

Προσομοίωση λειτουργίας πλήθους
διασυνδεδεμένων με το δίκτυο ηλεκτρικών
οχημάτων ως ισοδύναμη μονάδα αποθήκευσης

Στυλιανός Βούλγαρης



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
TECHNICAL UNIVERSITY OF CRETE

Εξεταστική επιτροπή
Καθηγητής Κανέλλος Φώτιος (Επιβλέπων)
Καθηγητής Κουτρούλης Ευτύχιος
Καθηγητής Σταυρακάκης Γεώργιος

Ευχαριστίες

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του καθηγητά του πολυτεχνείου Κρήτης και του τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών κ. Φώτιου Κανέλλου. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω από καρδιάς τόσο για την δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με τον πολύ ενδιαφέρον κλάδο της ενέργειας, όσο και για την προθυμία του να με βοηθήσει σε κάθε δυσκολία που αντιμετώπισα κατά την διεκπεραίωση της εργασίας.

Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω θερμά την οικογένειά μου, που με στηρίζει όλα αυτά τα χρόνια!

Συντομογραφίες

ΗΟ / EV	Ηλεκτρικό Όχημα / Electric Vehicle
ΚΕΚ	Κινητήρας Εσωτερικής Καύσης
ΑΤΠ	Αθροιστικός Τρόπος Προσομοίωσης
ΣΤΠ	Συγκεντρωτικός Τρόπος Προσομοίωσης
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
V2G	Vehicle To Grid
G2V	Grid To Vehicle
SOC	State of Charge

Περίληψη

Τα τελευταία χρόνια βιώνουμε όλο και περισσότερο την ραγδαία επέκταση των αυτοκινήτων με κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η αύξηση αυτή, έχει ολέθριες συνέπειες τόσο στο περιβάλλον, όσο και στους ζωντανούς οργανισμούς. Αρχικά, τα καυσαέρια που προκύπτουν από την μαζική και επεκταμένη αυτή χρήση, συμβάλουν στην επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου και κατ'επέκταση οδηγούν σε μια μεγάλη κλιματική αλλαγή με ολοένα και θερμότερο κλίμα. Επίσης, οι επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων και γενικά των ζωντανών οργανισμών είναι εξίσου σημαντικές. Πρώτα απ' όλα η εισπνοή αυτού του κοκτέιλ των βλαβερών αερίων που παράγονται από τους κινητήρες αυτούς, οδηγεί σε πολλά αναπνευστικά προβλήματα. Ακόμα, προκύπτουν σημαντικά ζητήματα στα οικοσυστήματα και στις πόλεις από τον θόρυβο που παράγουν οι κινητήρες εσωτερικής καύσης. Αξίζει ακόμα να αναφερθεί ότι τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν μειωθεί δραματικά τα διαθέσιμα ενεργειακά αποθέματα πετρελαίου.

Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι η στροφή σε μία πιο φιλική προς το περιβάλλον και την υγεία μας μορφή ενέργειας είναι απαραίτητη. Μια τέτοια μορφή είναι και η ηλεκτρική ενέργεια, η οποία μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Τα τελευταία χρόνια έχει ξεκινήσει ένα παγκόσμιο κύμα με σκοπό την αντικατάσταση των συμβατικών αυτοκινήτων από καινούργια με ηλεκτροκίνητες και μπαταρίες. Η αλλαγή αυτή θα βοηθήσει πολύ στην εξάλειψη των προβλημάτων που αναφερθήκαν προηγουμένως. Με βάση την παραπάνω λογική η τεχνογνωσία πάνω στους ηλεκτροκίνητες και την ηλεκτροκίνηση αναπτύσσεται ολοένα και περισσότερο. Τόσο τα αυτοκίνητα όσο και οι μπαταρίες τους, γίνονται όλο και πιο αποδοτικές.

Στην εργασία αυτή, ασχοληθήκαμε με την μοντελοποίηση ενός στόλου ηλεκτρικών οχημάτων και την προσομοίωση της διαδικασίας φόρτισής τους ως ισοδύναμη μπαταρία. Πιο συγκεκριμένα, σκοπός της διπλωματικής αυτής ήταν η εύρεση του βέλτιστου τρόπου φόρτισης του παραπάνω στόλου με βάση το κόστος. Τα ΗΟ, είχαν την δυνατότητα, εκτός από το να παίρνουν ενέργεια από το δίκτυο (G2V), να προσφέρουν και προς αυτό (V2G). Η προσομοίωση της φόρτισης των ΗΟ έγινε με δύο τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι αντιμετωπίζοντας τον στόλο ως ένα άθροισμα μονομερών φορτιστών. Πιο συγκεκριμένα εστιάζουμε στην λειτουργία κάθε φορτιστή και προσομοιώνουμε την λειτουργία του. Αφού το κάνουμε αυτό, στο τέλος αθροίζουμε τις προσομοιώσεις όλων των φορτιστών και προκύπτει το τελικό αποτέλεσμα. Ο δεύτερος τρόπος είναι αντιμετωπίζοντας το σύνολο των φορτιστών ως έναν ισοδύναμο φορτιστή που θα συνδυάζει τις λειτουργίες όλων. Έτσι, θα προκύψει η συγκεντρωτική προσομοίωση φόρτισης του στόλου των ΗΟ. Είναι δηλαδή φανερό ότι θα έχουμε δύο διαφορετικά αποτελέσματα, ένα για κάθε τρόπο προσομοίωσης. Στο τέλος της εργασίας, συγκρίνουμε τους δύο αυτούς τρόπους προσομοίωσης, αλλάζοντας κάθε φορά και σημαντικές μεταβλητές (πχ αριθμός ΗΟ, ποσοστό χρήσης V2G), με στόχο να καταλήξουμε στον καλύτερο τρόπο αντιμετώπισης της φόρτισης ενός στόλου ΗΟ. Τα δεδομένα όλης της διπλωματικής, στα οποία βασιστήκαμε για την μοντελοποίηση, είναι βασισμένα σε ρεαλιστικά μοντέλα. Έτσι και τα αποτελέσματα έχουν πλήρη απήχηση στην πραγματικότητα.

Abstract

In recent years, we have increasingly experienced the rapid expansion of cars with internal combustion engines. This increase has disastrous consequences for both the environment and living organisms. Firstly, the exhaust gases resulting from this massive and extensive use contribute to the worsening of the greenhouse effect, and consequently, lead to significant climate change with increasingly warmer climates. Additionally, the impacts on human health and living organisms, in general, are equally significant. First of all, inhaling this cocktail of harmful gases produced by these engines leads to many respiratory problems. Moreover, significant issues arise in ecosystems and cities due to the noise produced by internal combustion engines. It is also worth mentioning that in recent decades, the available petroleum energy reserves have dramatically decreased.

