



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Αξιολόγηση τεχνολογιών Vehicle-to-Grid στη λειτουργία δικτύων
διανομής χαμηλής τάσης**

Διπλωματική Εργασία

Χαράλαμπος Καρακύργιος

Επιβλέπων: Ελευθέριος Κόντης

Σεπτέμβριος 2025



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**Αξιολόγηση τεχνολογιών Vehicle-to-Grid στη λειτουργία δικτύων
διανομής χαμηλής τάσης**

Διπλωματική Εργασία

Χαράλαμπος Καρακύργιος

Επιβλέπων: Ελευθέριος Κόντης

Σεπτέμβριος 2025



UNIVERSITY OF THESSALY

SCHOOL OF ENGINEERING

DEPARTMENT OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING

**Assessment of Vehicle-to-Grid technologies in the operation of
low voltage distribution systems**

Diploma Thesis

Charalampos Karakyrgios

Supervisor: Eleftherios Kontis

September 2025

Εγκρίνεται από την Επιτροπή Εξέτασης:

Επιβλέπων

Ελευθέριος Κόντης

Επίκουρος Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Δημήτριος Μπαργιώτας

Καθηγητής, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών
Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Μέλος

Ασπασία Δασκαλοπούλου

Αναπληρώτρια Καθηγήτρια, Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και
Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

**ΥΠΕΥΘΥΝΗ ΔΗΛΩΣΗ ΠΕΡΙ ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΗΣ ΔΕΟΝΤΟΛΟΓΙΑΣ ΚΑΙ ΠΝΕΥΜΑΤΙΚΩΝ
ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ**

Με πλήρη επίγνωση των συνεπειών του νόμου περί πνευματικών δικαιωμάτων, δηλώνω ρητά ότι η παρούσα διπλωματική εργασία, καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας, αποτελούν αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλουν οποιασδήποτε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχουν έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή/και πηγές άλλων συγγραφέων αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. Δηλώνω επίσης ότι τα αποτελέσματα της εργασίας δεν έχουν χρησιμοποιηθεί για την απόκτηση άλλου πτυχίου. Αναλαμβάνω πλήρως, ατομικά και προσωπικά, όλες τις νομικές και διοικητικές συνέπειες που δύναται να προκύψουν στην περίπτωση κατά την οποία αποδειχθεί, διαχρονικά, ότι η εργασία αυτή ή τμήμα της δεν μου ανήκει διότι είναι προϊόν λογοκλοπής.

Ο Δηλών

Χαράλαμπος Καρακύργιος

DISCLAIMER ON ACADEMIC ETHICS AND INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS

Being fully aware of the implications of copyright laws, I expressly state that this diploma thesis, as well as the electronic files and source codes developed or modified in the course of this thesis, are solely the product of my personal work and do not infringe any rights of intellectual property, personality and personal data of third parties, do not contain work / contributions of third parties for which the permission of the authors / beneficiaries is required and are not a product of partial or complete plagiarism, while the sources used are limited to the bibliographic references only and meet the rules of scientific citing. The points where I have used ideas, text, files and / or sources of other authors are clearly mentioned in the text with the appropriate citation and the relevant complete reference is included in the bibliographic references section. I also declare that the results of the work have not been used to obtain another degree. I fully, individually and personally undertake all legal and administrative consequences that may arise in the event that it is proven, in the course of time, that this thesis or part of it does not belong to me because it is a product of plagiarism.

The Declarant

Charalampos Karakyrgios

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφιερώνεται με αγάπη στην οικογένειά μου και σε όλους τους δικούς μου ανθρώπους, οι οποίοι με στήριξαν αδιάκοπα και πίστεψαν σε εμένα σε κάθε μου βήμα. Η αμέριστη συμπαράστασή τους αποτέλεσε για εμένα πηγή δύναμης και έμπνευσης. Επιθυμώ να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα της εργασίας, κ. Κόντη Ελευθέριο, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη διαρκή υποστήριξη και την ψύχραιμη στάση του καθ' όλη τη διάρκεια της συνεργασίας μας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την Εξεταστική Επιτροπή για τον χρόνο, την προσοχή και την επικοινωνιακή αξιολόγηση της εργασίας μου.

Διπλωματική Εργασία

Αξιολόγηση τεχνολογιών Vehicle-to-Grid στη λειτουργία δικτύων διανομής χαμηλής τάσης

Χαράλαμπος Καρακύργιος

Περίληψη

Η αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων (ΗΟ) ολοένα και διευρύνεται με το ερευνητικό κομμάτι όσον αφορά την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων που προσφέρει η ηλεκτροκίνηση να βρίσκεται στις κορυφαίες θέσεις της επικαιρότητας. Η τεχνολογία Vehicle-to-Grid (V2G), με το όχημα να έχει διττό ρόλο ως προς το δίκτυο, αποτελεί καινοτόμο ιδέα κατά την οποία τα οχήματα που την υποστηρίζουν έχουν τη δυνατότητα να επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή ισχύος από και προς το δίκτυο. Με κατάλληλη ένταξη αλγορίθμων φόρτισης, η V2G τεχνολογία παρέχει την δυνατότητα επιστροφής ισχύος στο δίκτυο διανομής μέσω της αξιοποίησης των μπαταριών των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Αυτό θα δημιουργήσει νέες οικονομικές δυνατότητες στους χρήστες των V2G ηλεκτρικών αυτοκινήτων, όμως ενδέχεται να επηρεάσει την σταθερότητα του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας θα διερευνηθεί η δυνατότητα χρήσης ΗΟ τεχνολογίας V2G προς το οικονομικό όφελος των χρηστών και η επίδραση τους στη λειτουργία των δικτύων διανομής χαμηλής τάσης. Επιπλέον, πραγματοποιήθηκαν συγκρίσεις θεωρώντας ΗΟ που δε διαθέτουν τεχνολογίες V2G. Τα αποτελέσματα που εξήχθησαν επιβεβαιώνουν την οικονομική αποδοτικότητα των V2G ΗΟ, υπερκαλύπτοντας κατά 100% το ημερήσιο κόστος φόρτισης και προσφέροντας κατά μέσο όρο 52% κερδοφορία με βάση τις περιπτώσεις που μελετήθηκαν σε σχέση με τα συμβατικά ΗΟ που διαθέτουν μόνο «έξυπνη φόρτιση». Παράλληλα, αναλύθηκαν μετρήσιμα δεδομένα που αφορούν την πτώση τάσης στο δίκτυο μέσω της προσομοίωσης του δικτύου διανομής και παρατηρήθηκαν αυξήσεις έως και 234% στην μέγιστη εμφανιζόμενη πτώση τάσης, από την βέλτιστη μέχρι την λιγότερο αποδοτική τοποθέτηση των ΗΟ στο δίκτυο που μελετήθηκε.

Λέξεις-κλειδιά: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, Δίκτυο Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας, Έξυπνο Δίκτυο, Ηλεκτροκίνηση, Οικονομική Αποδοτικότητα, Πτώση Τάσης, V2G

Assessment of Vehicle-to-Grid technologies in the operation of low voltage distribution systems

Charalampos Karakyrgios

Abstract

The electric vehicle (EV) market is continuously expanding, with the research focus on fully exploiting the potential offered by electromobility being at the forefront of current developments. Vehicle-to-Grid (V2G) technology, in which the vehicle assumes a dual role with respect to the grid, constitutes an innovative concept whereby supported vehicles have the capability to enable bidirectional power flow to and from the grid. With the appropriate integration of charging algorithms, V2G technology allows the return of power to the distribution grid through the utilization of EV batteries. This creates new economic opportunities for V2G users; however, it may also impact the stability of the electricity distribution network.

Within the framework of this thesis, the feasibility of employing EVs with V2G technology for the economic benefit of users, as well as their impact on the operation of low-voltage distribution networks, is investigated. In addition, comparisons were conducted considering EVs that do not incorporate V2G technologies. The results confirm the economic efficiency of V2G-enabled EVs, fully offsetting 100% of the daily charging cost and providing, on average, a 52% profit margin in the examined cases, compared to conventional EVs equipped only with “smart charging.” At the same time, measurable data regarding voltage drop in the grid were analyzed through distribution network simulation, and increases of up to 234% in the maximum observed voltage drop were identified, depending on the optimal versus the least efficient allocation of EVs within the studied network.

Keywords: Economic Efficiency, Electromobility (E-mobility), Electricity Distribution Network, Renewable Energy Sources, Smart Grid, Vehicle-to-Grid (V2G), Voltage Drop

Πίνακας περιεχομένων

Ευχαριστίες	x
Περίληψη	xi
Abstract.....	xii
Πίνακας Περιεχομένων.....	xiii
Κατάλογος Εικόνων	xv
Κατάλογος Πινάκων.....	xix
Συντομογραφίες	xx
Κεφάλαιο 1 Εισαγωγή.....	1
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής.....	2
1.1.1 Συνεισφορά	2
1.2 Οργάνωση του τόμου	3
Κεφάλαιο 2 Η Τεχνολογία V2G και οι Δυνατότητες της.....	4
2.1 Εισαγωγή	4
2.1.1 Διείσδυση Ηλεκτρικών Οχημάτων στην Αγορά	4
2.1.2 Η Ενεργειακή Αυτονομία των Ηλεκτρικών Οχημάτων.....	5
2.2 Θεωρητικό πλαίσιο της τεχνολογίας V2G.....	6
2.2.1 Περιγραφή βασικής ιδέας του V2G	6
2.2.2 Δυνατότητες και περιπτώσεις χρήσης V2G στο δίκτυο	7
2.2.3 PHEVs και V2G.....	9
2.2.4 Οικονομικά οφέλη του καταναλωτή από V2G.....	10
2.2.5 Παράδειγμα Αλγορίθμου Έξυπνης Φόρτισης προς όφελος του δικτύου διανομής	11
Κεφάλαιο 3 Μελέτη Αλγορίθμων Φόρτισης.....	12
3.1 Εισαγωγή.....	12
3.1.1 Αναφορά των παραμέτρων.....	12
3.1.2 Τιμολόγηση κιλοβατώρας	13
3.1.3 Δεδομένα Χρηστών Ηλεκτρικών Οχημάτων της προσομοίωσης	14
3.2 Ανάλυση λειτουργίας Αλγορίθμων	14

3.2.1 Αλγόριθμος με δυνατότητα V2G μετά την ώρα παράδοσης στο 24ωρο...	14
3.2.2 Αλγόριθμος V2G διαμορφωμένος για μέγιστο οικονομικό κέρδος	18
3.2.3 Αλγόριθμος χωρίς V2G με χρήση «έξυπνης φόρτισης»	21
3.2.4 Αλγόριθμος Απλής Φόρτισης	23
3.3 Παράθεση και σύγκριση αποτελεσμάτων	23
3.3.1 Αποτελέσματα Αλγορίθμου Simple_V2G_24h	23
3.3.2 Αποτελέσματα Αλγορίθμου Optimized_Max_Profit	27
3.3.3 Αποτελέσματα Αλγορίθμου NO_V2G_Smartcharge.....	30
3.3.4 Αποτελέσματα Αλγορίθμου Simple_Charge	33
3.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα.....	37
3.4.1 Συμπεράσματα λειτουργίας αλγορίθμων	37
3.4.2 Οικονομικά αποτελέσματα	37
3.4.3 Συμπεράσματα για τις περιπτώσεις χρήσης των αλγορίθμων	40
Κεφάλαιο 4 Μελέτη Δικτύου Διανομής Χαμηλής Τάσης	42
4.1 Εισαγωγή.....	42
4.1.1 Σκοπός της προσομοίωσης	42
4.2 Παρουσίαση και υλοποίηση του δικτύου	43
4.3 Υλοποίηση Αλγορίθμου Προσομοίωσης Δικτύου στο MATLAB	44
4.3.1 Βασική Λειτουργία Αλγορίθμου.....	44
4.4 Παράθεση αποτελεσμάτων	44
4.4.1 Προσομοίωση Δικτύου Διανομής: Σενάριο#1 (θέσεις 1-6)	44
4.4.2 Προσομοίωση Δικτύου Διανομής: Σενάριο#2 (θέσεις 1-3-5-7-9-10)	57
4.4.3 Προσομοίωση Δικτύου Διανομής: Σενάριο#3 (θέσεις 6-11)	70
4.5 Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις	83
4.5.1 Πίνακες Αποτελεσμάτων Πτώσης Τάσης	84
Κεφάλαιο 5 Συμπεράσματα και Προτάσεις	88
5.1 Συμπεράσματα.....	88
5.2 Προτάσεις και μελλοντικές βελτιώσεις	89
Βιβλιογραφία	91

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 2.1: Μέση και Μέγιστη Αυτονομία HO	5
Εικόνα 2.2: Βασική Ιδέα V2G	7
Εικόνα 2.3: Παραδείγματα Αυτόνομων Λειτουργιών V2G	8
Εικόνα 3.1: Πορεία τιμής KWh σε 24h.....	13
Εικόνα 3.2: Διάγραμμα Ροής αλγορίθμου Simple_V2G_24h.....	17
Εικόνα 3.3: Διάγραμμα Ροής αλγορίθμου Optimized_Max_Profit.....	20
Εικόνα 3.4: Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου No_V2G_smartcharge.....	22
Εικόνα 3.5: Ημερήσιο Κέρδος από V2G.....	23
Εικόνα 3.6 Simple_V2G_24h HO1.....	24
Εικόνα 3.7 Simple_V2G_24h HO2.....	25
Εικόνα 3.8 Simple_V2G_24h HO3.....	25
Εικόνα 3.9 Simple_V2G_24h HO4.....	26
Εικόνα 3.10 Simple_V2G_24h HO5.....	26
Εικόνα 3.11 Simple_V2G_24h HO6.....	27
Εικόνα 3.12: Optimized_max_Profit HO1.....	27
Εικόνα 3.13: Optimized_max_Profit HO2.....	28
Εικόνα 3.14: Optimized_max_Profit HO3.....	28
Εικόνα 3.15: Optimized_max_Profit HO4.....	29
Εικόνα 3.16: Optimized_max_Profit HO5.....	29
Εικόνα 3.17: Optimized_max_Profit HO6.....	30
Εικόνα 3.18: No_V2G_Smartcharge HO1	30
Εικόνα 3.19: No_V2G_Smartcharge HO2	31
Εικόνα 3.20: No_V2G_Smartcharge HO3	31
Εικόνα 3.21: No_V2G_Smartcharge HO4	32
Εικόνα 3.22: No_V2G_Smartcharge HO5	32
Εικόνα 3.23: No_V2G_Smartcharge HO6	33
Εικόνα 3.24: Κόστος Φόρτισης ανά HO για Simple_Charge.....	33
Εικόνα 3.25: Simple_Charge HO1	34

Εικόνα 3.26: Simple_Charge HO2	34
Εικόνα 3.27: Simple_Charge HO3	35
Εικόνα 3.28: Simple_Charge HO4	35
Εικόνα 3.29: Simple_Charge HO5	36
Εικόνα 3.30: Simple_Charge HO6	36
Εικόνα 3.31: Καθαρά Κέρδη και Κόστη ανά HO	38
Εικόνα 3.32: Ρεαλιστικά Καθαρά Κέρδη και Κόστη ανά HO	39
Εικόνα 4.1: Μορφολογία Δικτύου Διανομής.....	43
Εικόνα 4.2: Optimized_Max_Profit L108 Σενάριο#1 (1-6)	45
Εικόνα 4.3: Optimized_Max_Profit L111 Σενάριο#1 (1-6)	46
Εικόνα 4.4: Optimized_Max_Profit L120 Σενάριο#1 (1-6)	46
Εικόνα 4.5: Optimized_Max_Profit L126 Σενάριο#1 (1-6)	47
Εικόνα 4.6: Optimized_Max_Profit L128 Σενάριο#1 (1-6)	47
Εικόνα 4.7: Optimized_Max_Profit L134 Σενάριο#1 (1-6)	48
Εικόνα 4.8: Simple_V2G_24h L108 Σενάριο#1 (1-6)	48
Εικόνα 4.9: Simple_V2G_24h L111 Σενάριο#1 (1-6)	49
Εικόνα 4.10: Simple_V2G_24h L120 Σενάριο#1 (1-6)	49
Εικόνα 4.11: Simple_V2G_24h L126 Σενάριο#1 (1-6)	50
Εικόνα 4.12: Simple_V2G_24h L128 Σενάριο#1 (1-6)	50
Εικόνα 4.13: Simple_V2G_24h L108 Σενάριο#1 (1-6)	51
Εικόνα 4.14: No_V2G_smartcharge L108 Σενάριο#1 (1-6)	51
Εικόνα 4.15: No_V2G_smartcharge L111 Σενάριο#1 (1-6)	52
Εικόνα 4.16: No_V2G_smartcharge L120 Σενάριο#1 (1-6)	52
Εικόνα 4.17: No_V2G_smartcharge L126 Σενάριο#1 (1-6)	53
Εικόνα 4.18: No_V2G_smartcharge L128 Σενάριο#1 (1-6)	53
Εικόνα 4.19: No_V2G_smartcharge L134 Σενάριο#1 (1-6)	54
Εικόνα 4.20: Simple_Charge L108 Σενάριο#1 (1-6)	54
Εικόνα 4.21: Simple_Charge L111 Σενάριο#1 (1-6)	55
Εικόνα 4.22: Simple_Charge L120 Σενάριο#1 (1-6)	55

Εικόνα 4.23: Simple_Charge L126 Σενάριο#1 (1-6)	56
Εικόνα 4.24: Simple_Charge L128 Σενάριο#1 (1-6)	56
Εικόνα 4.25: Simple_Charge L134 Σενάριο#1 (1-6)	57
Εικόνα 4.26: Optimized_Max_Profit L108 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	58
Εικόνα 4.27: Optimized_Max_Profit L111 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	59
Εικόνα 4.28: Optimized_Max_Profit L120 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	59
Εικόνα 4.29: Optimized_Max_Profit L126 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	60
Εικόνα 4.30: Optimized_Max_Profit L128 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	60
Εικόνα 4.31: Optimized_Max_Profit L134 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	61
Εικόνα 4.32: Simple_V2G_24h L108 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	61
Εικόνα 4.33: Simple_V2G_24h L111 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	62
Εικόνα 4.34: Simple_V2G_24h L120 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	62
Εικόνα 4.35: Simple_V2G_24h L126 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	63
Εικόνα 4.36: Simple_V2G_24h L128 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	63
Εικόνα 4.37: Simple_V2G_24h L108 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	64
Εικόνα 4.38: No_V2G_smartcharge L108 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	64
Εικόνα 4.39: No_V2G_smartcharge L111 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	65
Εικόνα 4.40: No_V2G_smartcharge L120 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	65
Εικόνα 4.41: No_V2G_smartcharge L126 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	66
Εικόνα 4.42: No_V2G_smartcharge L128 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	66
Εικόνα 4.43: No_V2G_smartcharge L134 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	67
Εικόνα 4.44: Simple_Charge L108 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	67
Εικόνα 4.45: Simple_Charge L111 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	68
Εικόνα 4.46: Simple_Charge L120 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	68
Εικόνα 4.47: Simple_Charge L126 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	69
Εικόνα 4.48: Simple_Charge L128 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	69
Εικόνα 4.49: Simple_Charge L134 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	70
Εικόνα 4.50: Optimized_Max_Profit L104 Σενάριο#3 (6-11)	71
Εικόνα 4.51: Optimized_Max_Profit L114 Σενάριο#3 (6-11)	72

Εικόνα 4.52: Optimized_Max_Profit L123 Σενάριο#3 (6-11)	72
Εικόνα 4.53: Optimized_Max_Profit L128 Σενάριο#3 (6-11)	73
Εικόνα 4.54: Optimized_Max_Profit L131 Σενάριο#3 (6-11)	73
Εικόνα 4.55: Optimized_Max_Profit L134 Σενάριο#3 (6-11)	74
Εικόνα 4.56: Simple_V2G_24h L104 Σενάριο#3 (6-11)	74
Εικόνα 4.57: Simple_V2G_24h L114 Σενάριο#3 (6-11)	75
Εικόνα 4.58: Simple_V2G_24h L123 Σενάριο#3 (6-11)	75
Εικόνα 4.59: Simple_V2G_24h L128 Σενάριο#3 (6-11)	76
Εικόνα 4.60: Simple_V2G_24h L131 Σενάριο#3 (6-11)	76
Εικόνα 4.61: Simple_V2G_24h L134 Σενάριο#3 (6-11)	77
Εικόνα 4.62: No_V2G_smartcharge L104 Σενάριο#3 (6-11)	77
Εικόνα 4.63: No_V2G_smartcharge L114 Σενάριο#3 (6-11)	78
Εικόνα 4.64: No_V2G_smartcharge L123 Σενάριο#3 (6-11)	78
Εικόνα 4.65: No_V2G_smartcharge L128 Σενάριο#3 (6-11)	79
Εικόνα 4.66: No_V2G_smartcharge L131 Σενάριο#3 (6-11)	79
Εικόνα 4.67: No_V2G_smartcharge L134 Σενάριο#3 (6-11)	80
Εικόνα 4.68: Simple_Charge L104 Σενάριο#3 (6-11)	80
Εικόνα 4.69: Simple_Charge L114 Σενάριο#3 (6-11)	81
Εικόνα 4.70: Simple_Charge L123 Σενάριο#3 (6-11)	81
Εικόνα 4.71: Simple_Charge L128 Σενάριο#3 (6-11)	82
Εικόνα 4.72: Simple_Charge L131 Σενάριο#3 (6-11)	82
Εικόνα 4.73: Simple_Charge L134 Σενάριο#3 (6-11)	83

.

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1: Παράμετροι Χρηστών ΗΟ	14
Πίνακας 4.1: Θέσεις ΗΟ στο δίκτυο Σενάριο#1 (1-6)	44
Πίνακας 4.2: Θέσεις ΗΟ στο δίκτυο Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	57
Πίνακας 4.3: Θέσεις ΗΟ στο δίκτυο Σενάριο#3 (6-11)	70
Πίνακας 4.4: Μέγιστη Πτώση Τάσης σε Volt για θέσεις ΗΟ Σενάριο#1 (1-6).....	85
Πίνακας 4.5: Μέγιστη Πτώση Τάσης σε Volt για θέσεις ΗΟ Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10)	85
Πίνακας 4.6: Μέγιστη Πτώση Τάσης σε Volt για θέσεις ΗΟ 6-11	86

Συντομογραφίες

ΑΠΕ: Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

ΕΗΣ: Εικονικοί Ηλεκτροπαραγωγικοί Σταθμοί

ΕΝΕΧ: Hellenic Energy Exchange (Ελληνικό Χρηματιστήριο Ενέργειας)

ΗΟ: Ηλεκτρικά Οχήματα

PHEV: Plug-in-Hybrid Electric Vehicle

SoC: State of Charge

V2B: Vehicle-to-Building

V2G: Vehicle-to-Grid

V2H: Vehicle-to-Home

ΚΕΦΑΛΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις που έχει να αντιμετωπίσει η παγκόσμια επιστημονική κοινότητα είναι η διασφάλιση των αναγκαίων ενεργειακών πόρων. Τα ζητήματα του όγκου των διαθέσιμων ορυκτών καυσίμων, όπως το πετρέλαιο, το φυσικό αέριο και ο λιγνίτης, αλλά και οι διαρκείς προβληματισμοί που αφορούν τη βιωσιμότητά τους, εγείρουν ερωτήματα. Η αύξηση της ζήτησης στον κλάδο της ενέργειας, καθώς και τα περιβαλλοντικά ζητήματα που προκύπτουν από τη χρήση των μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση εναλλακτικών, πιο φιλικών προς το περιβάλλον, πηγών ενέργειας.

Ετήσιες μελέτες που λαμβάνουν χώρα εκ μέρους της Διεθνούς Οργάνωσης Ενέργειας (International Energy Agency-IEA) υπογραμμίζουν την αυξητική πορεία της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης. Αποκορύφωμα αποτελούν οι δείκτες του προηγούμενου έτους που παρουσιάζουν αύξηση 2,2% στην ενεργειακή ζήτηση. Η ίδια μέτρηση εντός της προηγούμενης δεκαετίας (2013–2023) παρουσίαζε μέση ετήσια αύξηση 1,1%. Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της αύξησης προήλθε από τη ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια, η οποία κατέγραψε άνοδο 4,3%, γεγονός που διογκώνει την ερευνητική δραστηριότητα που αφορά την αναζήτηση μεθόδων με μεγαλύτερη αποδοτικότητα και λιγότερη σπατάλη. Η αύξηση αυτή υπερέβη τη διαθεσιμότητα ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, με αποτέλεσμα να εντατικοποιηθεί η χρήση ορυκτών καυσίμων προκειμένου να καλυφθεί η επιπλέον ζήτηση, κάτι που δημιουργεί επιπρόσθετη περιβαλλοντική και ενεργειακή πίεση [1].

Καταλυτικό ρόλο στην αναγκαία μετάβαση από τα ορυκτά καύσιμα στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κατέχει η ηλεκτρική ενέργεια. Μία μορφή της μετάβασης αυτής είναι η ηλεκτροκίνηση. Τα ηλεκτρικά οχήματα (ΗΟ) αποτελούν ένα ταχύτατα αναπτυσσόμενο κομμάτι της παγκόσμιας αυτοκινητοβιομηχανίας, προσφέροντας τη δυνατότητα σημαντικής μείωσης των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ρύπων, σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα εσωτερικής καύσης. Η διεύρυνση των ΗΟ στην αγορά επιφέρει, ωστόσο, και νέες προκλήσεις στο δίκτυο. Η ανεξέλεγκτη ή η ταυτόχρονη φόρτιση μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές αιχμές στη ζήτηση, με συνέπειες στη σταθερότητα τάσης και τη φόρτιση των μετασχηματιστών. Καθίσταται αναγκαία, συνεπώς, η αναζήτηση τεχνικών

εξομάλυνσης της απόκρισης, όπως η αποθήκευση ενέργειας, η δυναμική διαχείριση φορτίου και οι «έξυπνες» στρατηγικές εξισορρόπησης της ζήτησης και της προσφοράς. Ένα παράδειγμα είναι η ανάπτυξη στρατηγικών έξυπνης φόρτισης (smart charging), η οποία καθίσταται κρίσιμη με στόχο την ομαλή ενσωμάτωση των οχημάτων στο ηλεκτρικό σύστημα, χωρίς να απαιτούνται υπερβολικές επενδύσεις σε νέα υποδομή.

1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει παρουσίαση της τεχνολογίας Vehicle-to-Grid (V2G) και μέσω των διαφορετικών αλγορίθμων φόρτισης που υλοποιήθηκαν θα εξεταστεί η οικονομική αποδοτικότητα της τεχνολογίας και η βιωσιμότητα της όσον αφορά την επίδραση των ηλεκτρικών οχημάτων (HO) στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Σκοπός είναι να απαντηθούν τα εξής ερωτήματα:

- Τι είναι η τεχνολογία V2G και πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί;
- Πόσο αποδοτικά μπορεί να είναι τα HO με τεχνολογία V2G όσον αφορά το οικονομικό όφελος των χρηστών σε σχέση με τα HO που δεν χρησιμοποιούν την συγκεκριμένη τεχνολογία;
- Ποια είναι η επίδραση των τεχνικών φόρτισης και των διαφορετικών κατανομών των HO στην τάση του δικτύου διανομής;

1.1.1 Συνεισφορά

Η συνεισφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγκειται στην αξιολόγηση της ιδέας της τεχνολογίας V2G. Συγκεκριμένα θα πραγματοποιηθούν συγκρίσεις μεταξύ διαφορετικών τακτικών φόρτισης μεταξύ V2G HO και συμβατικών. Επιπλέον, θα εξεταστεί η επίδραση όλων των συστημάτων στην λειτουργία του δικτύου διανομής με σκοπό να εξαχθούν σφαιρικά συμπεράσματα για το πως τα HO επηρεάζουν την τάση του δικτύου.

Η ερευνητική διαδικασία που εφαρμόστηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας είναι η ακόλουθη:

- 1) Πραγματοποιήθηκε βιβλιογραφική έρευνα για την πορεία της ηλεκτροκίνησης και την τεχνολογία V2G.
- 2) Υλοποιήθηκαν 4 αλγόριθμοι με σκοπό την σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών φόρτισης και εξήχθησαν συμπεράσματα για την οικονομική τους αποδοτικότητα.
- 3) Οι αλγόριθμοι εντάχθηκαν σε μοντέλα προσομοίωσης δικτύου διανομής χαμηλής τάσης.
- 4) Έγινε ανάλυση αποτελεσμάτων και παρουσιάστηκαν συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις.

1.2 Οργάνωση του τόμου

Στο Κεφάλαιο 1 γίνεται η εισαγωγή στο θέμα της διπλωματικής εργασίας και στην παρούσα κατάσταση της επιστημονικής κοινότητας όσον αφορά την ηλεκτροκίνηση.

Στο Κεφάλαιο 2 περιγράφεται η τεχνολογία V2G, καθώς και οι διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης της.

Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται οι 4 διαφορετικοί αλγόριθμοι φόρτισης, αναλύεται η οικονομική αποδοτικότητα τους και οι διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης τους.

Στο Κεφάλαιο 4 λαμβάνει χώρα η προσομοίωση στο δίκτυο διανομής χαμηλής τάσης και αναλύονται τα αποτελέσματα που εξήχθησαν σχετικά με την πτώση τάσης που εμφανίζεται στο δίκτυο.

Στο Κεφάλαιο 5 γίνεται παράθεση των τελικών συμπερασμάτων και προτείνονται ιδέες για μελλοντική έρευνα και βελτίωση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Η ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ V2G ΚΑΙ ΟΙ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΤΗΣ

2.1 Εισαγωγή

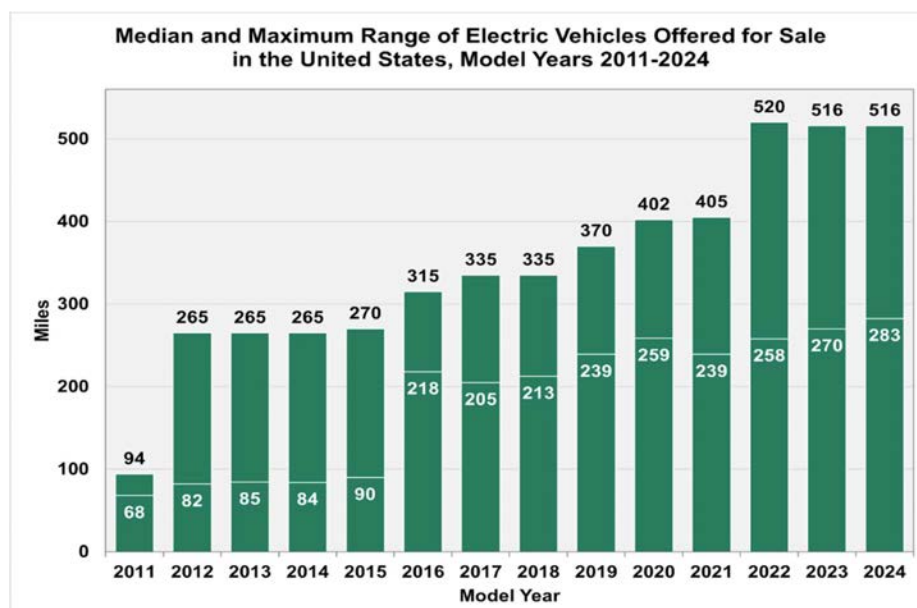
Η ηλεκτροκίνηση αποτελεί κινητήριο μοχλό στην προσπάθεια απανθρακοποίησης του πλανήτη και καταπολέμησης της ρύπανσης. Τα ΗΟ κατέχουν ένα σεβαστό μερίδιο της σημερινής αγοράς και η παραγωγή τους ακολουθεί την πορεία της αυξανόμενης ζήτησης τους. Η ερευνητική διαδικασία η οποία αφορά την ανάπτυξη νέων, βελτιωμένων τεχνολογιών καθιστούν τα αμιγώς ηλεκτρικά αυτοκίνητα, καθώς και τα plug-in-υβριδικά, ανάμεσα στις πιο ισχυρές προτάσεις που παρουσιάζονται στον καταναλωτή επί του παρόντος.

2.1.1 Διείσδυση ΗΟ στην Αγορά

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση της τάσης των καταναλωτών προς τα ΗΟ. Σύμφωνα με την Eurostat, το μερίδιο της αγοράς των αμιγώς ηλεκτρικών επιβατικών αυτοκινήτων ανήλθε στο 14,6% για νέες ταξινομήσεις στην Ευρωπαϊκή Ένωση, διατηρώντας την σταθερά ανοδική πορεία από το 2019 και έπειτα. Όμως, σε χαμηλούς δείκτες της τάξης του 1,4% κινείται ακόμα το ποσοστό των αμιγώς ΗΟ ως προς τα συνολικά επιβατικά οχήματα τα οποία κυκλοφορούν στην Ευρωπαϊκή Ένωση [2]. Το γεγονός αυτό προδίδει πως η ηλεκτροκίνηση όσον αφορά τα αυτοκίνητα ιδιωτικής χρήσης βρίσκεται ακόμα σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Οι κατασκευαστές συνεχίζουν την προσπάθεια για βελτίωση της οδηγικής εμπειρίας των χρηστών των ΗΟ, ενώ το μέλλον φαίνεται ευοίωνο όσον αφορά τον περιορισμό της ανησυχίας που αφορά την αυτονομία των ΗΟ (range anxiety) [3].

2.1.2 Η Ενεργειακή Αυτονομία των Ηλεκτρικών Οχημάτων

Συγκεκριμένα, σημειώνεται πρόοδος ως προς την ενεργειακή αυτονομία των οχημάτων, με τους κατασκευαστές να επενδύουν στην τεχνολογική αναβάθμιση των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας και στη βελτιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης. Αυτό αποτυπώνεται στην Εικόνα 2.1, στην οποία καταγράφεται η διαχρονική εξέλιξη της μέγιστης και μέσης αυτονομίας (σε μίλια) των αμιγώς ΗΟ που προσφέρονται προς πώληση στις Ηνωμένες Πολιτείες για τα έτη κατασκευής 2011 έως 2024. Στο γράφημα παρατηρείται αρχικά χαμηλή αυτονομία, με τιμές που δεν



Εικόνα 2.1: Μέση και Μέγιστη Αυτονομία ΗΟ[4].

ξεπερνούν τα 100 μίλια κατά τα πρώτα έτη λόγω των τεχνολογικών περιορισμών της εποχής. Από το 2016 και έπειτα, σημειώνεται ραγδαία αύξηση τόσο στη μέγιστη όσο και στη διάμεση αυτονομία, με σημαντικό άλμα να καταγράφεται την περίοδο 2019–2021. Το 2024 η μέγιστη αυτονομία φτάνει τα 516 μίλια, ενώ η διάμεση ξεπερνά για πρώτη φορά τα 280 μίλια, γεγονός που αποδεικνύει τη γενικευμένη βελτίωση όλων των διαθέσιμων μοντέλων. Η σύγκλιση των δύο τιμών καταδεικνύει ότι δεν είναι πλέον μόνο λίγα, ακριβότερα οχήματα με μεγάλη αυτονομία, αλλά ότι και τα ευρύτερα διαθέσιμα μοντέλα προσφέρουν πλέον ικανοποιητικές επιδόσεις, καθιστώντας τα ΗΟ περισσότερο προσβάσιμα και ανταγωνιστικά σε σχέση με τα συμβατικά στην αγορά του αυτοκινήτου.

Τα ΗΟ της σημερινής εποχής, εξοπλισμένα με μεγάλη αυτονομία και υψηλές τεχνολογίες βελτιστοποίησης της απόδοσης, διεγείρουν το ενδιαφέρον της ερευνητικής κοινότητας όσον αφορά τις πιθανές εναλλακτικές μεθόδους χρήσης τους. Με την τεχνολογική πρόοδο που σημειώνεται στις αυτονομίες των μπαταριών μπορούν να αποτελέσουν ένα σημαντικό γράναζι στο “έξυπνο δίκτυο” λειτουργώντας ως Εικονικοί Ηλεκτροπαραγωγικοί Σταθμοί (ΕΗΣ) γνωστοί και ως Virtual Power Plant. Πρόκειται για ένα ψηφιακά διασυνδεδεμένο δίκτυο αποκεντρωμένων ενεργειακών πόρων (όπως φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες, μπαταρίες αποθήκευσης, και φορτία ΗΟ), τα οποία λειτουργούν συντονισμένα μέσω λογισμικού σαν να ήταν ένας ενιαίος σταθμός παραγωγής ενέργειας. Ο στόχος είναι να βελτιστοποιείται η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας, να σταθεροποιείται το δίκτυο και να παρέχονται υπηρεσίες εξισορρόπησης χωρίς την ανάγκη κατασκευής νέων συμβατικών μονάδων.

2.2 Θεωρητικό πλαίσιο της τεχνολογίας V2G

2.2.1 Περιγραφή βασικής ιδέας του V2G

Η τεχνολογία V2G αποτελεί μια εκ των σημαντικότερων καινοτομιών στον χώρο της ηλεκτροκίνησης αλλά και της προσπάθειας αντιμετώπισης της ενεργειακής κρίσης. Προσφέρει πολλές δυνατότητες και παραλλαγές όσον αφορά την διαχείριση και την αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας με βάση τις ανάγκες του εκάστοτε δικτύου διανομής, αλλά και του χρήστη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Η ειδοποιός διαφορά του V2G σε σχέση με τους παραδοσιακούς τρόπους φόρτισης και αποθήκευσης της ενέργειας είναι η δυνατότητα για αμφίδρομη ροή ισχύος, όπως φαίνεται στην Εικόνα 2.2. Στο πλαίσιο αυτό, τα αμιγώς ΗΟ και τα plug-in υβριδικά μπορούν να παρέχουν σημαντικές υπηρεσίες προς το δίκτυο ηλεκτροδότησης, ιδίως όταν βρίσκονται σταθμευμένα στον φορτιστή για παρατεταμένα χρονικά διαστήματα [5].



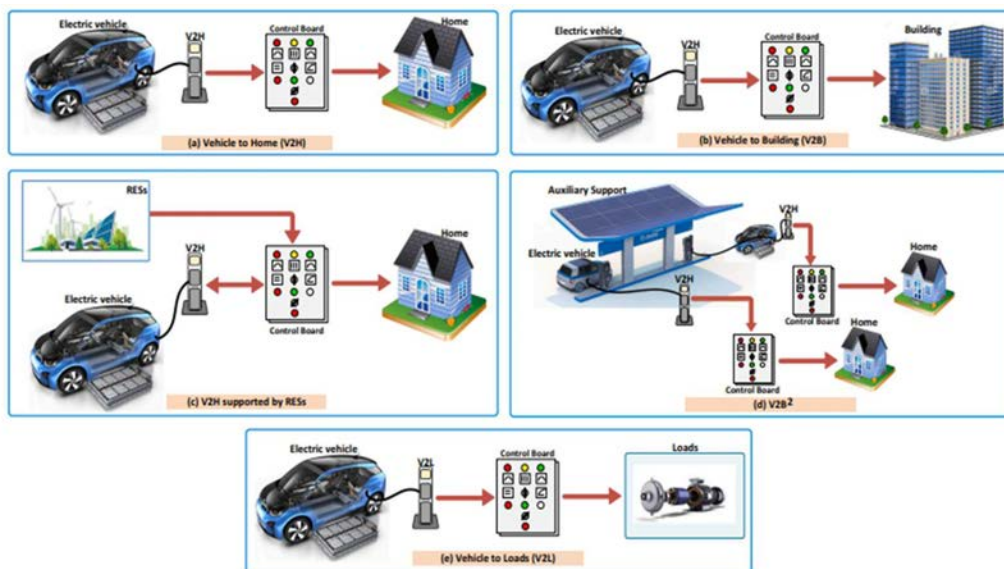
Εικόνα 2.2: Βασική Ιδέα V2G [6].

2.2.2 Δυνατότητες και περιπτώσεις χρήσης V2G στο δίκτυο

Τα αμιγώς ΗΟ συγκεκριμένα, τα οποία είναι εξοπλισμένα με μπαταρίες μεγαλύτερης χωρητικότητας, μπορούν μέσω της τεχνολογίας V2G να συνδράμουν στην εξομάλυνση του φορτίου μέσω αποφόρτισης στις ώρες αιχμής και φόρτισης σε ώρες χαμηλής ζήτησης (load leveling) [7]. Μπορούν να παρέχουν επικουρικές υπηρεσίες όπως ρύθμιση συχνότητας μέσω της γρήγορης απόκρισης τους, απορροφώντας ή παρέχοντας ισχύ ανάλογα την περίπτωση [8]. Η τεχνολογία V2G δίνει την δυνατότητα για ρύθμιση τάσης μέσω ελεγχόμενης αποφόρτισης σε συγκεκριμένα σημεία του δικτύου που απαιτείται, συμβάλλοντας στην εξισορρόπηση σε χαμηλής ή μέσης τάσης δίκτυα διανομής. Τέτοια ανάγκη εμφανίζεται συνήθως σε περιοχές που παρουσιάζουν αυξημένη διείδυση ΑΠΕ καθώς τα ΗΟ είναι ιδανικοί αποθηκευτικοί φορείς για την απορρόφηση πλεονάζουσας ενέργειας από φωτοβολταϊκά ή αιολικά πάρκα, ειδικά κατά τις ώρες όπου η προσφορά υπερβαίνει τη ζήτηση [9]. Μέσω αλγορίθμων V2G, η αποθηκευμένη ενέργεια μπορεί να επιστραφεί στο δίκτυο όταν η ενέργεια από ΑΠΕ δεν επαρκεί [10]. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια περιόδων υψηλής ζήτησης (peak load), τα ΗΟ μπορούν να αποφορτίζουν στο δίκτυο μειώνοντας την ανάγκη ενεργοποίησης ακριβών εφεδρικών μονάδων παραγωγής. Αυτό οδηγεί σε μείωση του συνολικού κόστους ενέργειας και περιορισμό των εκπομπών CO₂. Πολλαπλά οχήματα που υποστηρίζουν την V2G τεχνολογία μπορούν να λειτουργήσουν ως ΕΗΣ, συντονισμένα, ως άλλο δίκτυο διανομής, είτε παρέχοντας ρυθμιστικές υπηρεσίες που αφορούν την συχνότητα και την τάση του προϋπάρχοντος δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, είτε ικανοποιώντας εξολοκλήρου την ζήτηση τροφοδοσίας ενός δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, υπάρχει η δυνατότητα χρήσης των ΗΟ ως πηγές

εφεδρικής τροφοδοσίας για κατοικίες, και όχι μόνο, κατά την διάρκεια εκτάκτων περιστατικών μέσω της τεχνολογίας Vehicle-to-Home (V2H) [11].

Στην Εικόνα 2.3 παρουσιάζονται γραφικά οι αυτόνομες λειτουργίες τις οποίες μπορεί να υποστηρίξει η τεχνολογία V2G (Stand-Alone Mode). Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από ΗΟ, μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, μονόδρομους και αμφίδρομους φορτιστές μπαταριών, οικιακά και βιομηχανικά φορτία και μικρής κλίμακας παραγωγή από ΑΠΕ.



Εικόνα 2.3: Παραδείγματα Αυτόνομων Λειτουργιών V2G [12].

- Στην περίπτωση (a) το ΗΟ έχει την δυνατότητα μεταφοράς ενέργειας προς την κατοικία (Vehicle-to-Home). Αυτό καθίσταται δυνατό μέσω φορτιστών με τις κατάλληλες προδιαγραφές και με την ανάπτυξη αλγορίθμων που ανιχνεύουν διακοπές ρεύματος και βελτιστοποιούν την παροχή εφεδρικής ενέργειας [12].
- Στην περίπτωση (b) οπτικοποιείται η έννοια Vehicle-to-Building (V2B) της οποίας οι εφαρμογές ποικίλουν. Υφίσταται δυνατότητα για φόρτιση μιας κατεύθυνσης, παρέχοντας δυνατότητες μείωσης κόστους και εξομάλυνσης αιχμών ζήτησης. Μέσω αμφίδρομης ροής ισχύος μπορεί να επιτευχθεί επιπλέον μείωση κόστους μέσω πώλησης της ενέργειας πίσω στο δίκτυο [13].
- Στην περίπτωση (c) γίνεται λόγος για την δυνατότητα V2H παράλληλα με την τροφοδοσία της κατοικίας από ΑΠΕ. Τα ΗΟ μπορούν να μειώσουν τις αναμενόμενες διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της ημέρας, ενώ παράλληλα

μπορούν να λειτουργούν ως κύριες πηγές τροφοδοσίας της κατοικίας σε περιόδους που οι φωτοβολταϊκές μονάδες δεν είναι επαρκείς όπως νυχτερινές ώρες ή μέρες με μειωμένη ηλιοφάνεια [11].

- Στην περίπτωση (d) εισάγεται μια καινοτόμος ιδέα στην οποία τα ΗΟ χρησιμοποιούνται για την μεταφορά ενέργειας μεταξύ κτηρίων αλλά και την αποθήκευση της με σκοπό να πλησιαστεί ακόμα περισσότερο η ιδέα των κτηρίων μηδενικής ενεργειακής κατανάλωσης [12].
- Στην περίπτωση (e) απεικονίζεται η ιδέα Vehicle-to-Load η οποία επιτρέπει την τροφοδοσία φορτίων με αυτόνομο τρόπο από ΗΟ που υποστηρίζουν την V2G τεχνολογία [12].

Μια ακόμη αναδυόμενη έννοια που κάνει χρήση των V2G τεχνολογιών είναι το Vehicle-to-Vehicle concept, το οποίο επιτρέπει την μεταφορά ενέργειας από όχημα σε όχημα μέσω διεπαφών χωρίς να υπάρχει ανάγκη σταθμού φόρτισης, συμβάλλοντας έτσι στην μείωση του range anxiety [14].

2.2.3 PHEVs και V2G

Plug-in υβριδικά ΗΟ (Plug-in Hybrid Electric Vehicles-PHEVs) είναι οχήματα που συνδυάζουν έναν συμβατικό κινητήρα εσωτερικής καύσης με έναν ή περισσότερους ηλεκτροκινητήρες και μπαταρία μεγαλύτερης χωρητικότητας σε σχέση με τα συμβατικά υβριδικά. Η κύρια διαφορά τους είναι ότι η μπαταρία μπορεί να επαναφορτιστεί τόσο μέσω της ανάκτησης ενέργειας κατά την πέδηση (regenerative braking) όσο και με απευθείας φόρτιση από εξωτερική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας (plug-in charging). Αυτό τους επιτρέπει να λειτουργούν για συγκεκριμένη απόσταση αποκλειστικά με ηλεκτρική ενέργεια, μειώνοντας τις εκπομπές ρύπων και την κατανάλωση καυσίμου, ενώ διατηρούν την ευελιξία του κινητήρα εσωτερικής καύσης για μεγαλύτερη αυτονομία.

