, η σωστή μοντελοποίηση των παραμέτρων για τη διασφάλιση αξιόπιστου και ακριβούς αποτελέσματος, είναι επιβεβλημένη.

Σχετικά με την εφαρμογή των τεχνικών ελέγχου, δεν πρέπει να στοχεύουν μόνο στη μετατόπιση των φορτίων HA αλλά ταυτόχρονα και στη μείωση τους έτσι ώστε να μη δημιουργηθούν νέα, ανεπιθύμητα, φορτία αιχμής. Η τεχνική ελέγχου ανοικτού βρόχου είχε ως στόχο μόνο τη μετατόπιση του φορτίου HA, με κίνδυνο τη δημιουργία νέου φορτίου αιχμής. Για το λόγο αυτό, η ανάλυση αρχικού φορτίου καθώς και της ώρας άφιξης των HA κρίθηκε αναγκαία για την ελαχιστοποίηση αυτού του κινδύνου. Αντιθέτως, οι τεχνικές ελέγχου βρόχου είχαν ως στόχο τόσο στη μετατόπιση του φορτίου HA όσο και στην ελαχιστοποίηση της πιθανότητας δημιουργίας νέων φορτίων αιχμής. Αποδείχθηκε ότι, μέσω και των αποτελεσμάτων, οι τεχνικές ελέγχου κλειστού βρόχου είναι πολύ πιο αποδοτικές από αυτές του ανοικτού βρόχου.

8.2 Προοπτικές για μελλοντικές εργασίες

Οι παράμετροι μαζί με τα μοντέλα τα οποία δημιουργήθηκαν για την ανάλυση, βοήθησαν στο να επιτευχθεί καλύτερη κατανόηση της επιρροής τους ως προς το δίκτυο. Παρ' όλα αυτά, εξακολουθεί να είναι βασισμένο σε συγκεκριμένα δεδομένα αναφορικά με το μοντέλο δικτύου συμπεριλαμβανομένου και του αρχικού φορτίου. Επομένως, απαραίτητο επόμενο βήμα μπορεί να θεωρηθεί η διερεύνηση της επιρροής από άλλα μοντέλα δικτύου, είτε τα οποία έχουν γραμμές-μετασχηματιστές χαμηλότερης ονομαστικής τιμής είτε μεγαλύτερο αρχικό φορτίο. Επιπρόσθετα, η διερεύνηση πολυπλοκότερων μοτίβων οδήγησης θεωρείται αναγκαία, καθώς στην εργασία χρησιμοποιήθηκε ένα σχετικά απλοποιημένο μοτίβο οδήγησης, μέσω ενός μικρού δείγματος από το ερωτηματολόγιο.

Ακόμη ένα σημείο όπου απαιτείται να γίνουν περαιτέρω παραδοχές, είναι στη μοντελοποίηση των φορτιστών HA, για δύο συγκεκριμένους λόγους. Ο πρώτος είναι η γρήγορη εξέλιξη για την ισχύ των φορτιστών η οποία όλο και μεγαλώνει, δημιουργώντας έτσι μεγαλύτερα φορτία στο δίκτυο. Ο δεύτερος έχει σχέση με το συντελεστή ισχύος των φορτιστών. Η ραγδαία διεύθυνση ασύγχρονων ΑΠΕ στο δίκτυο, αναγκάζει τη χρήση ηλεκτρονικών ισχύος έτσι ώστε να διασφαλίζεται η σωστή λειτουργία του δικτύου καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας. Συνεπώς, για τους φορτιστές HA θα απαιτείται πιο πολύπλοκη μοντελοποίηση απ' ό,τι τώρα

όπου ο συντελεστής ισχύος τους θεωρήθηκε μονάδα, ούτως ώστε να συμβάλλουν και αυτοί στη σωστή και ασφαλή λειτουργία του δικτύου.

Παράλληλα, με τις εκθετικά αυξανόμενες πωλήσεις των ΗΑ περισσότερα σύνολα δεδομένων συμπεριφοράς φόρτισης θα γίνουν διαθέσιμα. Η καταγραφή, η ανάλυση καθώς και η σύγκριση τους με τα δημιουργηθέντα μοντέλα συμπεριφοράς φόρτισης, θα παρέχουν την ευκαιρία μίας βελτιωμένης και πιο αξιόπιστης μοντελοποίησης.