We thus understand that a shift towards a more environmentally friendly and health-conscious form of energy is essential. One such form is electric energy, which can be generated from renewable energy sources. In recent years, a global movement has begun to replace conventional cars with new ones that have electric motors and batteries. This change will greatly help eliminate the aforementioned problems. Based on this logic, expertise in electric motors and electric propulsion is increasingly developing. Both cars and their batteries are becoming more efficient.

In this project, we dealt with the modeling of a fleet of electric vehicles and the simulation of their charging process as an equivalent battery. More specifically, the purpose of this thesis was to find the optimal way to charge the above fleet based on cost. The EVs had the ability, apart from drawing energy from the grid (G2V), to also offer energy back to it (V2G). The charging simulation of the EVs was conducted in two ways. The first way is by treating the fleet as a sum of individual chargers. Specifically, we focus on the operation of each charger and simulate its operation. After doing this, we sum the simulations of all chargers to obtain the final result. The second way is by treating the whole set of chargers as an equivalent charger that combines the functions of all. Thus, a cumulative charging simulation of the fleet of EVs will result. It is evident that we will have two different results, one for each simulation method.

At the end of the project, we compared these two simulation methods, changing significant variables each time (e.g. the number of EVs, the percentage of V2G usage), aiming to determine the best way to handle the charging of a fleet of EVs. The data for the entire thesis, which we relied on for the modeling, is based on realistic models. Thus, the results have full resonance with reality.

Περιεχόμενα

1	Θεωρητική ανάλυση	11
1.1	Παγκόσμια τάση χρήσης ΗΟ	12
1.2	Πλεονεκτήματα ΗΟ	12
1.3	Μειονεκτήματα ΗΟ	13
1.4	Είδη Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων	14
1.5	Τρόποι φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων	17
1.6	Είδη συσσωρευτών ηλεκτρικών οχημάτων	19
1.7	Είδη φορτιστών ανάλογα με την τοποθεσία τους	22
1.8	Τύποι βυσμάτων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων	23
1.9	Τεχνολογία Vehicle to Grid (V2G)	25
2	Περιγραφή αλγορίθμου	28
3	Δεδομένα	30
3.1	Χρόνοι άφιξης και παραμονής των ηλεκτρικών οχημάτων στους φορτιστές	30
3.2	Τύποι ηλεκτρικών αυτοκινήτων και περιορισμοί φόρτισης	33
3.3	Ανάλυση αλγορίθμου σύνδεσης ΗΟ στους φορτιστές και παραγωγή άνω και κάτω ορίων φόρτισης	35
3.4	Παραγωγή άνω και κάτω ορίων φόρτισης (Eup και Edown, Pmax και Pmin)	36
3.5	Υπολογισμός ορίων συγκεντρωτικού μοντέλου φορτιστών (aggregated)	52
3.6	Προσομοίωση λειτουργίας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ως ισοδύναμο συσσωρευτή	53
3.7	Συνάθροιση όλων των ξεχωριστών προσομοιώσεων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ως ισοδύναμη μπαταρία	53
3.8	Προσομοίωση συγκεντρωτικής λειτουργίας φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων ως ισοδύναμο συσσωρευτή (aggregated)	54
4	Αποτελέσματα μοντελοποίησης	55
4.1	Ρυθμός άφιξης και αναχώρησης του στόλου των ηλεκτρικών αυτοκινήτων	55
4.2	Άνω και κάτω όρια φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά φορτιστή	57
4.3	Προσομοίωση φορτιστή με όλες τις παραπάνω περιπτώσεις διαθέσιμες	61
4.4	Προσομοίωση λειτουργίας φορτιστών σε συγκεντρωτικό επίπεδο (aggregated)	64
4.5	Προσομοίωση λειτουργίας φορτιστών ως άθροισμα των μονομερών προσομοιώσεων φορτιστών	67
4.6	Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών μεθόδων προσομοίωσης	68
4.7	Παρατήρηση της σημασίας του συνολικού αριθμού των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και του ποσοστού χρήσης της λειτουργίας V2G στο τελικό αποτέλεσμα	69

Κατάλογος Πινάκων

1	Σύγκριση τύπων μπαταριών	22
2	Πληροφορίες Ηλεκτρικών Οχημάτων	34
3	Περιορισμοί φόρτισης ανά τοποθεσία φορτιστή	34
4	Αποτελέσματα προσομοίωσης φόρτισης 4500 ηλεκτρικών αυτοκινήτων	69
5	Αποτελέσματα προσομοίωσης φόρτισης 1500 ηλεκτρικών αυτοκινήτων	70
6	Αποτελέσματα προσομοίωσης φόρτισης 300 ηλεκτρικών αυτοκινήτων	70

Κατάλογος Σχημάτων

1	Ηλεκτρικό όχημα 19ου αιώνα (Thomas Parker's EV)	11
2	Σημερινή μορφή ηλεκτρικού αυτοκινήτου	12
3	Συμβατικό ή ηλεκτρικό αυτοκίνητο	14
4	Ηλεκτρικό αυτοκίνητο με μπαταρία	15
5	Υβριδικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο	16
6	Υβριδικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο με δυνατότητα εξωτερικής φόρτισης	16
7	Ηλεκτρικό αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου	17
8	Αργή φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος με απευθείας σύνδεση σε ρευματοδότη	18
9	Αργή φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος με σύνδεση σε ρευματοδότη με παρεμβολή συστήματος προστασίας και επικοινωνίας. . . .	18
10	Φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος με εγκατεστημένο σύστημα ελέγχου και προστασίας.	19
11	Γρήγορη φόρτιση συνεχούς ρεύματος	19
12	Μπαταρίες Μολύβδου - Οξέος	20
13	Μπαταρίες Υδρίδιου νικελίου - μετάλλου	20
14	Μπαταρίες τύπου ZEBRA	21
15	Μπαταρίες Ιόντων - Λιθίου	21
16	Υπερπυκνωτές	22
17	Βύσμα φόρτισης τύπου 1	23
18	Βύσμα φόρτισης τύπου 2	24
19	Βύσμα φόρτισης τύπου CHAdemo	24
20	Βύσματα συνδιαστικού τρόπου φόρτισης τύπου 1 και 2	25
21	V2G τεχνολογία	25
22	Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ηλεκτρικά οχήματα	26
23	Κατανομή πιθανοτήτων ωρών άφιξης στο περιβάλλον εργασίας . . .	30
24	Κατανομή πιθανοτήτων ωρών παραμονής στο περιβάλλον εργασίας	31
25	Κατανομή πιθανοτήτων ωρών άφιξης στο οικιακό περιβάλλον . . .	31
26	Κατανομή πιθανοτήτων ωρών παραμονής στο οικιακό περιβάλλον .	32
27	Κατανομή πιθανοτήτων ωρών άφιξης σε δημόσιους χώρους	33
28	Κατανομή πιθανοτήτων ωρών παραμονής σε δημόσιους χώρους . .	33
29	Πιθανότητα φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος	35
30	Άνω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (V2G and G2V)	37
31	Άνω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (V2G and G2V)	38