Τα plug-in-υβριδικά οχήματα, μπορούν επίσης να συνδράμουν σε παρόμοιες λειτουργίες V2G με τα αμιγώς ΗΟ σε χαμηλότερη ενεργειακή κλίμακα λόγω των μικρότερης χωρητικότητας μπαταριών τους. Όμως λόγω του υβριδικού προφίλ που διαθέτουν, παρουσιάζουν την δυνατότητα για πιο «επιθετικές» τακτικές V2G καθώς δεν υπάρχει ο κίνδυνος ακινητοποίησης. Μπορούν να παρέχουν τόσο τις επικουρικές

υπηρεσίες με σκοπό την σταθερότητα και την ασφάλεια του δικτύου διανομής, όσο και τις αποδοτικότερες, οικονομικά, τακτικές προς όφελος του καταναλωτή ομοίως με τα αμιγώς ΗΟ [15].

2.2.4 Οικονομικά οφέλη του καταναλωτή από V2G

Η τεχνολογία V2G, πέραν των δυνατοτήτων συμμετοχής στην ενεργειακή μετάβαση και στην ευστάθεια των δικτύων διανομής, παρουσιάζει ουσιαστικά και μετρήσιμα οικονομικά οφέλη στον τελικό χρήστη. Αυτά εξαρτώνται από τις τιμολογιακές πολιτικές των παρόχων, τις χωρητικότητες των μπαταριών και τα διαφορετικά προφίλ φόρτισης των χρηστών. Συνεπώς, η απόσβεση της αγοράς του ΗΟ μπορεί να γίνει με ταχύτατο ρυθμό και να επιτευχθεί υψηλότερης τάξης ενεργειακή αυτονομία.

Ένας εκ των τρόπων δημιουργίας εσόδων μέσω της V2G τεχνολογίας είναι η παροχή ισχύος στο δίκτυο με σκοπό την διοχέτευση της σε επικουρικές υπηρεσίες, όπως η ρύθμιση συχνότητας ή και την εξολοκλήρου τροφοδότηση μικροδικτύων διανομής. Σε μια από τις πιο πρόσφατες δράσεις, τον Ιούνιο του 2025 στην Ουτρέχτη έλαβε χώρα μια πρωτοποριακή συνεργασία μεταξύ της εταιρείας car-sharing MyWheels, του κατασκευαστή Renault και της εταιρείας “We Drive Solar”. Το τοπικό δίκτυο υποστηρίζεται ενεργά από τον στόλο των ΗΟ τα οποία λειτουργούν ως ΕΗΣ, καθώς αποφορτίζουν ενέργεια σε ώρες αιχμής και επαναφορτίζονται σε περιόδους χαμηλής ζήτησης. Με αυτόν τον τρόπο, δημιουργείται ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο ενεργειακής εξισορρόπησης, χωρίς να θίγεται η διαθεσιμότητα των οχημάτων για χρήση από τους πολίτες. Ακολουθως, ο εκάστοτε χρήστης αποζημιώνεται οικονομικά με βάση την συμμετοχή του χωρίς να θυσιάζει την πρόσβαση του στο όχημα [16].

Κατά συνέπεια μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα πως, με κατάλληλη εγκαθίδρυση λογισμικού, τα V2G ΗΟ δύνανται να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο τόσο στην σταθερότητα του δικτύου, όσο και στην οικονομική ευρωστία των χρηστών τους.

2.2.5 Παράδειγμα Αλγορίθμου Έξυπνης Φόρτισης προς όφελος του δικτύου διανομής

Η [17], παρουσιάζει έναν δυναμικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης της φόρτισης ΗΟ με στόχο τον περιορισμό των αιχμών ισχύος στο δίκτυο διανομής. Ο αλγόριθμος ενσωματώνει τα προφίλ ζήτησης των οχημάτων, τους χρονικούς περιορισμούς φόρτισης, τις διακυμάνσεις των τιμών ενέργειας καθώς και τους τεχνικούς περιορισμούς του δικτύου, επιτρέποντας την προσαρμογή της διαδικασίας φόρτισης σε πραγματικό χρόνο. Μέσω αυτής της δυναμικής κατανομής, η φόρτιση κατανέμεται χρονικά με τρόπο που αποφεύγει τη συσσώρευση υψηλών φορτίων σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση των peak loads. Τα αποτελέσματα της έρευνας καταδεικνύουν ότι η προτεινόμενη στρατηγική όχι μόνο περιορίζει τις αιχμές φορτίου και ενισχύει τη σταθερότητα του δικτύου, αλλά ταυτόχρονα διασφαλίζει την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών των ΗΟ εντός του απαιτούμενου χρονικού διαστήματος. Στο επόμενο κεφάλαιο θα γίνει παρουσίαση αλγορίθμων έξυπνης φόρτισης που στοχεύουν στην οικονομική αποδοτικότητα προς τον καταναλωτή σε αντίθεση με την προαναφερθείσα υλοποίηση που στοχεύει μόνο σε παροχή επικουρικών υπηρεσιών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΜΕΛΕΤΗ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

3.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί η ανάλυση των αλγορίθμων που δημιουργήθηκαν με σκοπό τη μελέτη διαφορετικών σεναρίων φόρτισης, με και χωρίς V2G έχοντας λάβει υπόψη διαφορετικά προφίλ φόρτισης για τον κάθε χρήστη. Ακολουθώντας την βιβλιογραφική έρευνα του Κεφαλαίου 2, υλοποιήθηκαν 3 διαφορετικοί αλγόριθμοι φόρτισης, συν ένας της απλής φόρτισης, πάνω στους οποίους θα γίνει ανάλυση της λειτουργίας τους, παράθεση των αποτελεσμάτων του εκάστοτε αλγορίθμου, καθώς και σύγκριση μεταξύ τους όσον αφορά την λειτουργικότητα και το οικονομικό συμφέρον του χρήστη του εκάστοτε ΗΟ.

3.1.1 Αναφορά των παραμέτρων

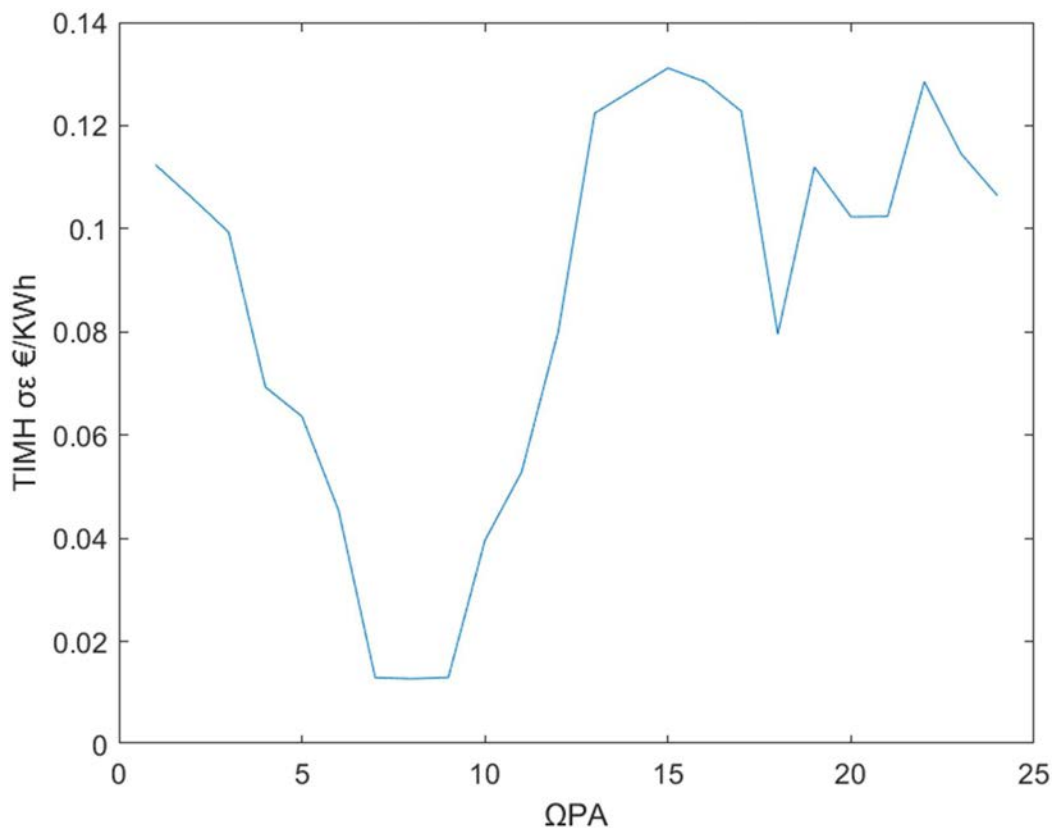
Σε όλους τους αλγορίθμους οι παράμετροι που έχουν ληφθεί υπόψη είναι ίδιοι προσδίδοντας την δυνατότητα για βέλτιστη σύγκριση αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα:

- Χωρητικότητα μπαταρίας των ΗΟ: 40kWh
- Δείκτης απόδοσης φόρτισης: 95%
- Δείκτης απόδοσης αποφόρτισης (V2G): 95%
- Μέγιστη επιτρεπτή τιμή State of Charge(SoC): 100%
- Ελάχιστη επιτρεπτή τιμή State of Charge(SoC): 15%
- Σταθερή ισχύς φόρτισης: 11kW
- Σταθερή ισχύς αποφόρτισης: 11kW
- Ωριαία χρονικά βήματα εντός του 24ώρου

Συγκεκριμένα στο ελάχιστο State of Charge (SoC) δεν επιτρέπεται να λάβει τιμή κάτω του 15% εντός των προσομοιώσεων που θα αναλυθούν, με σκοπό την διατήρηση της υγείας της μπαταρίας. Οι τιμές των ισχύων φόρτισης και αποφόρτισης λήφθηκαν από δεδομένα τριφασικών φορτιστών που κυκλοφορούν στην αγορά με δυνατότητα υποστήριξης της τεχνολογίας V2G [18].

3.1.2 Τιμολόγηση κιλοβατώρας

Με σκοπό την παρουσίαση όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος πάρθηκαν από την επίσημη ιστοσελίδα της ENEX Group σε €/MWh [19]. Έγινε μετατροπή τους σε €/KWh. Για τις ανάγκες της ανάλυσης επιλέχθηκαν οι τιμές ενέργειας ενός τυχαίου 24ώρου του έτους 2025. Συγκεκριμένα οι τιμές αφορούν την ημερομηνία 06/03/2025. Επιλέχθηκε η χρήση ίδιου τιμολογίου τόσο για τιμές φόρτισης όσο και για τιμές αποζημίωσης του χρήστη, κατά την αποφόρτιση, καθώς οι δύο καμπύλες ακολουθούν όμοια πορεία με μικρές αποκλίσεις. Φυσικά αυτό είναι πιθανό να μεταβληθεί στην περίπτωση που η τεχνολογία V2G έρθει κάτω από την ομπρέλα ενός θεσμικού πλαισίου, καθώς οι τιμές αποζημίωσης των χρηστών κατά την διάρκεια παροχής ισχύος στο δίκτυο, μέσω των ΗΟ τους, ενδέχεται να είναι διαφορετικές. Στην Εικόνα 3.1 φαίνεται η πορεία της τιμής της κιλοβατώρας, σύμφωνα με την ENEX, για την οποία έχουν γίνει οι προσομοιώσεις.



Εικόνα 3.1: Πορεία τιμής KWh σε 24h.

3.1.3 Δεδομένα Χρηστών Ηλεκτρικών Οχημάτων της προσομοίωσης

Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται τα προφίλ των 6 ΗΟ σύμφωνα με τα ζητούμενα των χρηστών τους. Επιλέχθηκαν διαφορετικές ώρες άφιξης και αποχώρησης από τον φορτιστή καθώς και διαφορετικές αρχικές και επιθυμητές τιμές του SoC των ΗΟ, με σκοπό την εξέταση διαφορετικών περιπτώσεων και την εξαγωγή σφαιρικών συμπερασμάτων.

Πίνακας 3.1: Παράμετροι Χρηστών ΗΟ.

ΗΟ id	ΑΡΧΙΚΟ SoC(%)	ΕΠΙΘΥΜΗΤΟ SoC(%)	ΩΡΑ ΑΦΙΞΗΣ	ΩΡΑ ΑΠΟΧΩΡΗΣΗΣ
1	42.47%	80%	16:00	09:00
2	15%	85%	23:00	14:00
3	63.92%	90%	21:00	08:00
4	55.97%	100%	18:00	10:00
5	35.22%	60%	22:00	10:00
6	46.89%	55%	20:00	07:00

3.2 Ανάλυση λειτουργίας Αλγορίθμων

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται ανάλυση της λειτουργίας των αλγορίθμων που δημιουργήθηκαν στο MATLAB, καθώς και η παράθεση των διαγραμμάτων ροής των αλγορίθμων [20].

3.2.1 Αλγόριθμος με δυνατότητα V2G μετά την ώρα παράδοσης για 24 ώρες

Σκοπός του αλγορίθμου Simple_V2G_24h είναι η βέλτιστη φόρτιση σύμφωνα με τα ζητούμενα του χρήστη στοχεύοντας στο χαμηλότερο δυνατό κόστος, έχοντας παράλληλα την δυνατότητα για αποφόρτιση με λειτουργία V2G μετά το πέρας της ώρας παραλαβής του ΗΟ σε περίπτωση που ο χρήστης του δεν επιλέξει την χρήση του.

Ο αλγόριθμος εκκινεί φορτώνοντας τα databases που περιέχουν τα προφίλ των χρηστών των ΗΟ και την διακύμανση της τιμής στο 24ωρο, τα όποια οπτικοποιούνται στον Πίνακα 3.1 και στην Εικόνα 3.1, αντίστοιχα. Το σύστημα ακολουθεί τις παραμέτρους που αναφέρθηκαν στην υποενότητα 3.1.1 ορίζοντας την απόδοση φόρτισης και εκφόρτισης αντίστοιχα, την χωρητικότητα των μπαταριών (KWh), καθώς και το ελάχιστο και μέγιστο SoC προστατεύοντας έτσι την υγεία της μπαταρίας. Η πορεία του αλγορίθμου περιγράφεται στην Εικόνα 3.2. Αρχικά υπολογίζεται η απαιτούμενη ενέργεια για να επιτευχθεί ο στόχος, σύμφωνα με την ώρα παραλαβής και το επιθυμητό ποσοστό μπαταρίας τα οποία έχει ορίσει ο χρήστης του κάθε ΗΟ:

$$Εαπαιτούμενη = (SOC_{στόχος} - SOC_{αρχικό}) \cdot Εμπαταρίας$$

Οι διαθέσιμες ώρες φόρτισης ταξινομούνται με βάση την φθηνότερη τιμή και επιλέγονται οι κατάλληλες για φόρτιση.

Το κάθε χρονικό βήμα, το οποίο έχει οριστεί στη μία ώρα, εξετάζεται εάν βρίσκεται στο φάσμα των επιλεγμένων ωρών για φόρτιση. Εφόσον αυτό ισχύει ο αλγόριθμος προχωρά σε αύξηση του SoC με σταθερή ισχύ P_{charge} (kW) για το συγκεκριμένο χρονικό βήμα. Εάν αυτό δεν ανήκει στις επιλεχθείσες ώρες, τότε το ΗΟ επιλέγει κατάσταση αδράνειας (idle), κατά την οποία το ΗΟ ούτε φορτίζει ούτε αποφορτίζει. Ο αλγόριθμος προχωράει στο επόμενο χρονικό βήμα κάνοντας την ίδια διαδικασία μέχρις ότου φτάσει στο τέλος των διαθέσιμων προς φόρτιση ωρών και επέλθει το χρονικό βήμα της ώρας παραλαβής από τον χρήστη.

Το επιθυμητό ποσοστό SoC έχει επιτευχθεί στην ζητούμενη ώρα παράδοσης. Μετά από αυτό το χρονικό διάστημα ο αλγόριθμος παρέχει την δυνατότητα για λειτουργία επιστροφής ισχύος στο δίκτυο, με την αντίστοιχη τιμή κιλοβατώρας αντλούμενη από την Enex Group. Η διαδικασία V2G λειτουργεί σύμφωνα με το ακόλουθο διάγραμμα ροής στην Εικόνα 3.2. Αρχικά εξετάζεται εάν το παρόν χρονικό βήμα βρίσκεται μετά από την ώρα παράδοσης. Εφόσον αυτό είναι αληθές, γίνεται μια ταξινόμηση των εναπομεινάντων χρονικών βημάτων σε φθίνουσα σειρά σύμφωνα με την τιμή κιλοβατώρας. Εδώ λαμβάνει χώρα ο περιορισμός που θα καθορίσει το αν θα γίνει ενέργεια V2G ή θα παραμείνει το ΗΟ σε κατάσταση αδράνειας. Πρέπει η τιμή της τρέχουσας ώρας να ανήκει στο ανώτερο 20% των εναπομεινάντων ωρών με σκοπό να γίνει η αποφόρτιση, ποσοστό το οποίο ενδέχεται

να είναι στην κρίση και την αρέσκεια του εκάστοτε χρήστη. Επόμενη συνθήκη η οποία πρέπει υποχρεωτικά να ικανοποιείται είναι το κατώτερο επιτρεπόμενο ποσοστό της μπαταρίας μέχρι το οποίο μπορεί να γίνει η διαδικασία V2G. Στην συγκεκριμένη περίπτωση το κατώτερο ποσοστό φόρτισης που μπορεί να βρεθεί η μπαταρία του εκάστοτε ΗΟ έχει οριστεί στο 80% της τιμής του επιθυμητού SoC κατά την ώρα παραλαβής. Ακολούθως, η διαδικασία συνεχίζεται για τις επόμενες ώρες μέχρις ότου να λάβει τέλος με το πέρας του εικοσιτετραώρου. Γενικότερα, ο αλγόριθμος ενημερώνει την τιμή του SoC με την ακόλουθη διαδικασία της ακόλουθης ενεργειακής εξίσωσης. Σε περίπτωση φόρτισης:

$$SoC(t + 1) = SoC(t) + (\text{βαθμός απόδοσης φόρτισης} * P_{charge})$$

Σε περίπτωση αποφόρτισης (V2G):

$$SoC(t + 1) = SoC(t) - (\text{βαθμός απόδοσης αποφόρτισης} * P_{discharge})$$

Σε περίπτωση κατάστασης αδράνειας (idle):

$$SoC(t + 1) = SoC(t)$$

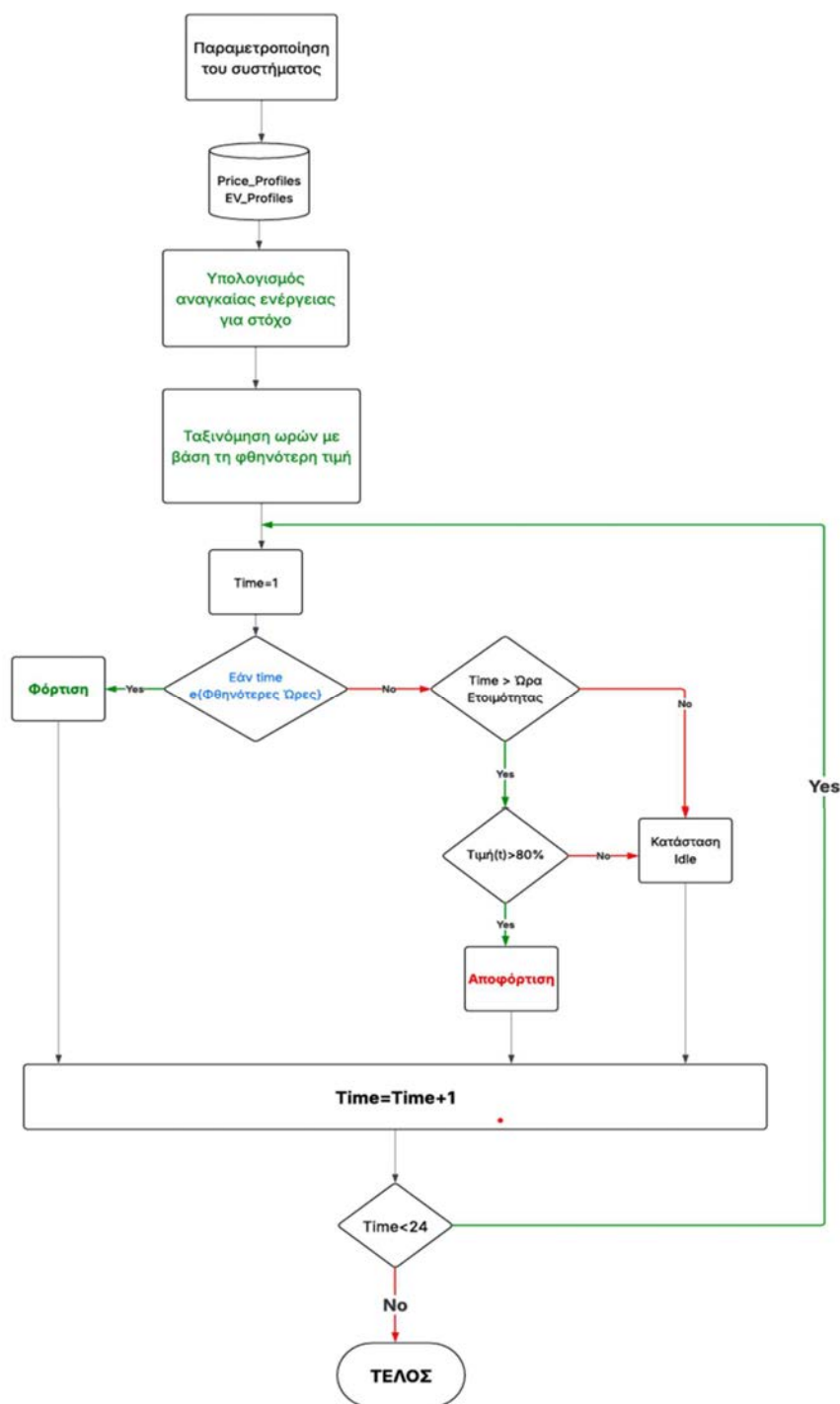
Υπολογίζονται ακολούθως με το πέρας της προσομοίωσης το συνολικό κόστος φόρτισης, το κέρδος που προήλθε από την διαδικασία του V2G και το καθαρό κέρδος (ή ζημία) για το εκάστοτε όχημα:

- $t = 1, 2, \dots, T$: Διακριτά χρονικά βήματα ($\Delta t = 1$ ώρα)
- $p(t)$: Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στο βήμα t [€/kWh]
- $P_{ch}(v,t)$: Ισχύς φόρτισης οχήματος v στο βήμα t [kW]
- $P_{dch}(v,t)$: Ισχύς αποφόρτισης (V2G) οχήματος v στο βήμα t [kW]
- $C_{ch}(v)$: Συνολικό κόστος φόρτισης οχήματος v [€]
- $R_{V2G}(v)$: Συνολικό έσοδο από V2G οχήματος v [€]
- $K(v)$: Καθαρό κέρδος (ή ζημία) οχήματος v [€]

$$C_{ch}(v) = \sum_{t=1}^T P_{ch}(v, t) p(t)$$

$$R_{V2G}(v) = \sum_{t=1}^T P_{dc}(v, t) p(t)$$

$$K(v) = R_{V2G}(v) - C_{ch}(v)$$



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα Ροής Αλγορίθμου Simple_V2G_24h.

3.2.2 Αλγόριθμος V2G διαμορφωμένο για μέγιστο οικονομικό κέρδος

Ο σκοπός του αλγορίθμου είναι η διαμόρφωση μιας στρατηγικής φόρτισης και εκφόρτισης (V2G) για ένα ΗΟ, με στόχο τη μέγιστη οικονομική απόδοση. Ο αλγόριθμος *Optimized_Max_Profit* στοχεύει στην εύρεση του σεναρίου φόρτισης-εκφόρτισης το οποίο θα προσφέρει στον χρήστη του ΗΟ την μέγιστη δυνατή χρηματική αποζημίωση μέσω της διεργασίας V2G, φορτίζοντας παράλληλα στις φθηνότερες διαθέσιμες ώρες. Το επιθυμητό SoC και η ώρα παραλαβής που δηλώνει ο χρήστης επιτυγχάνονται πάντα. Η κύρια διαφορά στην λογική με τον αλγόριθμο *Simple_V2G_24h*, του οποίου η περιγραφή έγινε στην υποενότητα 3.2.1, είναι η δυνατότητα χρήσης του V2G πριν την επίτευξη του επιθυμητού SoC. Το ΗΟ μπορεί να επιλέξει την βέλτιστη δυνατή στρατηγική φόρτισης μέσω των εναλλαγών φόρτισης-αποφόρτισης πριν την ώρα παραλαβής από τον χρήστη, με σκοπό την μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους.

Η διαδικασία ξεκινά με τη φόρτωση των δεδομένων, κάνοντας χρήση των ίδιων δεδομένων που οπτικοποιούνται στον Πίνακα 3.1 και την Εικόνα 3.1. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου στην Εικόνα 3.3, ως μεταβλητή απόφασης λαμβάνεται το διάνυσμα P , το οποίο περιλαμβάνει 24 συνεχείς τιμές ισχύος (kW), μία για κάθε ώρα της ημέρας. Η *fmincon* επιλύει το πρόβλημα με βάση μια προκαθορισμένη αντικειμενική συνάρτηση, η οποία εκφράζει το συνολικό κόστος ως συνάρτηση των τιμών ενέργειας και της επιλεγμένης ισχύος ανά ώρα. Η συνάρτηση στόχου της βελτιστοποίησης είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ενέργειας, το οποίο υπολογίζεται ως το άθροισμα των γινομένων ισχύος επί τιμής ανά ώρα, όπως περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση:

- P_t : Ισχύς (kW) που απορροφά ή αποδίδει το ΗΟ κατά την ώρα t .

Αν $P_t > 0$ σημαίνει φόρτιση (αγορά ενέργειας από το δίκτυο).

Αν $P_t < 0$ σημαίνει αποφόρτιση (πώληση ενέργειας στο δίκτυο).

Το P είναι το διάνυσμα με τις εκάστοτε 24 συνεχείς τιμές ισχύος μία για κάθε ώρα της ημέρας.

- p_t : Τιμή ηλεκτρικής ενέργειας (€/kWh) στην αγορά (EnEx) για την ώρα t .

Το p είναι το διάνυσμα με τις 24 τιμές κοστολόγησης της κιλοβατώρας.

- $J(P)$: Συνολικό κόστος ενέργειας (ή αρνητικό καθαρό κέρδος σε περίπτωση V2G).

Υπολογίζεται ως άθροισμα του γινομένου ισχύος επί τιμής ανά ώρα.

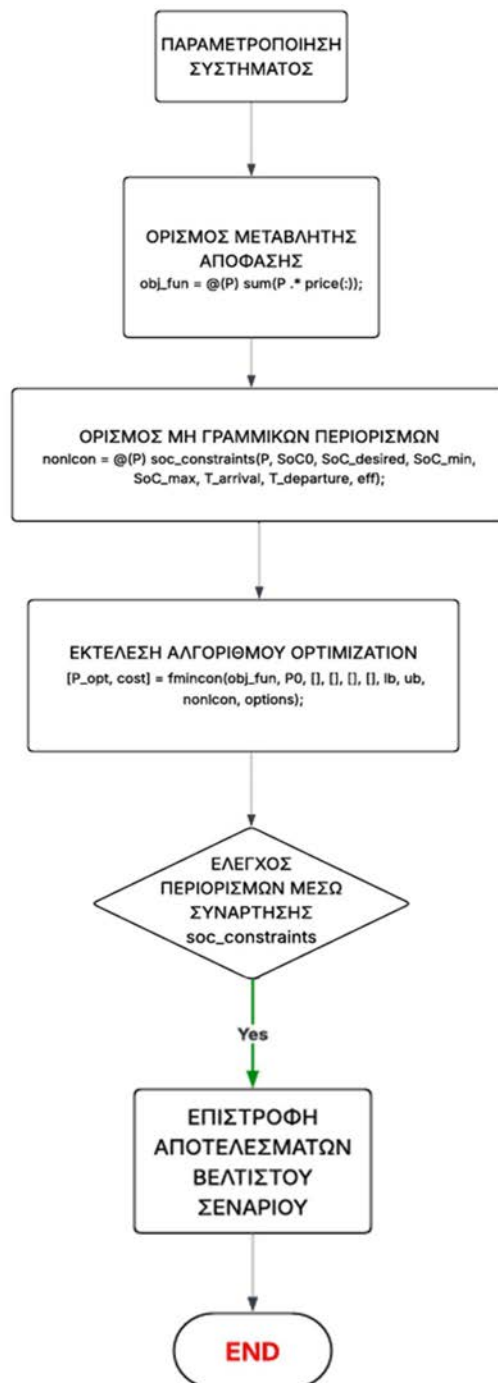
Συνάρτηση Στόχου Βελτιστοποίησης : Η επιλογή του βέλτιστου διανύσματος ισχύος P που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος (ή ισοδύναμα μεγιστοποιεί το καθαρό κέρδος).

$$\min_{P \in R^{24}} J(P) = \sum_{t=1}^{24} P_t p_t$$

Καθώς η εκφόρτιση προς το δίκτυο αποφέρει έσοδα, η αρνητική ισχύς συνεπάγεται αρνητικό κόστος και συνεπώς αύξηση του καθαρού κέρδους.

Νευραλγικό κομμάτι του αλγορίθμου είναι η συνάρτηση `fmincon` η οποία προχωρά επαναληπτικά, δοκιμάζοντας διαφορετικές πιθανές λύσεις για το διάνυσμα P , και σε κάθε βήμα υπολογίζει το αντίστοιχο SoC για κάθε ώρα της ημέρας, εφαρμόζοντας την ενεργειακή εξίσωση που συνδέει την ισχύ με το SoC, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 3.2.1. Κάθε υποψήφια λύση αξιολογείται ως προς τις επιτρεπτές τιμές του SoC σε κάθε χρονικό βήμα και ελέγχεται εάν έχει επιτευχθεί ο ζητούμενος τελικός στόχος που τέθηκε από τον χρήστη.

Μέσω της βοηθητικής συνάρτησης `soc_constraints` ορίζονται οι περιορισμοί του συστήματος όπως αυτοί αναφέρθηκαν στην υποενότητα 3.1.1 και η αρχική κατάσταση του οχήματος καθώς και τα ζητούμενα του χρήστη τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1. Αυτοί οι περιορισμοί είναι μη γραμμικοί και σχετίζονται με την εξέλιξη της κατάστασης φόρτισης του οχήματος. Αν οι περιορισμοί ικανοποιούνται, η λύση αξιολογείται βάσει του κόστους και γίνεται σύγκριση με προηγούμενες. Η διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να εντοπιστεί το διάνυσμα P που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος.



Εικόνα 3.3: Διάγραμμα Ροής αλγορίθμου Optimized_Max_Profit.

3.2.3 Αλγόριθμος χωρίς V2G με χρήση «έξυπνης φόρτισης»

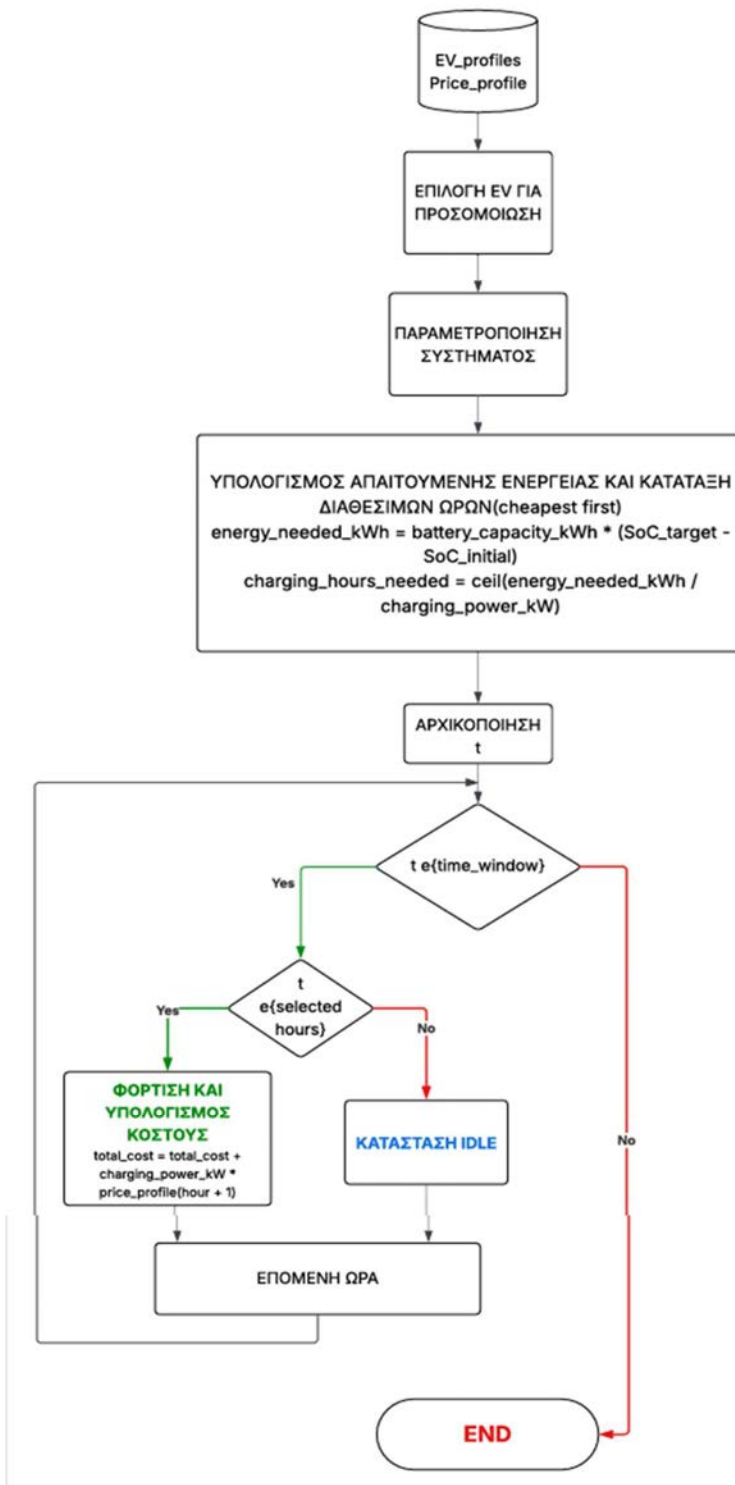
Σκοπός του αλγορίθμου NO_V2G_SmartCharge είναι η βέλτιστη φόρτιση των οχημάτων, λαμβάνοντας υπόψη τις εναλλαγές των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας στην ελληνική αγορά εντός της ημέρας. Επιλέγει, με βάση τα ζητούμενα του χρήστη του ΗΟ, τις κατάλληλες ώρες φόρτισης ώστε να επιτευχθεί το χαμηλότερο δυνατό κόστος.

Φορτώνονται τα προαναφερθέντα databases και ο αλγόριθμος εκκινεί ζητώντας από τον χρήστη να επιλέξει για ποιο από τα ΗΟ θα γίνει η προσομοίωση. Αρχικοποιούνται οι παράμετροι της προσομοίωσης, οι οποίοι παρουσιάστηκαν στην υποενότητα 3.1.1. Υπολογίζεται η απαραίτητη ενέργεια για πλήρωση μέχρι το ζητούμενο SoC και οι απαιτούμενες ώρες φόρτισης:

$$Εαπαιτούμενη = (SOC_{στόχος} - SOC_{αρχικό}) \cdot Εμπαταρίας)$$

$$Ωρες_{φορτισης} = [Εαπαιτούμενη / (P_{charge} * n_{ch})]$$

και κατατάσσονται οι διαθέσιμες ώρες σε αύξουσα σειρά με βάση την τιμή. Ο αλγόριθμος επιλέγει τις φθηνότερες από αυτές τις ώρες, αρκεί να επαρκούν για την κάλυψη της απαιτούμενης ενέργειας. Όπως φαίνεται στο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου στην Εικόνα 3.4 στις ώρες που δεν επιλέγονται για φόρτιση, το ΗΟ παραμένει σε κατάσταση αδράνειας (idle). Η διαδικασία φόρτισης ολοκληρώνεται όταν το ΗΟ φτάσει στο επιθυμητό SoC ακριβώς την ώρα που έχει δηλωθεί ως ώρα παραλαβής. Το συνολικό κόστος φόρτισης προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους ωριαίων χρεώσεων για τις επιλεγμένες ώρες ομοίως με τους προηγούμενους αλγορίθμους.



Εικόνα 3.4: Διάγραμμα Ροής αλγορίθμου No_V2G_smartcharge.

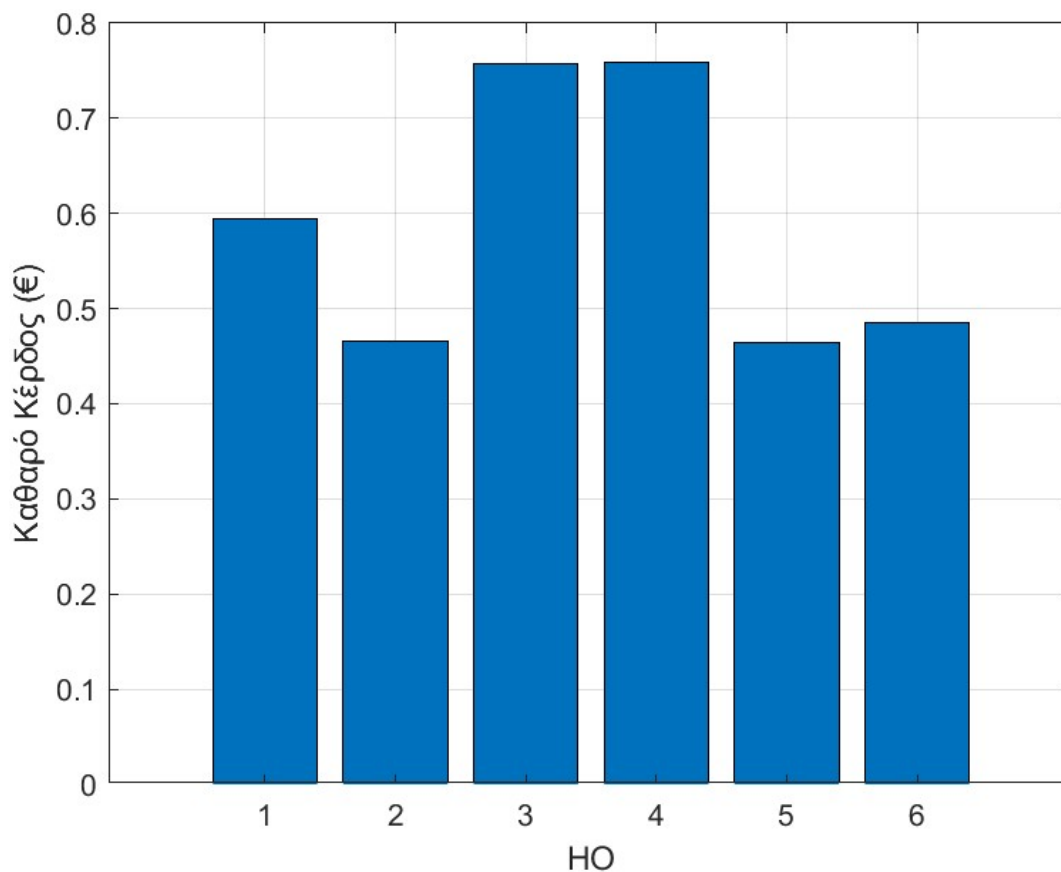
3.2.4 Αλγόριθμος Simple_Charge

Με στόχο την βέλτιστη δυνατή εξαγωγή συμπερασμάτων υλοποιήθηκε ένας επιπλέον αλγόριθμος μέσω MATLAB, στον οποίο το ΗΟ εισέρχεται στην εκάστοτε ώρα άφιξης που δηλώνεται στον Πίνακα 3.1 και ξεκινά αμέσως την φόρτιση μέχρις ότου επιτευχθεί το επιθυμητό ποσοστό μπαταρίας.

3.3 Παράθεση και σύγκριση αποτελεσμάτων

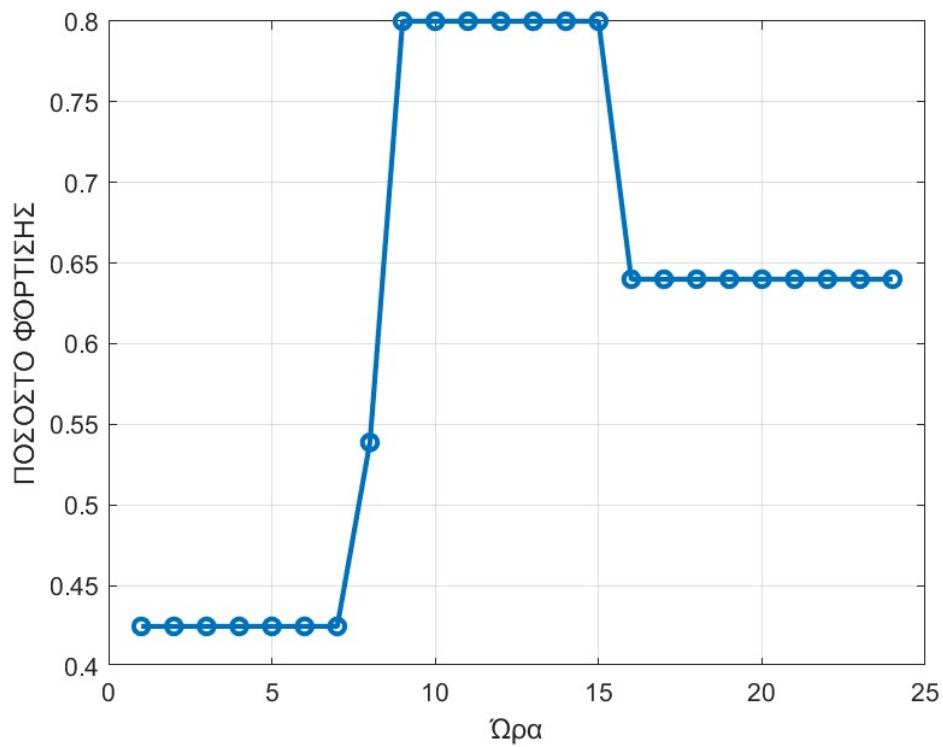
3.3.1 Αποτελέσματα αλγορίθμου Simple_V2G_24h

Στην Εικόνα 3.5 παρουσιάζεται το καθαρό ημερήσιο κέρδος σε ευρώ που προέκυψε από την διαδικασία V2G για κάθε ένα από τα 6 οχήματα για τα οποία γίνεται η προσομοίωση με βάση τα ζητούμενα του εκάστοτε χρήστη.

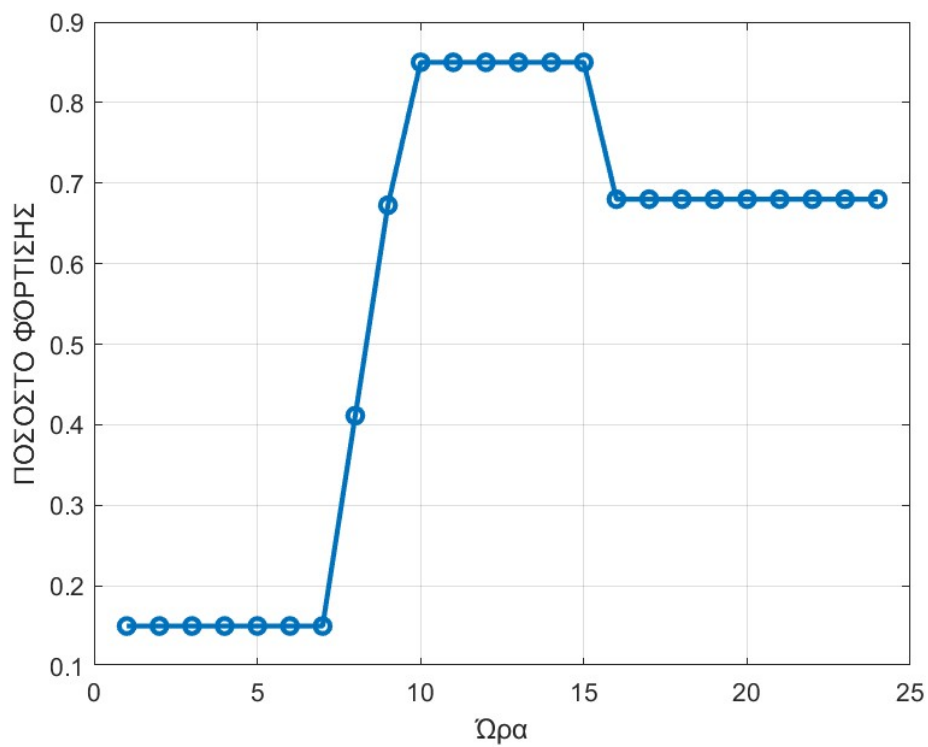


Εικόνα 3.5: Ημερήσιο Κέρδος από V2G.

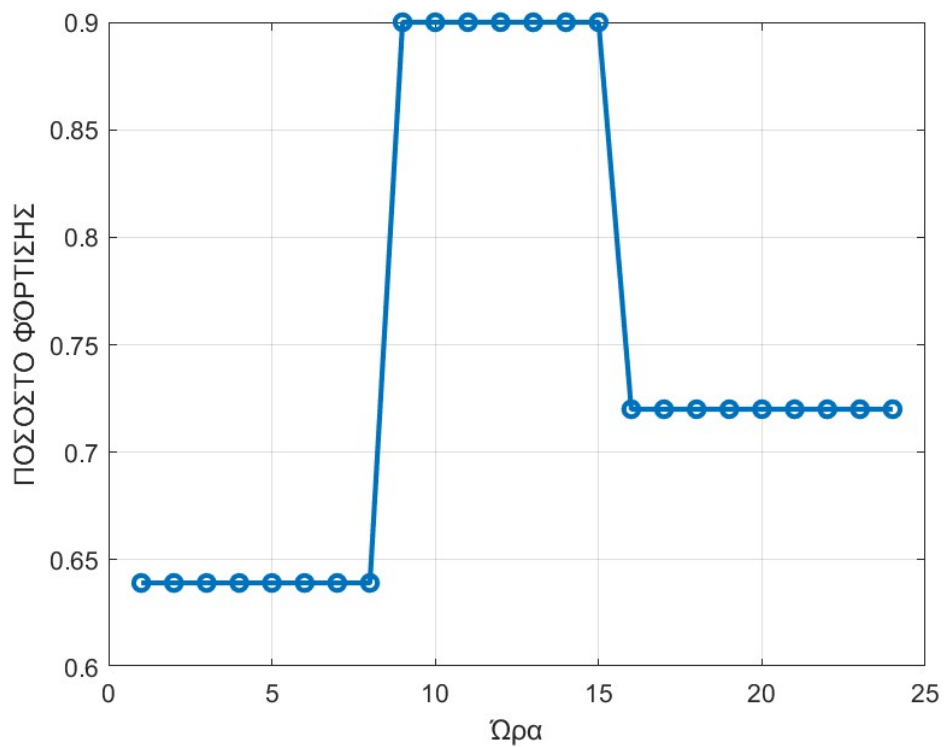
Ακολούθως, γίνεται παράθεση των 6 γραφημάτων στα οποία φαίνεται η πορεία του SoC για το κάθε όχημα από την Εικόνα 3.6 έως 3.11.