Τέλος, η ανησυχία για τις τεχνικές ελέγχου ΗΑ για το πότε καθώς και με ποιους αλγόριθμους εισάγονται, πρέπει να λαμβάνεται υπόψη. Σαν αποτέλεσμα αυτών των ερωτημάτων, είναι η ανάγκη επέκτασης της δομής μοντελοποίησης ούτως ώστε να δώσει απαντήσεις σχετικά με πρόσφατα εμφανιζόμενες ευαισθησίες, όπως για παράδειγμα το ποσοστό συμμετοχής των ΗΑ στον έλεγχο του συστήματος. Με την εξέλιξη των δικτύων σε έξυπνα δίκτυα, μία μελέτη θα πρέπει να εμπεριέχει τη μελέτη των επιρροών τόσο της κατανεμημένης παραγωγής μέσα στο δίκτυο όσο και των πιο προσαρμοσμένων φορτίων, στην επιρροή των ΗΑ. Στο τέλος, με τον κατάλληλο έλεγχο θα μπορεί να αποδειχθεί ότι το δίκτυο μπορεί να υποστηρίξει τα ΗΑ εάν και εφόσον ελέγχονται σωστά.

Βιβλιογραφία

- [1] IEA (2020). Global ev outlook 2020. <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>, 2020.
- [2] IEA (2020). Innovation in batteries and electricity storage. <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>, 2020.
- [3] A. Ashtari and E. Bibeau and S. Shahidinejad and T. Molinski. Pev charging profile prediction and analysis based on vehicle usage data. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1):341–350, 2012.
- [4] A. Lojowska and D. Kurowicka and G. Papaefthymiou and L. van der Sluis. From transportation patterns to power demand: Stochastic modeling of uncontrolled domestic charging of electric vehicles. Στο *2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, σελίδες 1–7, 2011.
- [5] A. Lojowska and D. Kurowicka and G. Papaefthymiou and L. van der Sluis. Stochastic modeling of power demand due to evs using copula. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(4):1960–1968, 2012.
- [6] A. O’Connell and D. Flynn and A. Keane. Rolling multi-period optimization to control electric vehicle charging in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(1):340–348, 2014.
- [7] A. Soroudi and A. Keane. Robust optimization based ev charging. Στο *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, σελίδες 1–6, 2014.
- [8] A. T. Al-Awami and E. Sortomme. Coordinating vehicle-to-grid services with energy trading. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1):453–462, 2012.
- [9] Ayla Kangur and Wander Jager and Rineke Verbrugge and Marija Bockarjova. An agent-based model for diffusion of electric vehicles. *Journal of Environmental Psychology*, 52:166 – 182, 2017.
- [10] B. Wang and Y. Wang and H. Nazaripouya and C. Qiu and C. Chu and R. Gadh. Predictive scheduling framework for electric vehicles with uncertainties of user behaviors. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(1):52–63, 2017.

- [11] Canizes, Bruno and Soares, João and Costa, Ângelo and Pinto, Tiago and Lezama, Fernando and Novais, Paulo and Vale, Zita. Electric vehicles' user charging behaviour simulator for a smart city. *Energies*, 12:1470, 2019.
- [12] Chris Silvia and Rachel M. Krause. Assessing the impact of policy interventions on the adoption of plug-in electric vehicles: An agent-based model. *Energy Policy*, 96:105 – 118, 2016.
- [13] D. Dallinger and D. Krampe and M. Wietschel. Vehicle-to-grid regulation reserves based on a dynamic simulation of mobility behavior. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(2):302–313, 2011.
- [14] D. S. Callaway and I. A. Hiskens. Achieving controllability of electric loads. *Proceedings of the IEEE*, 99(1):184–199, 2011.
- [15] D. Steen and L. Tuan and O. Carlson and L. Berling. Assessment of electric vehicle charging scenarios based on demographical data. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3:1457–1468, 2012.
- [16] EV Database. Electric vehicle database. <https://ev-database.org/>, 2021.
- [17] E. Sortomme and M. A. El-Sharkawi. Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1):131–138, 2011.
- [18] E. Sortomme and M. M. Hindi and S. D. J. MacPherson and S. S. Venkata. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1):198–205, 2011.
- [19] F. Soares and J. Lopes and P. Almeida and C. Moreira and L. Seca and R. Frías. A stochastic model to simulate electric vehicles motion and quantify the energy required from the grid. *Στο 17th Power Systems Computation Conference*, 2011.
- [20] G. Li and X. Zhang. Modeling of plug-in hybrid electric vehicle charging demand in probabilistic power flow calculations. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1):492–499, 2012.
- [21] Guo, Qinglai and Wang, Yao and Li, Zhengshuo and Xin, Shujun and Zhang, B.H. Factor analysis of the aggregated electric vehicle load based on data mining. *Energies*, 5, 2012.
- [22] IEA. <https://www.worldometers.info/co2-emissions/cyprus-co2-emissions/>, 2016.
- [23] J. A. P. Lopes and F. J. Soares and P. M. R. Almeida. Integration of electric vehicles in the electric power system. *Proceedings of the IEEE*, 99(1):168–183, 2011.
- [24] J. Tan and L. Wang. Integration of plug-in hybrid electric vehicles into residential distribution grid based on two-layer intelligent optimization. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5(4):1774–1784, 2014.