32	Άνω όριο ενέργειας - 3η περίπτωση (V2G and G2V)	38
33	Οριακή συνθήκη για το άνω όριο ενέργειας - Σημείο τομής $E_1(t)$ και $E_2(t)$	39
34	Σημεία τομής του άνω ορίου ενέργειας E_{up} και του E_{max}	40
35	Κάτω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (V2G and G2V)	41
36	Κάτω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (V2G and G2V)	42
37	Κάτω όριο ενέργειας - 3η περίπτωση (V2G and G2V)	43
38	Οριακή συνθήκη για το άνω όριο ενέργειας - Σημείο τομής $E_1(t)$ και $E_2(t)$	43
39	Σημεία τομής του κάτω ορίου ενέργειας E_{down} και του E_{min}	45
40	Άνω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (Μόνο G2V)	46
41	Άνω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (Μόνο G2V)	46
42	Κάτω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (Μόνο G2V)	47
43	Κάτω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (Μόνο G2V)	48
44	Άνω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (Ανόητη φόρτιση)	48
45	Άνω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (Ανόητη φόρτιση)	49
46	Κάτω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (Ανόητη φόρτιση)	50
47	Κάτω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (Ανόητη φόρτιση)	50
48	Διάγραμμα ροής	51
49	Όρες άφιξης στο οικιακό περιβάλλον	55
50	Όρες παραμονής στο οικιακό περιβάλλον	55
51	Όρες άφιξης στο περιβάλλον εργασίας	56
52	Όρες παραμονής στο περιβάλλον εργασίας	56
53	Όρες άφιξης σε δημόσιους χώρους	57
54	Όρες παραμονής σε δημόσιους χώρους	57
55	Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης για τον φορτιστή 1 (G2V and V2G)	58
56	Άνω και κάτω όρια ισχύος φόρτισης για τον φορτιστή 1 (G2V and V2G)	59
57	Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Μόνο G2V)	59
58	Άνω και κάτω όρια ισχύος φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Μόνο G2V)	60
59	Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Ανόητος τρόπος)	60
60	Άνω και κάτω όρια ισχύος φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Ανόητος τρόπος)	61
61	Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)	62
62	Άνω και κάτω όρια ισχύος φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)	62
63	Προσομοίωση λειτουργίας του φορτιστή 1 ως ισοδύναμη μπαταρία (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)	63
64	Προσομοίωση λειτουργίας του φορτιστή 1 ως ισοδύναμη μπαταρία εστιάζοντας μόνο στο δεύτερο 24ωρο (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσι- μες)	64

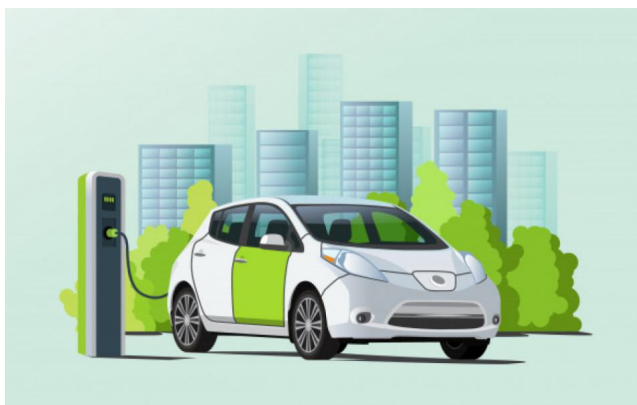
65	Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης σε συγκεντρωτικό επίπεδο (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)	65
66	Άνω και κάτω όρια ισχύος φόρτισης σε συγκεντρωτικό επίπεδο (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)	65
67	SOC offset	66
68	Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης επηρεασμένα από το SOC offset σε συγκεντρωτικό επίπεδο (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)	66
69	Προσομοίωση λειτουργίας συγκεντρωτικού επιπέδου ως ισοδύναμη μπαταρία (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)	67
70	Αθροιστική προσομοίωση λειτουργίας φορτιστών ως ισοδύναμη μπα- ταρία (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)	68
71	Σύγκριση συγκεντρωτικής και αθροιστικής προσομοίωσης λειτουρ- γίας όλων των φορτιστών	68

1 Θεωρητική ανάλυση

Ηλεκτρικά οχήματα(ΗΟ), είναι τα οχήματα, τα οποία χρησιμοποιούν ως κύρια πηγή ενέργειας την αποθηκευμένη στις επαναφορτιζόμενες μπαταρίες τους, ηλεκτρική ενέργεια. Σε αντίθεση με τα αυτοκίνητα εσωτερικής καύσης, χρησιμοποιούν τουλάχιστον έναν ηλεκτροκινητήρα για την κίνησή τους. Τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα κατασκευάστηκαν τον 19ο αιώνα. Ωστόσο, λόγω του μεγάλου όγκου σε σχέση με την αποθηκευμένη ενέργεια των συσσωρευτών, της χαμηλής τους αυτονομίας και της μεγάλης τεχνολογικής εξέλιξης των μηχανών εσωτερικής καύσης σε σχέση με των ηλεκτροκινητήρων-μπαταριών εκείνης της περιόδου σε συνδυασμό με το χαμηλότερο κόστος παραγωγής τους, οδήγησαν σε ένα “μονοπώλιο” των οχημάτων εσωτερικής καύσης. Η μαζική χρήση των συμβατικών οχημάτων εσωτερικής καύσης όλων αυτών των χρόνων, είχε σαν αποτέλεσμα την επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς το κύριο απόβλητο των θερμικών μηχανών είναι το αέριο του θερμοκηπίου (CO_2). Επίσης συνέβαλε στην παγκόσμια ενεργειακή κρίση, καθώς τα ενεργειακά αποθέματα ορυκτών καυσίμων, έχουν μειωθεί δραματικά. Τόσο η οικολογική, όσο και η ενεργειακή αυτή κρίση, έχουν σαν αποτέλεσμα τον 21ο αιώνα να θεσπιστούν νόμοι και οι αυτοκινητοβιομηχανίες να κάνουν στροφή στα ΗΟ, τα οποία χάρη στην μεγάλη μελέτη που έχει γίνει πάνω τους, έχουν πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα θερμικού κινητήρα. Αξίζει να αναφερθεί ακόμα, ότι για να χαρακτηριστούν τα ΗΟ φιλικά προς το περιβάλλον, θα πρέπει η ηλεκτρική τους ενέργεια να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) και όχι από εργοστάσια που καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα και αφήνουν έντονα το αποτύπωμά τους με τα βλαβερά καυσαέρια που παράγουν.