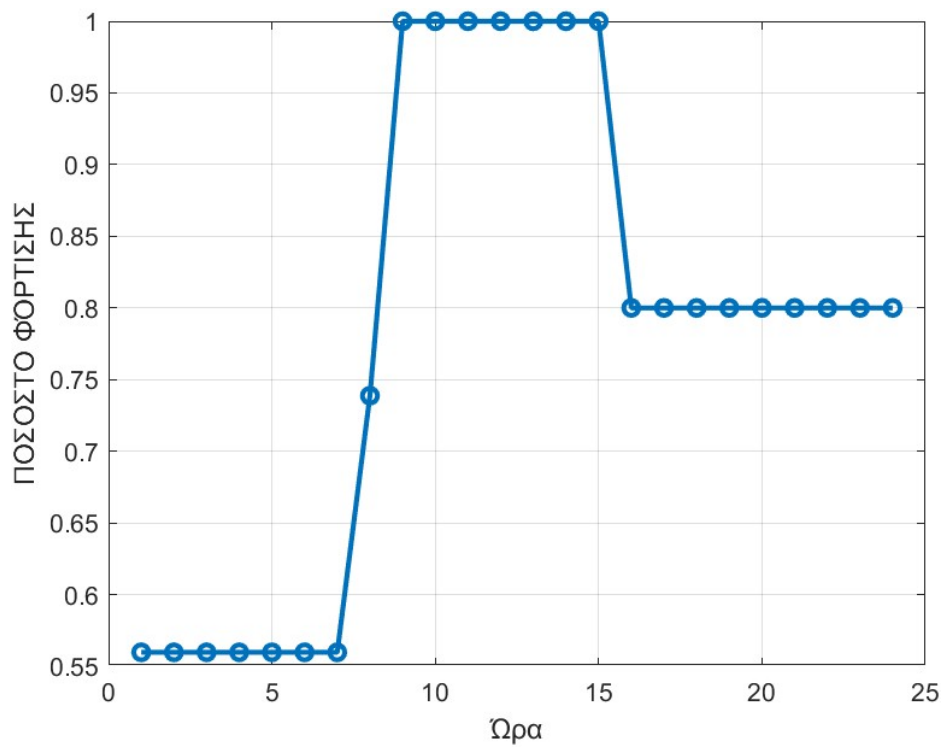
Εικόνα 3.6 Simple_V2G_24h HO1.



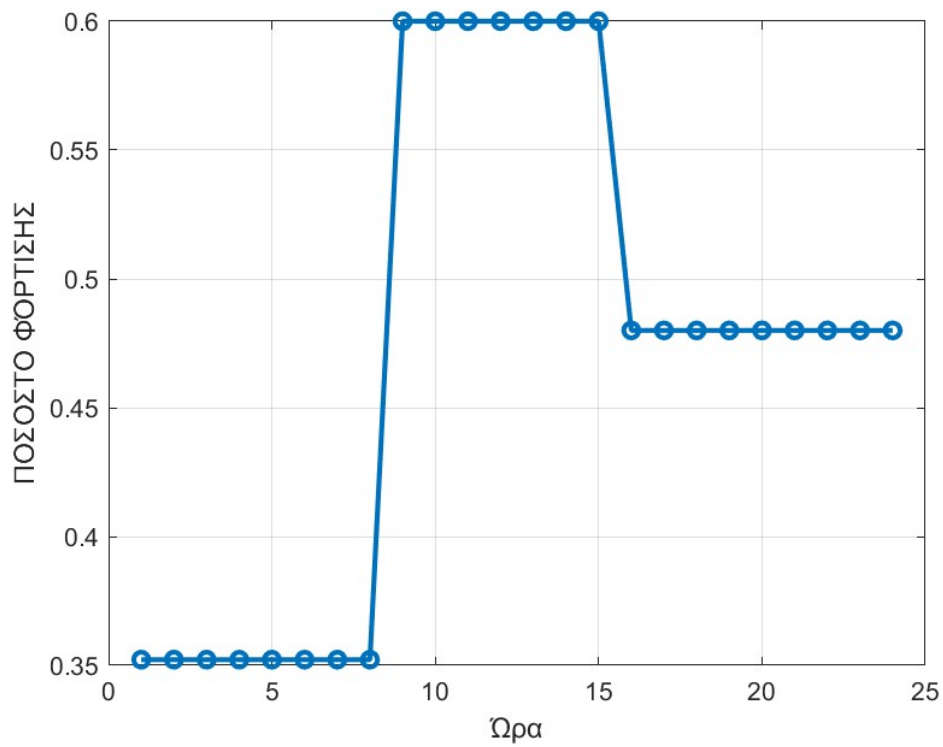
Εικόνα 3.7 Simple_V2G_24h HO2



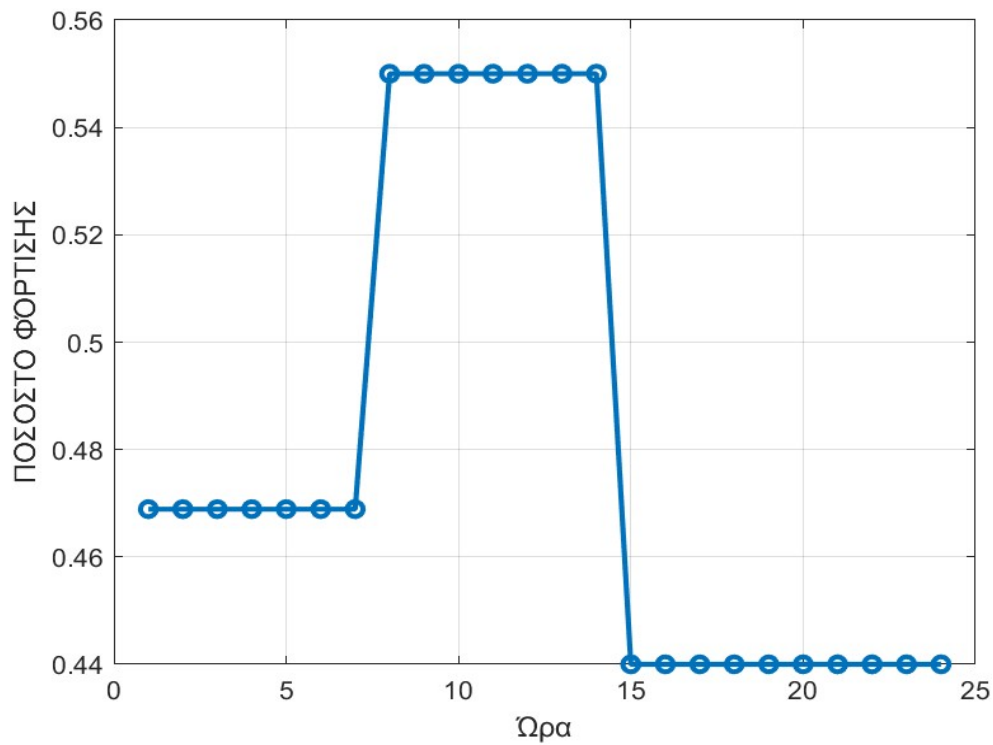
Εικόνα 3.8: Simple_V2G_24h HO3.



Εικόνα 3.9: Simple_V2G_24h HO4.



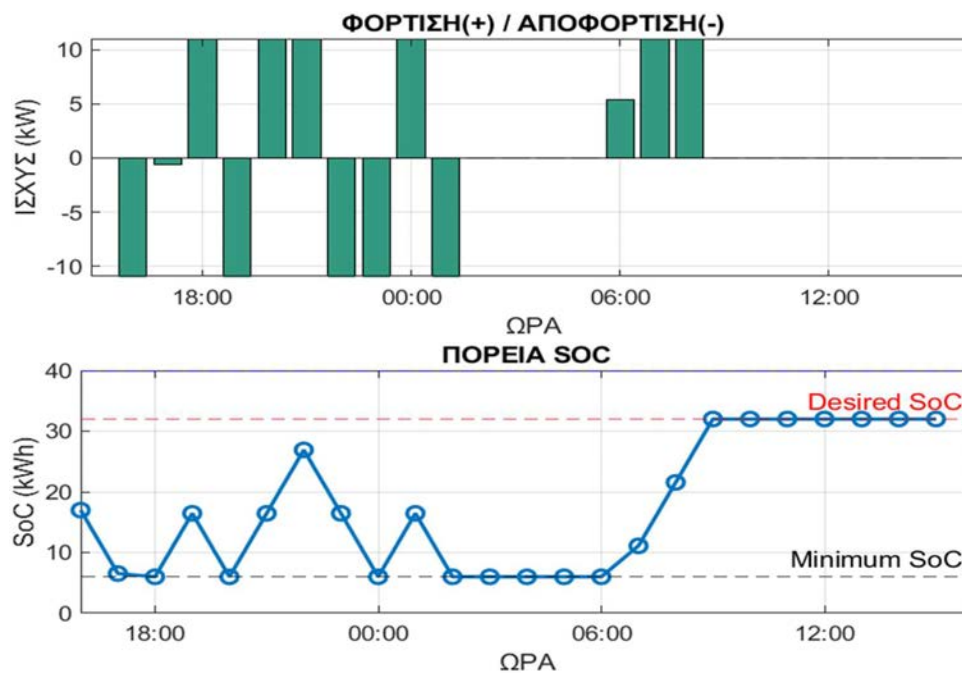
Εικόνα 3.10: Simple_V2G_24h HO5



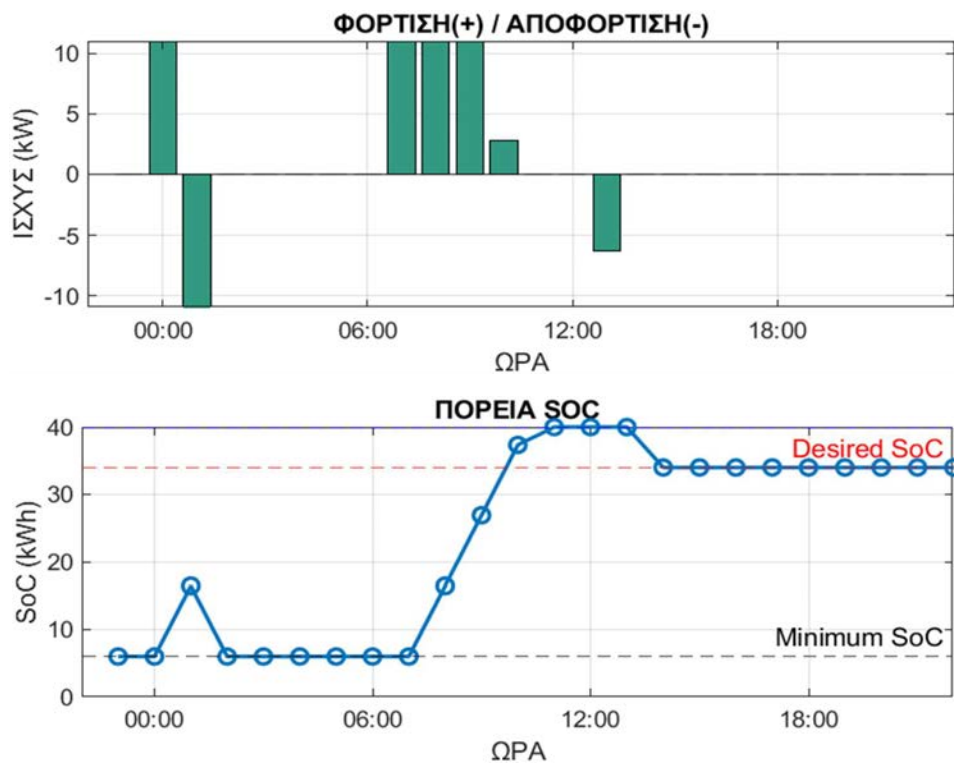
Εικόνα 3.11: Simple_V2G_24h HO6.

3.3.2 Αποτελέσματα αλγορίθμου Optimized_max_Profit

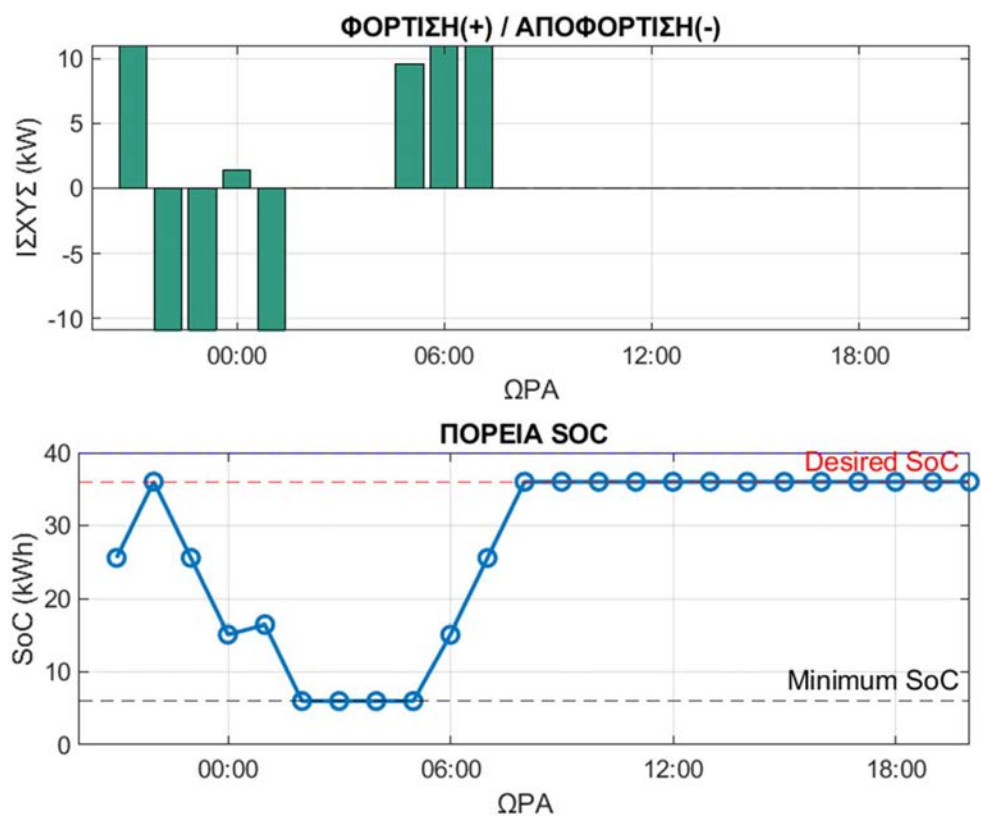
Στις Εικόνες 3.12 έως 3.17 παρουσιάζονται τα 6 διαγράμματα πορείας του SoC για το κάθε HO κάνοντας χρήση του αλγορίθμου Optimized_max_Profit.



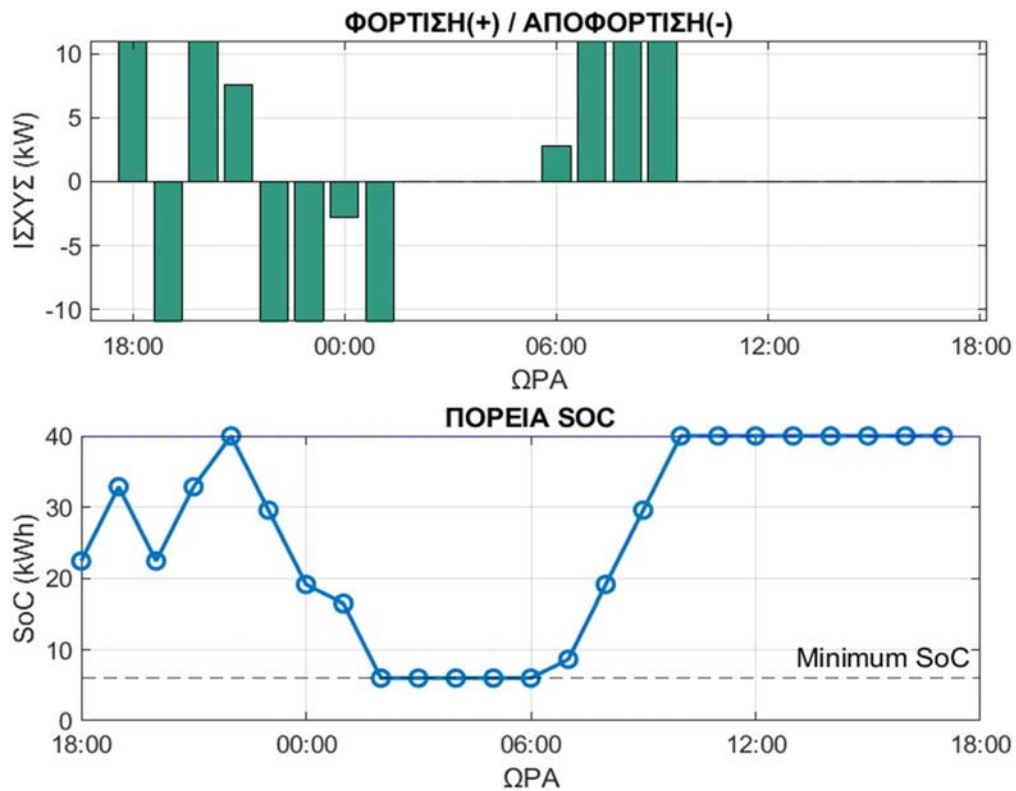
Εικόνα 3.12: Optimized_Max_Profit HO1.



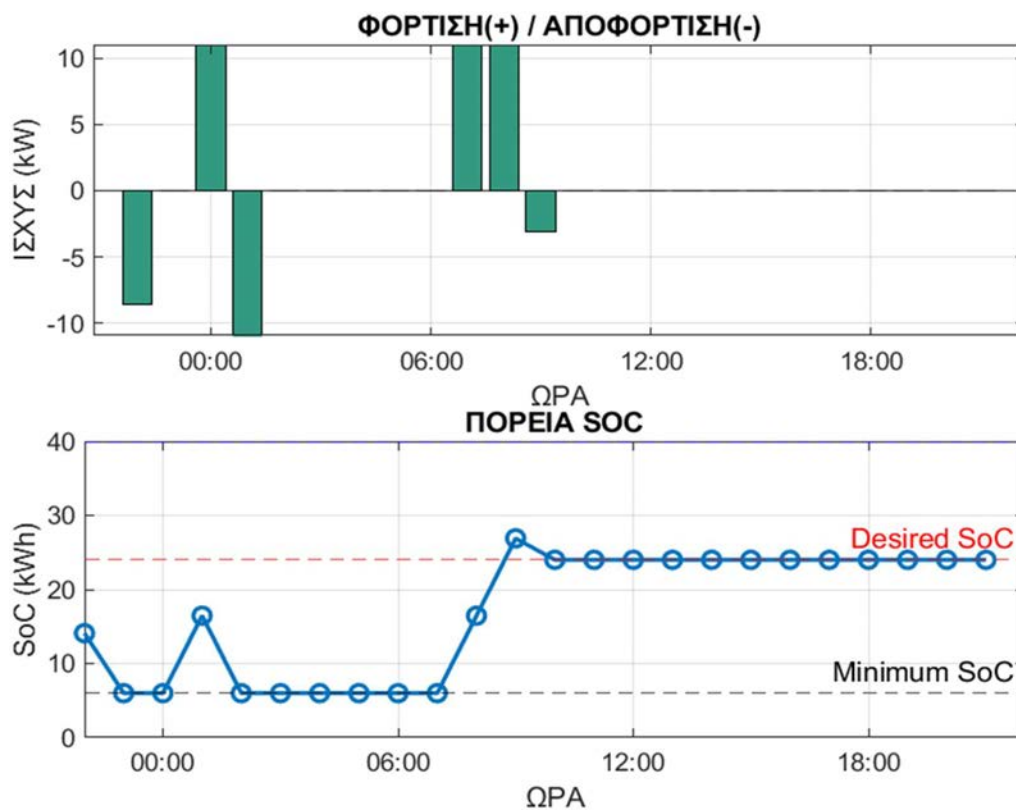
Εικόνα 3.13: Optimized_Max_Profit HO2.



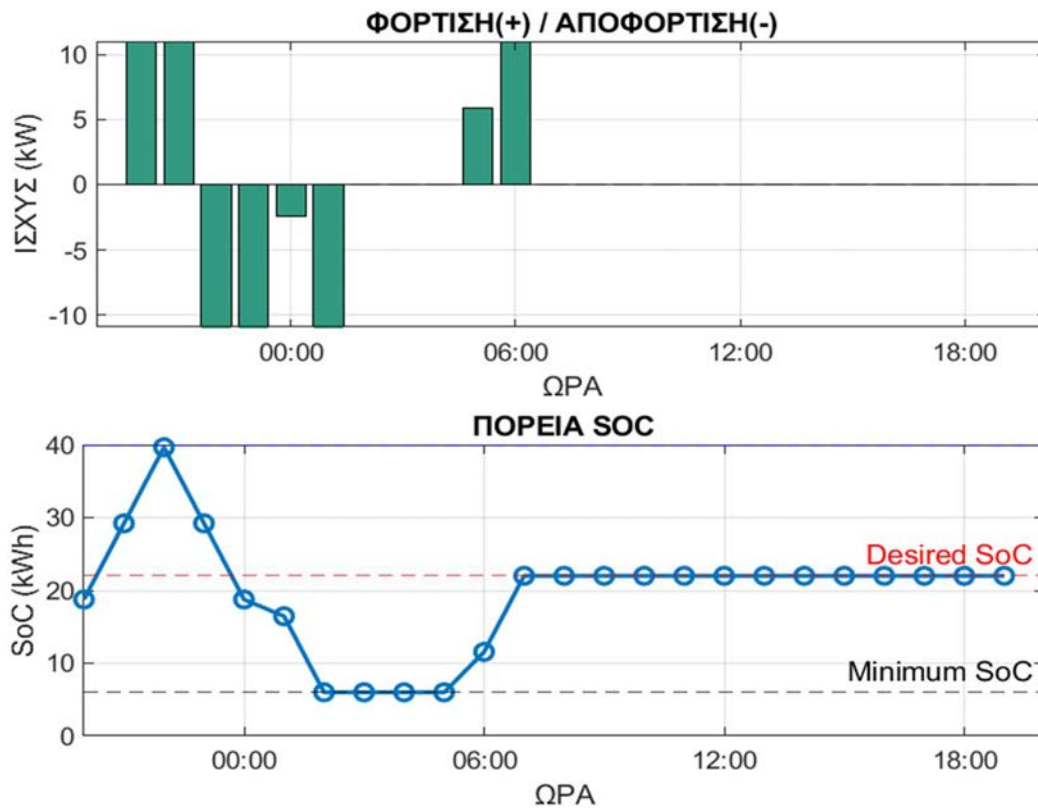
Εικόνα 3.14 Optimized_Max_Profit HO3.



Εικόνα 3.15: Optimized_Max_Profit HO4.



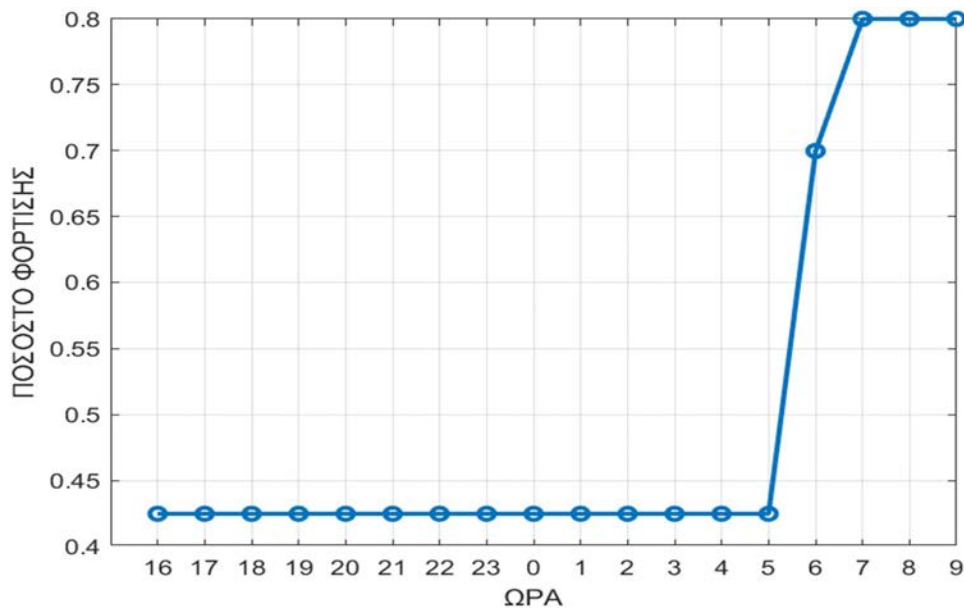
Εικόνα 3.16: Optimized_Max_Profit HO5.



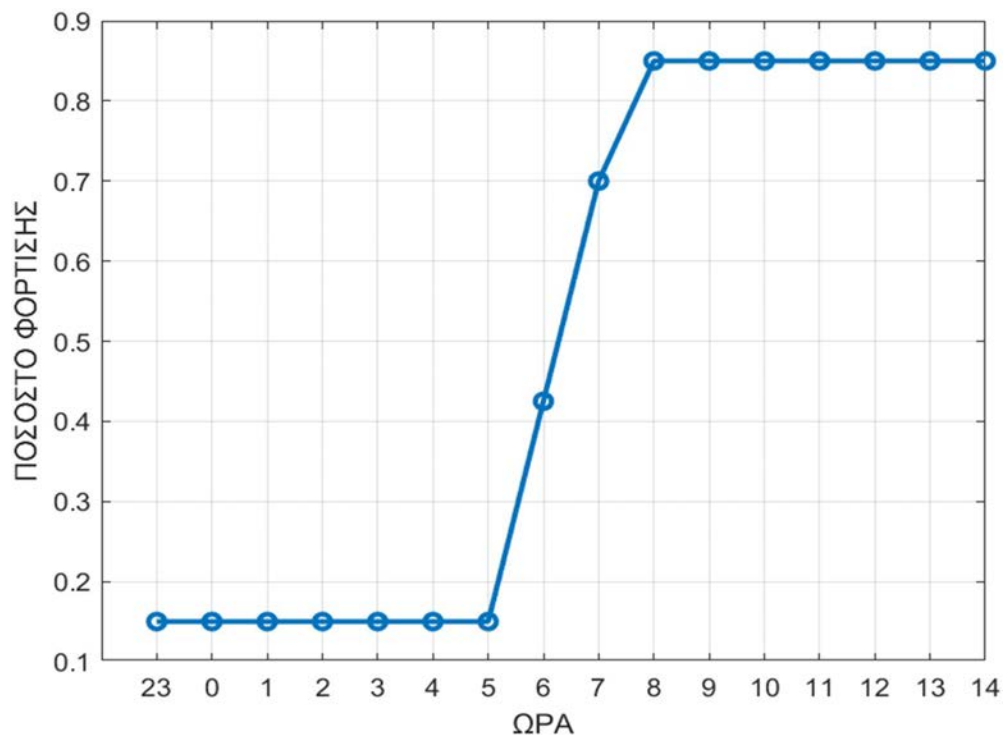
Εικόνα 3.17: Optimized_Max_Profit HO6.

3.3.3 Αποτελέσματα αλγορίθμου NO_V2G_Smart-Charge

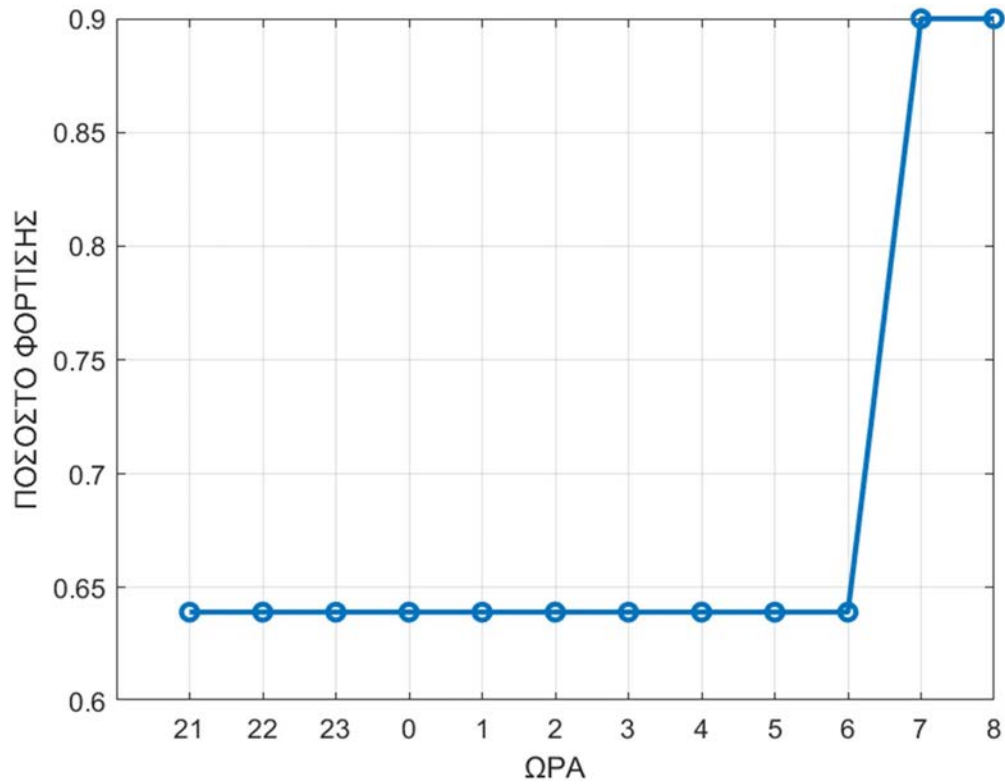
Στις Εικόνες 3.18 έως 3.23 παρουσιάζονται τα γραφήματα της πορείας των SoC για τις προσομοιώσεις του αλγορίθμου NO_V2G_Smartcharge.



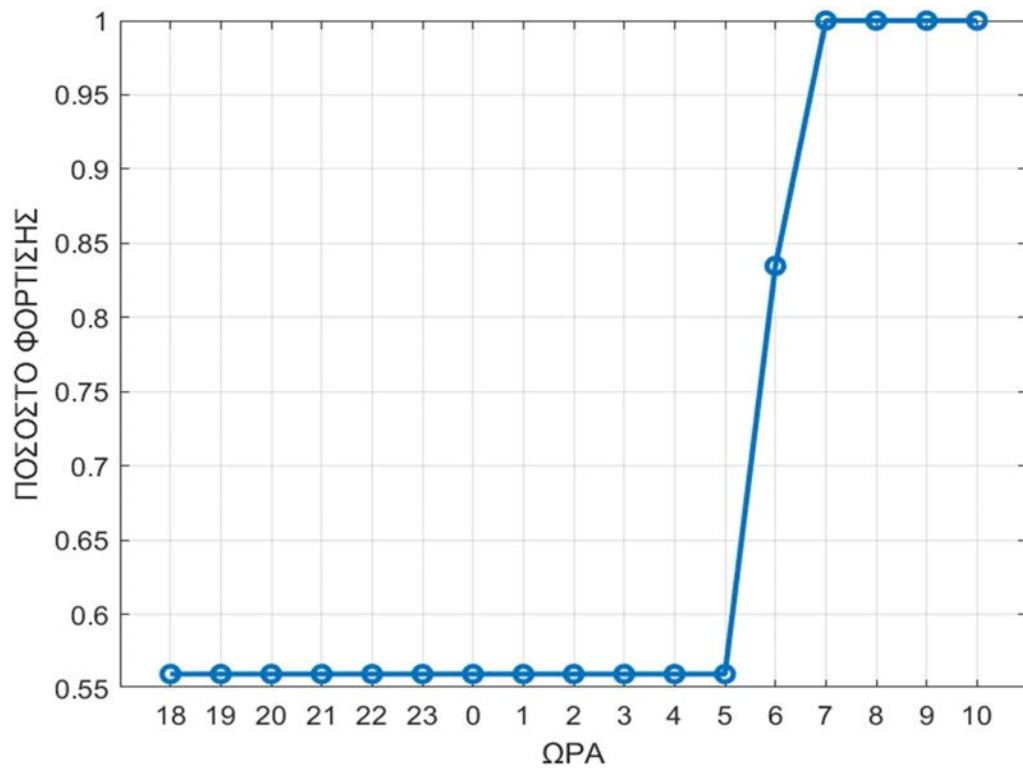
Εικόνα 3.18: No_V2G_Smartcharge HO1.



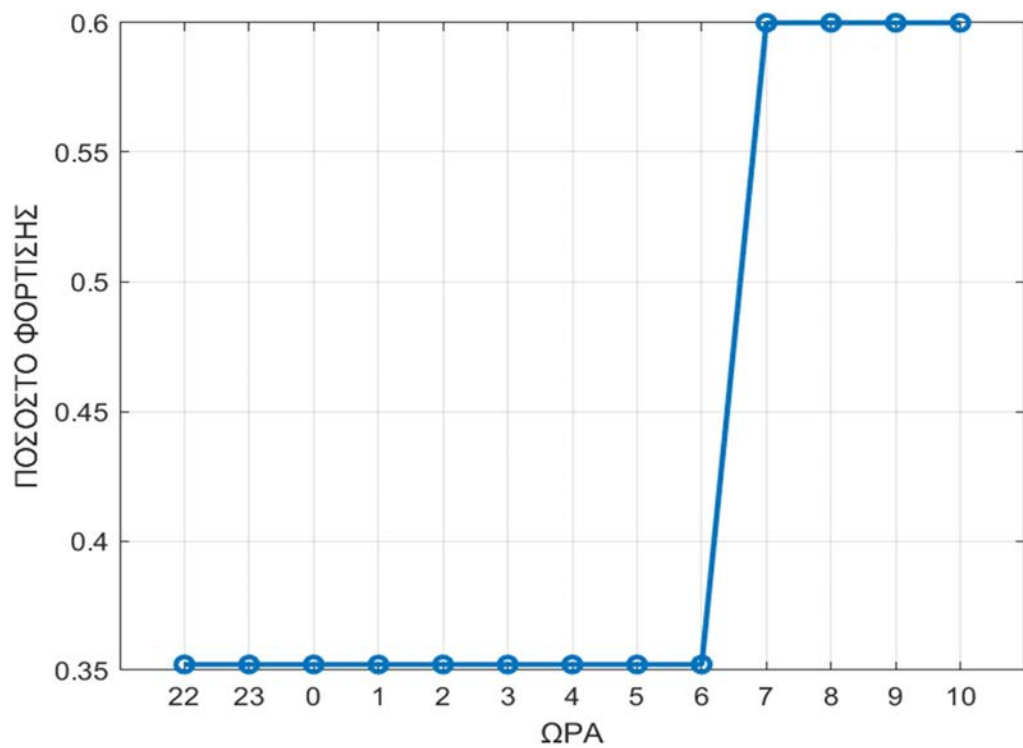
Εικόνα 3.19: No_V2G_Smartcharge HO2.



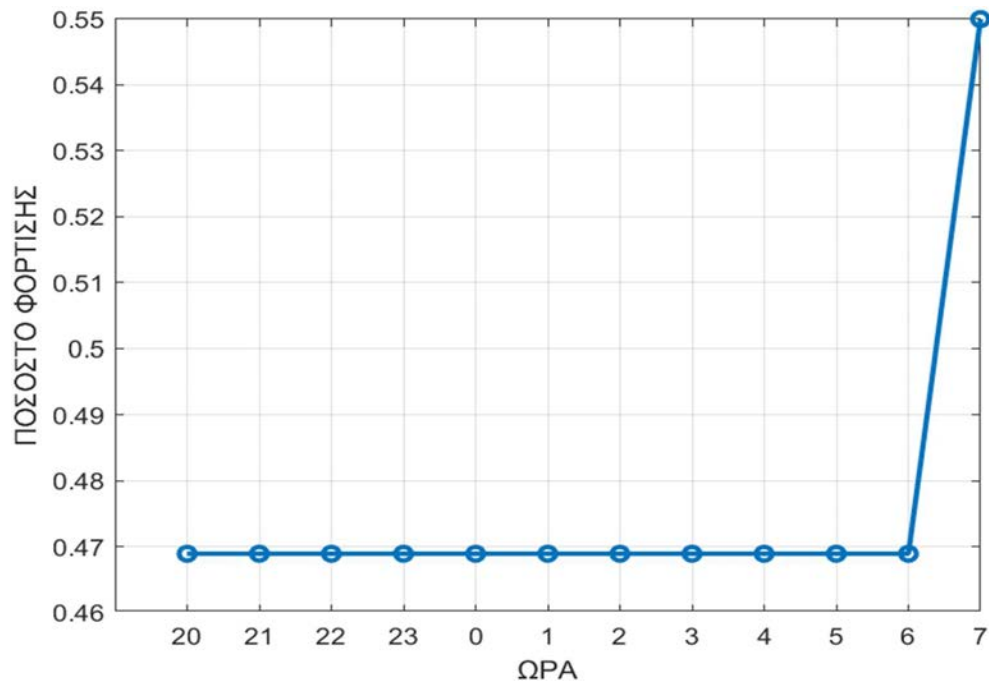
Γράφημα 3.20: No_V2G_Smartcharge HO3.



Εικόνα 3.21: No_V2G_Smartcharge HO4.



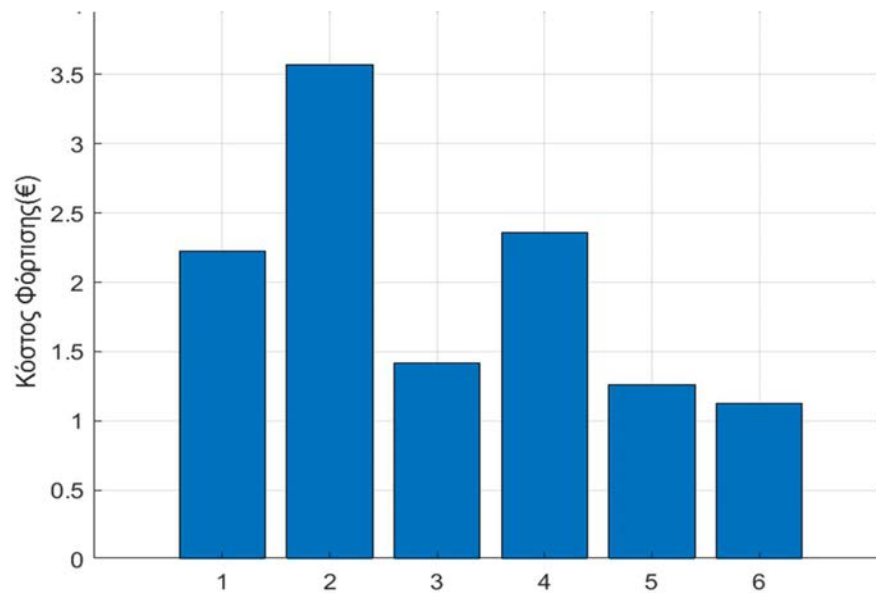
Εικόνα 3.22: No_V2G_Smartcharge HO5.



Εικόνα 3.23: No_V2G_Smartcharge HO6.

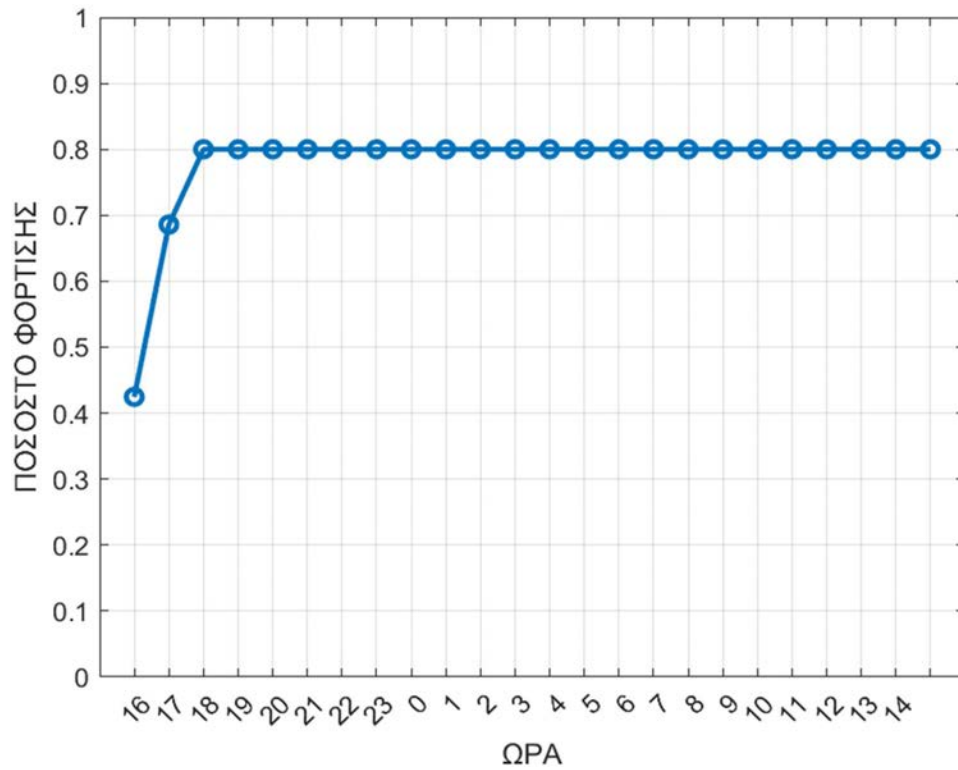
3.3.4 Αποτελέσματα αλγορίθμου Simple_Charge

Στην Εικόνα 3.24 παρουσιάζονται τα κόστη φόρτισης για το κάθε ΗΟ, χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Simple_Charge.

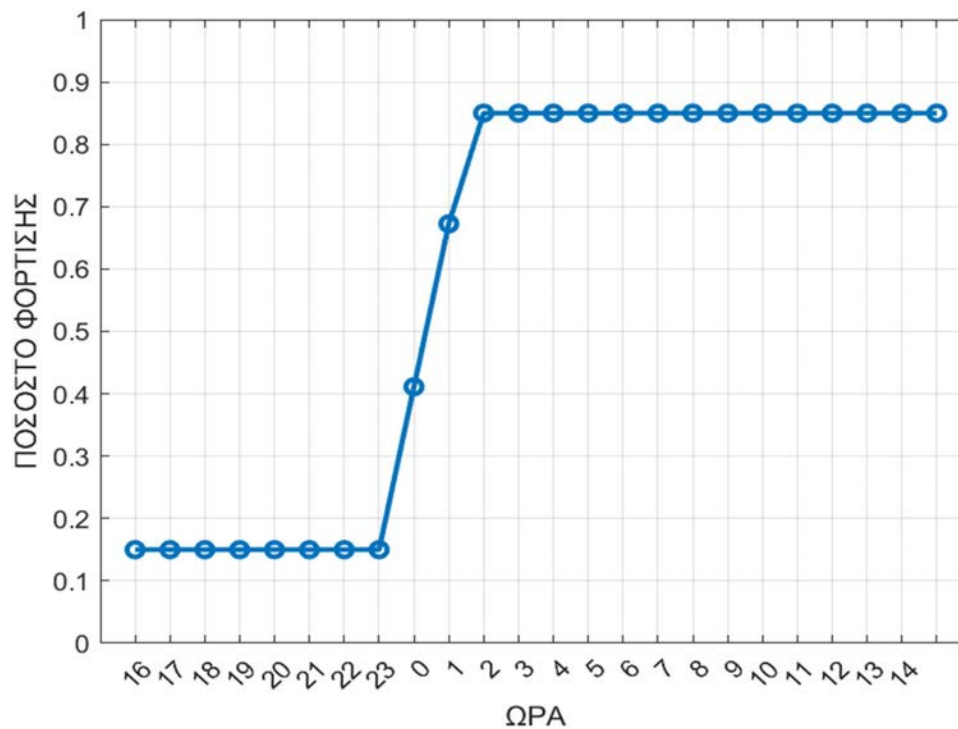


Εικόνα 3.24: Κόστος Φόρτισης ανά ΗΟ για Simple_Charge.

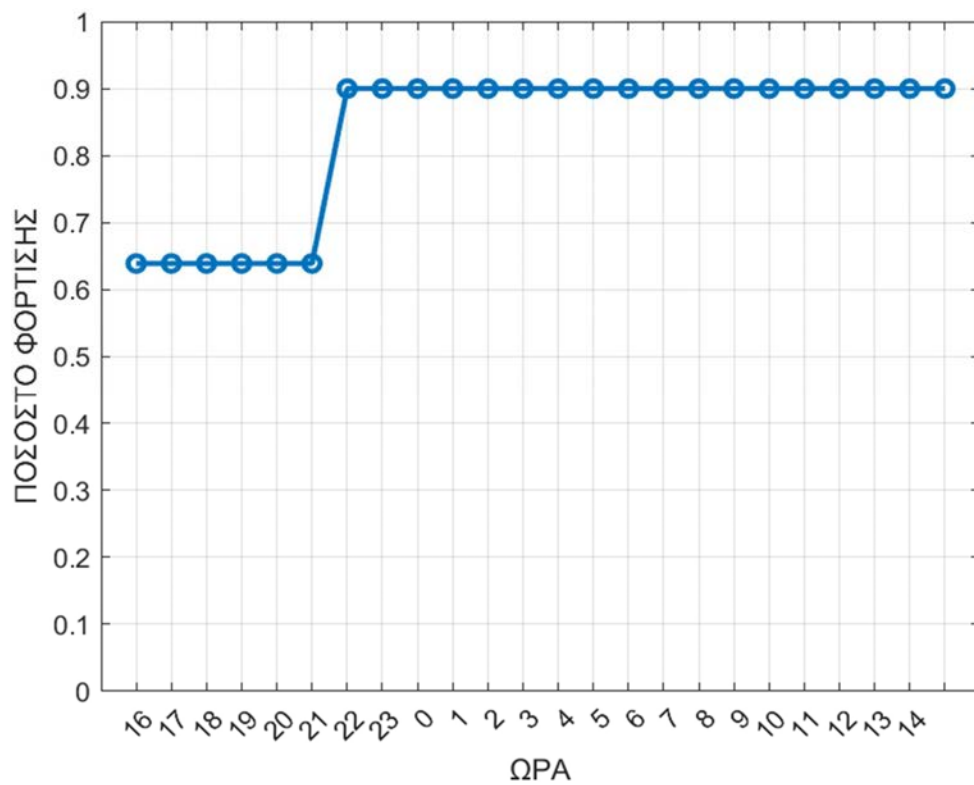
Στις Εικόνες 3.25 έως 3.30 παρουσιάζεται η πορεία του SoC για τα 6 ΗΟ της προσομοίωσης χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο Simple_Charge.