- [25] J. Zhao and C. Wan and Z. Xu and J. Wang. Risk-based day-ahead scheduling of electric vehicle aggregator using information gap decision theory. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8(4):1609–1618, 2017.
- [26] K. Chaudhari and N. K. Kandasamy and A. Krishnan and A. Ukil and H. B. Gooi. Agent-based aggregated behavior modeling for electric vehicle charging load. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(2):856–868, 2019.
- [27] K. Clement-Nyns and E. Haesen and J. Driesen. The impact of charging plug-in hybrid electric vehicles on a residential distribution grid. *IEEE Transactions on Power Systems*, 25(1):371–380, 2010.
- [28] K. Qian and C. Zhou and M. Allan and Y. Yuan. Modeling of load demand due to ev battery charging in distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(2):802–810, 2011.
- [29] L. Pieltain Fernández and T. Gomez San Roman and R. Cossent and C. Mateo Domingo and P. Frías. Assessment of the impact of plug-in electric vehicles on distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1):206–213, 2011.
- [30] M. G. Vayá and G. Andersson and S. Boyd. Decentralized control of plug-in electric vehicles under driving uncertainty. Στο *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, σελίδες 1–6, 2014.
- [31] Masoum, A.S. and Deilami, S. and Moses, Paul and Masoum, M.A.S. and Abu-Siada, A. Smart load management of plug-in electric vehicles in distribution and residential networks with charging stations for peak shaving and loss minimisation considering voltage regulation. *Generation, Transmission & Distribution, IET*, 5:877 – 888, 2011.
- [32] N. Rotering and M. Ilic. Optimal charge control of plug-in hybrid electric vehicles in deregulated electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(3):1021–1029, 2011.
- [33] Electricity Authority of Cyprus. ‘ΤΥΠΙΚΑ ΠΡΟΦΙΛ ΕΝΕΡΓΟΥ ΙΣΧΥΟΣ ΓΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΩΤΕΣ ΣΥΝΔΕΔΕΜΕΝΟΥΣ ΣΤΟ ΣΥΣΤΗΜΑ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2020’. <https://www.eac.com.cy/EL/RegulatedActivities/Distribution/agorailektrismou/Documents/%CE%A4%CF%85%CF%80%CE%B9%CE%BA%CE%AC%20%CE%A0%CF%81%CE%BF%CF%86%CE%AF%CE%BB%20%CE%9A%CE%B1%CF%84%CE%B1%CE%BD%CE%AC%CE%BB%CF%89%CF%83%CE%B7%CF%82%20%CE%B3%CE%B9%CE%B1%20%CF%84%CE%BF%20%CE%AD%CF%84%CE%BF%CF%82%202020.pdf>, 2021.
- [34] Origin. Version 2021 , originlab corporation. <https://www.originlab.com/>, 2021.
- [35] P. Richardson and D. Flynn and A. Keane. Optimal charging of electric vehicles in low-voltage distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 27(1):268–279, 2012.

- [36] PlugShare. <https://www.plugshare.com/location/306199>, 2021.
- [37] J. Pontes. Tesla model 3 breaks records in hot market — europe ev sales report. <https://cleantechnica.com/2019/10/30/tesla-model-3-breaks-records-in-hot-market-europe-ev-sales-report/>, 2019.
- [38] R. Leou and C. Su and C. Lu. Stochastic analyses of electric vehicle charging impacts on distribution network. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(3):1055–1063, 2014.
- [39] R.D. Zimmerman and C.E. Murillo-Sanchez. Matpower user’s manual. <https://matpower.org/docs/MATPOWER-manual-7.0.pdf>, 2019.
- [40] Rodica Loisel and Guzay Pasaoglu and Christian Thiel. Large-scale deployment of electric vehicles in germany by 2030: An analysis of grid-to-vehicle and vehicle-to-grid concepts. *Energy Policy*, 65:432 – 443, 2014.
- [41] S. Huang and D. Infield. The impact of domestic plug-in hybrid electric vehicles on power distribution system loads. Στο *2010 International Conference on Power System Technology*, σελίδες 1–7, 2010.
- [42] S. Rezaee and E. Farjah and B. Khorramdel. Probabilistic analysis of plug-in electric vehicles impact on electrical grid through homes and parking lots. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 4(4):1024–1033, 2013.
- [43] S. Shahidinejad and S. Filizadeh and E. Bibeau. Profile of charging load on the grid due to plug-in vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1):135–141, 2012.
- [44] S. Shao and M. Pipattanasomporn and S. Rahman. Demand response as a load shaping tool in an intelligent grid with electric vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(4):624–631, 2011.
- [45] James C. Spall. *Introduction to Stochastic Search and Optimization: Estimation, Simulation, and Control*. John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
- [46] T. Lee and B. Adornato and Z. S. Filipi. Synthesis of real-world driving cycles and their use for estimating phev energy consumption and charging opportunities: Case study for midwest/u.s. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 60(9):4153–4163, 2011.
- [47] T. Zhang and W. Chen and Z. Han and Z. Cao. Charging scheduling of electric vehicles with local renewable energy under uncertain electric vehicle arrival and grid power price. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 63(6):2600–2612, 2014.
- [48] Παντελή Σωκράτης, Πισσαρίδης Χαράλαμπος. “Προφίλ οδηγικής συμπεριφοράς στη Κύπρο/driving profile in cyprus”. <https://forms.gle/aAQyo1S28qds7dXPA>, 2020.