Σχήμα 1: Ηλεκτρικό όχημα 19ου αιώνα (Thomas Parker's EV)



Σχήμα 2: Σημερινή μορφή ηλεκτρικού αυτοκινήτου

1.1 Παγκόσμια τάση χρήσης ΗΟ

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται παγκοσμίως το φαινόμενο της στροφής προς την ηλεκτροκίνηση. Τόσο οι χώρες, όσο και οι βιομηχανίες, προωθούν συνεχώς την χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας για την κίνηση, καθώς θέλουν μία πιο φιλική προς το περιβάλλον μορφή ενέργειας. Η τάση αυτή αναμένεται να γίνει ακόμα πιο έντονη τα επόμενα χρόνια, καθώς γίνονται όλο και περισσότερα βήματα προς την κατεύθυνση αυτή. Αναλυτικότερα, πολλές χώρες επιδοτούν τους πολίτες για την αγορά νέου ΗΟ. Ακόμα, πολλές πολιτείες αναπτύσσουν συνεχώς το δίκτυο φόρτισης των οχημάτων αυτών τόσο σε δημόσιους, όσο και σε ιδιωτικούς χώρους. Επίσης, οι βιομηχανίες από την μεριά τους, επενδύουν σε έρευνες, προκειμένου να βελτιστοποιήσουν τους συσσωρευτές και τον ηλεκτροκινητήρα των ΗΟ, με αποτέλεσμα αυτά να γίνονται όλο και πιο οικονομικά και αποδοτικά ταυτοχρόνως.

1.2 Πλεονεκτήματα ΗΟ

Τα πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, σε σχέση με τα συμβατικά, είναι αρκετά και παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αρχικά το πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι είναι φιλικότερα προς το περιβάλλον καθώς δεν παράγουν τα βλαβερά καυσαέρια που εξάγουν τα οχήματα εσωτερικής καύσης (πχ CO_2). Τα καυσαέρια αυτά είναι επιβλαβή τόσο για το περιβάλλον, καθώς συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όσο και για τους ζωντανούς οργανισμούς, καθώς δημιουργούν πολλά αναπνευστικά προβλήματα.
- Ένα ΗΟ κινείται πιο οικονομικά από ένα συμβατικό, καθώς η αξία της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για μια απόσταση είναι σημαντικά μικρότερη από την αντίστοιχη αξία του καυσίμου. Σε αυτό βοηθάει και το γεγονός ότι

οι ηλεκτροκινητήρες είναι πολύ πιο αποδοτικοί από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Πιο συγκεκριμένα στα ΗΟ αξιοποιείται μεγαλύτερο ποσοστό της αποθηκευμένης ενέργειας (πάνω από 90%) συγκριτικά με τα παραδοσιακά αυτοκίνητα που έχουν απώλειες της τάξης του 55%. Επίσης, στα ΗΟ η ισχύς του κινητήρα παραδίδεται στους τροχούς άμεσα με αποτέλεσμα η επιτάχυνσή τους να είναι πολλή καλύτερη. Άρα, τα ΗΟ είναι πιο αποδοτικά.

- Ένα ΗΟ έχει πολύ λιγότερα μηχανικά μέρη σε σχέση με ένα παραδοσιακό όχημα, με αποτέλεσμα οι φθορές σε βάθος χρόνου να είναι ελάχιστες. Αυτό βοηθάει την τσέπη του καταναλωτή, ο οποίος δεν θα χαλάει πολλά λεφτά για την συντήρηση του αυτοκινήτου. Επίσης, έχει λιγότερα κινούμενα μέρη, έτσι έχει και μικρότερη πιθανότητα να παρουσιάσει βλάβη και να προκαλέσει κάποιο ατύχημα.
- Ένας ηλεκτροκινητήρας είναι ανόρυβος σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες. Αυτό θα συμβάλει στην μείωση του προβλήματος της ηχορύπανσης. Έτσι, τόσο οι άνθρωποι στις μεγαλουπόλεις, όσο και οι διάφοροι ζωντανοί οργανισμοί στα οικοσυστήματα δεν θα ενοχλούνται από το φαινόμενο αυτό.
- Ένα ΗΟ προσφέρει μια καλύτερη οδηγική εμπειρία στον χρήστη, καθώς έχει πολλή μεγαλύτερη ροπή και επιτάχυνση σε σχέση με ένα συμβατικό. Επίσης, αυτή η άμεση ανταπόκριση γκαζιού συμβάλλει σε μία πιο ασφαλής οδήγηση επειδή ο οδηγός θα μπορεί να αποφύγει άμεσα σε συγκεκριμένες περιπτώσεις πιθανούς κινδύνους.
- Τέλος, ένα ΗΟ ανεφοδιάζεται πιο εύκολα από ένα παραδοσιακό όχημα, καθώς μπορεί να συνδεθεί σε οποιαδήποτε παροχή ρεύματος, σε αντίθεση με τα συμβατικά, τα οποία ανεφοδιάζονται μόνο σε πρατήρια καυσίμων.

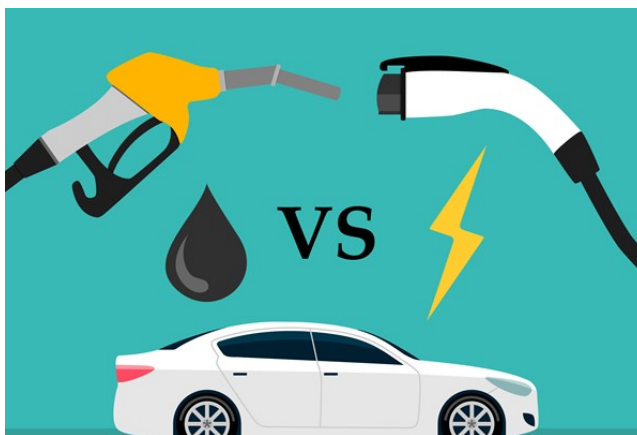
1.3 Μειονεκτήματα ΗΟ

Τα μειονεκτήματα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, σε σχέση με τα συμβατικά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Αρχικά, ένα σημαντικό μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι η τεχνολογία των ΗΟ δεν έχει προχωρήσει ακόμα αρκετά, με αποτέλεσμα η αυτονομία τους να είναι μικρότερη σε σχέση με αυτήν των παραδοσιακών αυτοκινήτων.
- Ένα ακόμα σημαντικό μειονέκτημα είναι το γεγονός ότι ο χρόνος φόρτισης ενός ΗΟ είναι πολύ μεγαλύτερος συγκριτικά με τον απαιτούμενο χρόνο πλήρους ανεφοδιασμού ενός παραδοσιακού αυτοκινήτου.
- Σε ορισμένες περιοχές οι υποδομές δημόσιας φόρτισης των ΗΟ είναι περιορισμένη, με αποτέλεσμα οι οδηγοί να αντιμετωπίζουν πρόβλημα με την γρήγορη επαναφόρτισή τους.
- Το κόστος απόκτησης ενός ΗΟ είναι μεγαλύτερο σε σχέση με αυτό ενός συμβατικού οχήματος. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια πολλά κράτη επιδοτούν

την απόκτηση ενός ΗΟ, βοηθώντας οικονομικά τους πολίτες στην απόκτησή του.