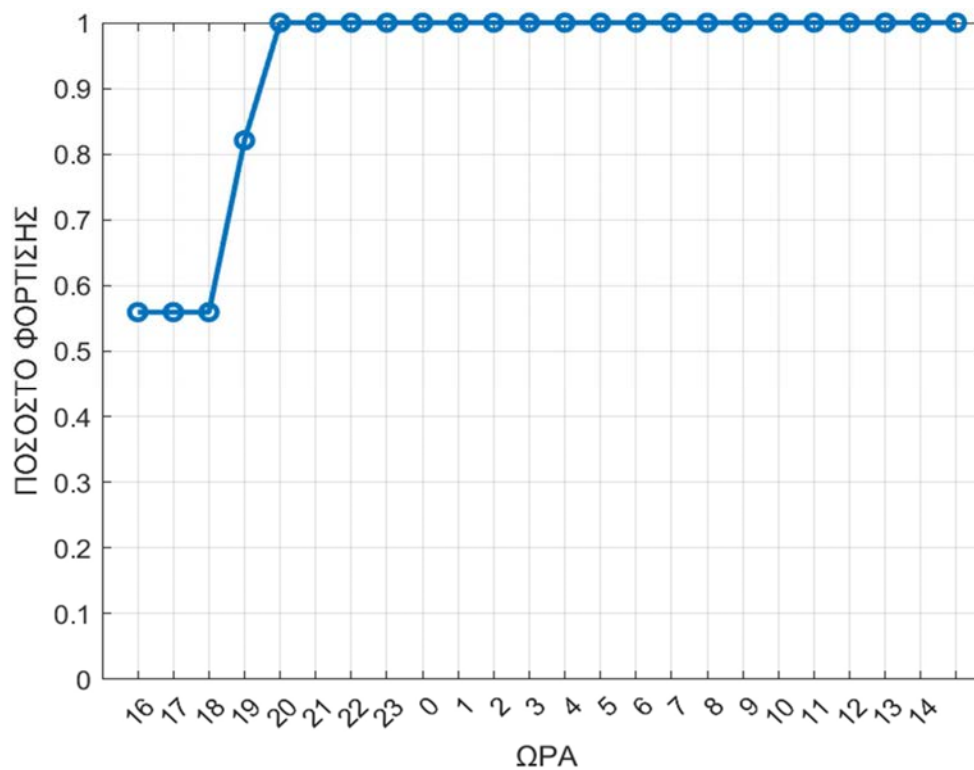
Εικόνα 3.25: Simple_Charge HO1.



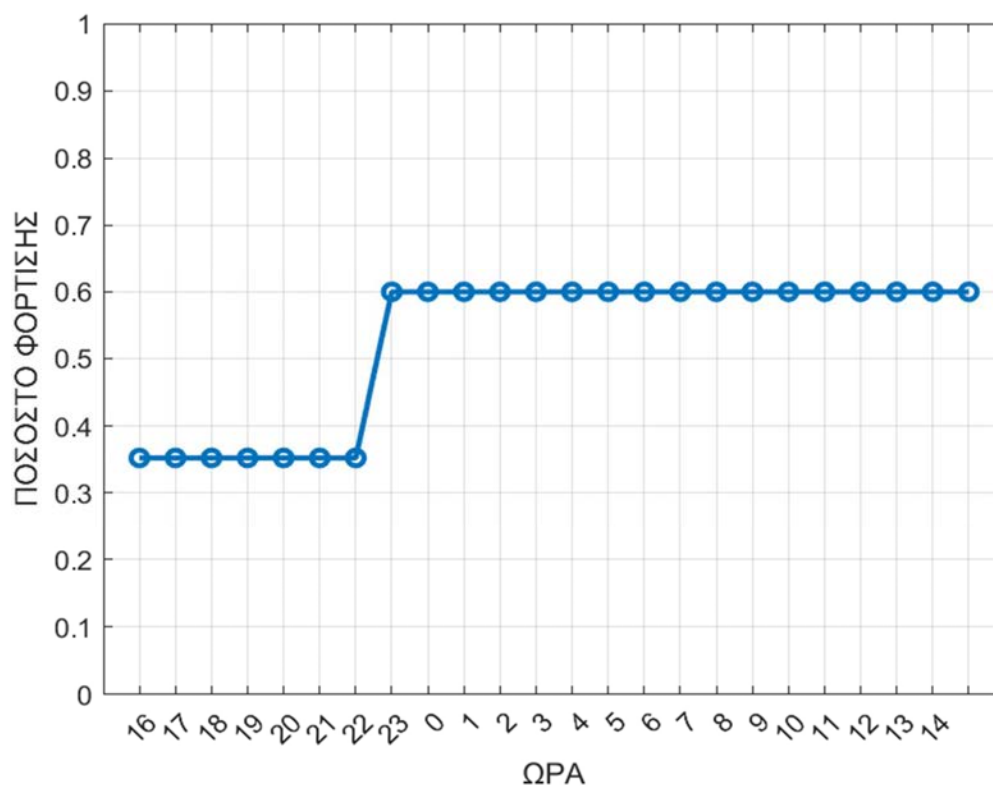
Εικόνα 3.26 Simple_Charge HO2.



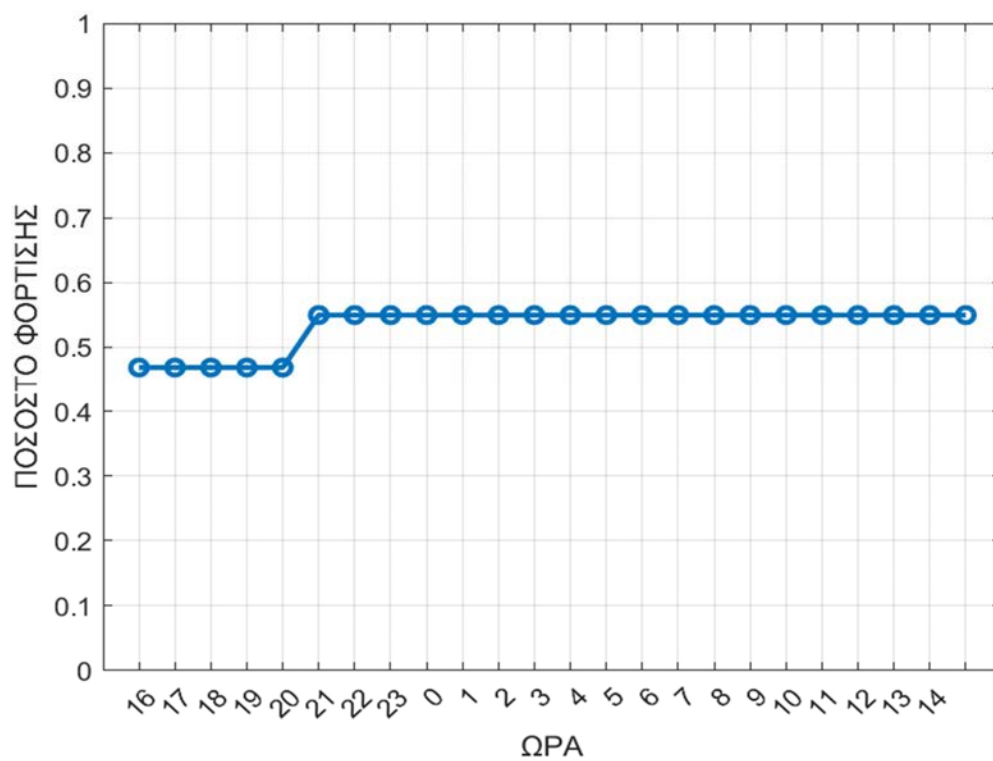
Εικόνα 3.27 Simple_Charge HO3.



Εικόνα 3.28: Simple_Charge HO4.



Εικόνα 3.29: Simple_Charge HO5.



Εικόνα 3.30 Simple_Charge HO6.

3.4 Ανάλυση αποτελεσμάτων και συμπεράσματα

Από τους 4 αλγορίθμους που υλοποιήθηκαν παράγονται διαφορετικά αποτελέσματα, τα οποία καθιστούν δυνατή την εξαγωγή εμπεριστατωμένων συμπερασμάτων όσον αφορά την αποδοτικότητα τους και τις διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης τους, ανάλογα με την προτίμηση του χρήστη ενός ΗΟ.

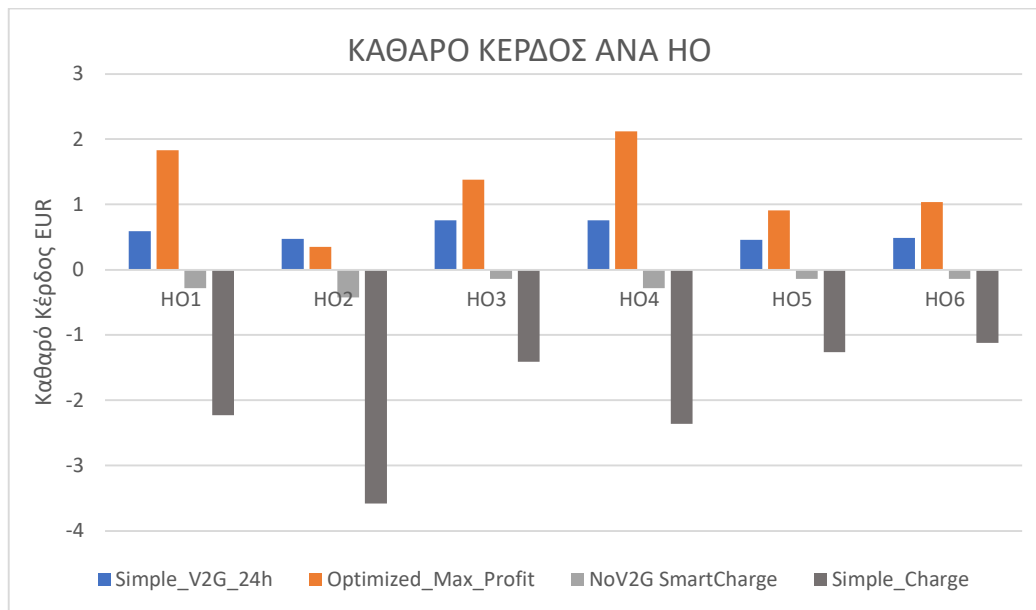
3.4.1 Συμπεράσματα λειτουργίας αλγορίθμων

Από τις Εικόνες 3.6 έως 3.30 είναι εφικτό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με την λειτουργικότητα των αλγορίθμων που υλοποιήθηκαν. Συγκεκριμένα, έχοντας εικόνα της τιμής της κιλοβατώρας σε κάθε ώρα του 24ώρου, από την Εικόνα 3.1, παρατηρείται πως στους 3 από τους 4 αλγόριθμους (εκτός του Simple_Charge), στους οποίους υπάρχει δυνατότητα επιλογής ώρας φόρτισης τα ΗΟ φορτίζουν στις φθηνότερες δυνατές διαθέσιμες ώρες, ελαχιστοποιώντας όσο είναι δυνατόν το κόστος φόρτισης. Οι δύο αλγόριθμοι που διαθέτουν την τεχνολογία V2G, παρατηρείται πως έχουν διαφορετική στρατηγική αποφόρτισης, όμως, όπως φαίνεται στις Εικόνες 3.6 έως 3.17 τα ΗΟ αποφορτίζουν στις ακριβότερες διαθέσιμες ώρες, μεγιστοποιώντας έτσι το κέρδος από V2G.

3.4.2 Οικονομικά αποτελέσματα

Στην προηγούμενη ενότητα πραγματοποιήθηκε ανάλυση της λειτουργίας των τριών αλγορίθμων και παρουσιάστηκαν τα εξαγόμενα γραφήματα. Εξίσου υψηλής σημασίας είναι να εξεταστεί η οικονομική αποδοτικότητα τους και η οπτικοποίηση της.

Στην Εικόνα 3.31 οπτικοποιείται η διαφοροποίηση του καθαρού κέρδους (ή της ζημίας) για το εκάστοτε ΗΟ ανάλογα με το σενάριο το οποίο χρησιμοποιείται.



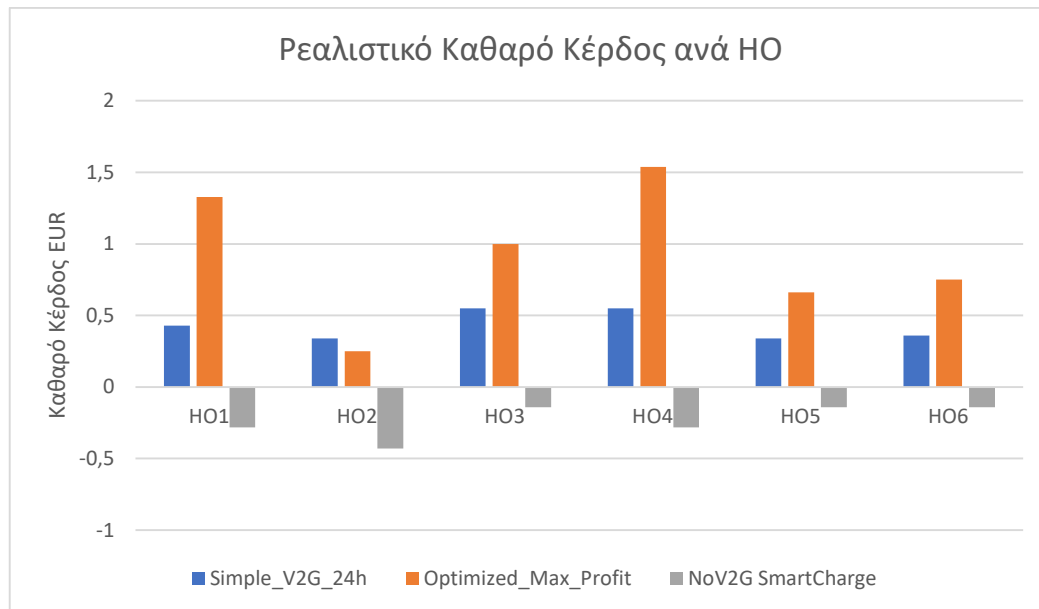
Εικόνα 3.31 Καθαρά Κέρδη και Κόστη ανά ΗΟ.

Παρατηρείται από την Εικόνα 3.31 χαρακτηριστική διαφορά μεταξύ των δύο σεναρίων που υποστηρίζουν την τεχνολογία V2G. Αυτό συμβαίνει λόγω των διαφορών τους όσον αφορά την λήψη απόφασης για εκφόρτιση στο δίκτυο ή μη. Εξαιτίας του αρκετά πρώιμου σταδίου της τεχνολογίας V2G στην Ελλάδα δεν υπάρχουν δεδομένα όσον αφορά την τιμή πώλησης στο δίκτυο, μιας κιλοβατώρας μέσω V2G τεχνολογίας. Για να αντιμετωπισθεί αυτό και να μετατρέψουμε τα οικονομικά αποτελέσματα στην πιο ρεαλιστική τους μορφή, εισάγεται ο Δείκτης Ρεαλιστικού Κέρδους (Realistic Revenue Factor-RFF). Ο συγκεκριμένος δείκτης λειτουργεί ως συντελεστής προσαρμογής, επιτρέποντας τη μετατροπή των εξαχθέντων αποτελεσμάτων, από τους αλγορίθμους, σε πιο ρεαλιστικές οικονομικές εκτιμήσεις, λαμβάνοντας υπόψη τις ισχύουσες τιμές της ελληνικής αγοράς ενέργειας. Μετά από βιβλιογραφική έρευνα όσον αφορά τις τιμές πώλησης της κιλοβατώρας από χρήση V2G, θα ληφθεί σαν μέση τιμή πώλησης 0.063€/KWh, όμοια με την τιμή ανά κιλοβατώρα που παράγεται από φωτοβολταϊκά. Από το 24ώρο τιμολόγιο που έχει χρησιμοποιηθεί εξάγεται η μέση τιμή αγοράς της κιλοβατώρας στα 0.086€/KWh [21].

Συνεπώς:

$$RFF = \frac{ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ}{ΤΙΜΗ ΑΓΟΡΑΣ} = 0.73$$

Το χαρακτηριστικό γράφημα ρεαλιστικού καθαρού κέρδους θα αλλάξει ως εξής στην Εικόνα 3.32:



Εικόνα 3.32: Ρεαλιστικά Καθαρά Κέρδη και Κόστη ανά ΗΟ.

Παρατηρείται πως είναι εμφανής η οικονομική αποδοτικότητα του αλγορίθμου *Optimized_Max_Profit*, πράγμα που οφείλεται στην δυνατότητα του να εκφορτίζει πριν την επίτευξη του επιθυμητού ποσοστού πλήρωσης της μπαταρίας στην ώρα που έχει ορίσει ο χρήστης ως ώρα παράδοσης. Αυτό συμβαίνει καθώς ο αλγόριθμος εκμεταλλεύεται τις ώρες με τις υψηλότερες τιμές για να αποζημιωθεί με τον βέλτιστο τρόπο ο χρήστης. Στις 5 από τις 6 περιπτώσεις υπερτερεί εμφανώς του αλγορίθμου *Simple_V2G_24h* όσον αφορά τα οικονομικά οφέλη.

Στην περίπτωση του HO2 ο αλγόριθμος *Optimized_max_Profit* παρουσιάζει βέλτιστο σενάριο με καθαρό κέρδος 0.25€ χαμηλότερο του *Simple_V2G_24h* με 0,34€. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας της μεγάλης διαφοράς αρχικού και επιθυμητού SoC (15%-85%) σε συνδυασμό με το διαθέσιμο χρονικό παράθυρο που έχει ο αλγόριθμος για να λειτουργήσει (23:00-14:00). Ο *Simple_V2G_24h* έχει την δυνατότητα εκφόρτισης στο δίκτυο μόνο μετά το πέρας της ώρας παραλαβής από τον χρήστη, σε περίπτωση που αυτός δεν επιλέξει την χρήση του ΗΟ. Αυτή η δυνατότητα, προσδίδει

μεγαλύτερη χρηματική αποζημίωση, στην συγκεκριμένη περίπτωση, καθώς οι ακριβότερες ώρες βρίσκονται στο χρονικά παράθυρο 14:00-16:00 και 19:00-00:00. Ο `Optimized_max_Profit` από την άλλη υποχρεούται να σταματήσει στις 14:00 στην συγκεκριμένη περίπτωση έχοντας οπωσδήποτε πετύχει το επιθυμητό ποσοστό πλήρωσης, πράγμα που καθιστά πολύ μικρό το παράθυρο για V2G, όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.13 και συνεπώς οδηγεί σε μικρότερη χρηματική αποζημίωση λόγω επιστροφής ισχύος στο δίκτυο.

Είναι ξεκάθαρη η διαφορά μεταξύ των αλγορίθμων `No_V2G_Smartcharge` και `Simple_Charge` όπως φαίνεται στην Εικόνα 3.32. Η επιλογή των φθηνότερων διαθέσιμων ωρών για φόρτιση είναι καθοριστική ενώ η κατευθείαν φόρτιση είναι αρκετά ακριβότερη καθώς κατά κανόνα οι ακριβότερες ώρες της δυναμικής τιμολόγησης της κιλοβατώρας συμπίπτουν με τις ώρες άφιξης των ΗΟ στους φορτιστές τους. Αυτό συμβαίνει, αφού οι περισσότεροι χρήστες των ΗΟ επιστρέφουν στον φορτιστή τους τα οχήματα μετά τις απογευματινές ώρες, κυρίως στις εργάσιμες μέρες.

3.4.3 Συμπεράσματα για τις περιπτώσεις χρήσης των αλγορίθμων

Ο αλγόριθμος `Simple_V2G_24h` κάνει πιο απλή χρήση του V2G καθώς επιλέγει να φορτίσει μέχρι την ώρα παραλαβής στις φθηνότερες διαθέσιμες ώρες, καλύπτοντας το ζητούμενο του χρήστη για συγκεκριμένο ποσοστό πλήρωσης. Ακολουθώντας, παρουσιάζει ένα μοντέλο V2G για τις εναπομείναντες ώρες μέχρι το πέρας του τρέχοντος 24ώρου. Παρέχει την δυνατότητα για επιλογή ελαχίστου ποσοστού μπαταρίας μετά την επιθυμητή ώρα παραλαβής, πράγμα που καθορίζει το ύψος των κερδών από V2G. Θα μπορούσε να γίνει χρήση του σε περιπτώσεις που ο χρήστης αποφασίσει πως δεν θα κάνει χρήση του οχήματος του τελευταία στιγμή, ενώ παράλληλα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί σε εταιρείες που διαθέτουν μεγάλο στόλο ΗΟ (π.χ. εταιρείες χρονομίσθωσης), τα οποία παραμένουν σταθμευμένα για μεγάλα χρονικά διαστήματα.

Ο αλγόριθμος `Optimized_Max_Profit` αποτελεί το πιο ρεαλιστικό σενάριο εφαρμογής της V2G τεχνολογίας στον μέσο οδηγό ενός ιδιωτικής χρήσης ΗΟ. Παρουσιάζοντας πάντα το βέλτιστο οικονομικά σενάριο μέχρι την απαιτούμενη ώρα

παραλαβής του οχήματος, μπορεί να φανεί ιδιαίτερα χρήσιμος σε όλους τους οδηγούς ΗΟ με V2G, σε πιάτσες ταξί, εταιρείες car-sharing κ.ά.

Ο αλγόριθμος No_V2G_SmartCharge μπορεί να έχει εφαρμογές σε οποιοδήποτε ΗΟ, που δεν υποστηρίζει V2G, ελαχιστοποιώντας το κόστος φόρτισης, όσο είναι δυνατό, πετυχαίνοντας πάντα τα ζητούμενα του χρήστη για το παραδοτέο ποσοστό πλήρωσης της μπαταρίας και την ώρα παραλαβής του οχήματος από τον φορτιστή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΜΕΛΕΤΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ ΔΙΚΤΥΟΥ ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΧΑΜΗΛΗΣ ΤΑΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Στο αυτό το κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας θα γίνει παρουσίαση της προσομοίωσης σε ένα δίκτυο χαμηλής τάσης εντάσσοντας σε αυτό τα 6 ΗΟ για τα οποία είχαν γίνει οι προσομοιώσεις στο Κεφάλαιο 3. Για κάθε έναν από τους αλγορίθμους που υλοποιήθηκαν θα γίνει διαφορετική προσομοίωση στοχεύοντας στην εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά την επίδραση της ένταξης των ΗΟ στο συγκεκριμένο δίκτυο. Η προσομοίωση χρησιμοποιεί το MATLAB [20] συνδυαστικά με το πρόγραμμα OpenDss [22].

4.1.1 Σκοπός της προσομοίωσης

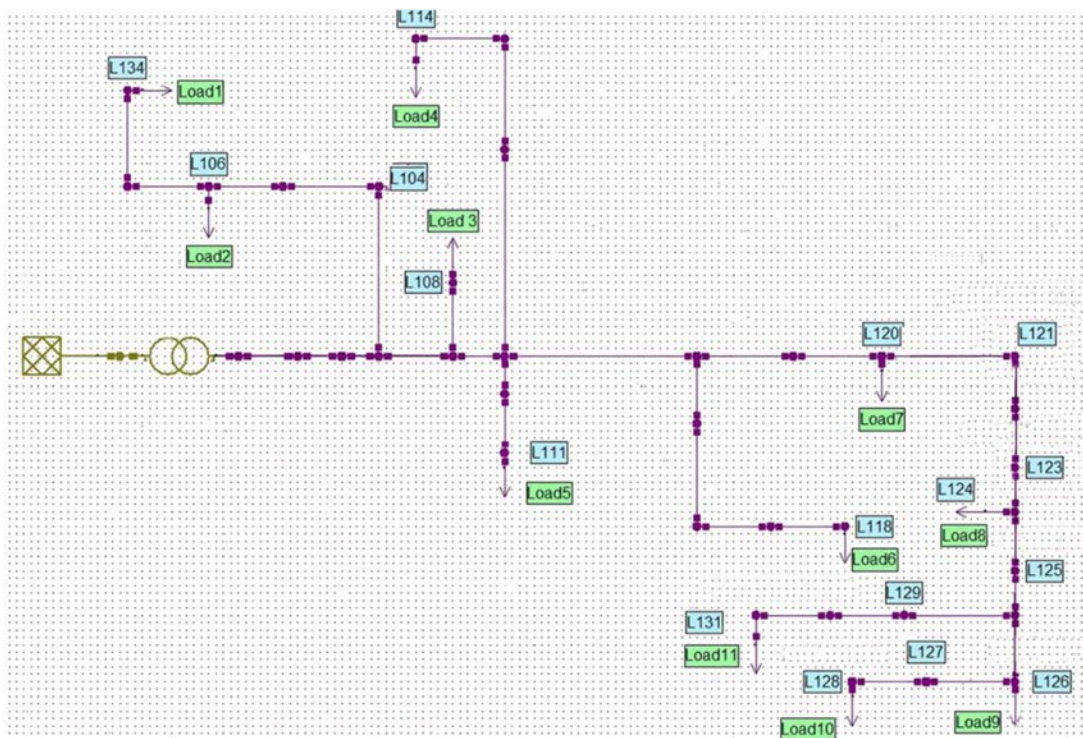
Ο σκοπός της προσομοίωσης δικτύου χαμηλής τάσης στο οποίο έχουμε εντάξει ΗΟ που είτε υποστηρίζουν είτε δεν υποστηρίζουν την τεχνολογία V2G, είναι να απαντηθούν τα ερωτήματα που αφορούν την πτώση τάσης που παρουσιάζεται. Μέσω της προσομοίωσης, θα αντληθούν πληροφορίες για το διαφορετικό φόρτο που επιδίδουν στο δίκτυο οι αλγόριθμοι φόρτισης που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επιπλέον, θα γίνει υλοποίηση 3 διαφορετικών σεναρίων στα οποία θα μεταβάλλεται η τοποθέτηση των ΗΟ στο δίκτυο σε σχέση με τον μετασχηματιστή. Θα μελετηθεί η διαφορά της εμφανιζόμενης πτώσης τάσης, των ίδιων αλγορίθμων φόρτισης, στα 3 διαφορετικά σενάρια, με σκοπό να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τον ρόλο που διαδραματίζει η απόσταση ενός φορτίου (ΗΟ) από τον μετασχηματιστή στην πτώση τάσης. Αναλυτικότερα:

- Σενάριο#1 (1-6) Πλησιέστερη Κατανομή: Οι διαθέσιμες θέσεις φορτίων στις οποίες θα συνδεθούν τα 6 ΗΟ διαδοχικά είναι οι Load1 έως Load6 της Εικόνας 4.1.
- Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10) Ομοιόμορφη Κατανομή : Οι διαθέσιμες θέσεις φορτίων στις οποίες θα συνδεθούν τα 6 ΗΟ διαδοχικά είναι οι Load-Load3-Load5-Load7-Load9-Load10 της Εικόνας 4.1.

- Σενάριο#3 (6-11) Απομακρυσμένη Κατανομή: Οι διαθέσιμες θέσεις φορτίων στις οποίες θα συνδεθούν τα 6 ΗΟ διαδοχικά είναι οι Load6 έως Load11 της Εικόνας 4.1.

4.2 Παρουσίαση και υλοποίηση του δικτύου

Η μορφολογία του δικτύου στο οποίο θα γίνει η μελέτη παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.1.



Εικόνα 4.1: Μορφολογία Δικτύου Διανομής.

Κατά την διάρκεια της μελέτης θα τοποθετηθούν σε διαφορετικούς κόμβους τα ΗΟ, με σκοπό να εξαχθεί ένα εμπειριστατωμένο συμπέρασμα όσον αφορά την επίδραση τους στην λειτουργία του συγκεκριμένου δικτύου. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.1, οι διαθέσιμες θέσεις για τοποθέτηση ΗΟ προς φόρτιση είναι οι Load1-Load11 στους αντίστοιχους κόμβους.

4.3 Υλοποίηση Αλγορίθμου Προσομοίωσης Δικτύου στο Matlab

4.3.1 Βασική Λειτουργία Αλγορίθμου

Ο κώδικας που έχει υλοποιηθεί στο MATLAB παρέχει την δυνατότητα για διαφορετική τοποθέτηση των 6 ΗΟ στις διαθέσιμες 11 θέσεις, που μπορούν να συνδεθούν φορτία, ενώ παράλληλα μπορεί να μετρηθεί η τάση σε κάθε κόμβο του δικτύου διανομής της Εικόνας 4.1. Ως αποτέλεσμα εξάγονται διαγράμματα τάσεων στις 3 φάσεις για τις 24 ώρες της ημέρας.

4.4 Παράθεση αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα τα οποία εξάγονται είναι σε μορφή διαγράμματος τάσης σε Volt(V) ανά ώρα της προσομοίωσης. Με διακεκομμένη γραμμή εμφανίζεται η πορεία της τάσης εάν δεν υπήρχαν τα ΗΟ, ενώ με μπλε κόκκινο και κίτρινο χρώμα εμφανίζονται οι φάσεις Α, Β, C αντίστοιχα. Τοποθετώντας στο ίδιο διάγραμμα την πορεία της τάσης χωρίς να έχουμε τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μαζί με την πορεία της τάσης έχοντας συμπεριλάβει την επίδραση των ΗΟ, είναι εφικτό να οπτικοποιήσουμε την πτώση τάσης για την οποία ευθύνονται τα οχήματα.

Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται 3 διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης, τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά σε ποιες από τις διαθέσιμες θέσεις φορτίων (Load1-Load11), του δικτύου διανομής της Εικόνας 4.1, συνδέονται τα 6 ΗΟ για φόρτιση.

4.4.1 Προσομοίωση Δικτύου Διανομής: Σενάριο#1 (θέσεις 1-6)

Στο Σενάριο#1 (1-6) της προσομοίωσης του δικτύου διανομής τα ΗΟ συνδέονται στις πλησιέστερες στον μετασχηματιστή θέσεις φορτίων της Εικόνας 4.1. Οι κόμβοι και τα οχήματα που συνδέονται προς φόρτιση σε αυτούς παρουσιάζονται στον Πίνακα 4.1.

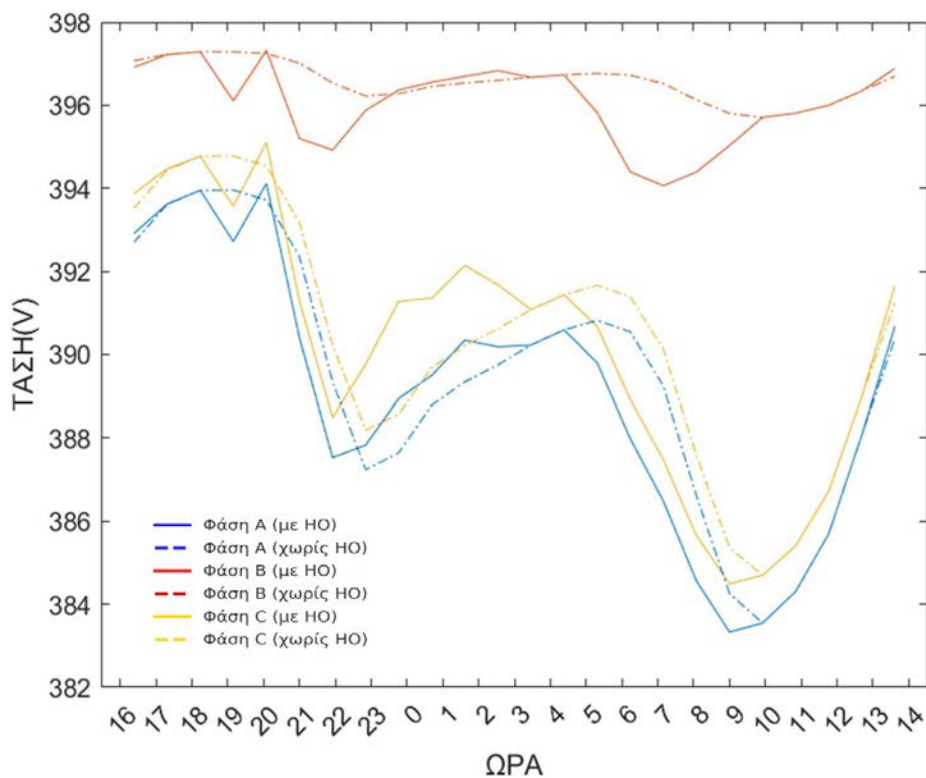
Πίνακας 4.1: Θέσεις ΗΟ στο δίκτυο Σενάριο #1 (1-6).

ΗΟ id	ΚΟΜΒΟΣ
ΗΟ1	L134
ΗΟ2	L106

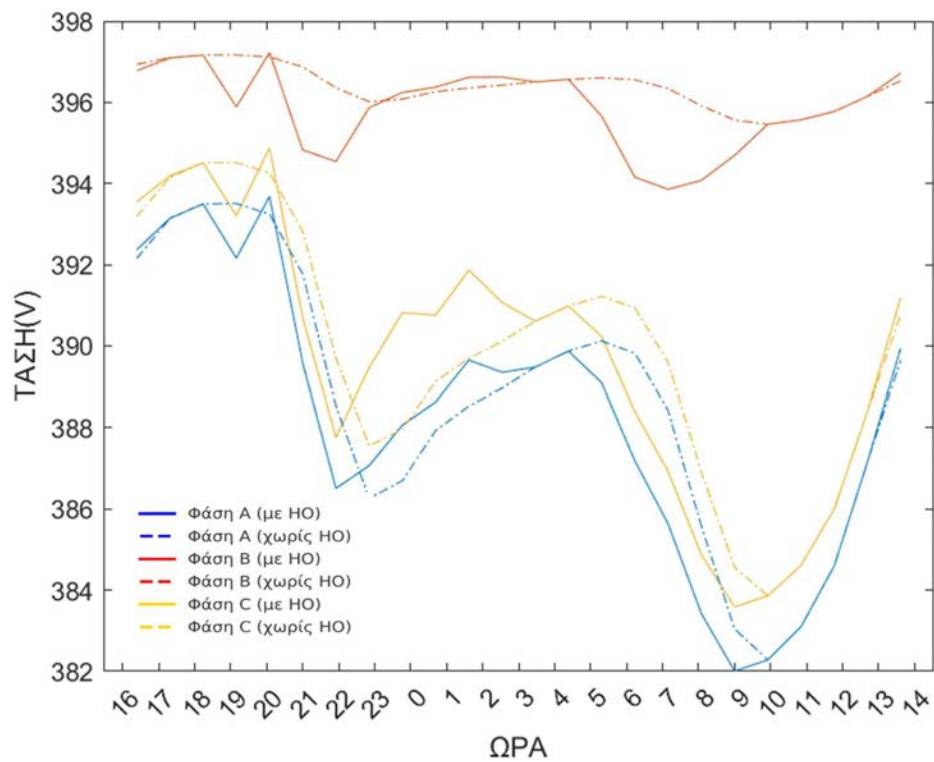
H03	L108
H04	L114
H05	L111
H06	L118

Οι κόμβοι που επιλέχθηκαν για τους οποίους θα γίνει μέτρηση της τάσης για όλες τις μεθόδους φόρτισης για το Σενάριο#1 είναι: L108, L111, L120, L126, L128, L134. Κριτήριο επιλογής των κόμβων προς μέτρηση είναι η κατανομή τους στο δίκτυο δηλαδή η απόσταση τους από τον μετασχηματιστή. Σκοπός είναι να εξαχθεί ένα εμπειριστατωμένο συμπέρασμα όσον αφορά την πτώση τάσης σε διάφορα σημεία του δικτύου.

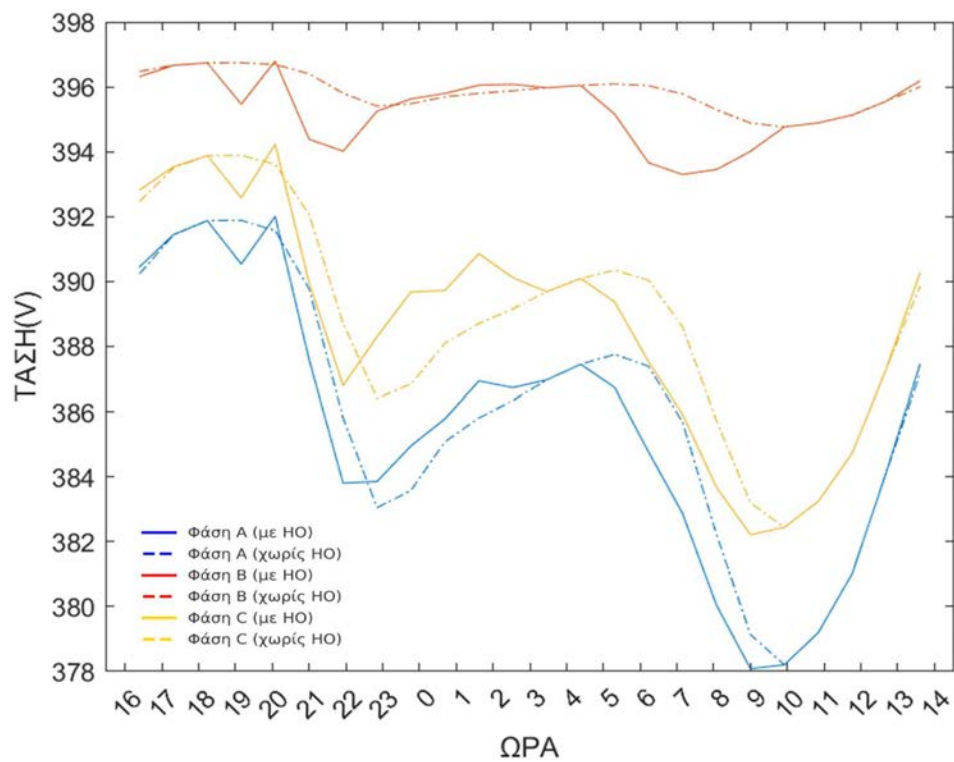
Ακολουθούν τα διαγράμματα του αλγορίθμου Optimized_Max_Profit στις Εικόνες 4.2 έως 4.7.



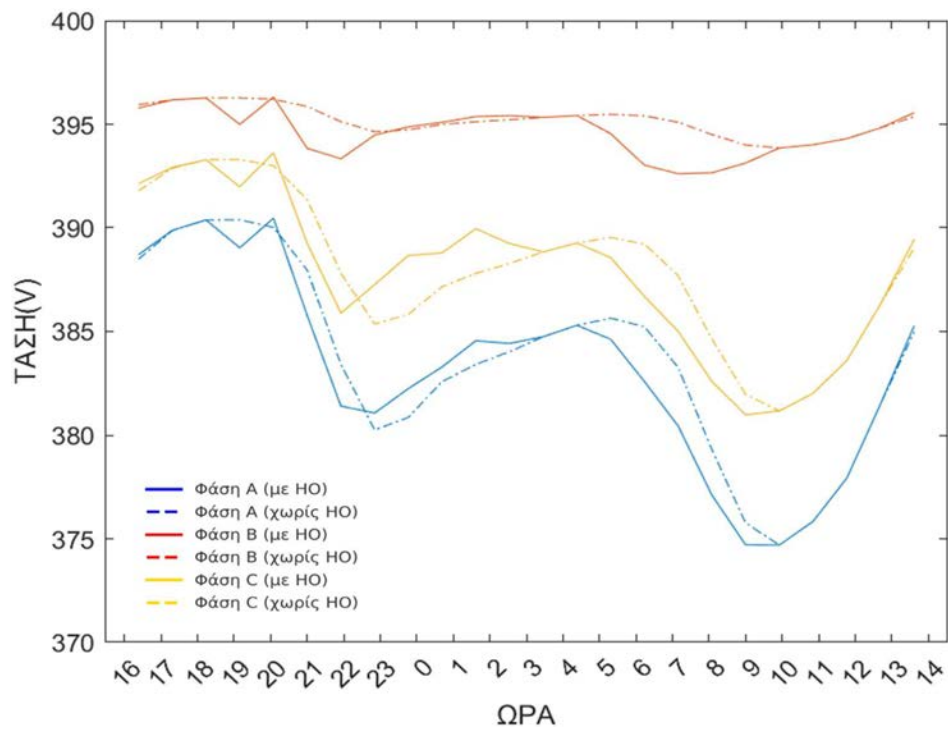
Εικόνα 4.2: Optimized_Max_Profit L108 Σενάριο#1(1-6).



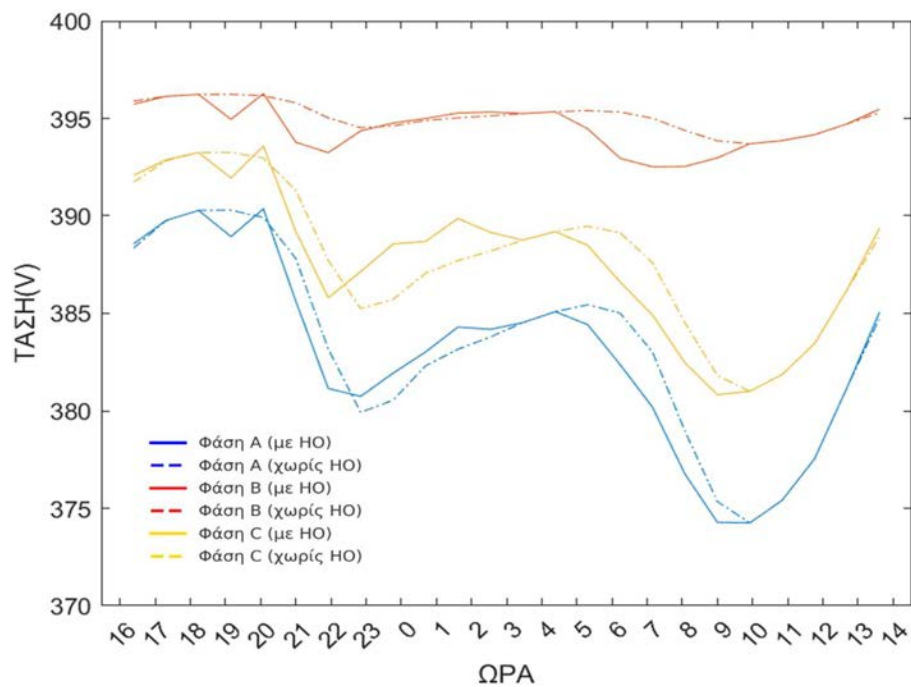
Εικόνα 4.3: Optimized_Max_Profit L111 Σενάριο#1 (1-6).



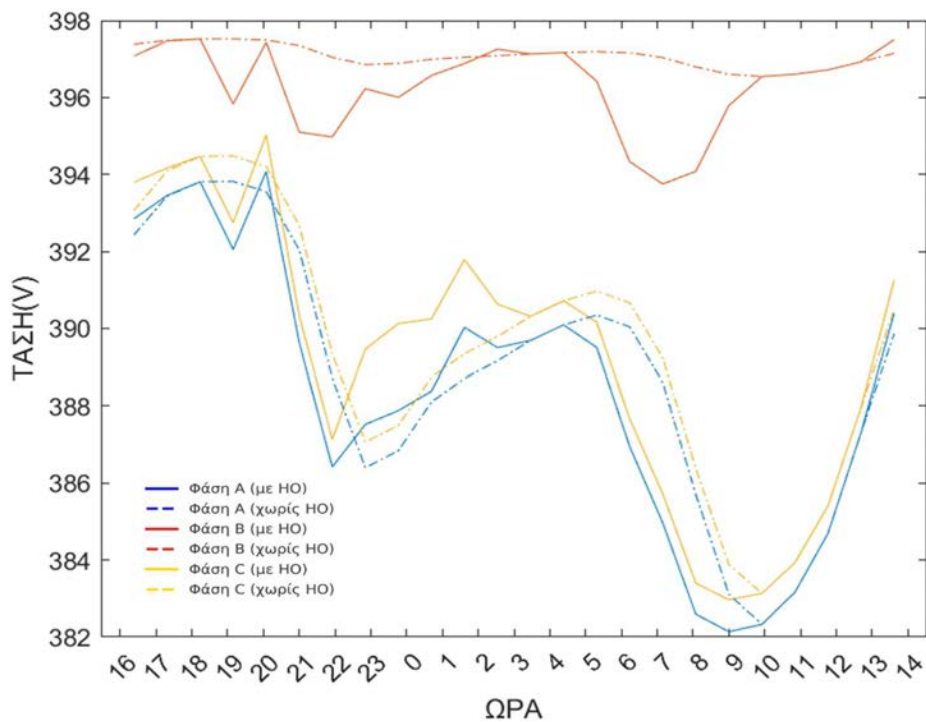
Εικόνα 4.4: Optimized_Max_Profit L120 Σενάριο#1 (1-6).



Εικόνα 4.5: Optimized_Max_Profit L126 Σενάριο#1 (1-6).

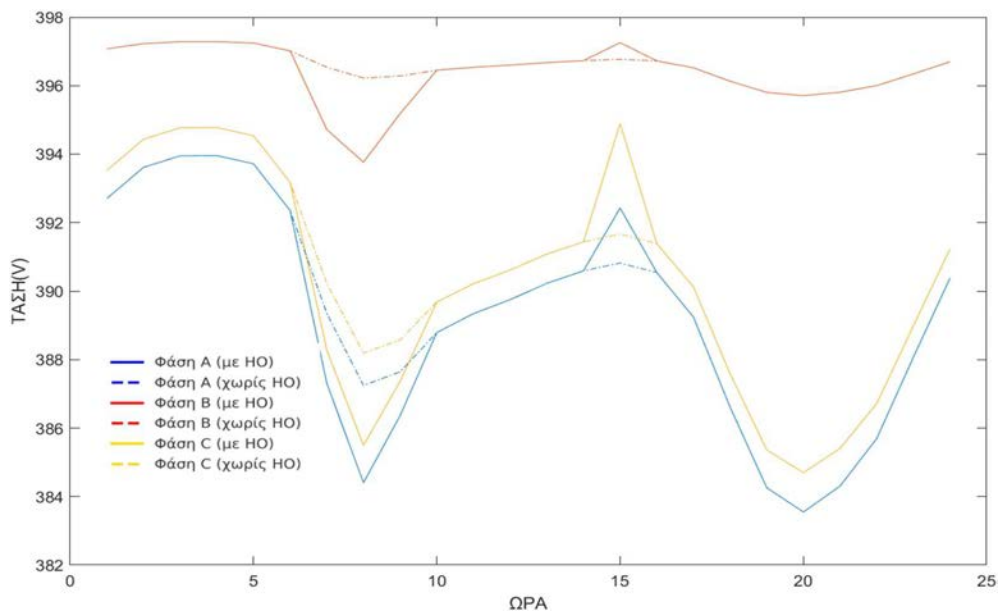


Εικόνα 4.6: Optimized_Max_Profit L128 Σενάριο#1 (1-6).