- [49] Thomas Franke and Josef F. Krems. Understanding charging behaviour of electric vehicle users. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 21:75 – 89, 2013.
- [50] Voumvoulakis, Emmanouil and Leonidaki, Eirini and Papoutsis, Georgios and Hatziaargyriou, Nikolaos. Evaluation of the impact of plug-in electric vehicles in greek distribution network. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017:2270–2274, 2017.
- [51] Wenbo Shi και V. W. S. Wong. Real-time vehicle-to-grid control algorithm under price uncertainty. Στο *2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, σελίδες 261–266, 2011.
- [52] Roy Billinton Wenyuan Li. *Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods*. Springer, Boston, MA, 1994.
- [53] M. Woodward, B. Walton, J. Hamilton και G. Alberts S. Fullerton-Smith E. Day J. Ringrow. <https://www2.deloitte.com/uk/en/insights/focus/future-of-mobility/electric-vehicle-trends-2030.html>, 2020.
- [54] X. Bai and W. Qiao. Robust optimization for bidirectional dispatch coordination of large-scale v2g. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(4):1944–1954, 2015.
- [55] Y. Cao and S. Tang and C. Li and P. Zhang and Y. Tan and Z. Zhang and J. Li. An optimized ev charging model considering tou price and soc curve. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 3(1):388–393, 2012.
- [56] Y. Zhou and D. K. Y. Yau and P. You and P. Cheng. Optimal-cost scheduling of electrical vehicle charging under uncertainty. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9(5):4547–4554, 2018.

Παράρτημα

Παράρτημα Α΄

Δομή ερωτηματολογίου

Το ερωτηματολόγιο το οποίο δημιουργήσαμε περιείχε τις παρακάτω ερωτήσεις:

- 1) Ποιος είναι ο 4-ψήφιος ταχυδρομικός κώδικας στον τόπο διαμονής σας· (π.χ. 3180) /
What is the 4-digit ZIP code at your residence? (e.g. 3180)
- 2) Σε τι είδους οικία διαμένετε· / In which type of house do you live?
- 3) Ποια από τις παρακάτω κατηγορίες περιγράφει καλύτερα την εργασιακή σας κατάσταση·
/ Which of the following categories describes best your employment status?
- 4) Είστε ιδιοκτήτης αυτοκινήτου· / Do you own a car?
- 5) Τι μεταφορικό μέσο χρησιμοποιείτε για τη μετακίνησή σας στη δουλειά· / What means
of transportation do you use to get to work?
- 6) Τι ώρα αναχωρείτε για τη δουλειά/πανεπιστήμιο σας· / What time do you depart for
work/university from home?
- 7) Τι ώρα φτάνετε σπίτι μετά το τέλος της ημέρας· / What time do you arrive at home
at the end of the day?
- 8) Πόση απόσταση (σε χιλιόμετρα) οδηγείτε περίπου με το αυτοκίνητο σε μια εργάσιμη
μέρα· / What distance (in kilometres) do you drive by car during 1 workday?
- 9) Πόση απόσταση (σε χιλιόμετρα) οδηγείτε περίπου μια μη εργάσιμη ημέρα· / What
distance (in kilometers) do you drive by car during a non-working day?
- 10) Είστε ιδιοκτήτης ηλεκτρικού αυτοκινήτου· / Do you own an electric car?
- 11) Πόσες φορές την εβδομάδα φορτίζετε το αυτοκίνητο σας· / How many times per week
do you charge your car?
- 12) Πού φορτίζετε το αυτοκίνητο σας· / Where do you charge your car?
- 13) Τι ώρα αρχίζετε συνήθως το φόρτισμα του αυτοκινήτου σας· / What time do you
usually plug in your car for charging?

- 14) Αν οι τιμές των ηλεκτρικών αυτοκινήτων ήταν συγκρίσιμες με τα συμβατικά αυτοκίνητα, θα αγοράζατε ηλεκτρικό αυτοκίνητο. / Would you buy an electric car if their prices were similar to conventional cars?