- Η υγεία της μπαταρίας μειώνεται σημαντικά με την πάροδο του χρόνου, με αποτέλεσμα, το ΗΟ να έχει όλο και μικρότερη αυτονομία. Ακόμα το σενάριο αντικατάστασης της μπαταρίας είναι σχεδόν απαγορευτικό, εξαιτίας του πολύ αυξημένου κόστους της.
- Η περιορισμένη διάρκεια ζωής των μπαταριών δημιουργεί ένα σημαντικό πρόβλημα όσον αφορά την απόρριψή τους, καθώς αποτελούν χημικά απόβλητα και θέλουν ιδιαίτερη μεταχείριση. Επίσης, η κατασκευή των συσσωρευτών απαιτεί την εξόρυξη σπάνιων μετάλλων, με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα νέο περιβαλλοντικό ζήτημα. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί ότι γίνονται συνεχείς έρευνες για την ανακύκλωση των μπαταριών αυτών, έτσι ώστε να μειωθεί πολύ το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα.



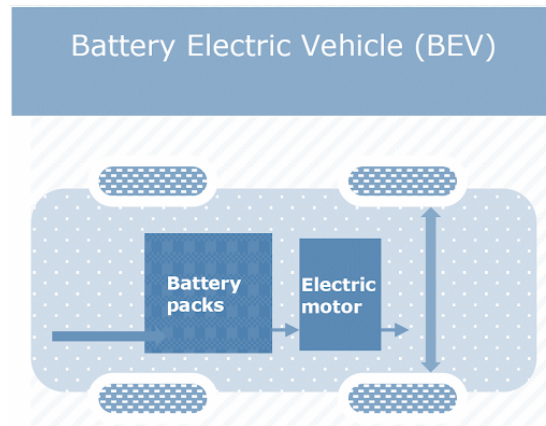
Σχήμα 3: Συμβατικό ή ηλεκτρικό αυτοκίνητο.

1.4 Είδη Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, τα ΗΟ χρησιμοποιούν τουλάχιστον έναν ηλεκτροκινητήρα για την κίνησή τους, ξοδεύοντας την αποθηκευμένη ενέργεια που βρίσκεται στους συσσωρευτές τους. Ωστόσο, υπάρχουν διάφορα είδη ΗΟ τα οποία θα αναλυθούν παρακάτω:

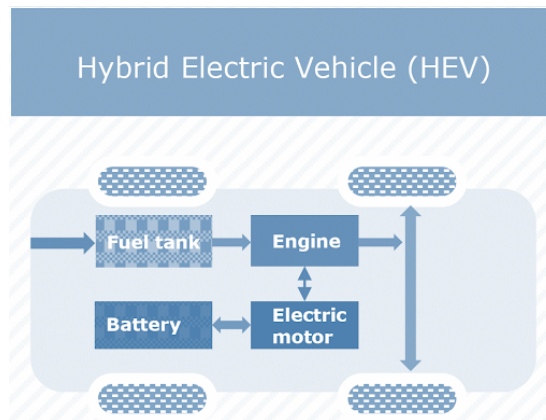
- Ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μπαταρία (Battery Electric Vehicles – BEVs)
Τα αυτοκίνητα αυτής της κατηγορίας, διαφέρουν από τα συμβατικά αμάξια στο γεγονός ότι αντί για έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης, έχουν έναν ηλεκτροκινητήρα. Η πηγή ενέργειας των οχημάτων αυτών είναι ένας συσσωρευτής, ο οποίος φορτίζεται από το ηλεκτρικό δίκτυο και τροφοδοτεί τον ηλεκτροκινητήρα. Η κίνηση σε αυτά τα αυτοκίνητα βασίζεται απολύτως στην

ηλεκτρική ενέργεια και είναι απαραίτητη η τακτική φόρτισή τους. Έχουν μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα και πολύ χαμηλό κόστος συντήρησης, καθώς απουσιάζουν τα πολλά κινούμενα μηχανικά μέρη των συμβατικών αυτοκινήτων.



Σχήμα 4: Ηλεκτρικό αυτοκίνητο με μπαταρία

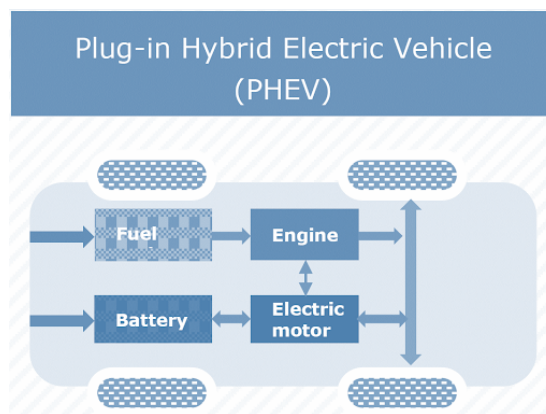
- Υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα (Hybrid Electric Vehicles – HEVs)
Τα αυτοκίνητα αυτής της κατηγορίας, συνδυάζουν για την κίνησή τους έναν ηλεκτροκινητήρα και έναν κινητήρα εσωτερικής καύσης (ΚΕΚ). Πηγές ενέργειας αποτελούν τόσο τα καύσιμα που είναι αποθηκευμένα στο ρεζερβουάρ του αυτοκινήτου, όσο και η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στον συσσωρευτή. Η φόρτιση της μπαταρίας γίνεται από τον ΚΕΚ, ο οποίος είναι συνδεδεμένος με τον ηλεκτροκινητήρα. Ακόμα, η μπαταρία φορτίζει κατά την διαδικασία επιβράδυνσης του αμαξίου, στην οποία ο ηλεκτροκινητήρας λειτουργεί σαν γεννήτρια. Η κίνηση σε αυτά τα αυτοκίνητα βασίζεται στον ΚΕΚ, τον οποίο υποβοηθά η λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα. Τα οχήματα αυτά, έχουν χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου σε σχέση με τα συμβατικά, αλλά και καλύτερες επιδόσεις από αυτά, λόγω της συνεισφοράς του ηλεκτροκινητήρα στην κίνησή τους.