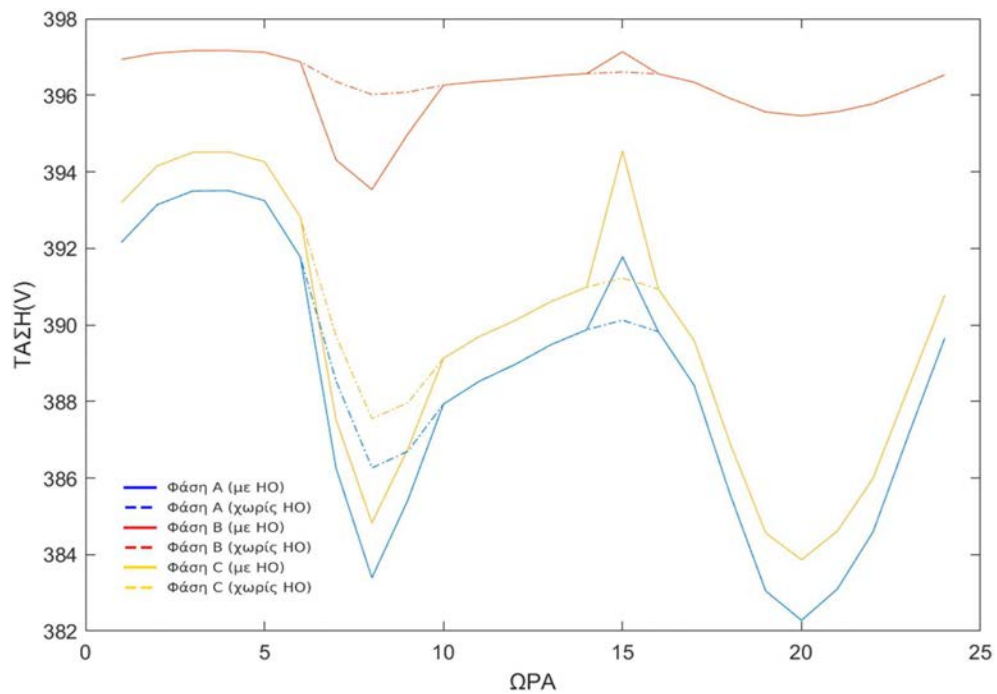


Εικόνα 4.7: Optimized_Max_Profit L134 Σενάριο#1 (1-6).

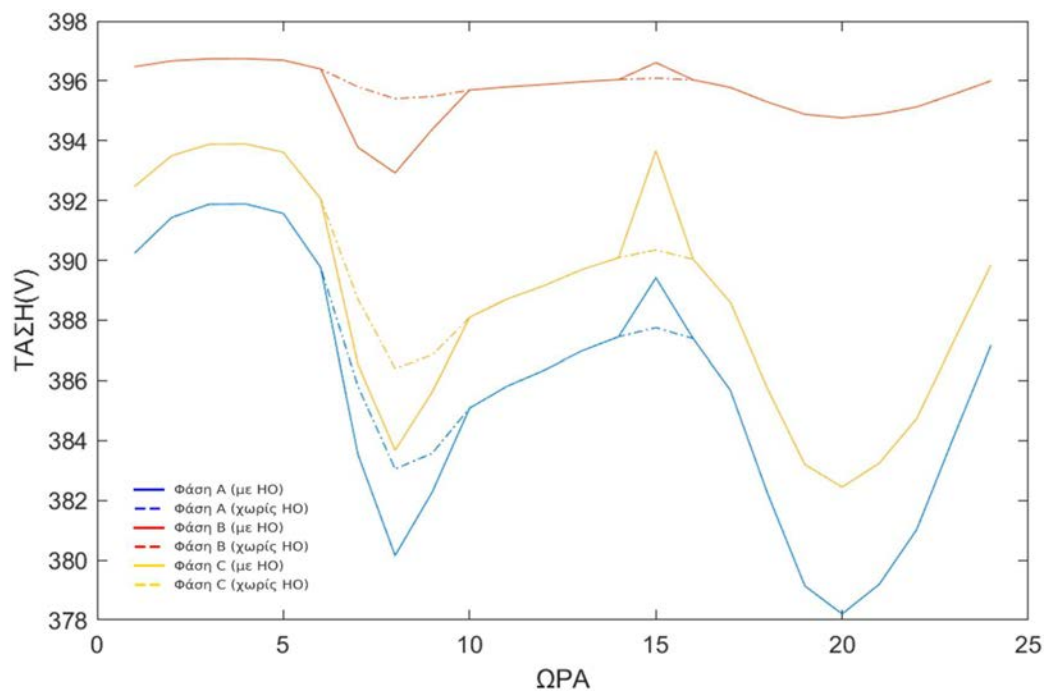
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων στις Εικόνες 4.8 έως 4.13 για τον αλγόριθμο Simple_V2G_24h. Στον άξονα Χ έχουμε ώρες από 1 έως 24 καθώς ο αλγόριθμος αυτός εξυπηρετεί δεδομένα σταθερού 24ώρου όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 3.



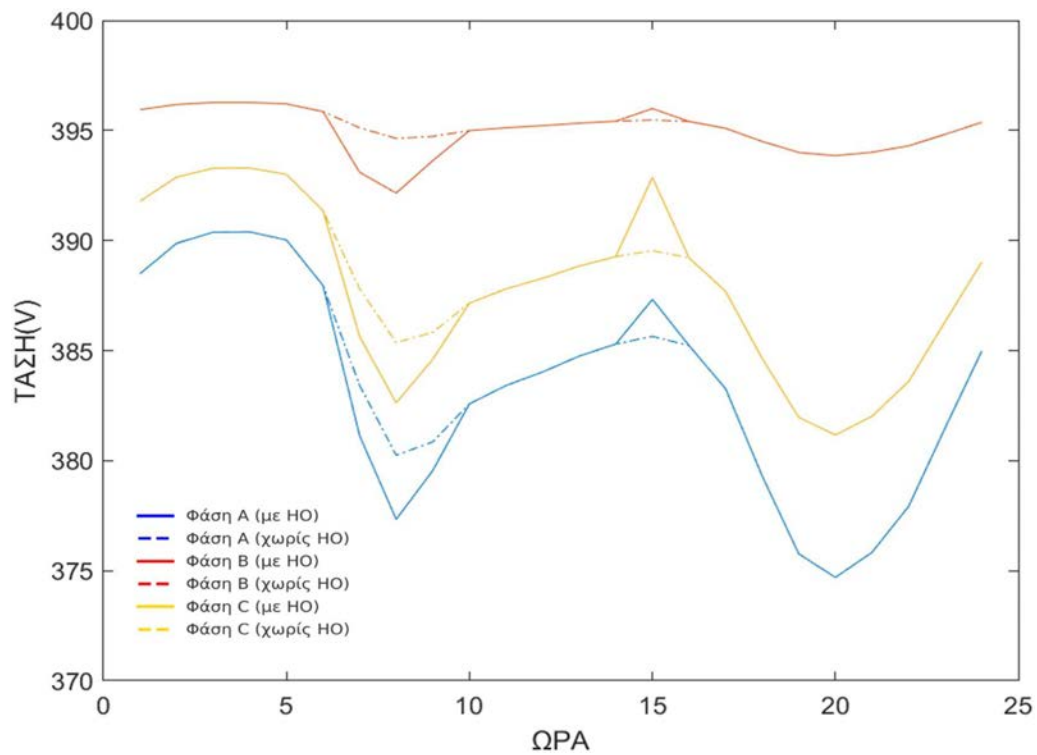
Εικόνα 4.8: Simple_V2G_24h L108 Σενάριο#1 (1-6).



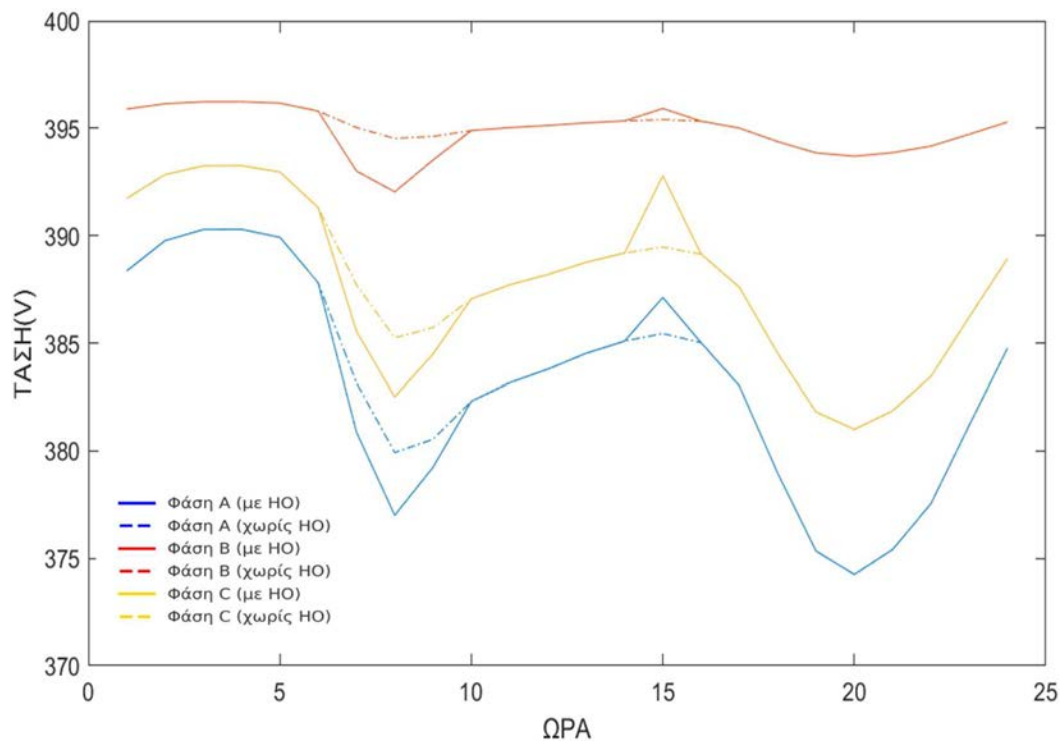
Εικόνα 4.9: Simple_V2G_24h L111 Σενάριο#1 (1-6).



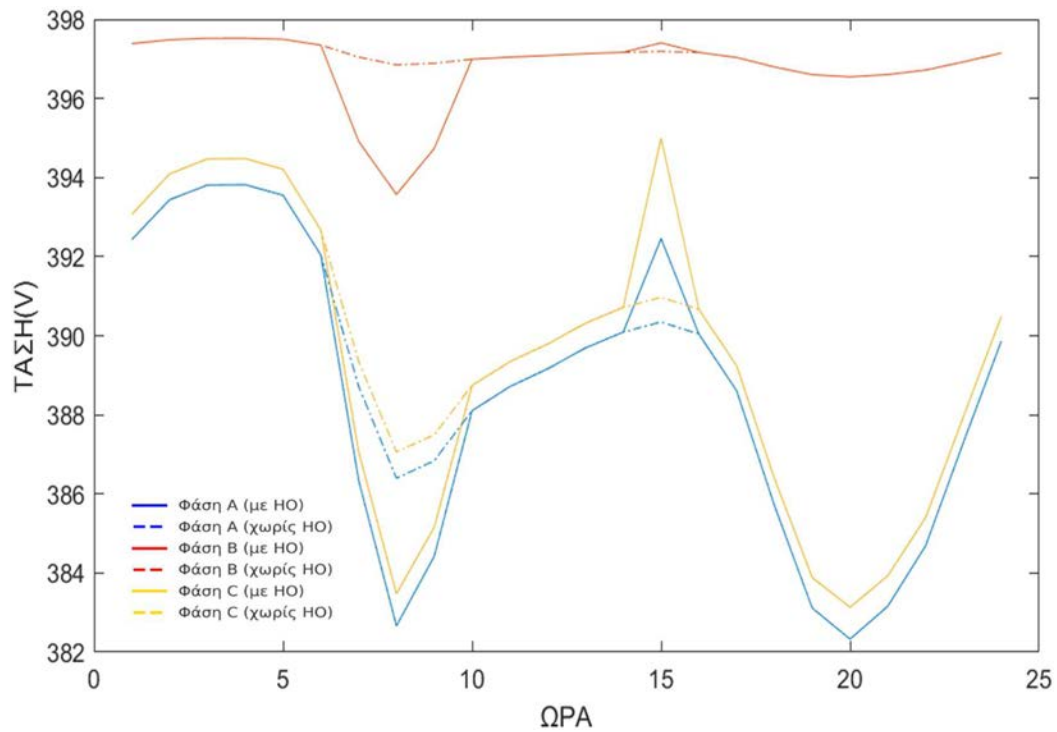
Εικόνα 4.10: Simple_V2G_24h L120 Σενάριο#1 (1-6).



Εικόνα 4.11: Simple_V2G_24h L126 Σενάριο#1 (1-6).

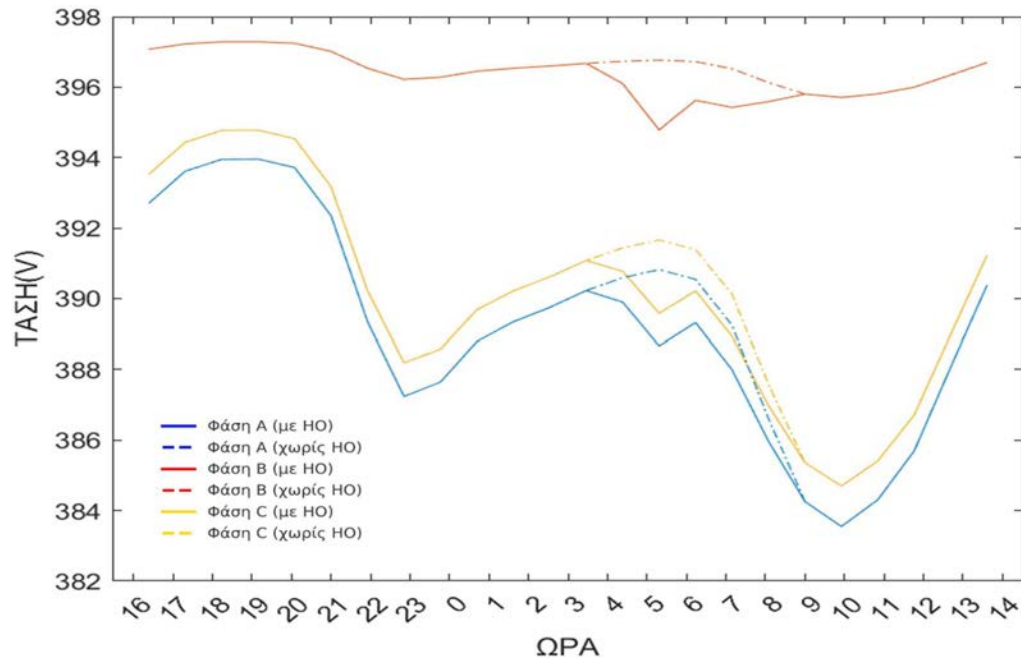


Εικόνα 4.12: Simple_V2G_24h L128 Σενάριο#1 (1-6).

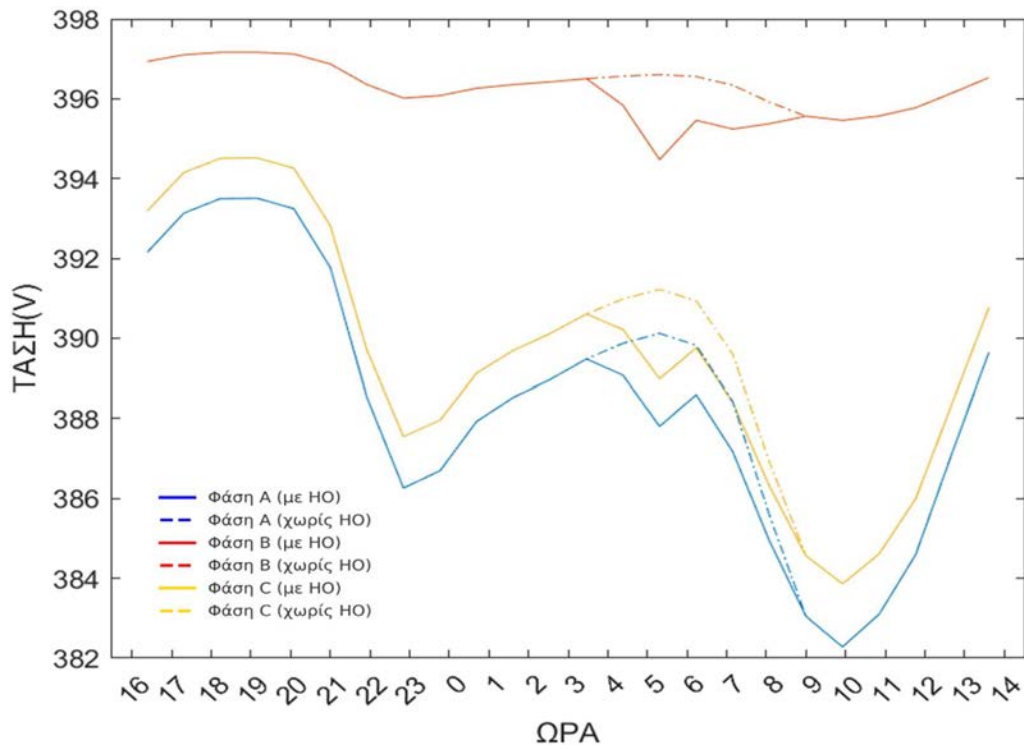


Εικόνα 4.13: Simple_V2G_24h L134 Σενάριο#1 (1-6).

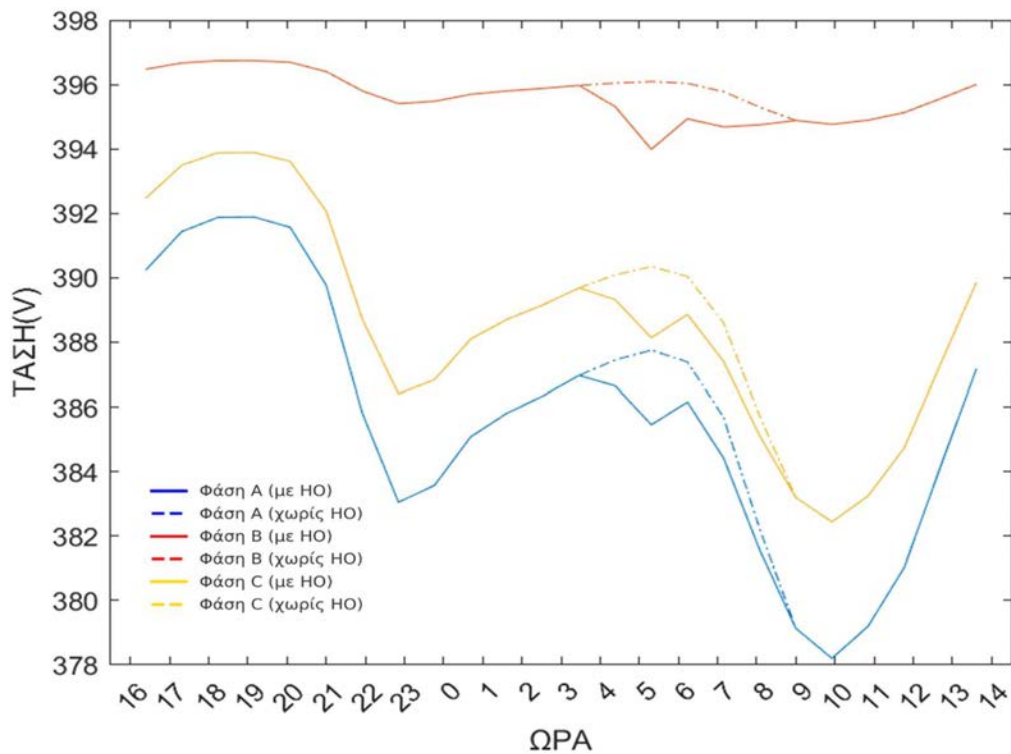
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων των κόμβων για τον αλγόριθμο No_V2G_smartcharge στις Εικόνες 4.14 έως 4.19.



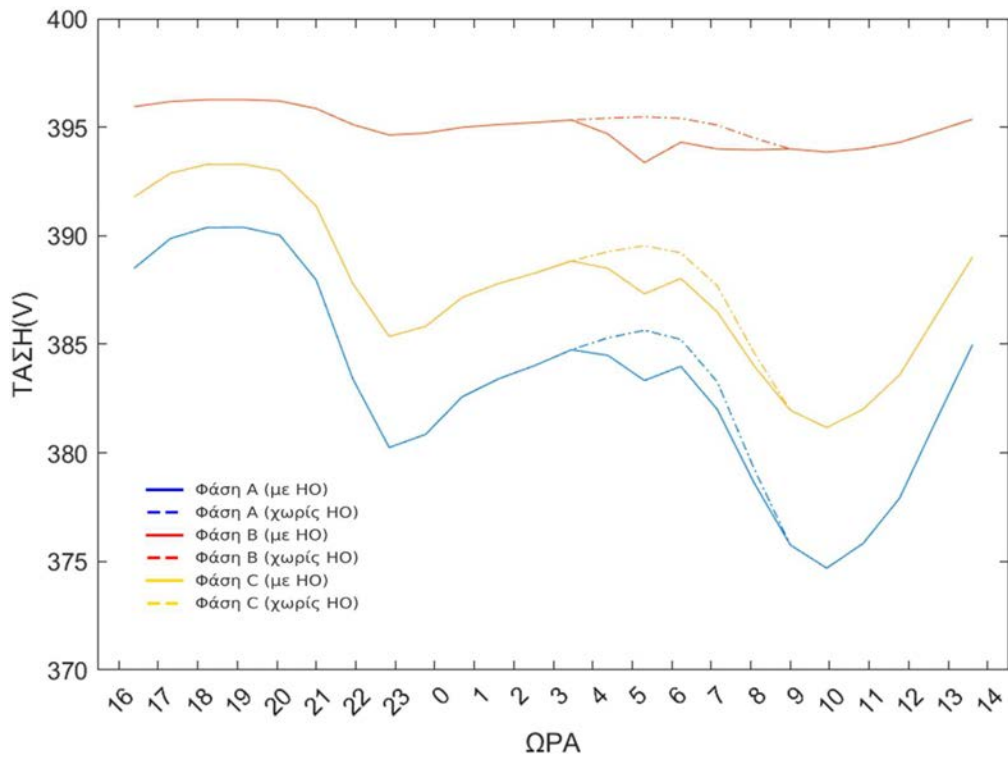
Εικόνα 4.14: No_V2G_smartcharge L108 Σενάριο#1 (1-6).



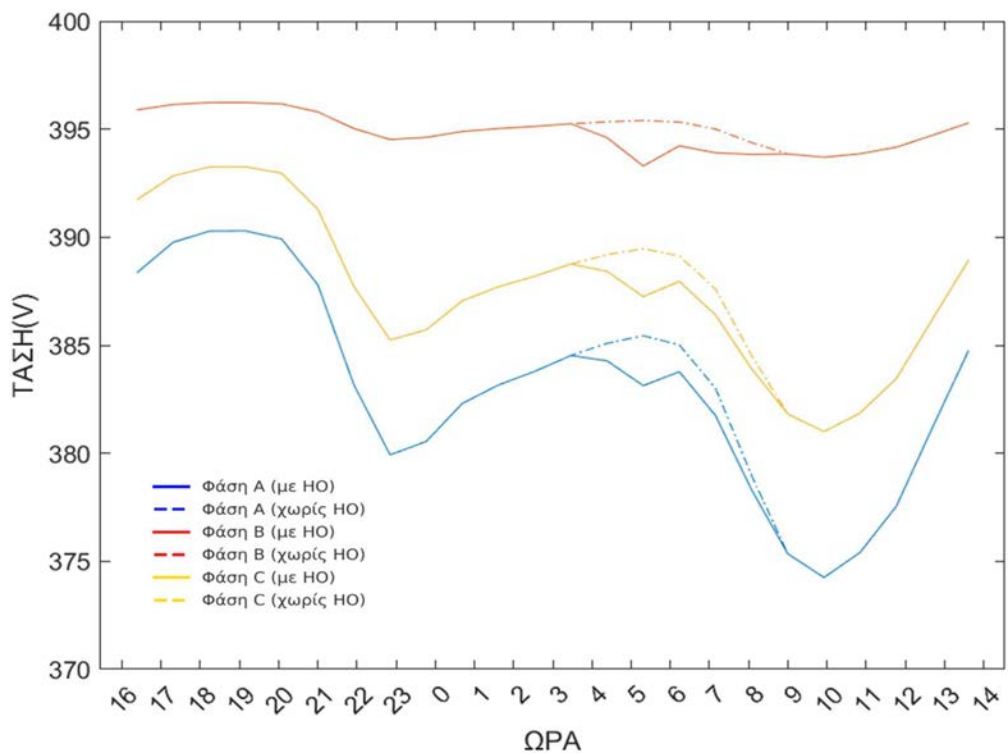
Εικόνα 4.15: No_V2G_smartcharge L111 Σενάριο#1 (1-6).



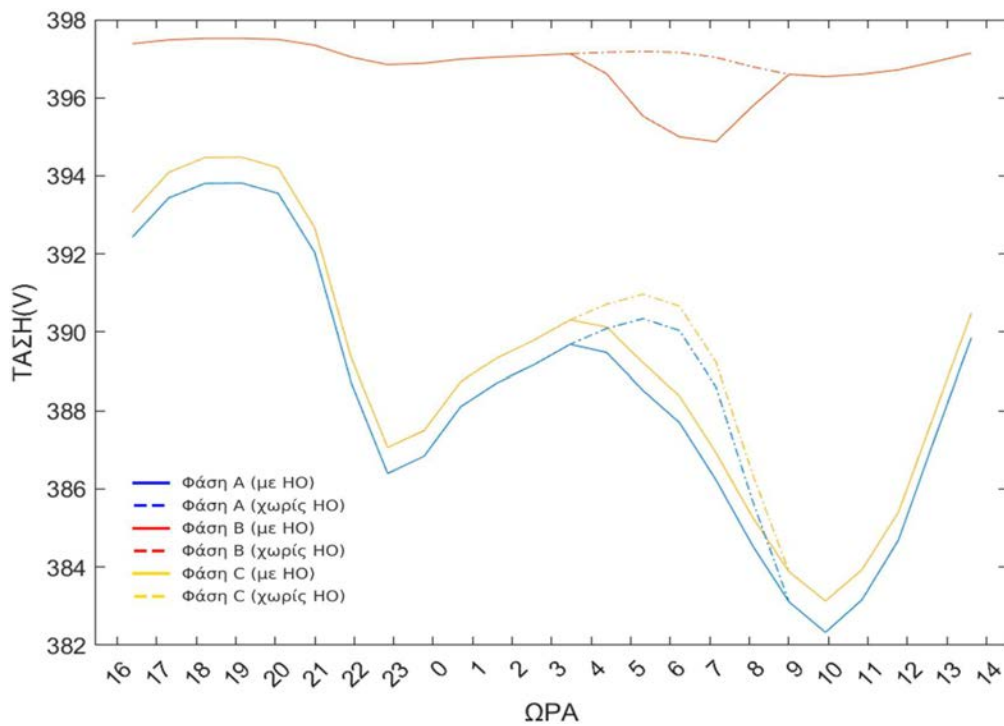
Εικόνα 4.16: No_V2G_smartcharge L120 Σενάριο#1 (1-6).



Εικόνα 4.17: No_V2G_smartcharge L126 Σενάριο#1 (1-6).

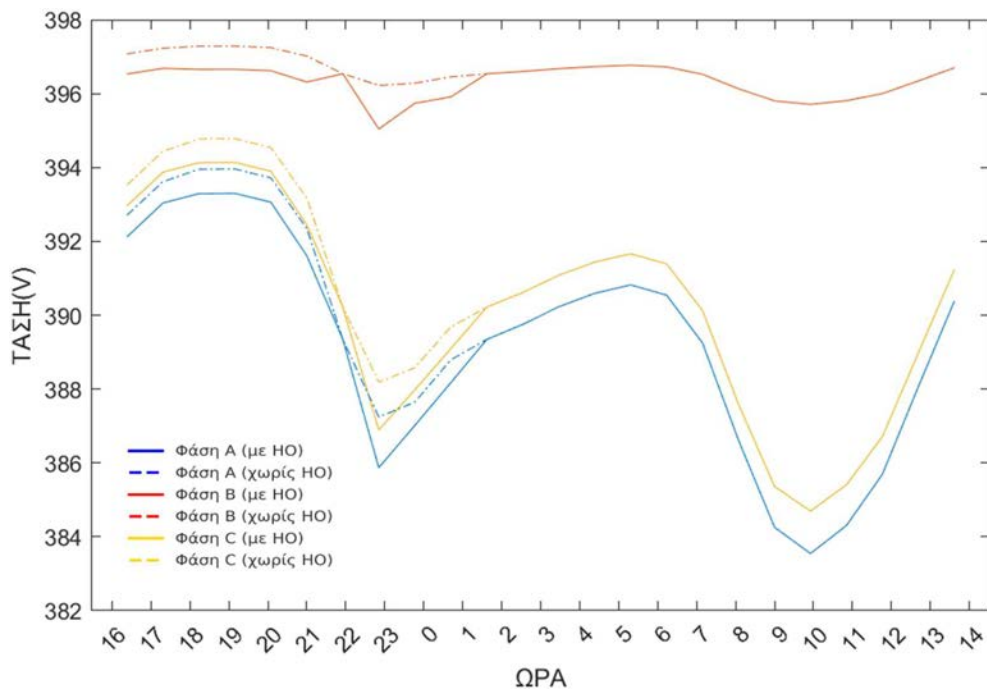


Εικόνα 4.18: No_V2G_smartcharge L128 Σενάριο#1 (1-6).

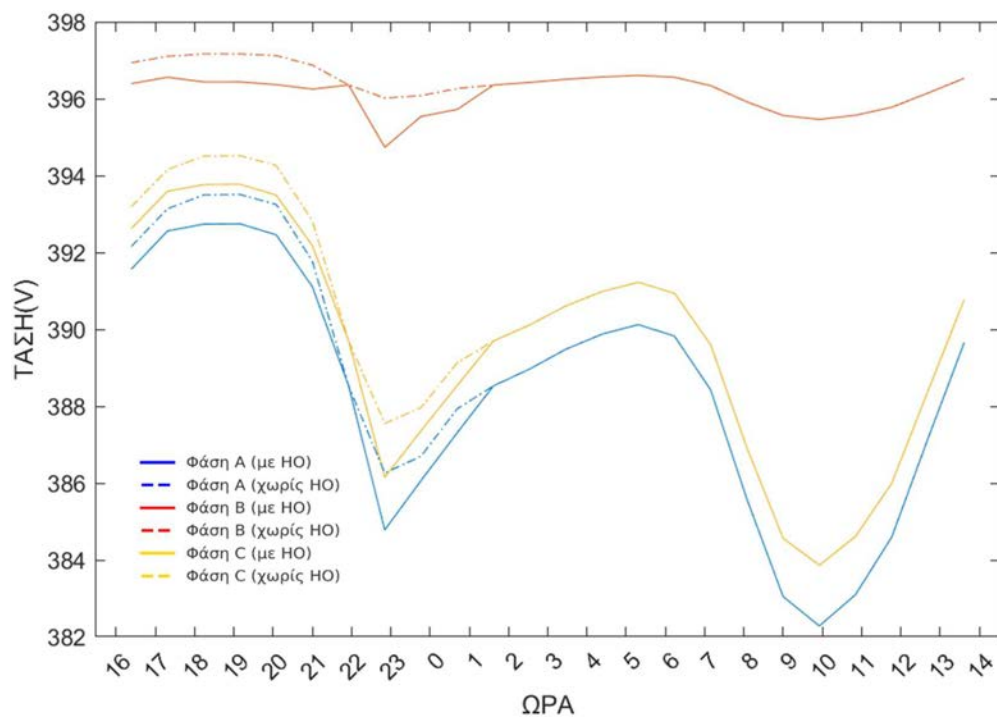


Εικόνα 4.19: No_V2G_smartcharge L134 Σενάριο#1 (1-6).

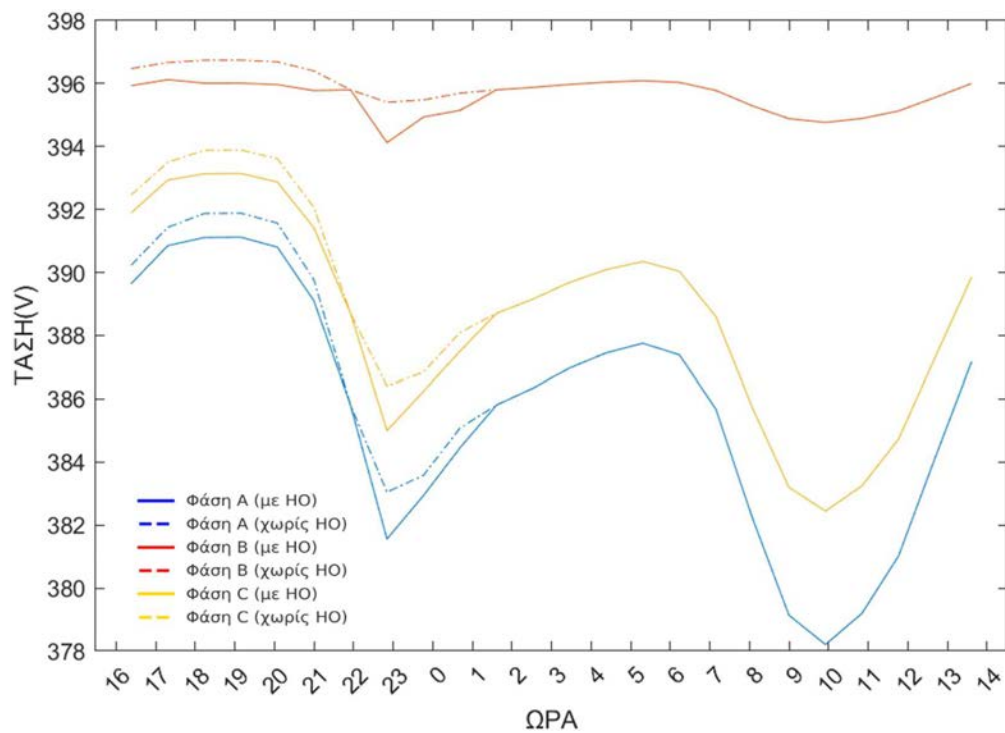
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων για τον αλγόριθμο απλής φόρτισης Simple_Charge στις Εικόνες 4.20 έως 4.25.



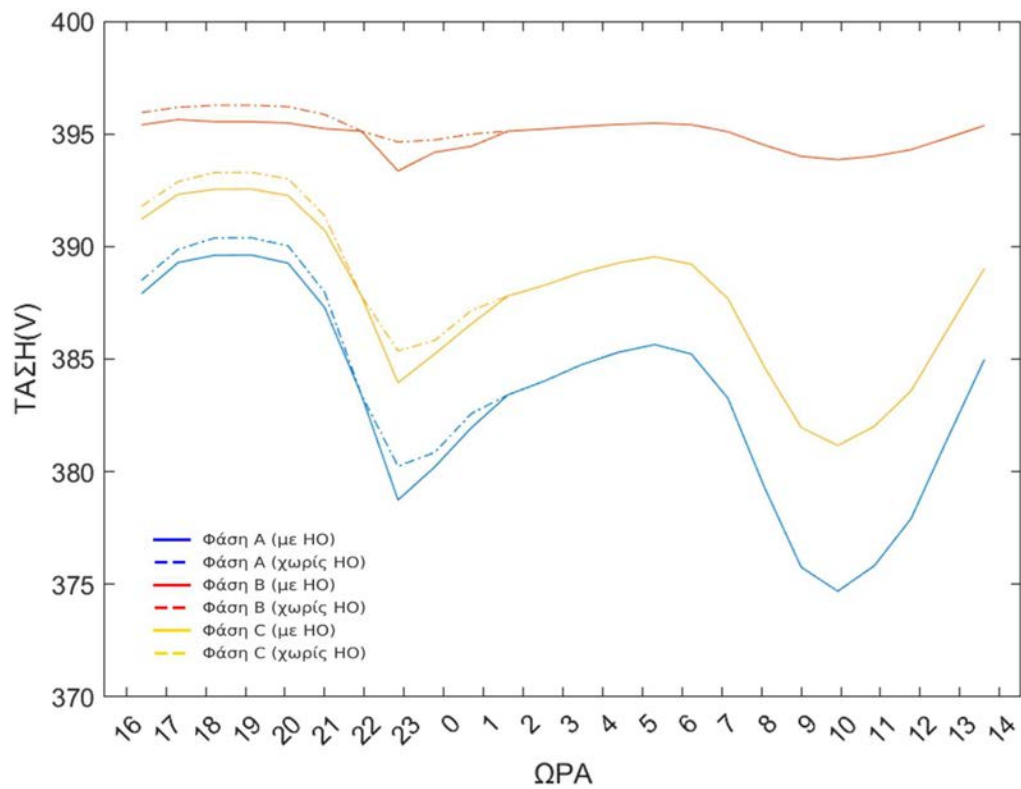
Εικόνα 4.20: Simple_Charge L108 Σενάριο#1 (1-6).



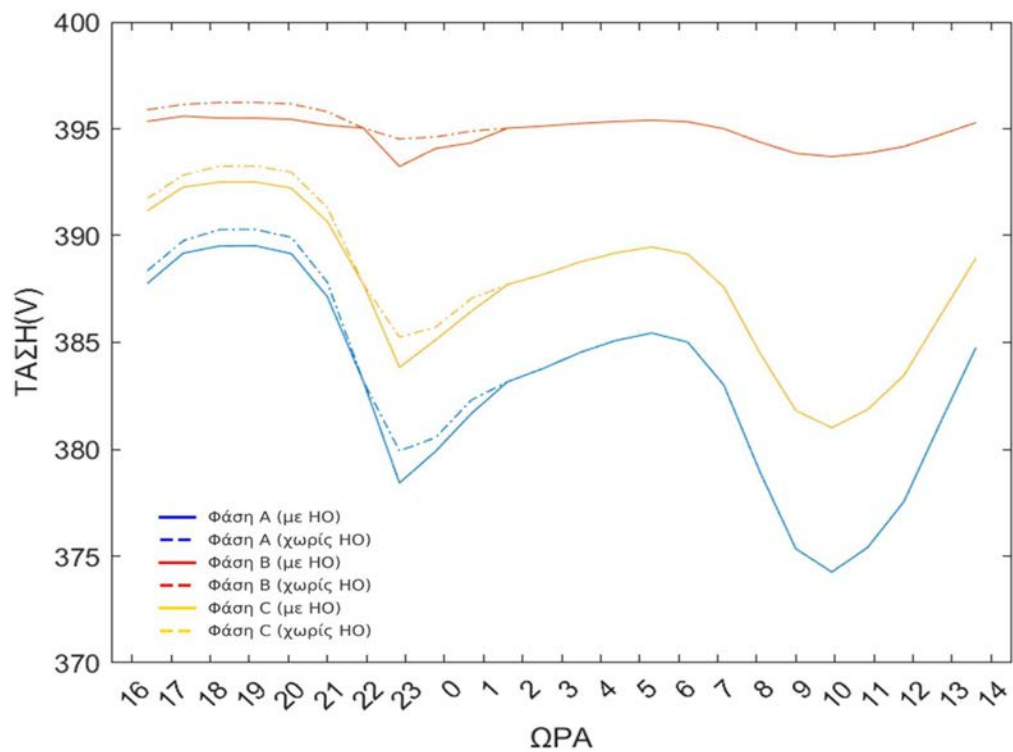
Εικόνα 4.21: Simple_Charge L111 Σενάριο#1 (1-6).



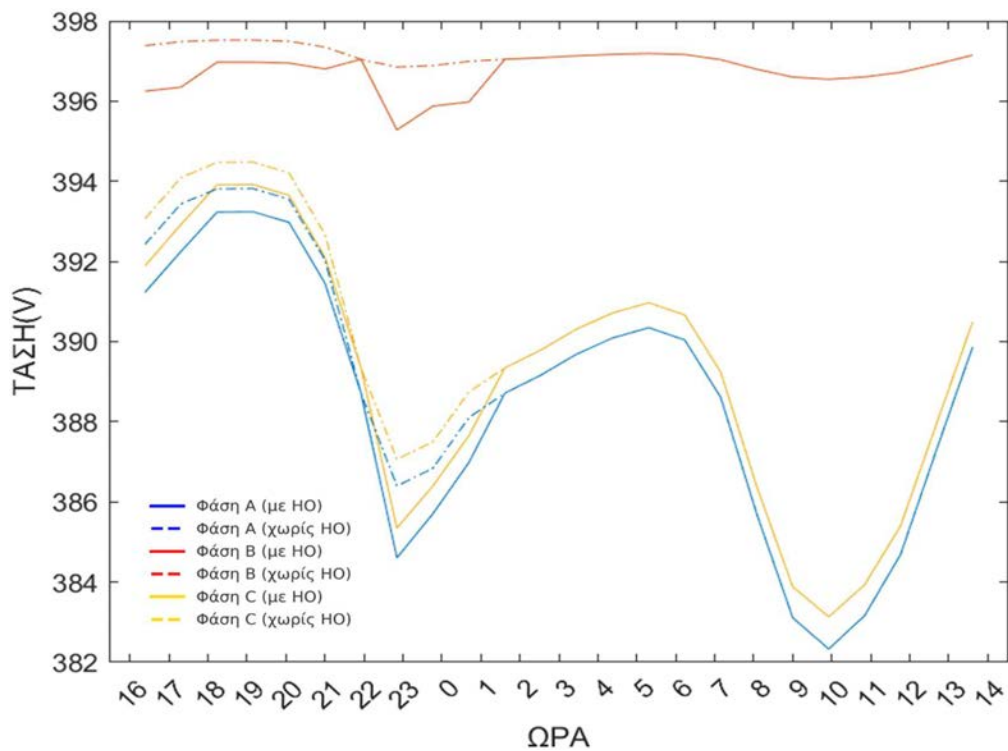
Εικόνα 4.22: Simple_Charge L120 Σενάριο#1 (1-6).



Εικόνα 4.23: Simple_Charge L126 Σενάριο#1 (1-6).



Εικόνα 4.24: Simple_Charge L128 Σενάριο#1 (1-6).



Εικόνα 4.25: Simple_Charge L134 Σενάριο#1 (1-6).

4.4.2 Προσομοίωση Δικτύου Διανομής: Σενάριο#2 (θέσεις 1-3-5-7-9-10)

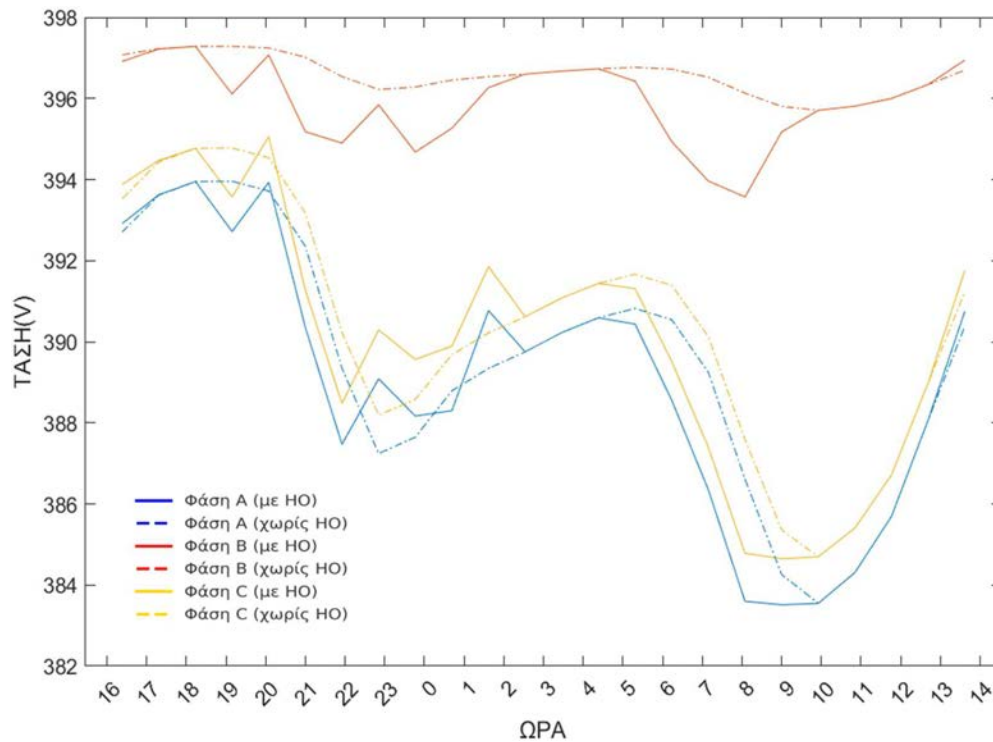
Στο Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10) της προσομοίωσης του δικτύου διανομής τα ΗΟ συνδέονται με ομοιόμορφη κατανομή ως προς τον μετασχηματιστή στις θέσεις φορτίων Load1-Load3-Load5-Load7-Load9-Load10 του σχεδίου της Εικόνας 4.1. Τα ΗΟ συνδέονται διαδοχικά στους αντίστοιχους κόμβους όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2: Θέσεις ΗΟ στο δίκτυο Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

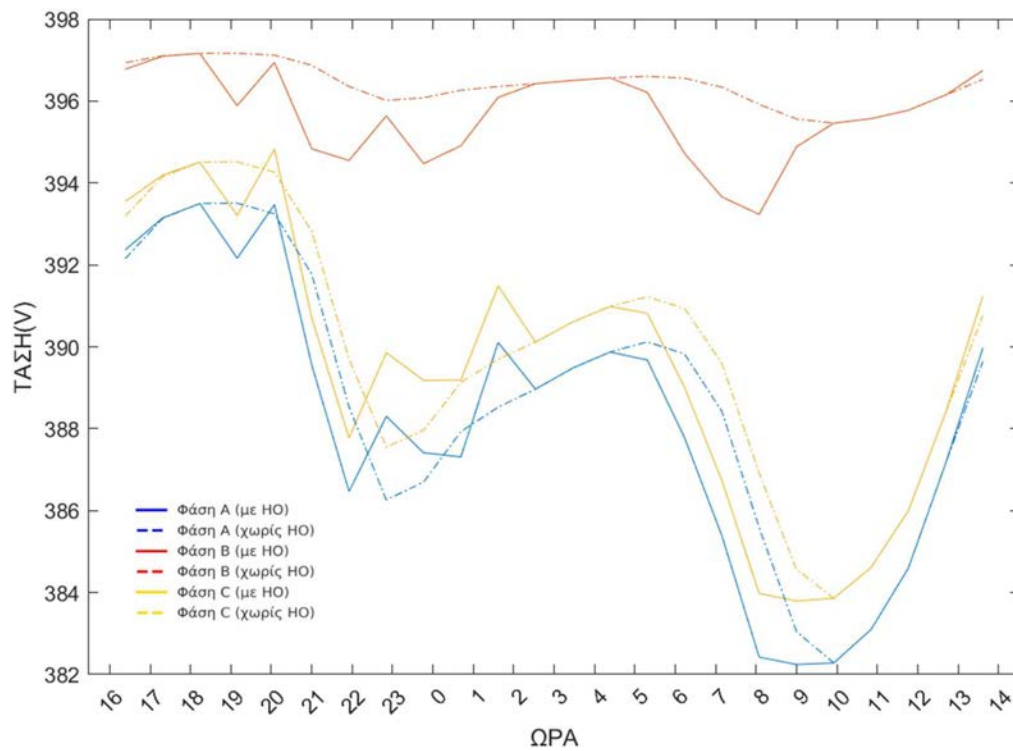
ΗΟ id	ΚΟΜΒΟΣ
ΗΟ1	L134
ΗΟ2	L108
ΗΟ3	L111
ΗΟ4	L120
ΗΟ5	L126
ΗΟ6	L128

Οι κόμβοι που έχουν επιλεχθεί για να γίνει μέτρηση της τάσης κατά την διάρκεια της προσομοίωσης είναι: L108, L111, L120, L126, L128, L134.

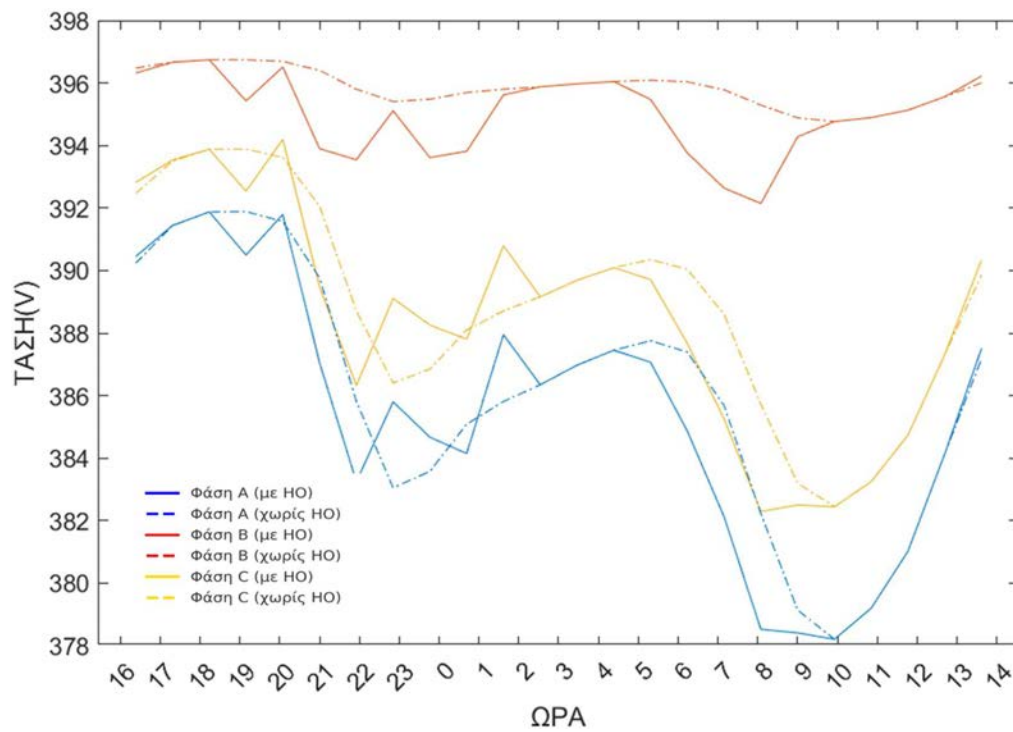
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων για τον αλγόριθμο Optimized_max_Profit στις Εικόνες 4.26 έως 4.31.



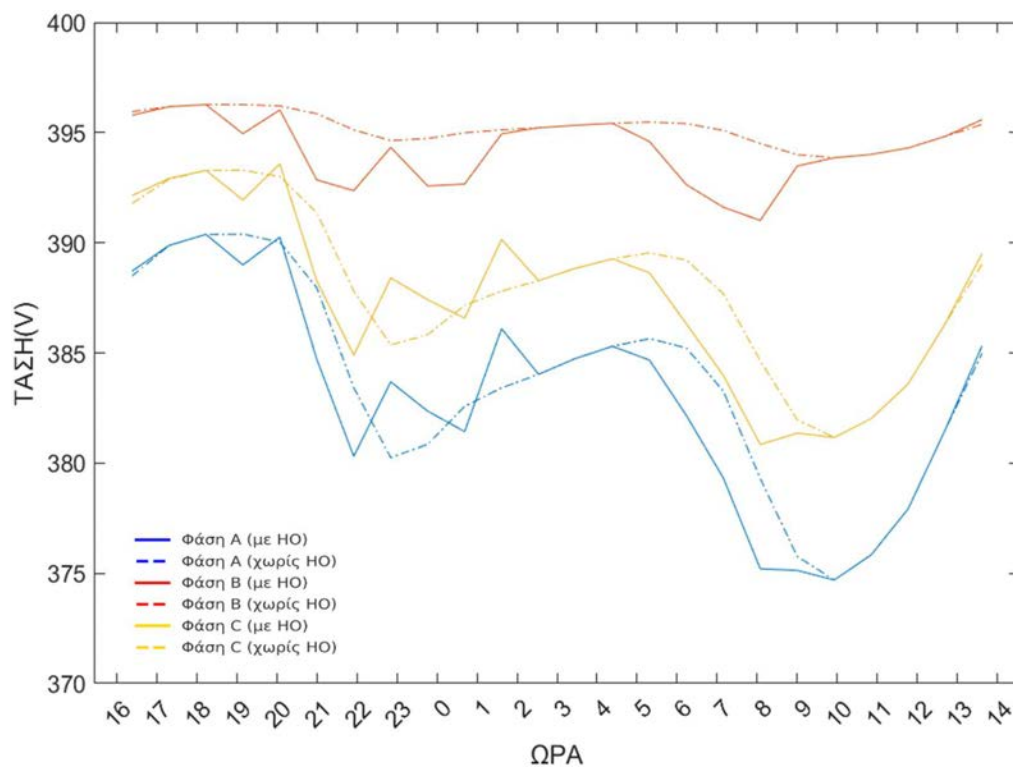
Εικόνα 4.26: Optimized_Max_Profit L108 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



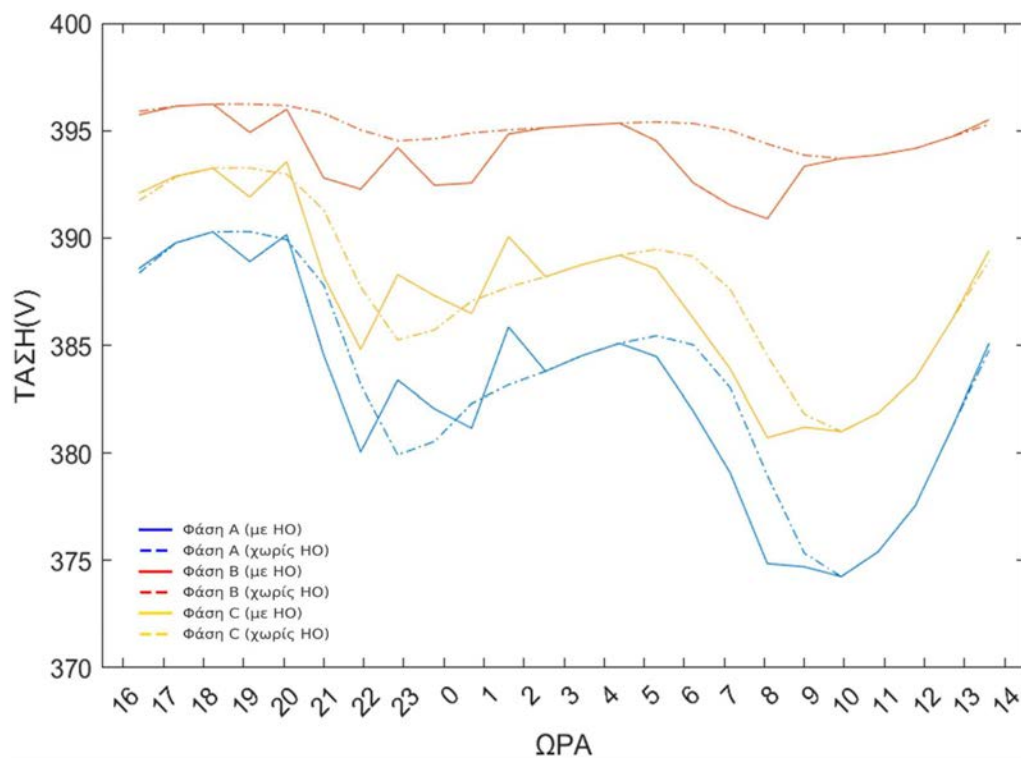
Εικόνα 4.27: Optimized_Max_Profit L111 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



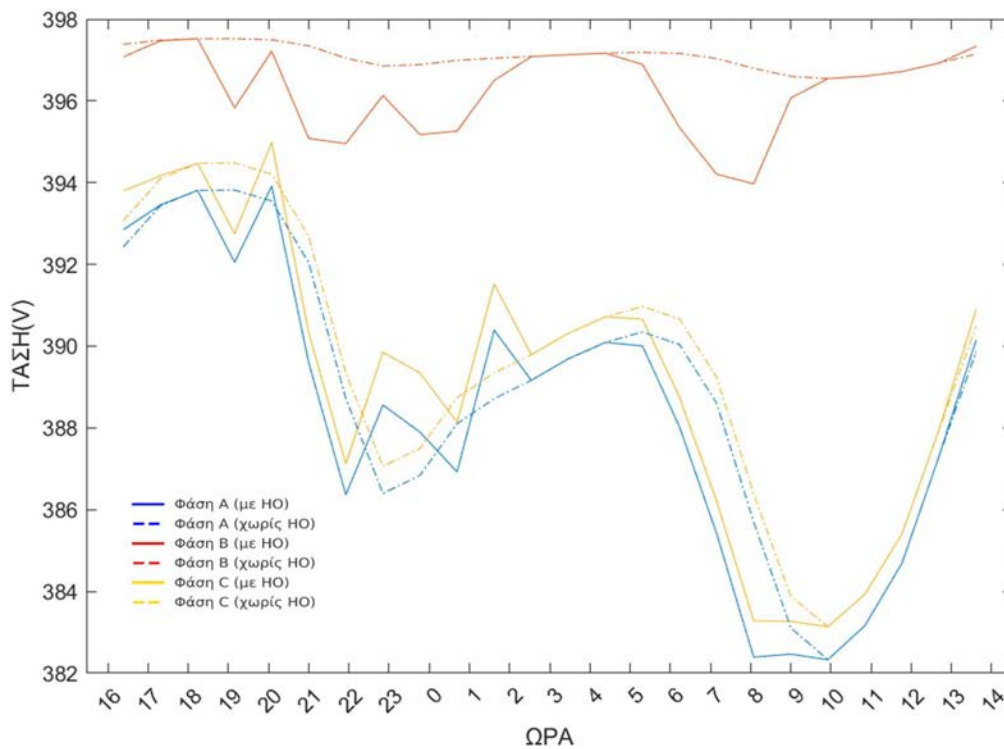
Εικόνα 4.28: Optimized_Max_Profit L120 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



Εικόνα 4.29: Optimized_Max_Profit L126 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

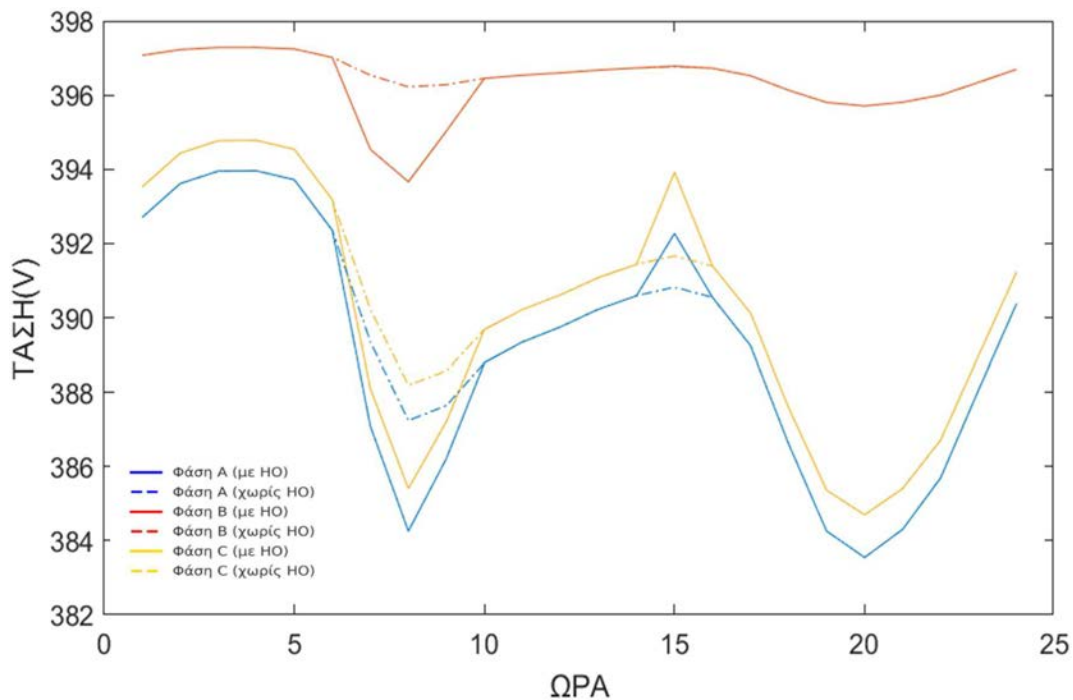


Εικόνα 4.30: Optimized_Max_Profit L128 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

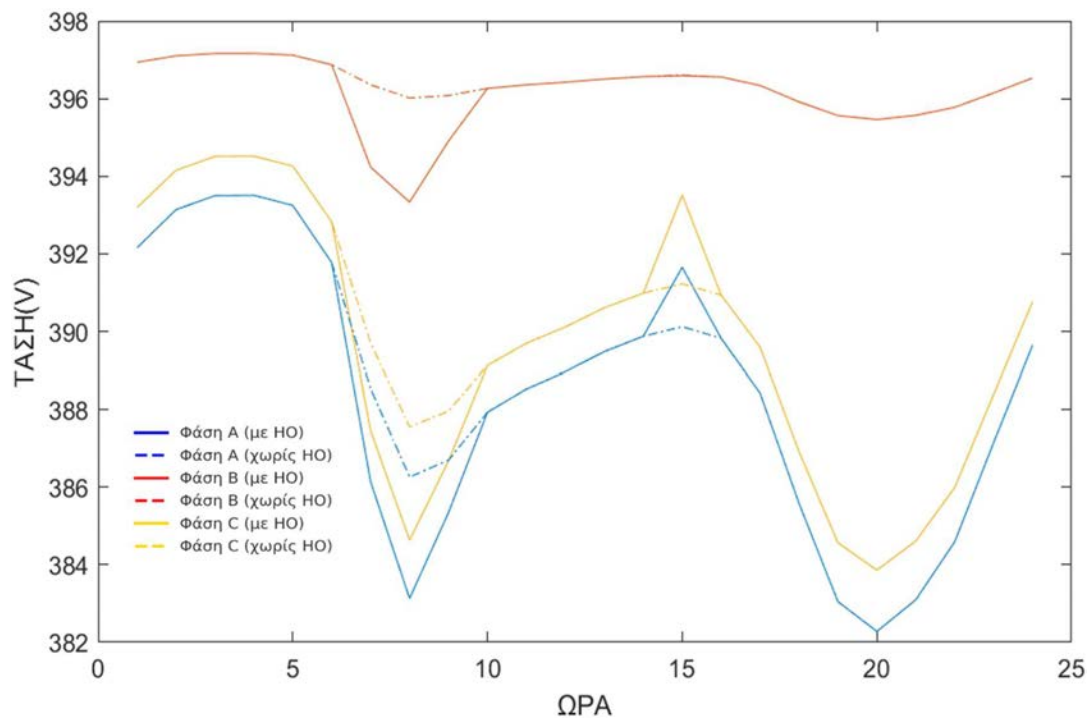


Εικόνα 4.31: Optimized_Max_Profit L134 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

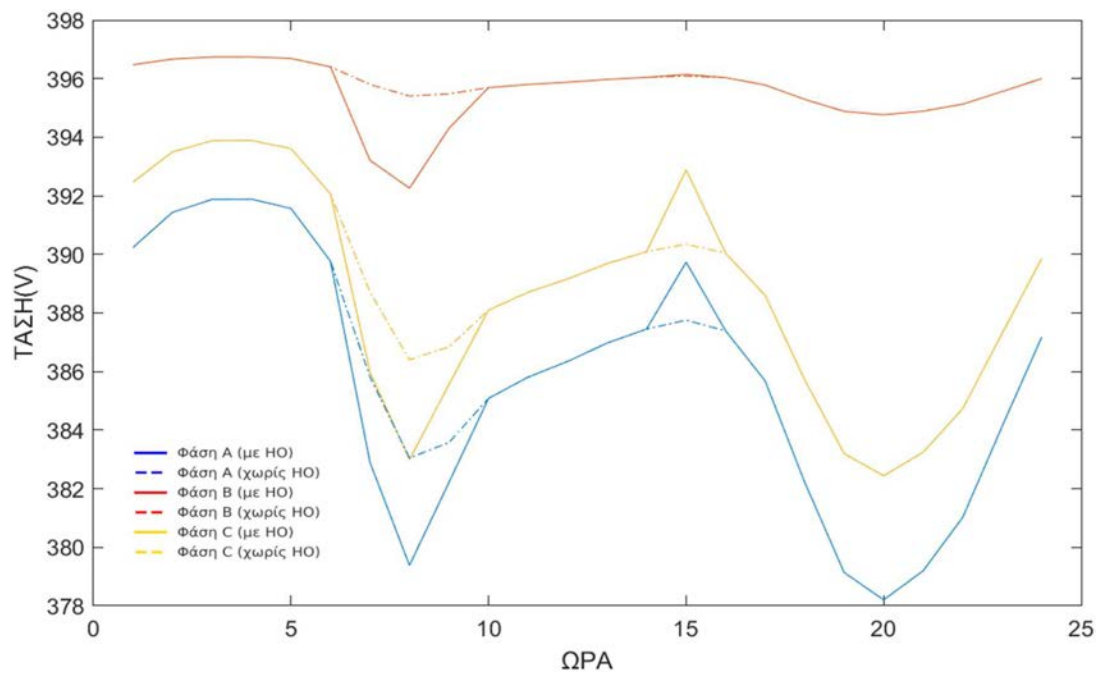
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων για τον αλγόριθμο Simple_V2G_24h στις Εικόνες 4.32 έως 4.37.



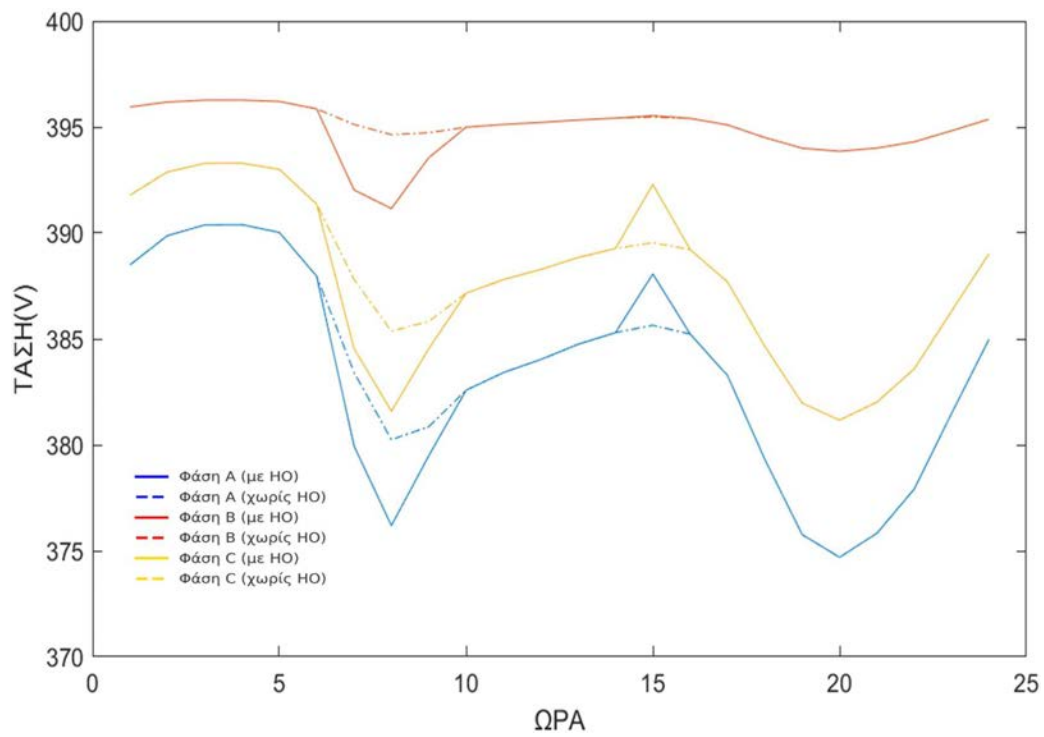
Εικόνα 4.32: Simple_V2G_24h L108 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



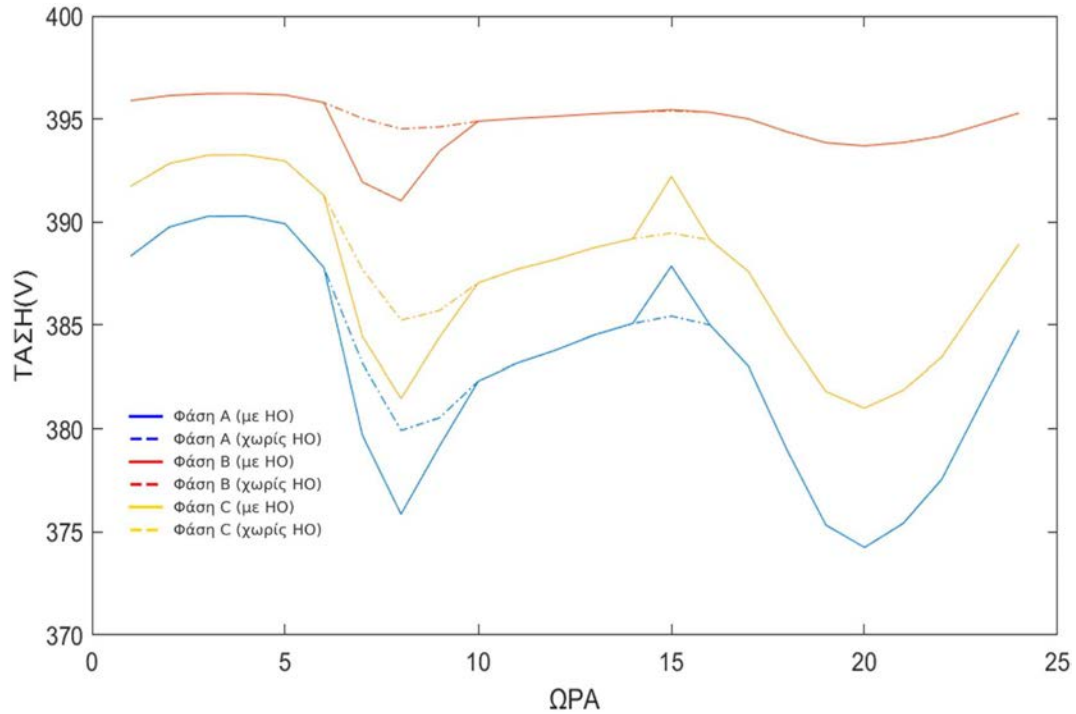
Εικόνα 4.33: Simple_V2G_24h L111 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



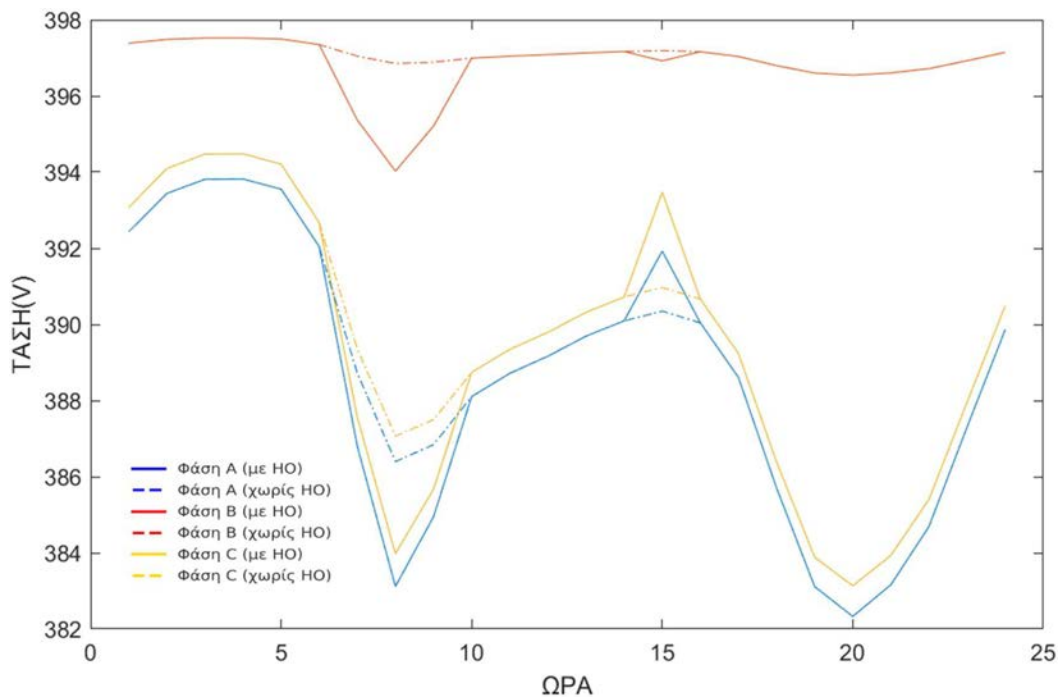
Εικόνα 4.34: Simple_V2G_24h L120 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



Εικόνα 4.35: Simple_V2G_24h L126 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

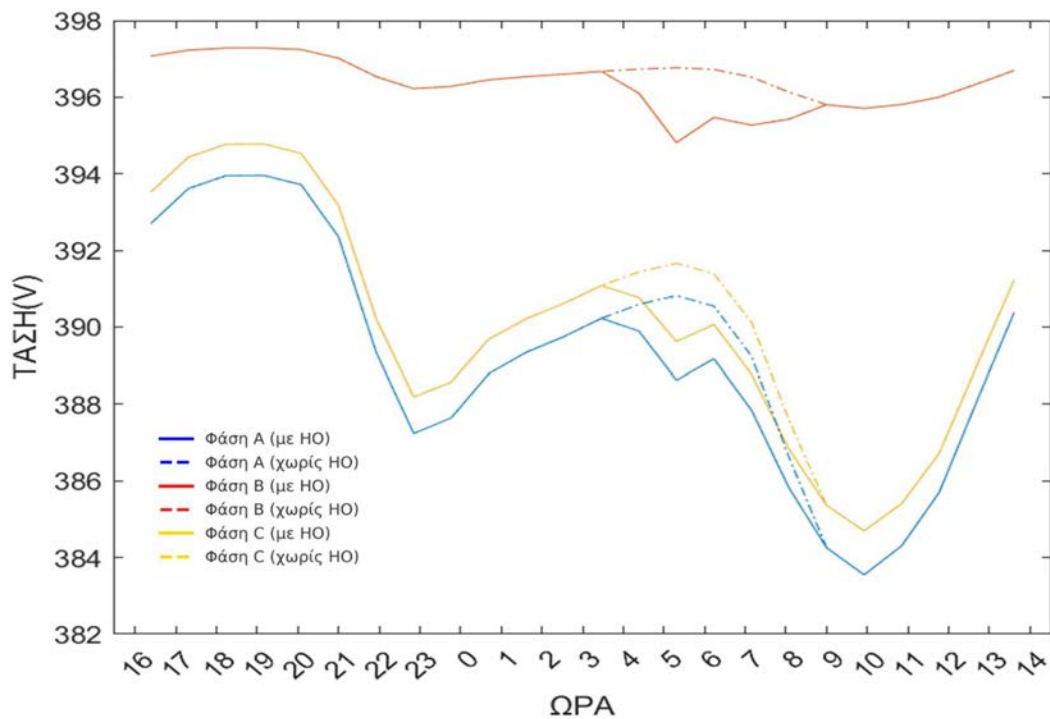


Εικόνα 4.36: Simple_V2G_24h L128 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

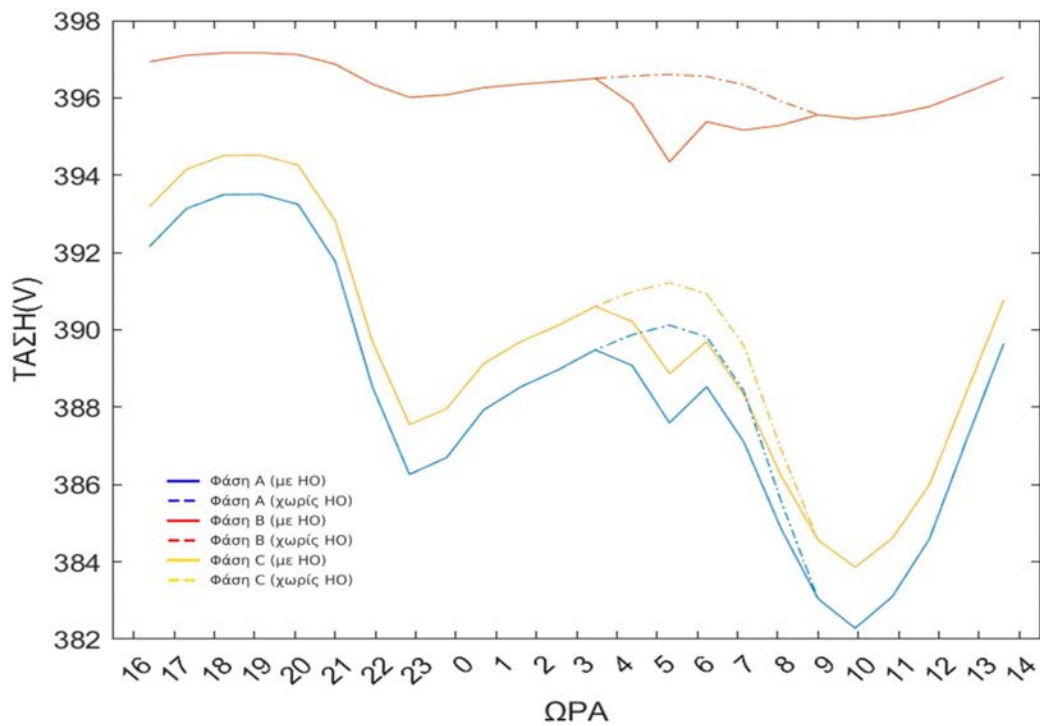


Εικόνα 4.37: Simple_V2G_24h L134 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

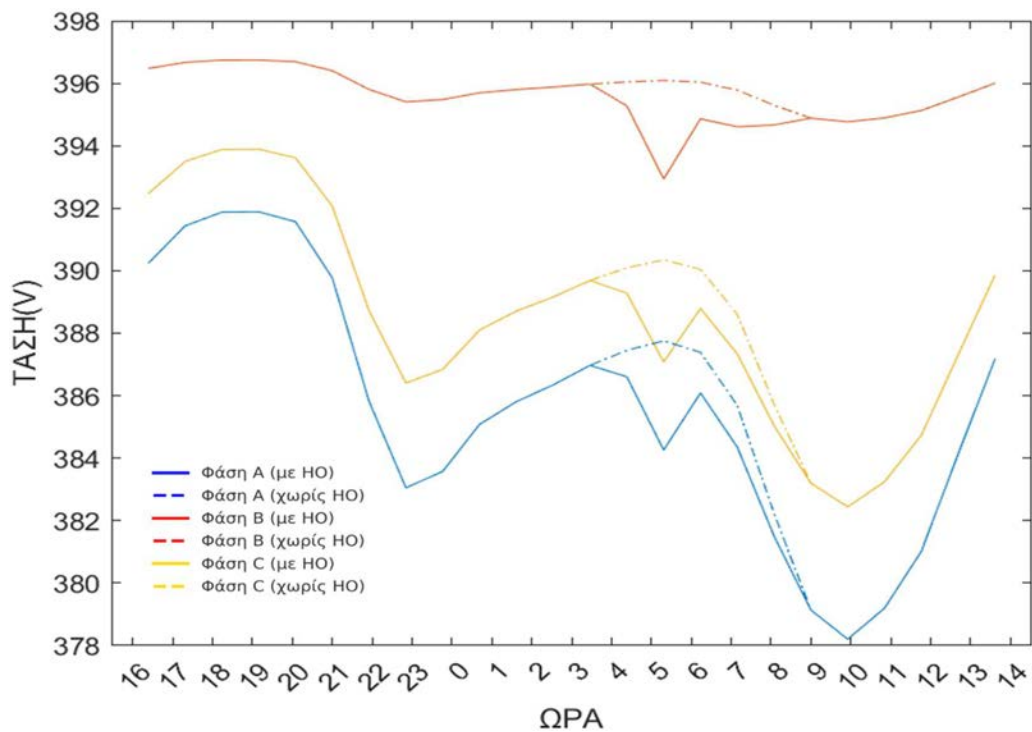
Ακολουθούν τα διαγράμματα για τον αλγόριθμο No_V2G_Smartcharge στις Εικόνες 4.38 έως 4.43



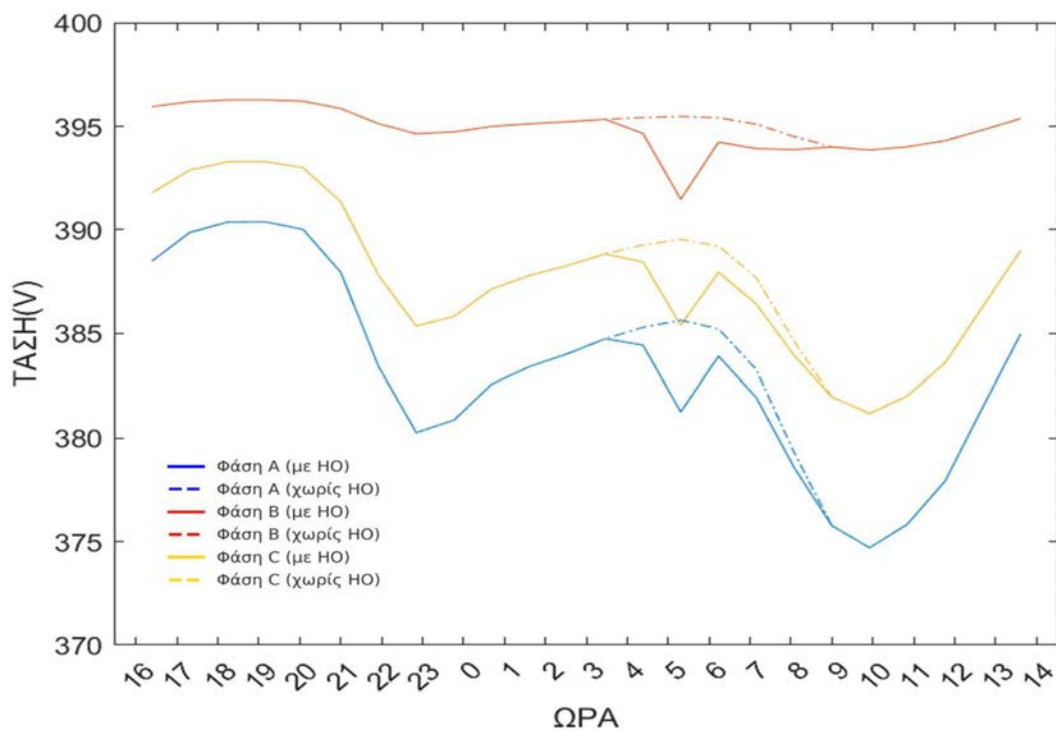
Εικόνα 4.38: No_V2G_Smartcharge L108 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



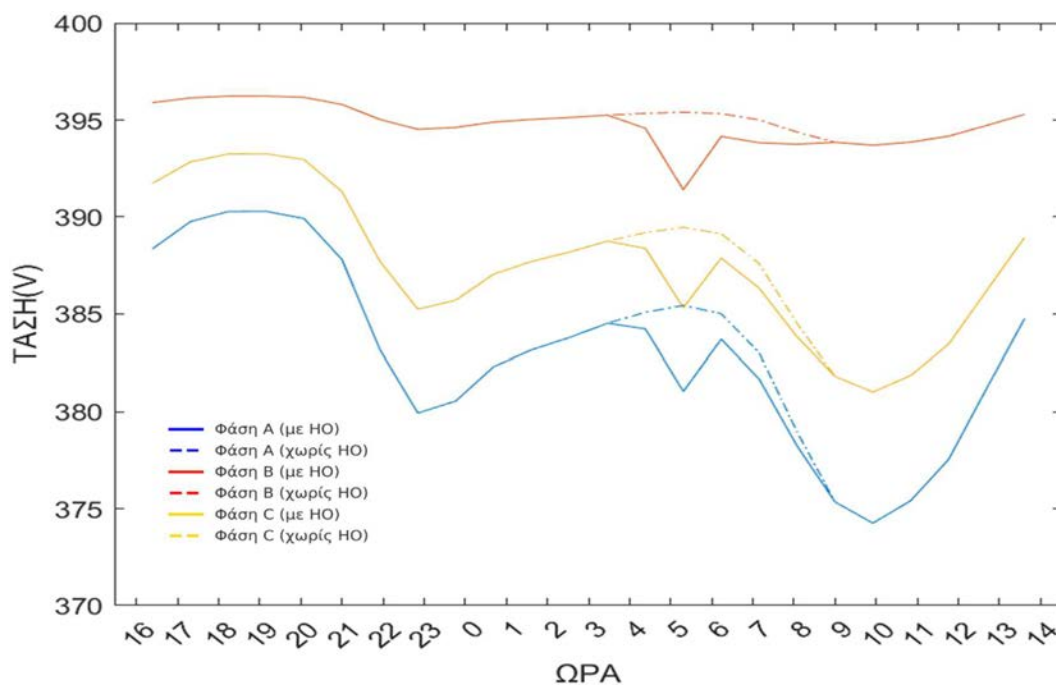
Εικόνα 4.39: No_V2G_Smartcharge L111 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



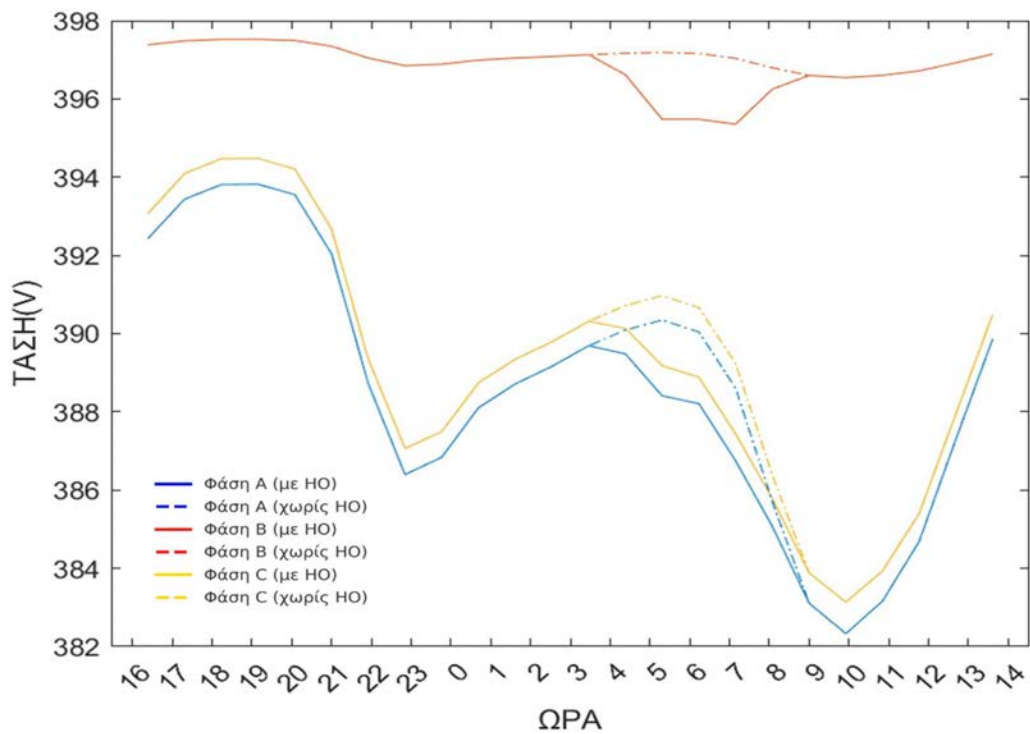
Εικόνα 4.40: No_V2G_Smartcharge L120 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



Εικόνα 4.41: No_V2G_Smartcharge L126 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

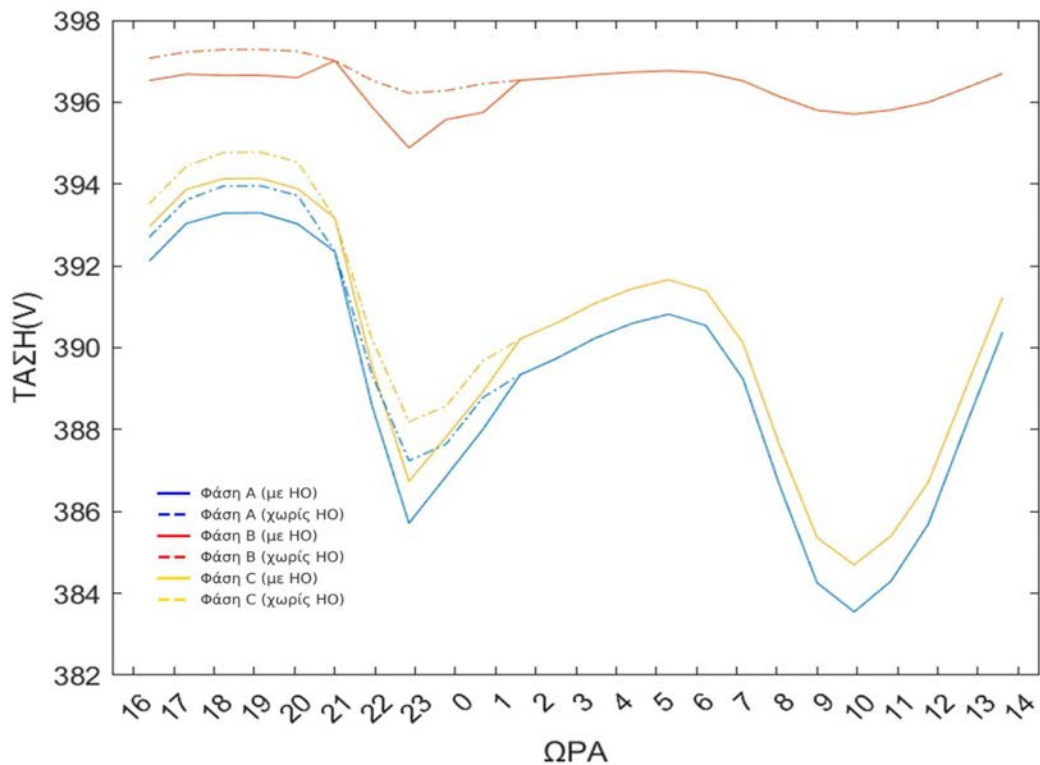


Εικόνα 4.42: No_V2G_Smartcharge L128 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

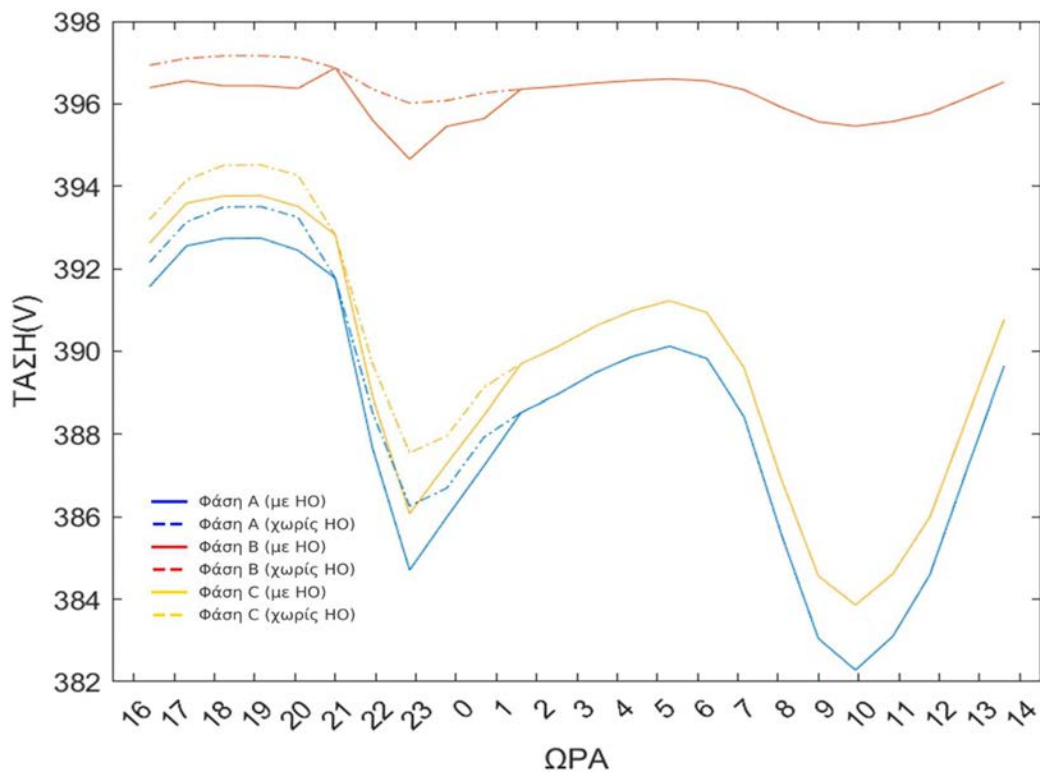


Εικόνα 4.43: No_V2G_Smartcharge L134 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

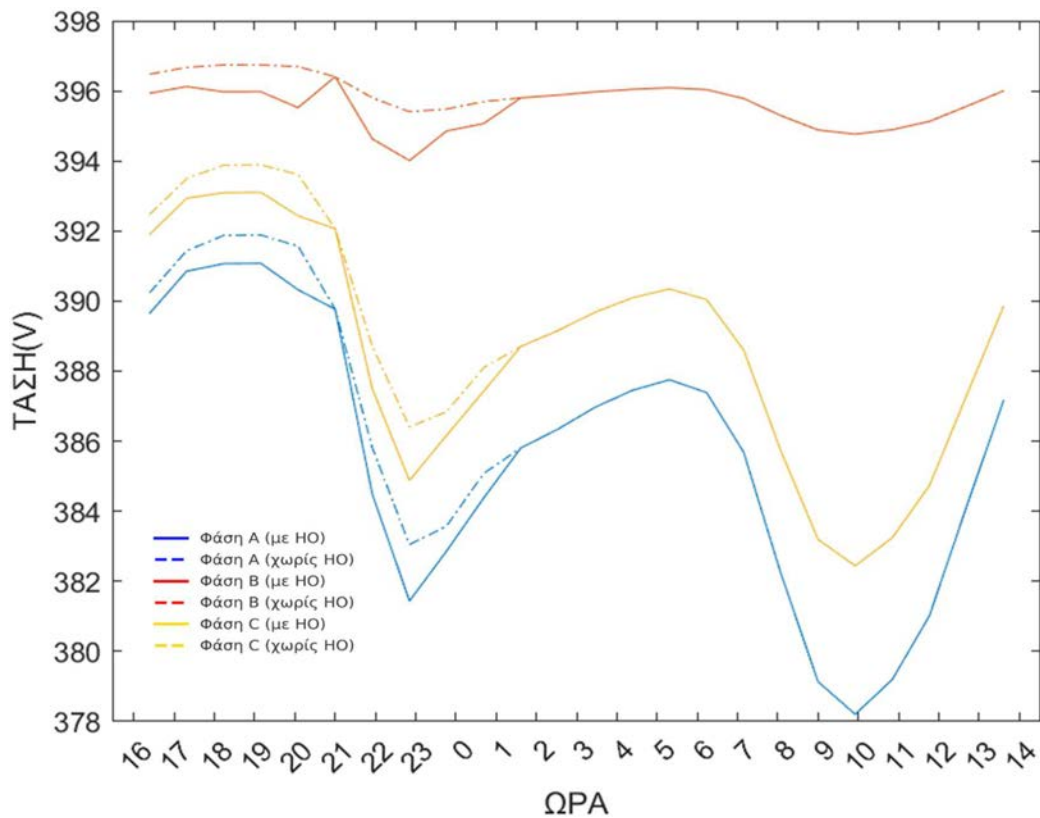
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων για τον αλγόριθμο απλής φόρτισης simple_charge στις Εικόνες 4.44 έως 4.49.