Σχήμα 5: Υβριδικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο

- Πλυγ-ιν υβριδικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα (Plug in Hybrid Electric Vehicles – PHEVs)

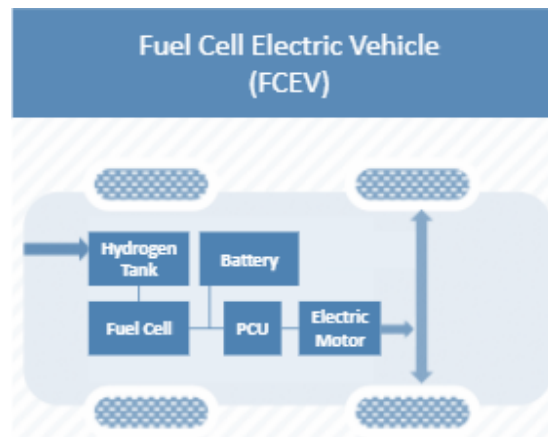
Τα αυτοκίνητα αυτής της κατηγορίας είναι παρόμοια με τα HEVs με την μόνη διαφορά ότι οι συσσωρευτές τους, μπορούν να φορτίζονται και εξωτερικά, με την σύνδεσή τους στο ηλεκτρικό δίκτυο. Διαθέτουν μεγαλύτερες μπαταρίες από την προηγούμενη κατηγορία, με αποτέλεσμα να έχουν και μεγαλύτερη αυτονομία. Σε αυτά τα οχήματα υπάρχει η δυνατότητα της εναλλαγής ανάμεσα στην αποκλειστική ηλεκτροκίνηση και την αποκλειστική χρήση του θερμικού κινητήρα, όποτε αυτό είναι αναγκαίο. Επίσης, είναι εφικτή η ταυτόχρονη χρήση και των δύο κινητήρων.



Σχήμα 6: Υβριδικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο με δυνατότητα εξωτερικής φόρτισης

- Ηλεκτρικά αυτοκίνητα με κυψέλες καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEVs)

Τα αυτοκίνητα αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούν τις κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την λειτουργία του ηλεκτροκινητήρα. Επομένως, η μπαταρία του οχήματος αυτού δεν φορτίζεται από εξωτερικό παράγοντα. Το κύριο καύσιμο είναι το υδρογόνο, το οποίο αποθηκεύεται σε δεξαμενές υπό υψηλή πίεση. Η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης ανάμεσα στο οξυγόνο και το υδρογόνο. Αποτελούν πολύ φιλικά για το περιβάλλον οχήματα, καθώς το μοναδικό απόβλητό τους είναι το νερό σε μορφή υδρατμών.



Σχήμα 7: Ηλεκτρικό αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου

Στην διπλωματική αυτή, θα εστιάσουμε στα είδη αυτοκινήτων τα οποία έχουν την δυνατότητα άμεσης φόρτισης από το ηλεκτρικό δίκτυο μιας πόλης. Πιο συγκεκριμένα, τα είδη αυτά είναι τα BEVs και PHEVs.

1.5 Τρόποι φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Υπάρχουν τρεις βασικοί τρόποι φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, τόσο σε οικιακό, όσο και σε δημόσιο επίπεδο, οι οποίοι έχουν σημαντικές διαφορές και θα αναλυθούν παρακάτω:

- Αργή φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) με απευθείας σύνδεση σε ρευματοδότη.

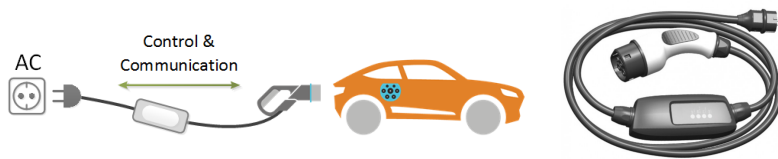
Είναι ο πιο αργός τρόπος φόρτισης, στον οποίο συνδέεται το αμάξι απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο, μέσω ενός απλού ρευματοδότη χαμηλής τάσης. Δεν υπάρχει “επικοινωνία” μεταξύ του αυτοκινήτου και του ηλεκτρικού πίνακα, με αποτέλεσμα, εκτός από την χαμηλή ταχύτητα φόρτισης, να μην προστατεύεται η “υγεία” των ηλεκτρικών εξαρτημάτων του αυτοκινήτων. Αποδίδει

περίπου 2,3 kW ανά ώρα φόρτισης και είναι μια καλή λύση σε περιπτώσεις ανάγκης, όπου δεν είναι δυνατή η φόρτιση με κάποιον άλλο τρόπο.



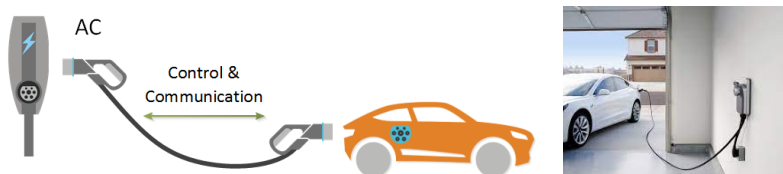
Σχήμα 8: Αργή φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος με απευθείας σύνδεση σε ρευματοδότη

- Αργή φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) με σύνδεση σε ρευματοδότη με παρεμβολή συστήματος προστασίας και επικοινωνίας.
Στην περίπτωση χρήσης αυτού του βύσματος, το αμάξι συνδέεται απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Σε αντίθεση με την προηγούμενη περίπτωση, χρησιμοποιείται ένα καλώδιο το οποίο φέρει πάνω του συστήματα που επιτρέπουν τόσο την επικοινωνία ανάμεσα στο όχημα και το δίκτυο, όσο και την προστασία του αυτοκινήτου.



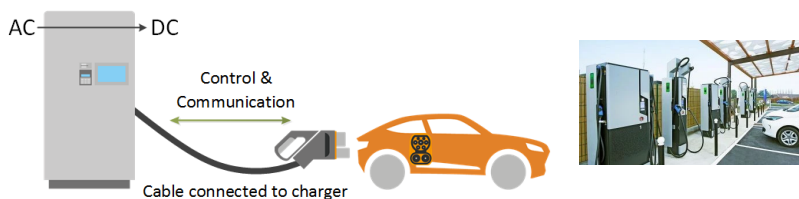
Σχήμα 9: Αργή φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος με σύνδεση σε ρευματοδότη με παρεμβολή συστήματος προστασίας και επικοινωνίας.

- Φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος (AC) με εγκατεστημένο σύστημα ελέγχου και προστασίας.
Μεταξύ του ηλεκτρικού αυτοκινήτου και του ηλεκτρικού δικτύου παρεμβάλλεται ένα σύστημα ελέγχου και προστασίας το οποίο είναι εγκατεστημένο στον τοίχο του σπιτιού ή στο δημόσιο πάρκινγκ. Είναι αρκετά πιο γρήγορος τρόπος φόρτισης σε σχέση με τον πρώτο, και αποδίδει έως 22 kW ανά ώρα φόρτισης. Αυτή η μέθοδος φόρτισης, απαιτεί την προεγκατάσταση του συστήματος ελέγχου από εξειδικευμένο ηλεκτρολόγο και ενδεικνύεται για έξυπνα δίκτυα.



Σχήμα 10: Φόρτιση εναλλασσόμενου ρεύματος με εγκατεστημένο σύστημα ελέγχου και προστασίας.