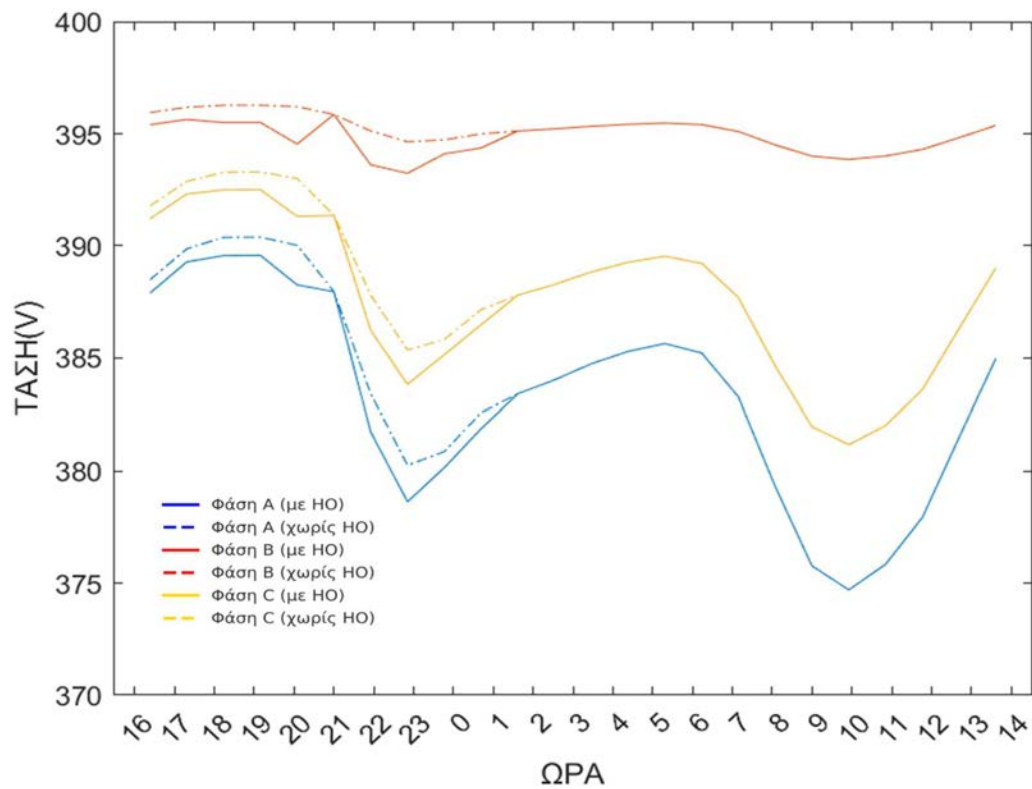
Εικόνα 4.44: Simple_Charge L108 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



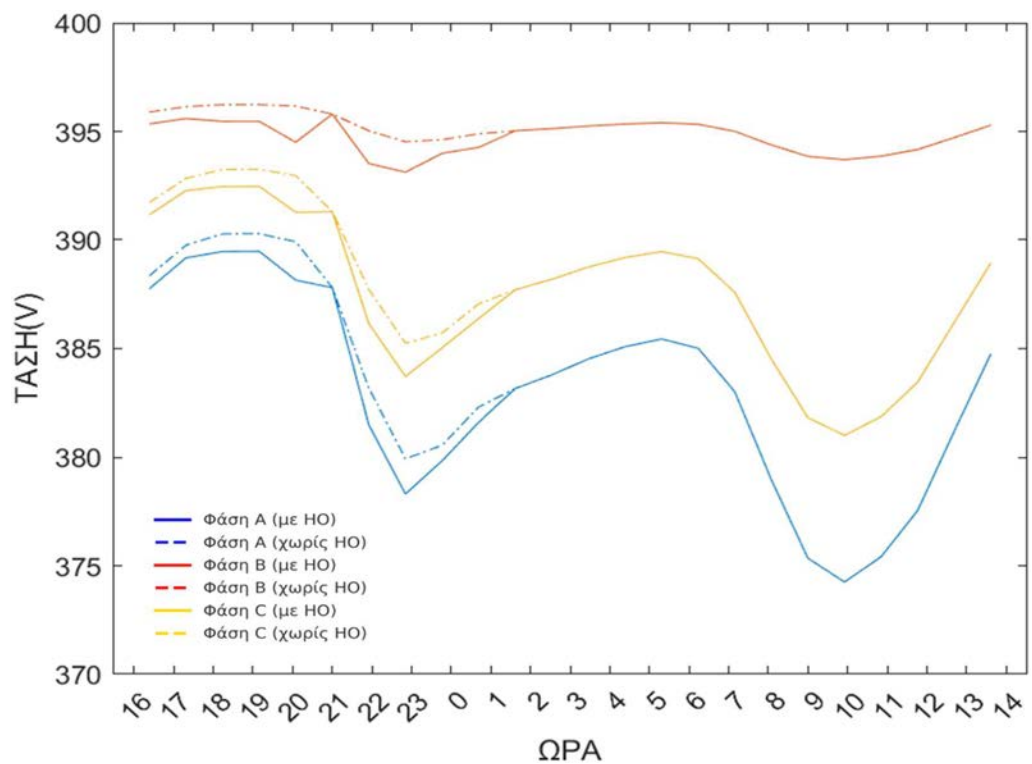
Εικόνα 4.45: Simple_Charge L111 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



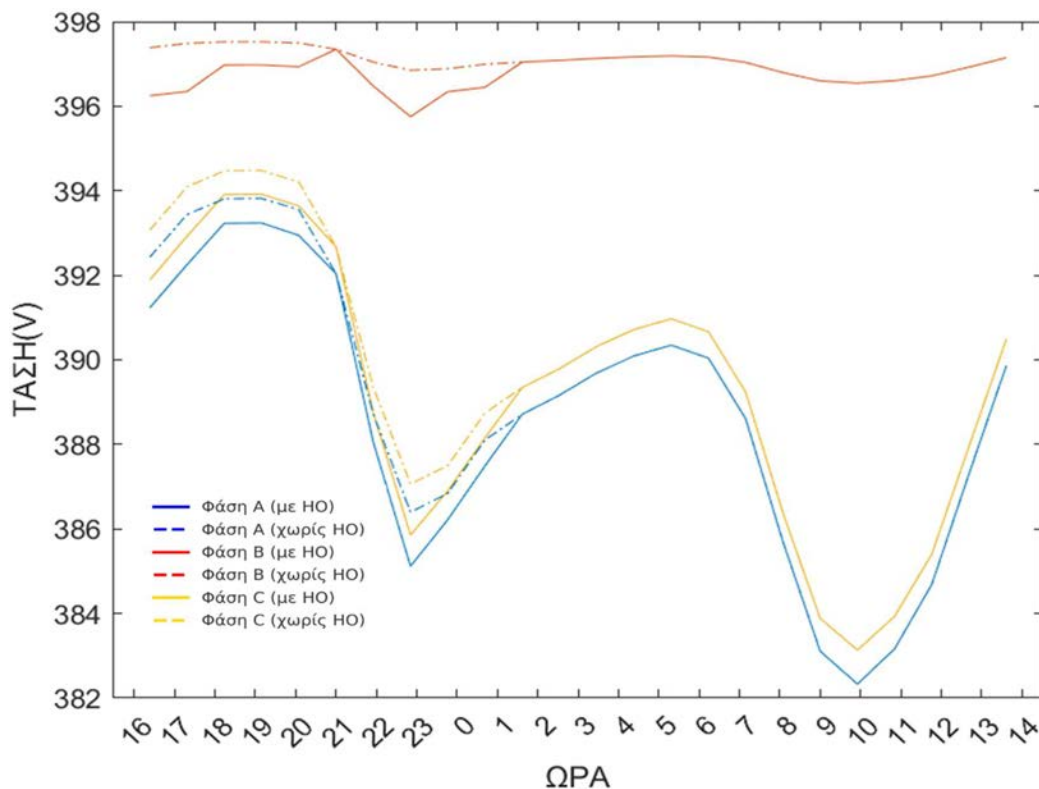
Εικόνα 4.46: Simple_Charge L120 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



Εικόνα 4.47: Simple_Charge L126 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



Εικόνα 4.48: Simple_Charge L128 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).



Εικόνα 4.49: Simple_Charge L134 Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

4.4.3 Προσομοίωση Δικτύου Διανομής: Σενάριο#3 (θέσεις 6-11)

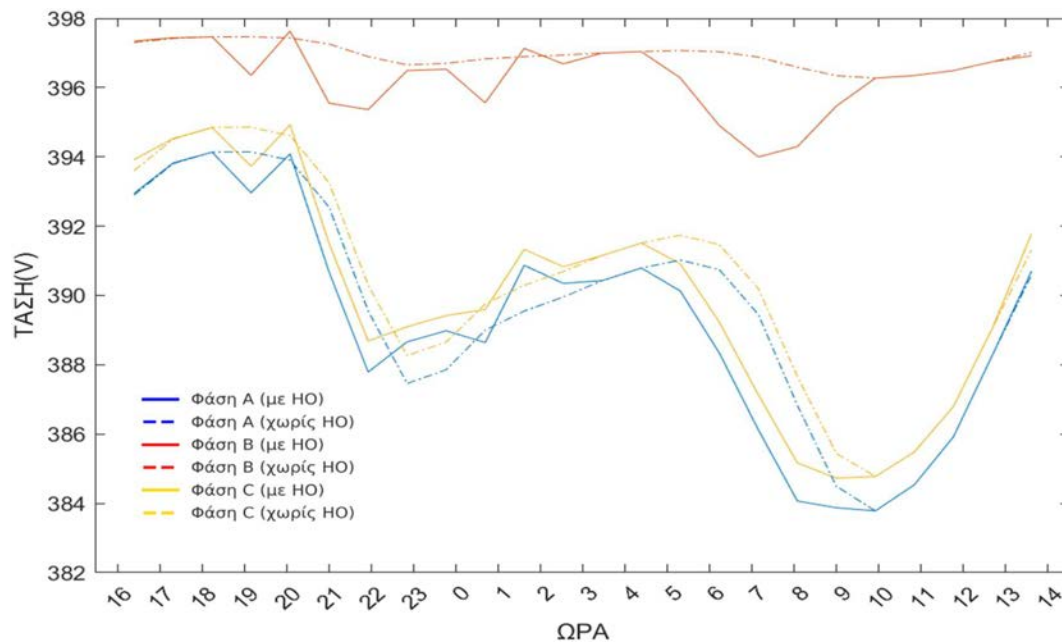
Στο Σενάριο#3 (1-6) της προσομοίωσης του δικτύου διανομής τα HO συνδέονται για φόρτιση στις πιο απομακρυσμένες, ως προς τον μετασχηματιστή, θέσεις φορτίων της Εικόνας 4.1. Τα HO συνδέονται διαδοχικά στις διαθέσιμες θέσεις φορτίων Load6-Load11 της Εικόνας 4.1, όπως φαίνεται και στον Πίνακα 4.3.

Πίνακας 4.3: Θέσεις HO στο δίκτυο Σενάριο#3 (6-11).

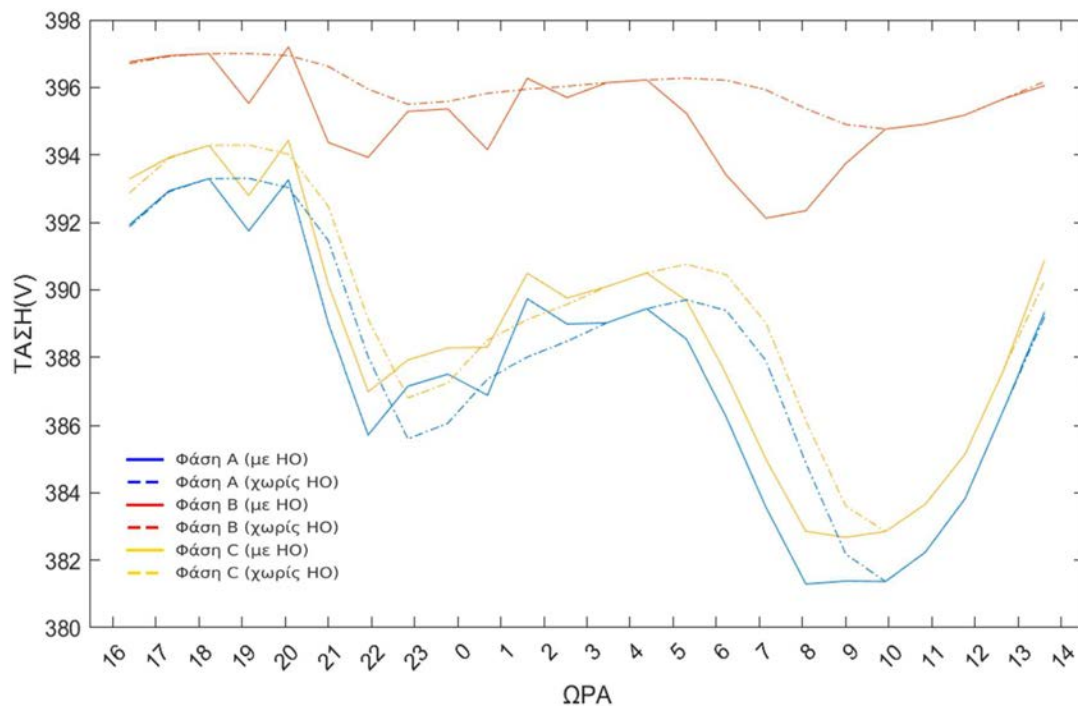
HO id	ΚΟΜΒΟΣ
HO1	L118
HO2	L120
HO3	L124
HO4	L126
HO5	L128
HO6	L131

Οι κόμβοι που έχουν επιλεγθεί για να γίνει μέτρηση της τάσης κατά την διάρκεια της προσομοίωσης για το Σενάριο#3 είναι: L104, L114, L123, L128, L131, L134.

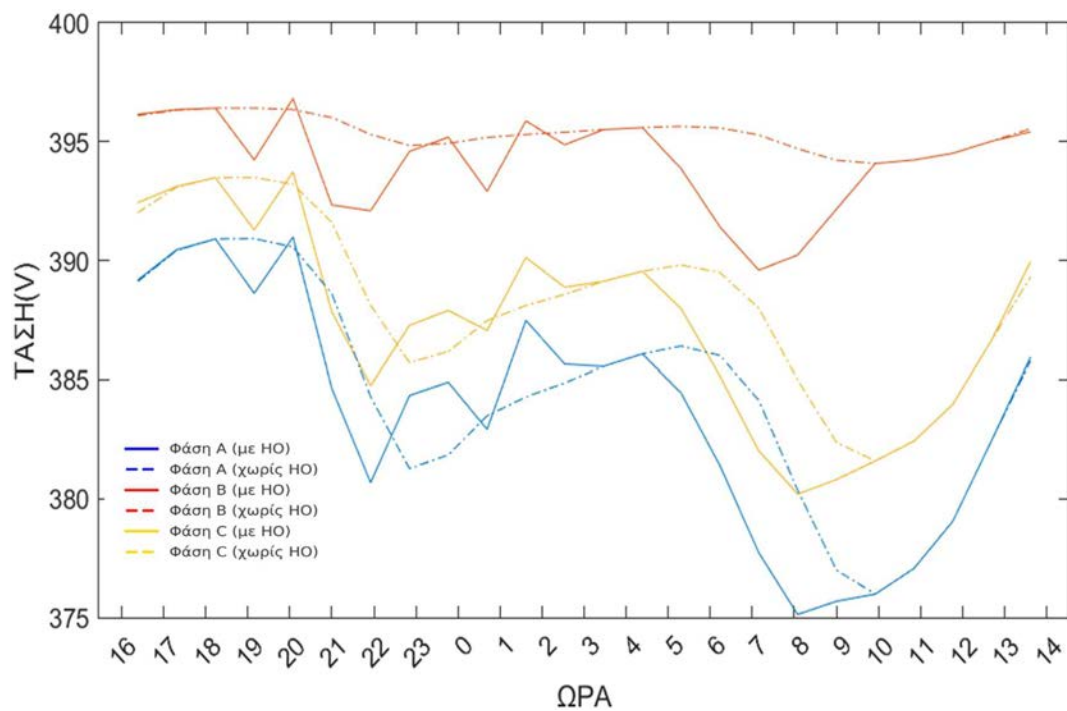
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων για τον αλγόριθμο Optimized_Max_Profit στις Εικόνες 4.50 έως 4.55 για το Σενάριο#3.



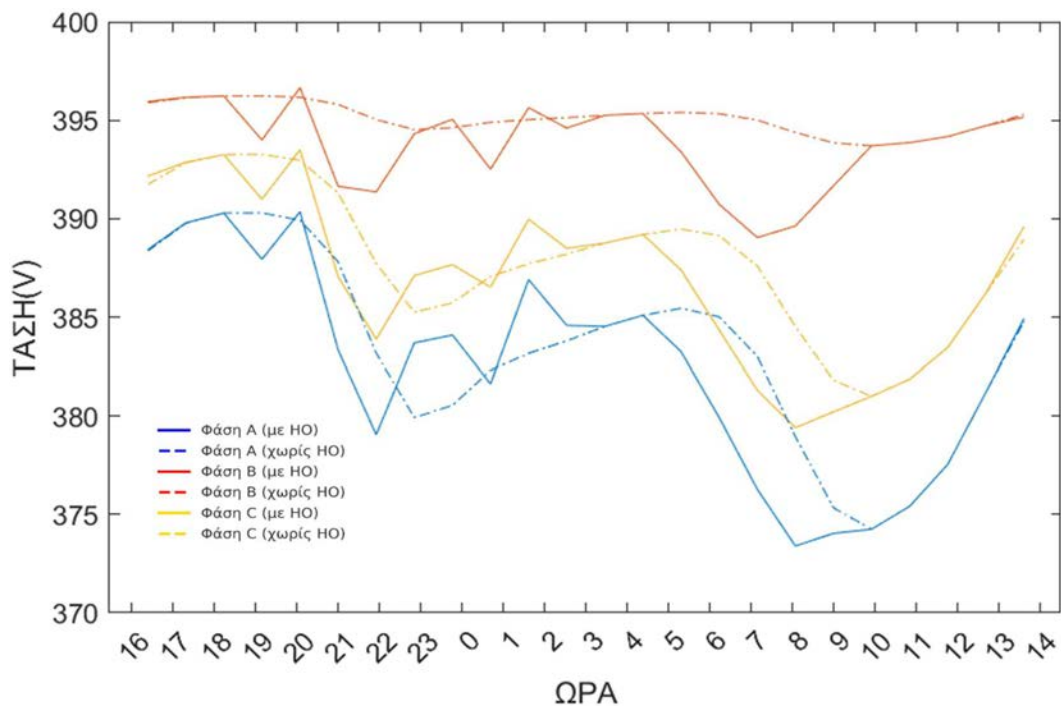
Εικόνα 4.50: Optimized_Max_Profit L104 Σενάριο#3 (6-11).



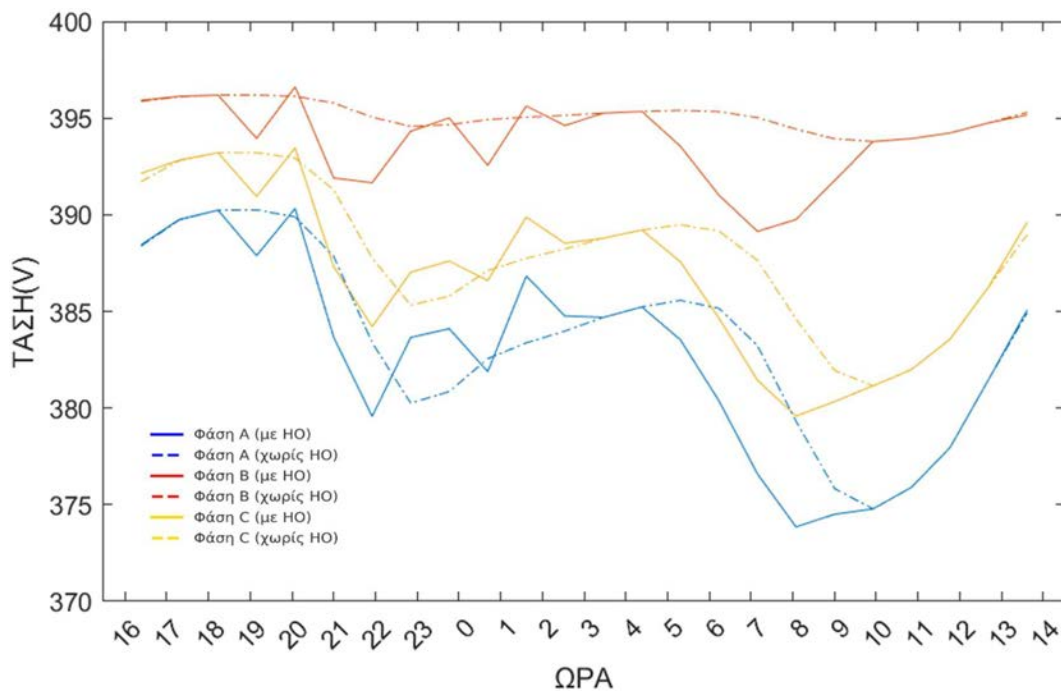
Εικόνα 4.51: Optimized_Max_Profit L114 Σενάριο#3 (6-11).



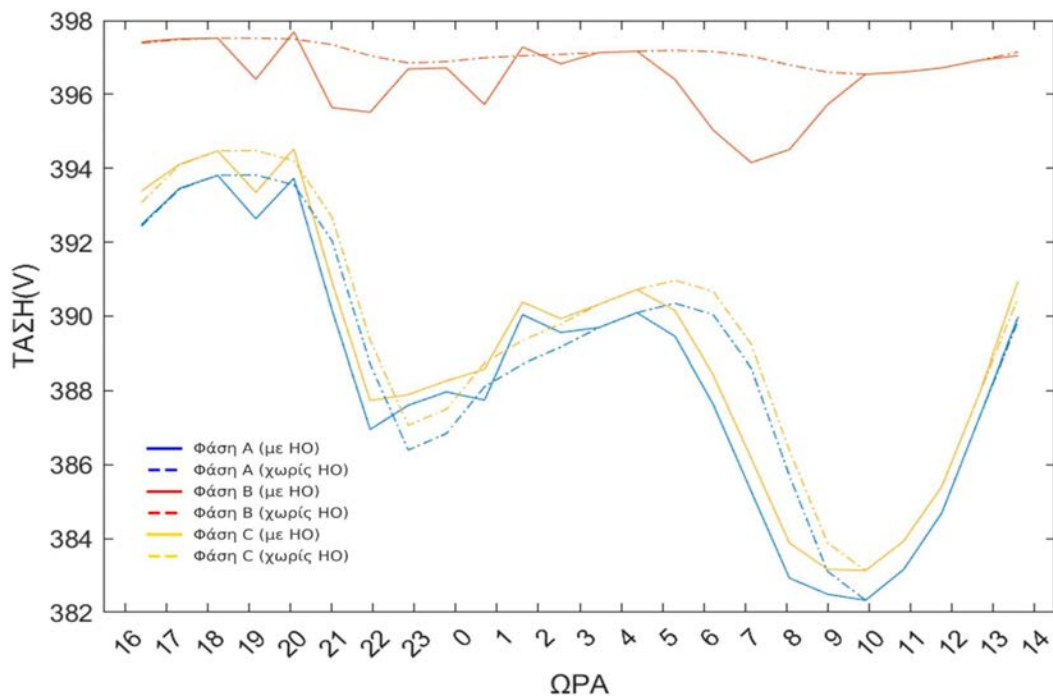
Εικόνα 4.52: Optimized_Max_Profit L123 Σενάριο#3 (6-11).



Εικόνα 4.53: Optimized_Max_Profit L128 Σενάριο#3 (6-11).

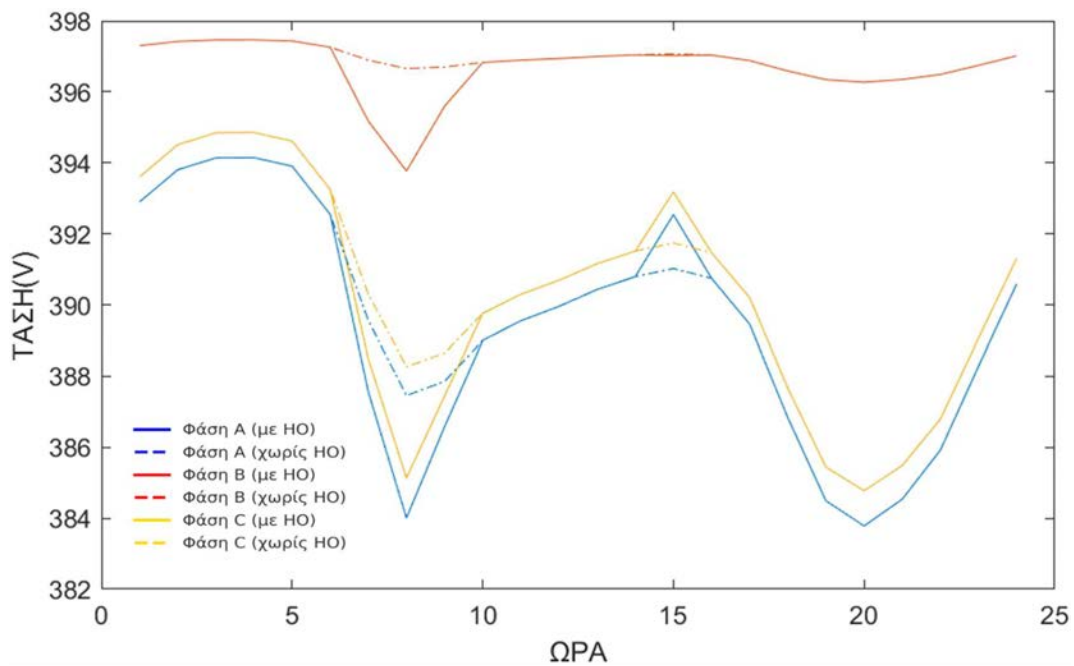


Εικόνα 4.54: Optimized_Max_Profit L131 Σενάριο#3 (6-11).

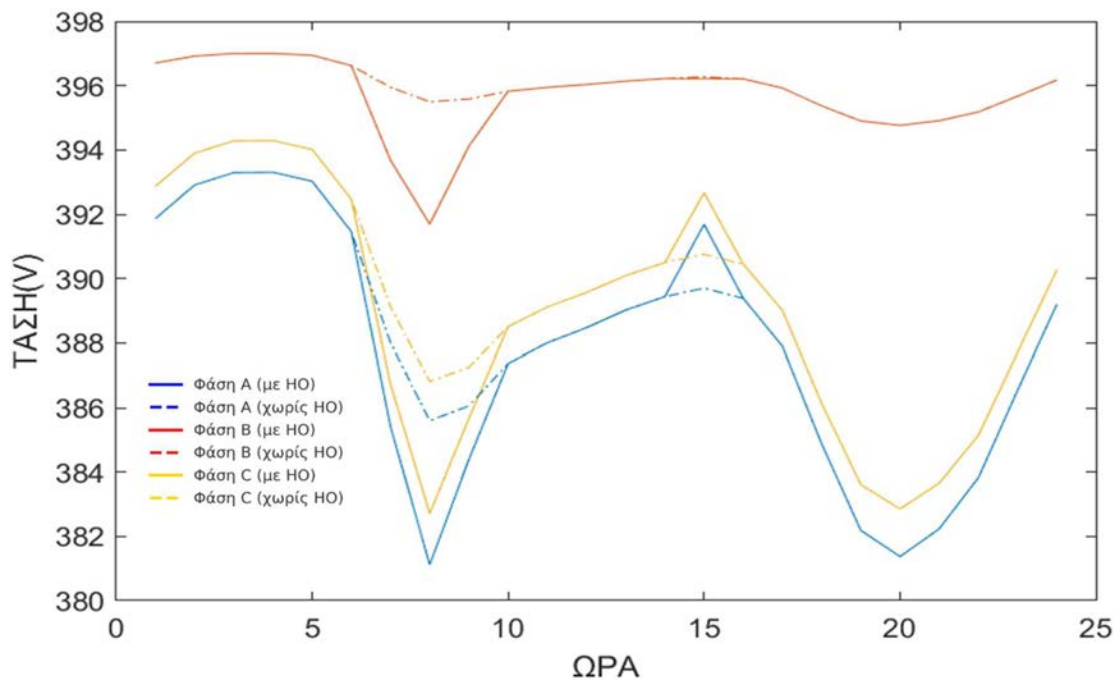


Εικόνα 4.55: Optimized_Max_Profit L134 Σενάριο#3 (6-11).

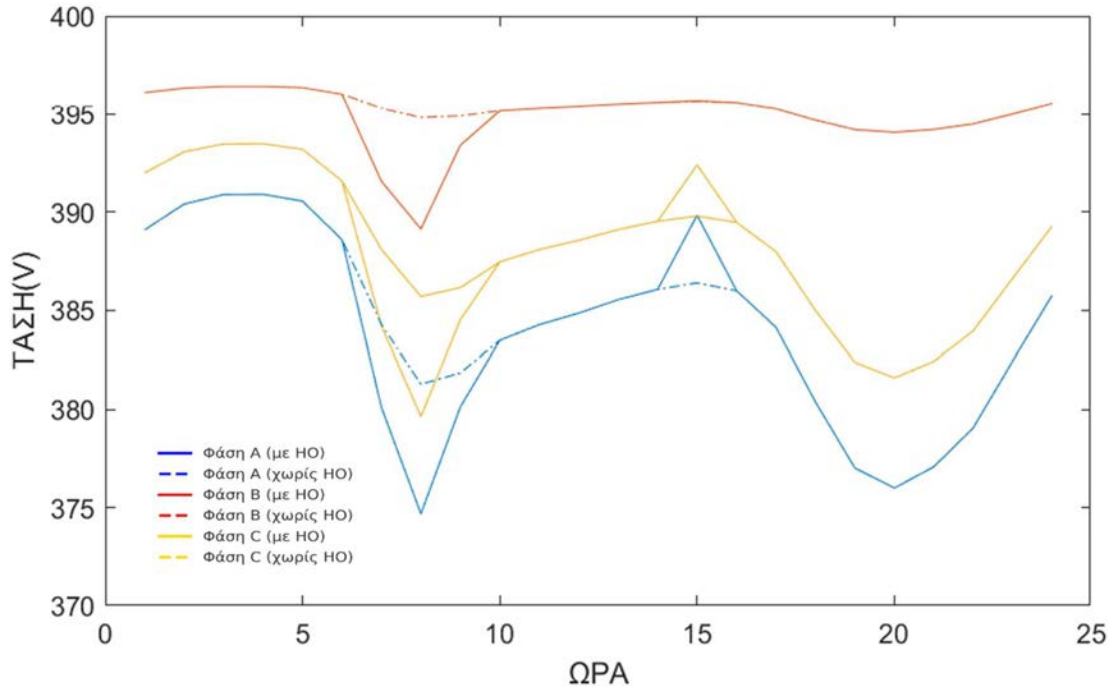
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων για τον αλγόριθμο Simple_V2G_24h στις Εικόνες 4.56 έως 4.61.



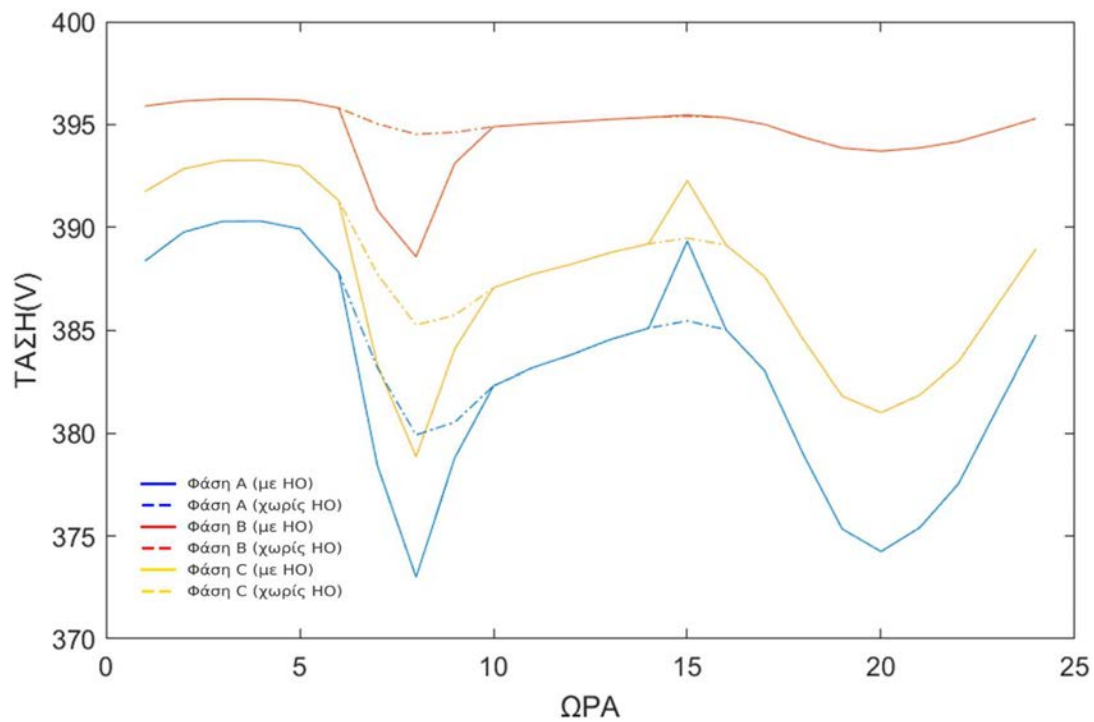
Εικόνα 4.56: Simple_V2G_24h L104 Σενάριο#3 (6-11).



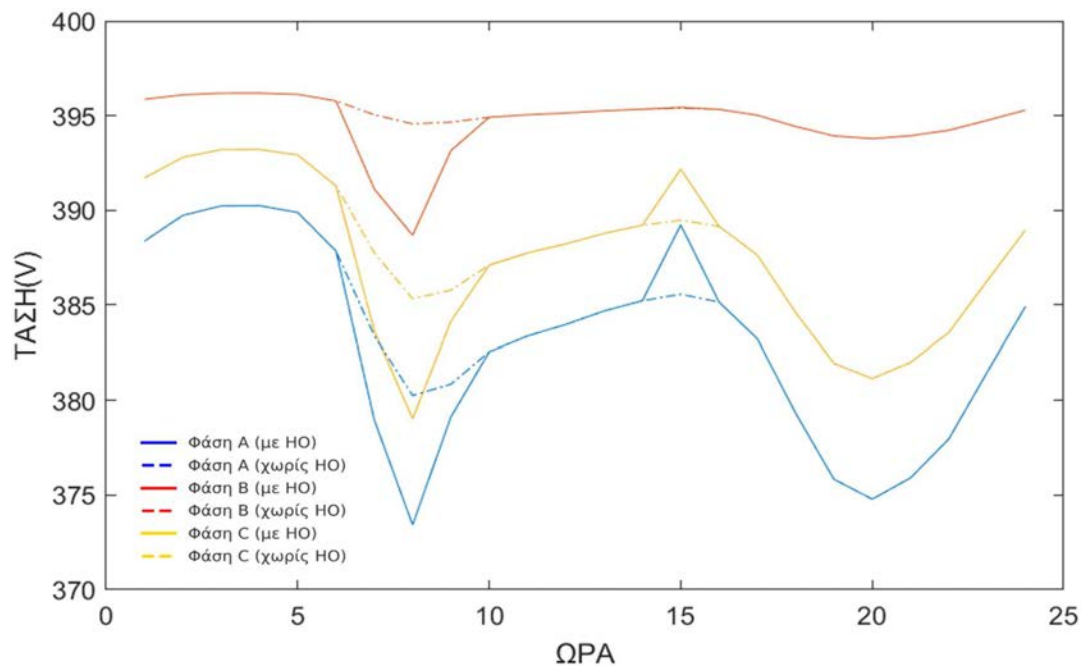
Εικόνα 4.57: Simple_V2G_24h L114 Σενάριο#3 (6-11).



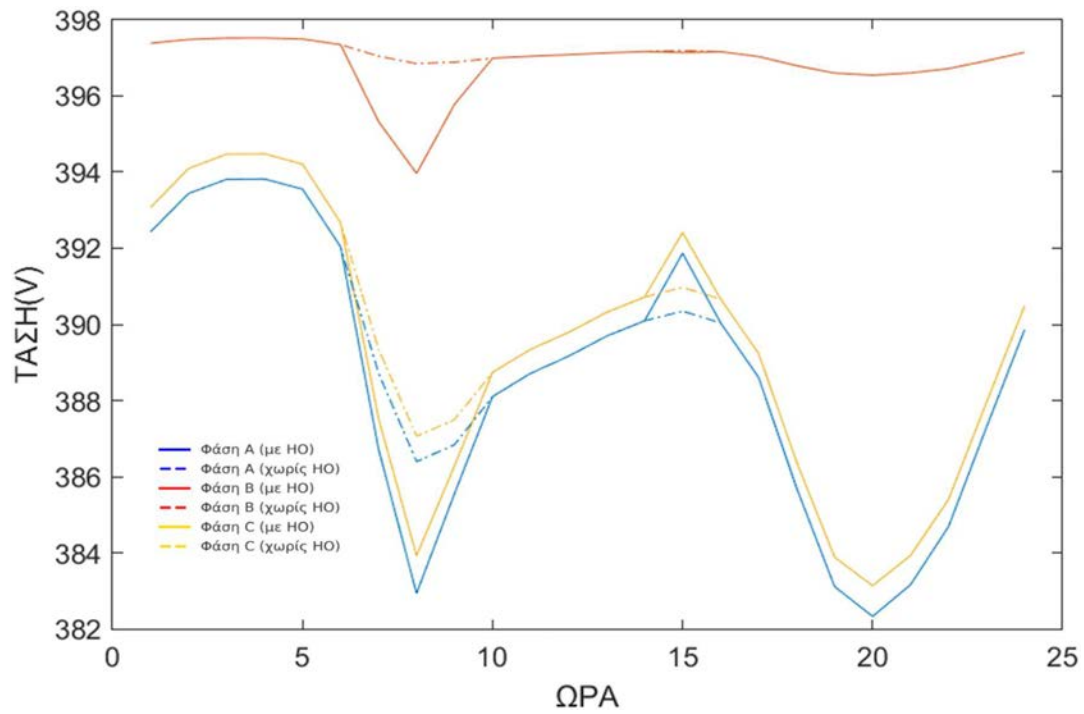
Εικόνα 4.58: Simple_V2G_24h L123 Σενάριο#3 (6-11).



Εικόνα 4.59: Simple_V2G_24h L128 Σενάριο#3 (6-11).

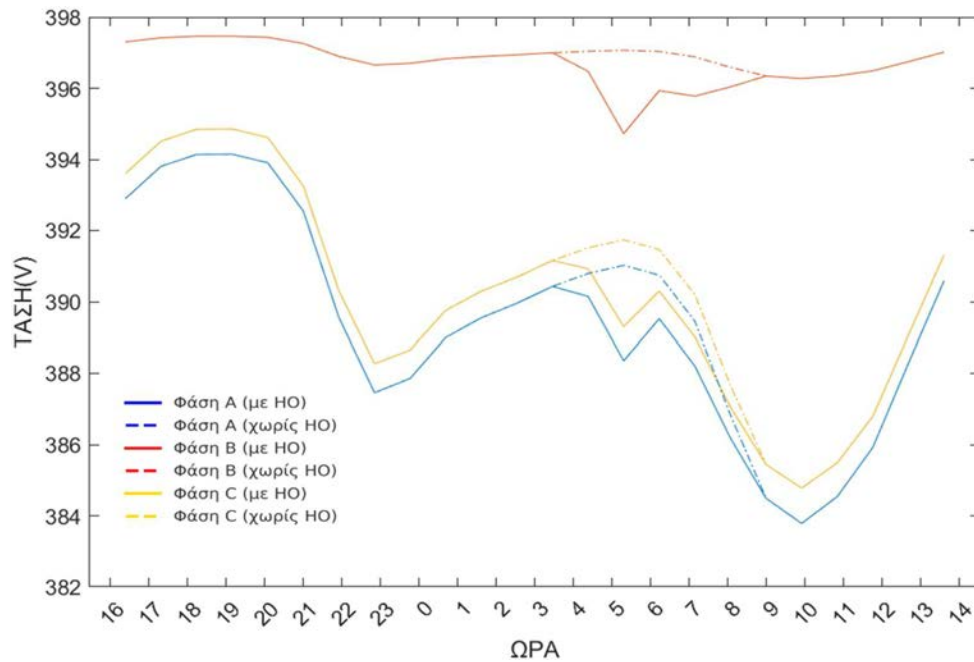


Εικόνα 4.60: Simple_V2G_24h L131 Σενάριο#3 (6-11).

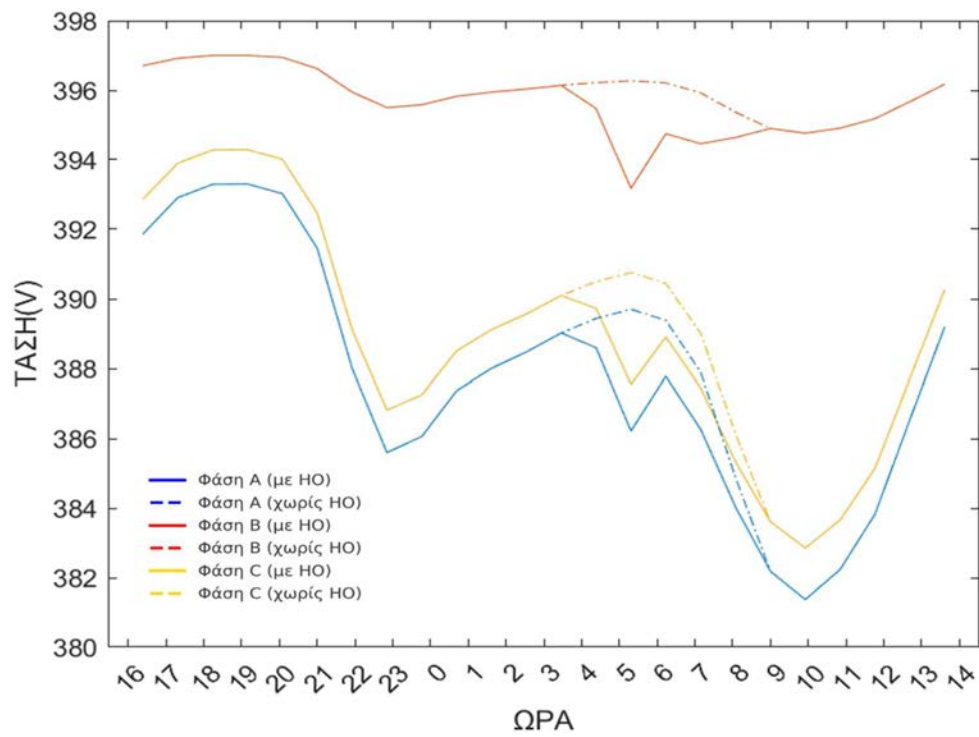


Εικόνα 4.61: Simple_V2G_24h L134 Σενάριο#3 (6-11).

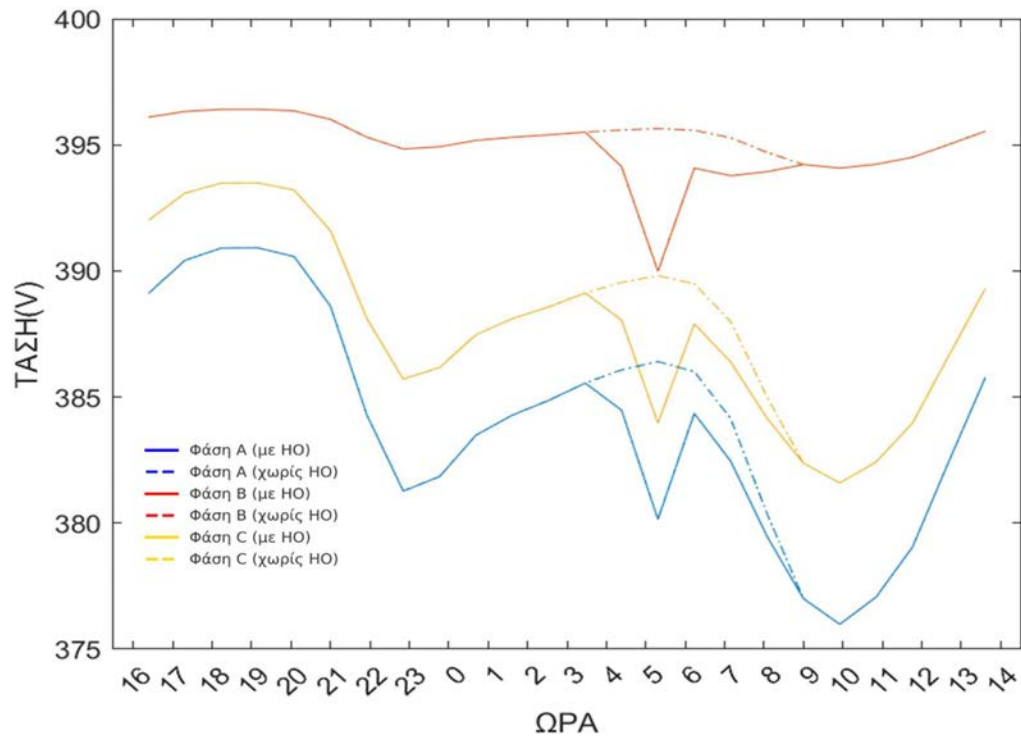
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων για τον αλγόριθμο NO_V2G_smartcharge στις Εικόνες 4.62 έως 4.67.