- Ακαριαία φόρτιση συνεχούς ρεύματος (DC)
Αποτελεί τον πιο γρήγορο τρόπο φόρτισης. Η φόρτιση γίνεται πάρα πολύ γρήγορα, με αποδόσεις που ξεπερνούν τα 100 kW ανά ώρα φόρτισης. Ενδεικνύεται για σύντομες στάσεις των αμαξιών, όπου είναι άμεση η ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας. Οι φορτιστές αυτοί βρίσκονται κυρίως σε δημόσια πάρκινγκ και επιτρέπουν την “επικοινωνία” μεταξύ αυτοκινήτου και δικτύου. Ωστόσο η συχνή φόρτιση με συνεχές ρεύμα, μπορεί να βλάψει την μακροπρόθεσμη υγεία της μπαταρίας του οχήματος.

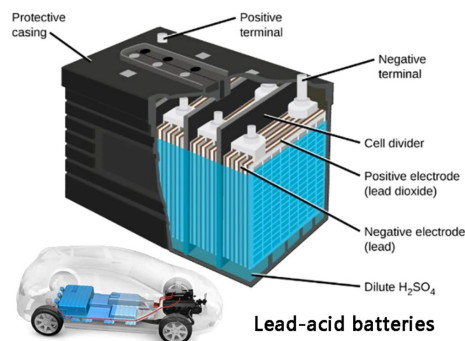


Σχήμα 11: Γρήγορη φόρτιση συνεχούς ρεύματος

1.6 Είδη συσσωρευτών ηλεκτρικών οχημάτων

Οι βασικές κατηγορίες των συσσωρευτών που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά οχήματα είναι οι εξής:

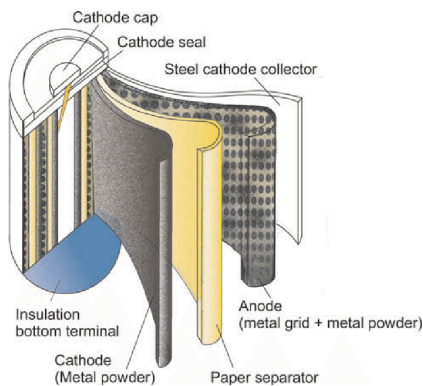
- Μπαταρίες Μολύβδου - Οξέος (Lead - Acid)
Αποτελούν το παλαιότερο και το οικονομικότερο είδος μπαταρίας. Είναι βαριές μπαταρίες συγκριτικά με την ενέργεια που αποθηκεύουν, με αναλογία 30-50 Wh/kg. Η απόδοσή τους και η χωρητικότητά τους επηρεάζεται σημαντικά από τις χαμηλές θερμοκρασίες. Η απόδοσή τους είναι περίπου 70-85%, ενώ στις χαμηλές θερμοκρασίες μπορεί να φτάσει το 40%. Επίσης, οι βαθιές και απότομες εκφορτίσεις μειώνουν δραστικά την διάρκεια ζωής της, η οποία κυμαίνεται στα 3-4 χρόνια.



Σχήμα 12: Μπαταρίες Μολύβδου - Οξέος

- Μπαταρίες Υδρίδιου νικελίου - μετάλλου (Nickel-metal hydride)

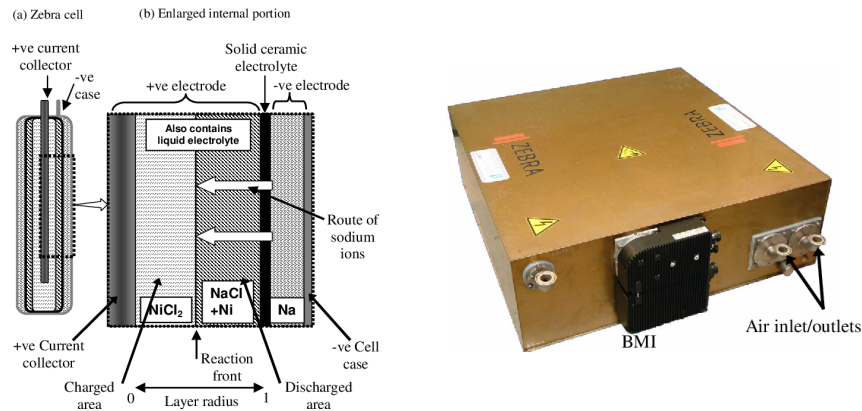
Η απόδοση αυτού του είδους είναι χαμηλότερη από αυτήν των μπαταριών μολύβδου - οξέος και κυμαίνεται γύρω στο 60-70%. Ταυτόχρονα η αναλογία ενέργειας προς βάρος (30-80 Wh/kg) είναι λίγο καλύτερη από την προηγούμενη. Ακόμα, έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής (160000km++) , αλλά και μεγάλο βαθμό αυτοεκφόρτισης. Τέλος, η απόδοσή τους και η χωρητικότητά τους επηρεάζεται σημαντικά από τις χαμηλές θερμοκρασίες.



Σχήμα 13: Μπαταρίες Υδρίδιου νικελίου - μετάλλου

- Μπαταρίες τύπου ZEBRA

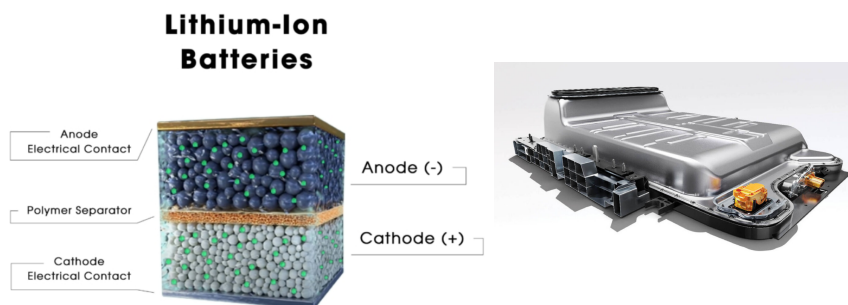
Η αναλογία ενέργειας προς βάρος αυτού του είδους είναι καλή και πιο συγκεκριμένα κυμαίνεται στο 90-120 Wh/kg . Η διάρκεια ζωής τους είναι μεγάλη (χιλιάδες κύκλους φόρτισης) και είναι μη τοξικές για το περιβάλλον. Ωστόσο, η υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται κατά την λειτουργία τους ($270^{\circ}C$) τις καθιστούν επικίνδυνες για την δημιουργία πυρκαγιάς.