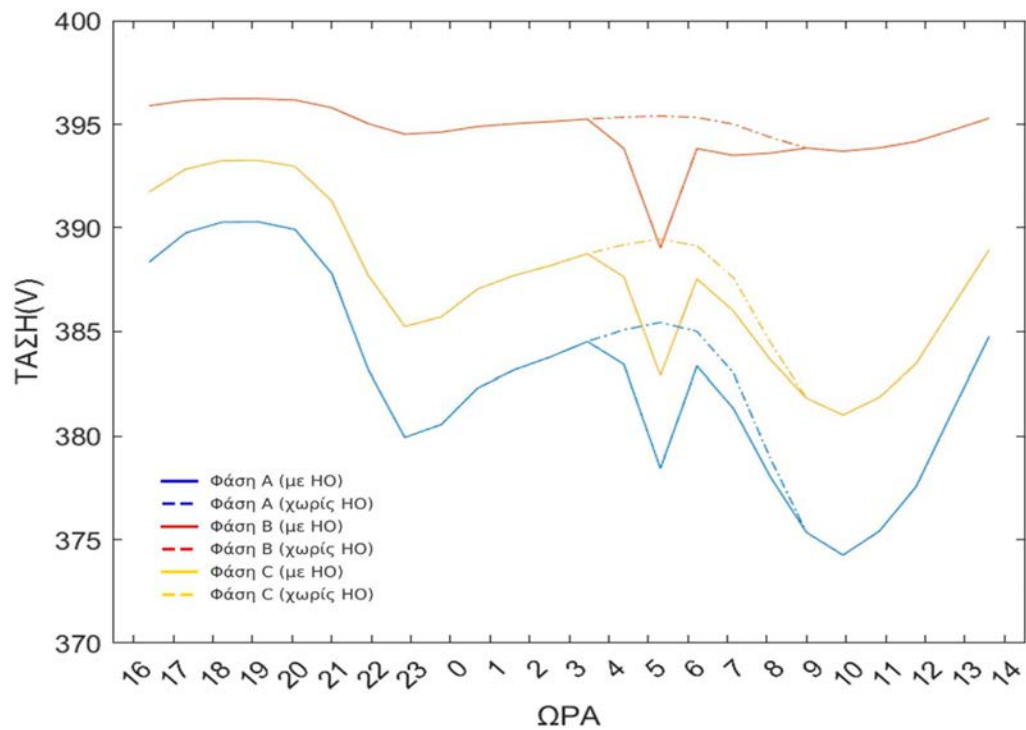
Εικόνα 4.62: NO_V2G_Smartcharge L104 Σενάριο#3 (6-11).



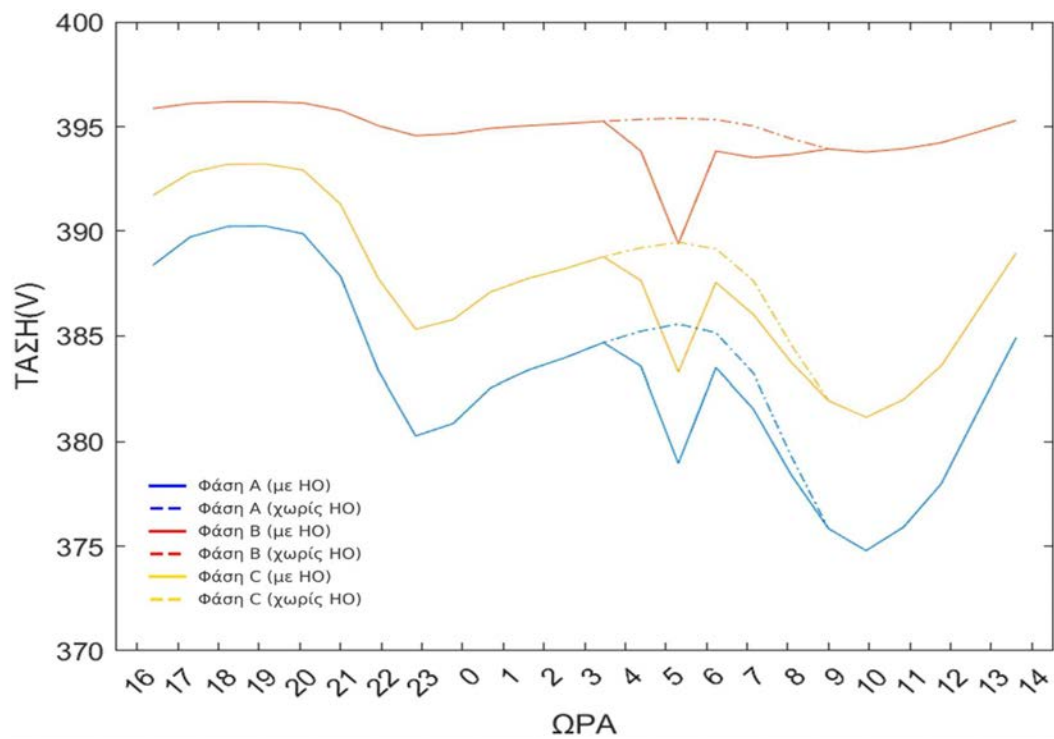
Εικόνα 4.63: NO_V2G_Smartcharge L114 Σενάριο#3 (6-11).



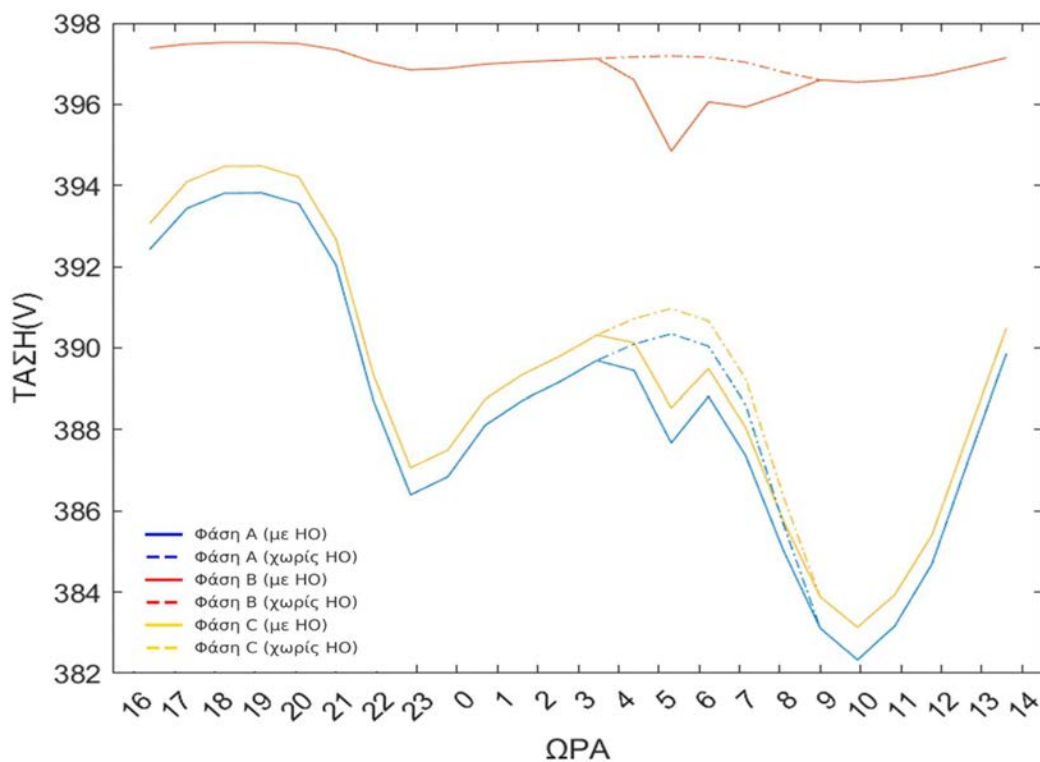
Εικόνα 4.64: NO_V2G_Smartcharge L123 Σενάριο#3 (6-11).



Εικόνα 4.65: NO_V2G_Smartcharge L128(6-11).

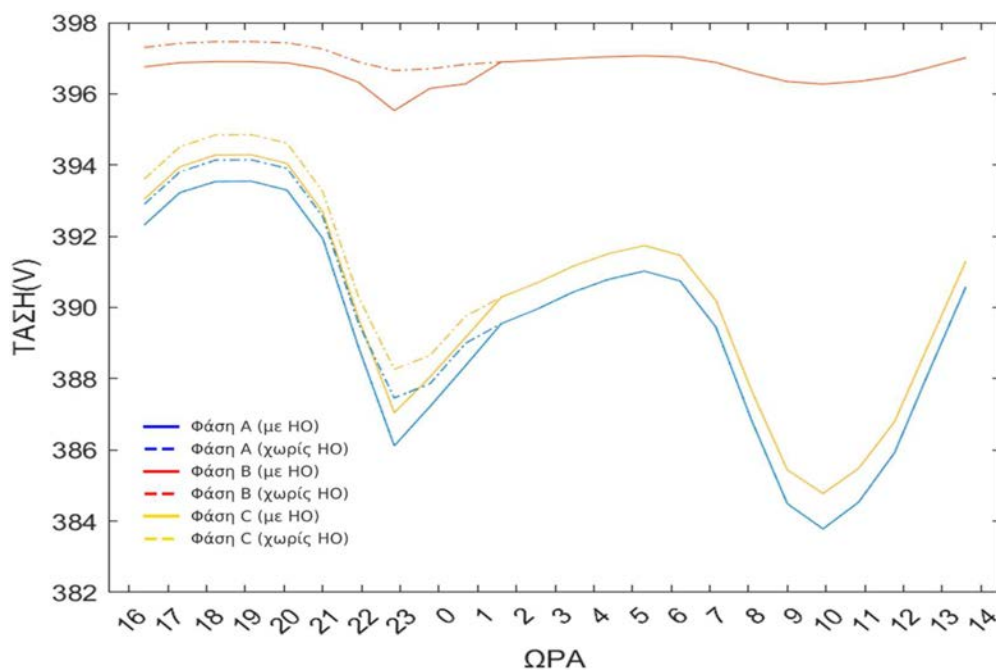


Εικόνα 4.66: NO_V2G_Smartcharge L131(6-11).

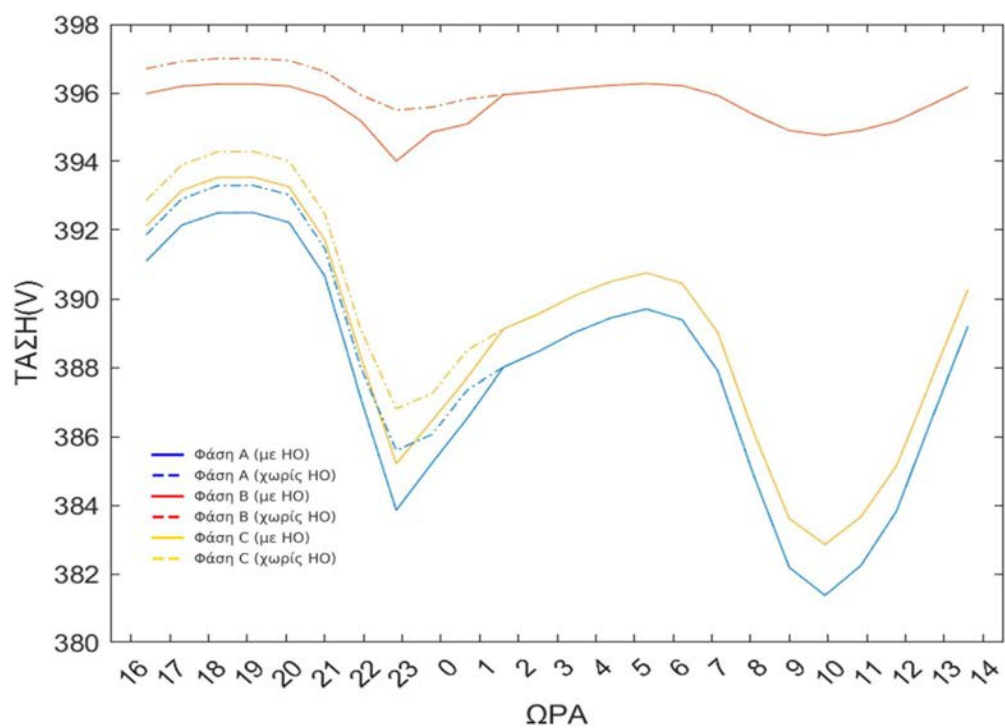


Εικόνα 4.67: NO_V2G_Smartcharge Σενάριο#3 (6-11).

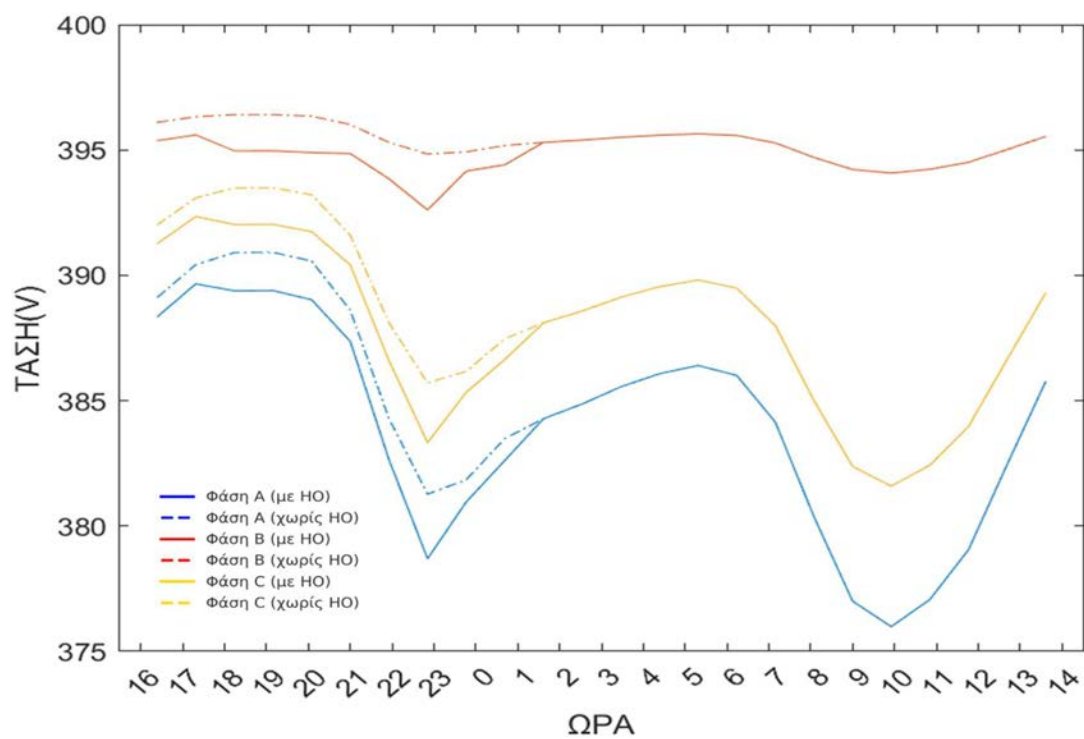
Ακολουθούν τα διαγράμματα τάσεων για τον αλγόριθμο απλής φόρτισης Simple_Charge. στις Εικόνες 4.68 έως 4.73



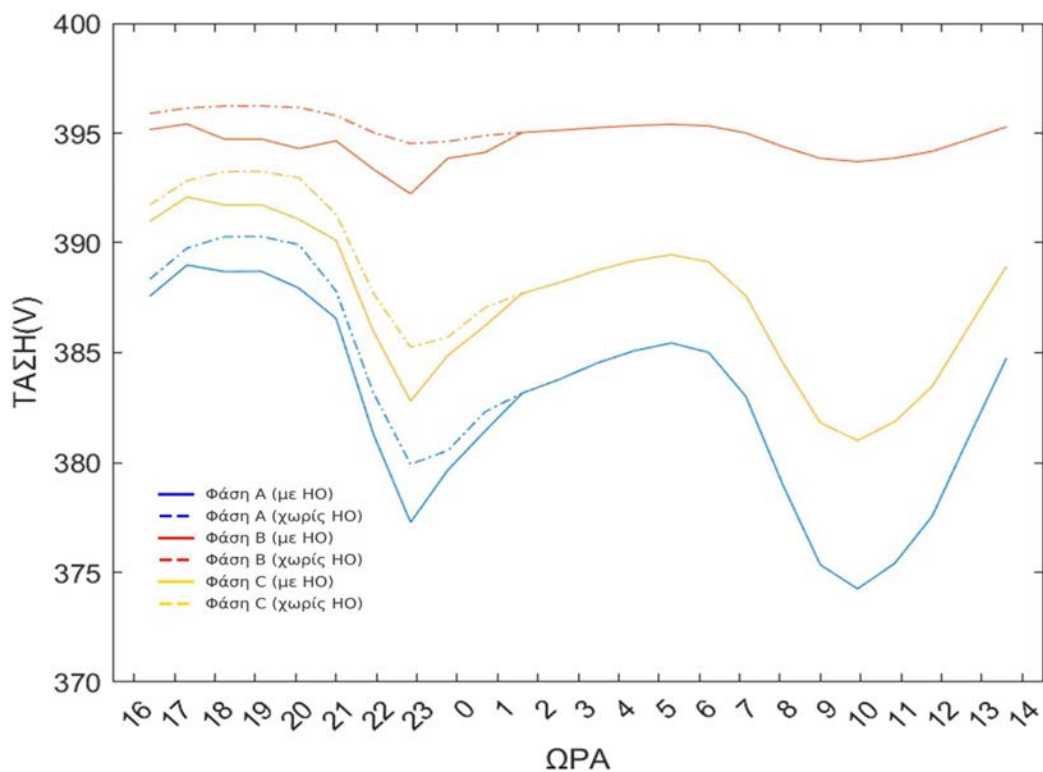
Εικόνα 4.68: Simple_Charge L104 Σενάριο#3 (6-11).



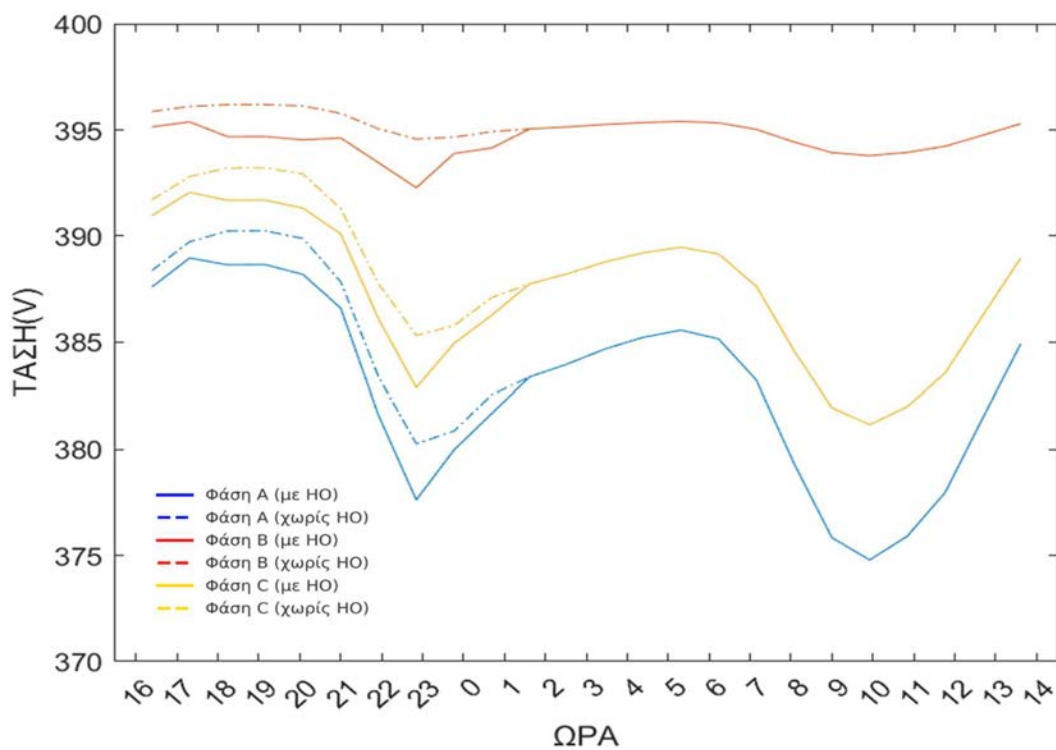
Εικόνα 4.69: Simple_Charge L114 Σενάριο#3 (6-11).



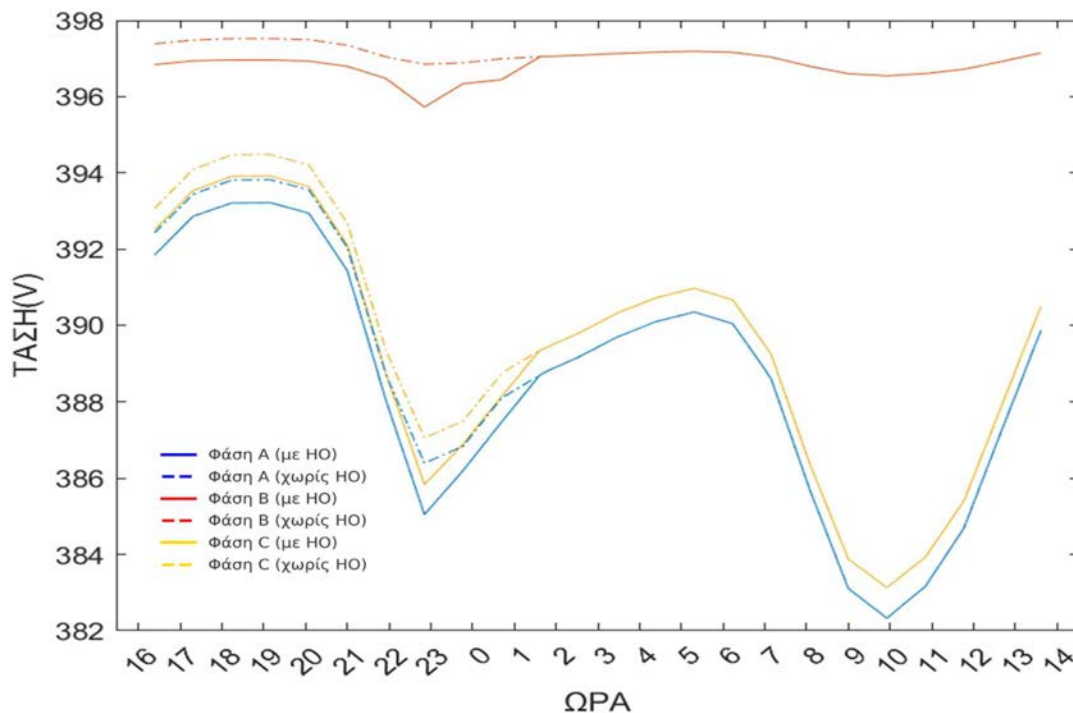
Εικόνα 4.70: Simple_Charge L123 Σενάριο#3 (6-11).



Εικόνα 4.71: Simple_Charge L128 Σενάριο#3 (6-11).



Εικόνα 4.72: Simple_Charge L131 Σενάριο#3 (6-11).



Εικόνα 4.73: Simple_Charge L134 Σενάριο#3 (6-11).

4.5 Συμπεράσματα και Παρατηρήσεις

Από την εξαγωγή των γραφημάτων για τα 3 σενάρια των διαφορετικών χωρικών κατανομών των HO, εντός του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας της προσομοίωσης, γίνεται εφικτό να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν την πτώση τάσης.

Η μεγαλύτερη πτώση τάσης που εμφανίζεται για τους 3 αλγορίθμους με επιλογή ώρας φόρτισης συμβαίνει για τις ώρες 05:00-09:00 καθώς εκεί έχουμε τις χαμηλότερες τιμές κιλοβατώρας. Γενικότερα, η πτώση τάσης είναι υψηλότερη στους κόμβους που βρίσκονται απομακρυσμένοι από τον μετασχηματιστή. Αυτό παρατηρείται στα γραφήματα που αφορούν τους κόμβους L123, L126, L128 και L131, όπου η μετρούμενη τάση υποχωρεί σε μεγαλύτερο βαθμό συγκριτικά με τους πιο κοντινούς κόμβους. Η αιτία αυτού του φαινομένου είναι η αντίσταση των γραμμών μεταφοράς. Καθώς το ηλεκτρικό ρεύμα διαρρέει μεγαλύτερο μήκος αγωγού μέχρι να φτάσει στους πιο απομακρυσμένους κόμβους, οι απώλειες ισχύος αυξάνονται και η τάση μειώνεται σύμφωνα με τον νόμο του Ohm ($\Delta V = I \cdot R$). Σε συνδυασμό με την

σύνδεση φορτίου υψηλής ζήτησης, όπως είναι τα ΗΟ, οι πιο απομακρυσμένοι κόμβοι παρουσιάζουν μεγαλύτερες αποκλίσεις.

Παρατηρούμε πως ο αλγόριθμος φόρτισης Optimized_Max_Profit παρουσιάζει τις περισσότερες αυξομειώσεις της τάσης στο δίκτυο για κάθε ένα από τα 3 διαφορετικά σενάρια. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας των περισσότερων εναλλαγών μεταξύ φόρτισης και εκφόρτισης σε σχέση με τους υπόλοιπους αλγορίθμους. Κατά την διάρκεια των εκφορτίσεων στην διαδικασία V2G παρατηρούμε αύξηση της τάσης στο δίκτυο, στις ώρες που η τιμή της κιλοβατώρας είναι υψηλότερη.

Στον αλγόριθμο Simple_V2G_24h οι αυξομειώσεις είναι λιγότερες. Η μεγαλύτερη πτώση εμφανίζεται τις πρωινές ώρες καθώς είναι οι ώρες που επιλέγονται για φόρτιση από τα ΗΟ, εφόσον οι ζητούμενες ώρες ετοιμότητας των περισσότερων οχημάτων είναι το πρωί. Μετά την επιθυμητή ώρα παραλαβής ο αλγόριθμος επιλέγει τα διαστήματα γύρω στις 15:00 για εκφόρτιση, καθώς εκεί έχουμε την υψηλότερη τιμή κιλοβατώρας όπως φαίνεται και στην Εικόνα 3.1.

Για τον αλγόριθμο NO_V2G_Smartcharge παρατηρούμε μείωση της τάσης στους κόμβους που μετρήθηκαν για τις ώρες 05:00-09:00 όπου έχουμε χαμηλότερη τιμή κιλοβατώρας και τα ΗΟ επιλέγουν να φορτίσουν σε αυτό το διάστημα.

Στον αλγόριθμο Simple_Charge παρουσιάζεται πτώση τάσης για τις ώρες άφιξης των ΗΟ, επειδή δεν υπάρχει επιλογή βέλτιστου διαστήματος φόρτισης και γίνεται έναρξη της φόρτισης από την ώρα άφιξης. Γίνεται αντιληπτό από τους Πίνακες 4.4, 4.5 και 4.6 πως στις 23:00 εμφανίζεται η μέγιστη πτώση τάσης. Αυτό συμβαίνει καθώς στις 23:00 βρίσκονται συνδεδεμένα τα περισσότερα ΗΟ ταυτόχρονα.

4.5.1 Πίνακες αποτελεσμάτων Μέγιστης Πτώσης Τάσης

Στους Πίνακες 4.4, 4.5 και 4.6 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα δεδομένα τα οποία εξήχθησαν όσον αφορά την μέγιστη πτώση τάσης και την ώρα της ημέρας που αυτή εμφανίζεται για τον κάθε κόμβο που μετρήθηκε. Οι μέγιστη πτώση τάσης για την εκάστοτε περίπτωση υπολογίστηκε από το αντίστοιχο γράφημα μέσω του MATLAB, λαμβάνοντας υπόψη την τάση με συνδεδεμένα τα ΗΟ και την τάση χωρίς τα ΗΟ για κάθε χρονικό βήμα.

Πίνακας 4.4: Μέγιστη Πτώση Τάσης σε Volt για θέσεις ΗΟ Σενάριο#1 (1-6).

ΚΟΜΒΟΣ	Optimized Max Profit	Simple 24h V2G	No V2G Smartcharge	Simple Charge
L108	2.46 (06:00)	2.84 (07:00)	2.16 (05:00)	1.37 (23:00)
L111	2.48 (07:00)	2.87 (07:00)	2.32 (05:00)	1.48 (23:00)
L120	2.63 (06:00)	2.90 (07:00)	2.30 (05:00)	1.49 (23:00)
L126	2.83 (06:00)	2.92 (07:00)	2.31 (05:00)	1.50 (23:00)
L128	2.64 (06:00)	2.92 (07:00)	2.31 (05:00)	1.50 (23:00)
L134	3.25 (07:00)	3.73 (07:00)	2.38 (07:00)	1.79 (23:00)

Πίνακας 4.5: Μέγιστη Πτώση Τάσης σε Volt για θέσεις ΗΟ Σενάριο#2 (1-3-5-7-9-10).

ΚΟΜΒΟΣ	Optimized Max Profit	Simple 24h V2G	No V2G Smartcharge	Simple Charge
L108	3.01 (07:00)	2.99 (07:00)	2.20 (05:00)	1.53 (23:00)
L111	3.01 (08:00)	3.13 (07:00)	2.53 (05:00)	1.55 (23:00)
L120	3.7 (08:00)	3.67 (07:00)	3.50 (05:00)	1.61 (23:00)
L126	4.1 (08:00)	4.06 (07:00)	4.40 (05:00)	1.62 (23:00)
L128	4.1 (08:00)	4.06 (07:00)	4.41 (05:00)	1.62 (23:00)
L134	3.31 (08:00)	3.28 (07:00)	1.94 (05:00)	1.28 (23:00)

Πίνακας 4.6: Μέγιστη Πτώση Τάσης σε Volt για θέσεις ΗΟ Σενάριο#3 (6-11).

KOMBOΣ	Optimized Max Profit	Simple 24h V2G	No V2G Smartcharge	Simple Charge
L104	3.27 (07:00)	3.45 (07:00)	2.67 (05:00)	1.34 (23:00)
L114	4.33 (07:00)	4.48 (07:00)	3.48 (05:00)	1.75 (23:00)
L123	6.41 (07:00)	6.60 (07:00)	6.26 (05:00)	2.58 (23:00)
L128	6.78 (07:00)	6.92 (07:00)	7.01 (05:00)	2.65 (23:00)
L131	6.64 (07:00)	6.83 (07:00)	6.63 (05:00)	2.65 (23:00)
L134	3.34 (07:00)	3.46 (07:00)	2.67 (05:00)	1.35 (23:00)

Παραθέτοντας τους 3 Πίνακες 4.4 έως 4.6 για τα 3 διαφορετικά σενάρια κατανομής των ΗΟ στο δίκτυο διανομής παρατηρείται διαφορά μεταξύ των ίδιων αλγορίθμων φόρτισης όσον αφορά την πτώση τάσης στους ίδιους κόμβους για την ίδια ώρα της ημέρας. Είναι εφικτό συνεπώς, να εξαχθεί το συμπέρασμα πως δεν ευθύνεται αποκλειστικά η λειτουργία των αλγορίθμων για την πτώση τάσης αλλά και το σε ποιο σημείο του δικτύου διανομής βρίσκονται τα ΗΟ.

Έχοντας υπόψη τα δεδομένα για την μέγιστη πτώση τάσης και ποια ώρα αυτή εμφανίζεται μπορούμε να καταλήξουμε σε ποιον τρόπο τοποθέτησης θα έχουμε βέλτιστη συμπεριφορά προς την λειτουργία του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα παράδειγμα άμεσης ένταξης της μελέτης δικτύου διανομής στην αγορά είναι η τοποθέτηση δημόσιων φορτιστών. Η βέλτιστη τοποθέτηση είναι στο Σενάριο#1 (θέσεις 1-6), δηλαδή στις θέσεις που απέχουν μικρότερη απόσταση από τον μετασχηματιστή. Αυτό συμβαίνει επειδή σε πλησιέστερες θέσεις έχουμε χαμηλότερη ωμική αντίσταση των γραμμών μεταφοράς και κατά συνέπεια επιβαρύνουμε τους κόμβους του δικτύου με την μεγαλύτερη αντοχή και η πτώση τάσης ελαχιστοποιείται όσο είναι εφικτό, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.4.

Συνδέοντας τα ΗΟ σε πιο απομακρυσμένους κόμβους όπως στους Πίνακες 4.5 και 4.6 παρατηρούνται έντονες αυξήσεις στο μέτρο της μέγιστης πτώσης τάσης ανά κόμβο. Συγκεκριμένα για του κόμβους L123, L126, L128 και L131, οι οποίοι βρίσκονται στην απομακρυσμένη πλευρά του δικτύου σε σχέση με τον μετασχηματιστή (Εικόνα 4.1), παρατηρείται αύξηση της μέγιστης πτώσης τάσης για τις ίδιες ώρες στο 72% για την χωρική κατανομή του Σεναρίου#2 (θέσεις 1-3-5-7-9-10) σε σχέση με το Σενάριο#1. Για την κατανομή του Σεναρίου#3 (θέσεις 6-11) η αύξηση της πτώσης τάσης είναι στο 234% σε σχέση με την κατανομή του Σεναρίου#1 (θέσεις 1-6).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Συμπεράσματα και μελλοντικές προτάσεις

5.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία παρουσιάστηκε η καινοτόμος τεχνολογία V2G και με την βοήθεια κώδικα και προσομοιώσεων εξήχθησαν ολιστικά συμπεράσματα όσον αφορά την σύγκριση διαφορετικών μεθόδων φόρτισης, την οικονομική απόδοση τους, αλλά και την επίδραση αυτών των τεχνολογιών στο δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο μέλλον, φαίνεται ιδιαίτερα πιθανό η ιδέα των ΗΟ με δυνατότητα αμφίδρομης ροής ισχύος να πρωταγωνιστήσει. Παρουσιάστηκαν τεχνικά τεκμηριωμένα αποτελέσματα, κάνοντας χρήση του προγράμματος MATLAB, για την οικονομική τους απόδοση και την δυνατότητα τους να μειώσουν τις οικονομικές επιβαρύνσεις των χρηστών των ΗΟ. Παρουσιάστηκαν 3+1 διαφορετικοί αλγόριθμοι με σκοπό την σύγκριση της αποδοτικότητας τους και των πιθανών τρόπων εκμετάλλευσής τους.

Καταλήγοντας, ο αλγόριθμος `Optimized_max_Profit` αποτελεί την ιδανικότερη περίπτωση για τον μέσο χρήστη ενός ΗΟ που στοχεύει στην ταχύτερη οικονομική απόσβεση του αυτοκινήτου του. Επιτρέποντας την εναλλαγή φόρτισης-αποφόρτισης, γίνεται πλήρης εκμετάλλευση των οικονομικά αποδοτικότερων ωρών τόσο για την φόρτιση όσο και για την αποφόρτιση.

Ο αλγόριθμος `Simple_V2G_24h` μπορεί να τελέσει σημαντικό ρόλο στην εξοικονόμηση χρηματικών πόρων, σε εταιρείες με μεγάλο στόλο ΗΟ όπως εταιρείες χρονομίσθωσης, μεταφορικές εταιρείες κλπ. Στο πλαίσιο μελλοντικής βελτίωσης, με την δυνατότητα για ανίχνευση επικίνδυνων καταστάσεων στο δίκτυο, μπορεί να παρέχει επικουρικές υπηρεσίες μέσω της εκφόρτισης των ΗΟ προς όφελος της ομαλής λειτουργίας ενός δικτύου διανομής. Ο αλγόριθμος `NO_V2G_Smartcharge` είναι ιδανικός για ΗΟ που δεν είναι εξοπλισμένα με V2G, μειώνοντας το κόστος φόρτισης όσο είναι εφικτό. Ο αλγόριθμος `Simple_Charge` αποτελεί την πιο αντί-οικονομική περίπτωση καθώς δεν έχει ούτε δυνατότητα επιλογής ώρας φόρτισης ούτε V2G και υλοποιήθηκε αποκλειστικά για λόγους σύγκρισης αποτελεσμάτων.

Οδεύοντας προς την επίτευξη ολοένα και αυξανόμενων ποσοστών εξηλεκτρισμού του πλανήτη, η μελέτη των επιδράσεων των νέων τεχνολογιών στην

ποιότητα της τάσης του δικτύου διανομής καθίσταται αναγκαία. Κάνοντας χρήση του MATLAB και του Openss έγινε σύγκριση των αλγορίθμων φόρτισης και οπτικοποιήθηκαν τα αποτελέσματα που αφορούν την πτώση τάσης στο δίκτυο. Συνεπώς, εμφανίζεται η δυνατότητα εντοπισμού τεχνικών ζητημάτων τόσο στις τεχνολογίες των ΗΟ αλλά και του δικτύου παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι πως οι αλγόριθμοι επηρεάζουν σταθερά το δίκτυο και έχοντας παρουσιάσει την μέγιστη πτώση τάσης για την οποία ευθύνονται τα ΗΟ στο Κεφάλαιο 4, γίνεται αντιληπτό πως μπορεί να μετριάσει μέσω σωστής χωρικής κατανομής των φορτιστών και ορθολογικής γεωγραφίας του ίδιου του δικτύου διανομής.

5.2 Προτάσεις και μελλοντικές βελτιώσεις

Με σκοπό την βελτίωση όλων των αλγορίθμων, θα ήταν θετική η ένταξη ακρίβειας στο λεπτό. Δηλαδή τα χρονικά βήματα τα οποία έχουν οριστεί σε μία ώρα να αντικατασταθούν με βήματα του ενός λεπτού. Για περεταίρω μελλοντική έρευνα προτείνεται η αύξηση της κλίμακας του δικτύου διανομής ενέργειας στο οποίο πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις με στόχο την βελτίωση των αλγορίθμων για μεγαλύτερα δίκτυα διανομής με περισσότερα ΗΟ, καθώς και η ένταξη εξωτερικών παραμέτρων στην μελέτη (π.χ. εξωτερική θερμοκρασία).

Συγκεκριμένα, προς εξέλιξη του αλγορίθμου Simple_V2G_24h μπορεί να υλοποιηθεί αλγόριθμος ανίχνευσης της πτώσης τάσης και άλλων δυσλειτουργιών στο δίκτυο με σκοπό τη βοηθητική λειτουργία V2G ΗΟ μέσω του αλγορίθμου, συμβάλλοντας έτσι στην ομαλή λειτουργία του δικτύου διανομής.

Προς μελλοντική βελτίωση του αλγορίθμου Optimized_Max_Profit, μπορεί να ενταχθεί κώδικας που υπολογίζει την φθορά της μπαταρίας. Θα υπολογίζει το πρόσθετο κόστος χρήσης της μπαταρίας ανά περίοδο, λαμβάνοντας υπόψη την ενέργεια που διακινείται, το εύρος μεταβολής του SoC και τη συχνότητα εναλλαγών φόρτισης-εκφόρτισης. Το κόστος αυτό θα ενσωματώνεται στο αντικείμενο βελτιστοποίησης, ώστε ο στόχος του αλγορίθμου να είναι το καθαρό κέρδος που λαμβάνει υπόψη τόσο το κόστος ενέργειας όσο και το εκτιμώμενο κόστος φθοράς. Αξίζει να σημειωθεί ότι η επίδραση της συμμετοχής σε σενάρια V2G στη διάρκεια

ζωής της μπαταρίας δεν είναι μονοδιάστατη. Σε λειτουργίες όπου οι μεταβολές του SoC είναι ρηχές και ελέγχονται με ήπιο τρόπο, η συμμετοχή μπορεί να συμβάλλει στη μείωση της επιβάρυνσης, αποτρέποντας την παρατεταμένη παραμονή της μπαταρίας σε υψηλά επίπεδα φόρτισης που ευνοούν την ημερολογιακή γήρανση (calendar aging). Η φθορά αυτού του τύπου προκαλείται κυρίως από χημικές αντιδράσεις που επιταχύνονται όταν η μπαταρία παραμένει για μεγάλο διάστημα πλήρως ή σχεδόν πλήρως φορτισμένη. Αντίθετα, οι συχνές και βαθιές εναλλαγές φόρτισης–εκφόρτισης οδηγούν σε κυκλική γήρανση (cycle aging), η οποία σχετίζεται με τη μηχανική καταπόνηση των ηλεκτροδίων και την απώλεια ενεργών υλικών εξαιτίας των επαναλαμβανόμενων κύκλων [23][24].

Η συμβολή αυτής της έρευνας έγκειται στη συνολική αποτίμηση της τεχνολογίας V2G, συνδυάζοντας τεχνικά, οικονομικά και λειτουργικά κριτήρια. Μελλοντικά, η εφαρμογή αυτών των συστημάτων σε ευρεία κλίμακα μπορεί να βελτιώσει την εξέλιξη της ηλεκτροκίνησης, καθιστώντας τα ΗΟ όχι μόνο μέσα μεταφοράς αλλά και κινητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, ενταγμένες στο πλαίσιο της «έξυπνης» και «πράσινης» ενέργειας προς όφελος των χρηστών, του δικτύου διανομής ηλεκτρικής ενέργειας και του περιβάλλοντος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] International Energy Agency, "IEA," [Online]. Available: <https://www.iea.org>.
- [2] Eurostat, "European Commission – Eurostat," [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat>.
- [3] M. C. Falvo, M. De Sanctis, F. Massaro, and L. Martirano. Electric mobility and V2G: Supporting the grid with new services. Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 181, 2023, pp. 113477.
- [4] U.S. Department of Energy. FOTW #1375, December 30, 2024: Median EV range for model year 2024 reached a record. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, Dec. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/vehicles/articles/fotw-1375-december-30-2024-median-ev-range-model-year-2024-reached-record>.
- [5] B. Bibak and H. Tekiner-Mogulkoc. Influences of vehicle to grid (V2G) on power grid: An analysis by considering associated stochastic parameters explicitly. Sustainable Energy, Grids and Networks, vol. 22, Sept. 2020, pp. 100429. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100429>.
- [6] China State Technology Limited. Aloft charging solutions. [Online]. Available: <https://www.cstl.com.hk/charging/aloft/>.
- [7] A. Shrivastava, A. Tiwari, S. Tewari, and R. Kumar. Impact of EV interfacing on peak-shelving and frequency regulation. Scientific Reports, vol. 14, no. 1, 2024, pp. 6633. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83309-3>.
- [8] S. Iqbal, A. Qamar, T. Kamal, A. B. Awan, and L. Olatomiwa. V2G strategy for primary frequency control of an industrial microgrid considering the charging station operator. Electronics, vol. 9, no. 4, Apr. 2020, pp. 549. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics9040549>.
- [9] M. Yumiki, S. Onori, and R. Gough. Autonomous vehicle-to-grid design for provision of frequency control ancillary service and distribution voltage regulation. arXiv preprint arXiv:2101.10518, Jan. 2021. [Online]. Available: <https://arxiv.org/abs/2101.10518>.

- [10] D. Brennenstuhl, N. H. Reich, and J. Teuscher. The potential of vehicle-to-home integration for residential prosumers: A case study. *Energy Systems*, 2024, pp. 145–165. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s40866-024-00206-4>.
- [11] S. Zhang, P. Papadopoulos, and P. Mancarella. Home energy optimization using vehicle-to-home. *Open Research Europe*, vol. 5, 2025, pp. 48. [Online]. Available: <https://doi.org/10.12688/openreseurope.17647.1>.
- [12] M. İnci, M. M. Savrun, and Ö. Çelik. Integrating electric vehicles as virtual power plants: A comprehensive review on vehicle-to-grid (V2G) concepts, interface topologies, marketing and future prospects. *Journal of Energy Storage*, vol. 55, 2022, pp. 105579. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105579>.
- [13] H. Li, H. Zhang, Y. Wang, Y. Xu, and X. Chen. Unlocking the energy flexibility of vehicle-to-building by shared use of charging facilities. *Energy*, vol. 310, 2025, pp. 130786. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.130786>.
- [14] U. B S, V. Khadkikar, H. H. Zeineldin, S. Singh, H. Otrók and R. Mizouni, "Direct Electric Vehicle to Vehicle (V2V) Power Transfer Using On-Board Drivetrain and Motor Windings," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 69, no. 11, pp. 10765-10775, Nov. 2022, [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9591256>
- [15] J. D. K. Bishop, C. J. Axon, D. Bonilla, M. Tran, D. Banister, and M. D. McCulloch. Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV. *Applied Energy*, vol. 111, 2013, pp. 206–218. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.094>.
- [16] A. Hirtenstein and G. Guillaume. Dutch car-sharing firm adds Renault EVs capable of powering local grid. *Reuters*, Jun. 4, 2025. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/business/energy/dutch-car-sharing-firm-adds-reault-evs-capable-powering-local-grid-2025-06-04>.
- [17] [17] A. Aoun, M. Adda, A. Ilinca, M. Ghandour, and H. Ibrahim. Dynamic charging optimization algorithm for electric vehicles to mitigate grid power

- peaks. World Electric Vehicle Journal, vol. 15, no. 7, 2024, pp. 324. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/wevj15070324>.
- [18] J. Svarc. Bidirectional EV chargers review. Clean Energy Reviews, Mar. 2, 2023. [Online]. Available: <https://www.cleanenergyreviews.info/blog/bidirectional-ev-chargers-review>.
- [19] Hellenic Energy Exchange (EnEx). Home page. [Online]. Available: <https://www.enexgroup.gr/el/web/guest/home>.
- [20] MathWorks, Inc., “MATLAB Documentation,” The MathWorks Inc., Natick, MA, USA. [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/index.html>.
- [21] OLENG. Φωτοβολταϊκά στις στέγες έως 10 kW. Aug. 1, 2019. [Online]. Available: <https://www.oleng.eu/photovoltaics-in-roofs/>.
- [22] Electric Power Research Institute, “OpenDSS Manual,” Oct. 2020. [Online]. Available: <https://sourceforge.net/projects/electricdss/files/OpenDSS/OpenDSSManual.pdf>.
- [23] J. D. K. Bishop, C. J. Axon, D. Bonilla, M. Tran, D. Banister, and M. D. McCulloch. Evaluating the impact of V2G services on the degradation of batteries in PHEV and EV. Applied Energy, vol. 111, 2013, pp. 206–218. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.094>.
- [24] J. Geng, H. Hao, X. Hao, M. Liu, H. Dou, Z. Liu, and F. Zhao. Techno-economic comparison of vehicle-to-grid and commercial-scale battery energy storage system: Insights for the technology roadmap of electric vehicle batteries. World Electric Vehicle Journal, vol. 16, no. 4, 2025, pp. 200. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/wevj16040200>.