Σχήμα 14: Μπαταρίες τύπου ZEBRA

- Μπαταρίες Ιόντων - Λιθίου (Lithium-ion)

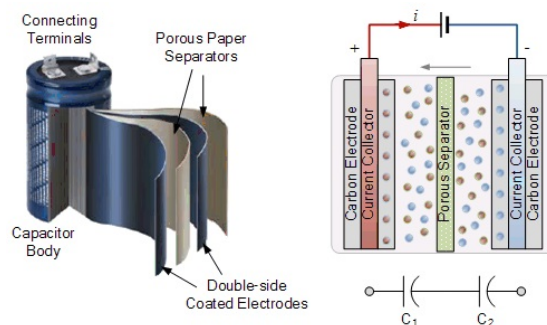
Είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος μπαταρίας ηλεκτρικών οχημάτων. Ο ίδιος τύπος μπαταρίας χρησιμοποιείται και σε πολλές ηλεκτρικές συσκευές της καθημερινότητάς μας (π.χ. φορητός υπολογιστής, κινητό τηλέφωνο). Η αναλογία ενέργειας προς βάρος αυτού του είδους είναι πάρα πολύ καλή και πιο συγκεκριμένα κυμαίνεται στο 200-300 Wh/kg. Τα σύγχρονα ΗΟ χρησιμοποιούν νέες τεχνολογίες στις μπαταρίες ιόντων - λιθίου, με αποτέλεσμα να έχουν μεγάλη διάρκεια ζωής, η οποία σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει τους 4500 κύκλους φόρτισης. Τα χαρακτηριστικά της αυτά, την καθιστούν δικαίως νούμερο ένα επιλογή στα ηλεκτρικά οχήματα της εποχής μας.



Σχήμα 15: Μπαταρίες Ιόντων - Λιθίου

- Υπερπυκνωτές (Ultracapacitors)

Δεν αποτελούν την κύρια πηγή ενέργειας ενός ΗΟ αλλά χρησιμοποιούνται ως δευτερεύουσες συσκευές αποθήκευσης και βοηθούν στην εξισορρόπηση του φορτίου των συστοιχιών μπαταριών ιόντων λιθίου. Οι υπερπυκνωτές δίνουν επίσης στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μια επιπλέον ώθηση ισχύος κατά την επιτάχυνση.



Σχήμα 16: Υπερπυκνωτές

Για λόγους ευκολίας και άμεσης σύγκρισης, στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται τα βασικά χαρακτηριστικά των τύπων συσσωρευτών που αναφέρθηκαν προηγουμένως.

	Μολύβδου - Οξέος	Υδρίδιου νικελίου - μετάλλου	Zebra	Ιόντων - Λιθίου
Ειδική ενεργειακή πυκνότητα (Wh/kg)	30 - 50	30 - 80	90 - 120	200 - 300
Κύκλους ζωής	500 - 1000	2000	2500 - 4500	2500 - 4500
Αυτοεκφόρτιση (% ανά μήνα)	4	20 - 30	1	5
Διακύμανση θερμοκρασίας (°C)	-20 - 50	-20 - 45	270 - 350	-20 - 60
Αποδοτικότητα (%)	70 - 85	70	80	99
Κόστος (\$/kWh)	107	323	592 - 807	150

Πίνακας 1: Σύγκριση τύπων μπαταριών

1.7 Είδη φορτιστών ανάλογα με την τοποθεσία τους

Ανάλογα με την τοποθεσία τους, οι φορτιστές χωρίζονται σε 3 βασικές κατηγορίες ως εξής:

- Φορτιστές στο οικιακό περιβάλλον (Home chargers)
Οι φορτιστές αυτού του είδους, μπορούν εύκολα να εγκατασταθούν σε οποιοδήποτε σπίτι. Η ταχύτητά τους συμβιβάζεται με τους περιορισμούς που θέτει η εγκατάσταση του σπιτιού. Αυτός είναι και ο λόγος που η οικιακή φόρτιση αποτελεί έναν αργό τρόπο φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος. Οι περισσότεροι χρήστες, επιλέγουν αυτόν τον τρόπο φόρτισης τόσο τις μεσημεριανές, όσο και τις βραδινές ώρες, τις οποίες γυρνάνε στο σπίτι τους και παρκάρουν τα οχήματά τους για αρκετές ώρες.

- Φορτιστές στο περιβάλλον εργασίας (Work chargers)
Οι φορτιστές αυτού του είδους, βρίσκονται σε οποιοδήποτε περιβάλλον εργασίας, το οποίο συγκεντρώνει πολλούς εργαζόμενους. Στην προσπάθειά τους να περιορίσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και να διευκολύνουν τους εργαζόμενούς τους που οδηγούν ηλεκτρικά οχήματα, ολοένα και περισσότερες εταιρείες, τοποθετούν φορτιστές στις εγκαταστάσεις τους. Οι ταχύτητες φόρτισης είναι σημαντικά μεγαλύτερες από αυτές των οικιακών φορτιστών, καθώς η ηλεκτρική παροχή των εταιρειών είναι πιο ισχυρή. Οι χρήστες επιλέγουν τον συγκεκριμένο τρόπο φόρτισης τις ώρες εργασίας τους.
- Φορτιστές σε δημόσιους χώρους (Social chargers)
Οι φορτιστές αυτού του είδους, βρίσκονται σε δημόσιους χώρους και είναι προσιτοί από όλους. Παρέχουν δυνατότητες υπερταχείας φόρτισης, καθώς οι περισσότεροι τροφοδοτούνται από συνεχές ρεύμα. Το κόστος ανά κιλοβατώρα είναι αυξημένο σε σχέση με το αντίστοιχο των οικιακών ή αυτών σε περιβάλλον εργασίας, και ποικίλλει λόγω των διαφορετικών επιχειρηματικών μοντέλων. Οι χρήστες επιλέγουν τον συγκεκριμένο τρόπο φόρτισης όταν βρίσκονται έξω για την εκπλήρωση των υποχρεώσεών τους (π.χ. ψώνια, αθλητικές δραστηριότητες, διασκέδαση).

1.8 Τύποι βυσμάτων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων

Τα κύρια βύσματα φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων είναι τα εξής:

- Type 1
Χρησιμοποιείται κυρίως στην βόρεια Αμερική από παλαιότερα μοντέλα ΗΟ. Διαθέτει έναν μονοφασικό σχεδιασμό και το βύσμα του έχει 5 εσοχές. Δύο από αυτές είναι αγωγοί ισχύος εναλλασσόμενου ρεύματος, μια είναι η γείωση και οι υπόλοιπες δυο είναι για λόγους επικοινωνίας ανάμεσα στο όχημα και το δίκτυο. Ταχύτητες φόρτισης από 3,7 έως 22kW. Κατάλληλο για AC φόρτιση.



Σχήμα 17: Βύσμα φόρτισης τύπου 1

- Type 2
Χρησιμοποιείται κυρίως από τα ευρωπαϊκά μοντέλα. Διαθέτει τόσο μονοφασικό όσο και τριφασικό σχεδιασμό και το βύσμα του έχει 7 εσοχές. Τρεις

από αυτές είναι αγωγοί που αντιστοιχούν στις τρεις φάσεις του ηλεκτρικού δικτύου. Μία είναι η εσοχή του ουδέτερου αγωγού, ο οποίος χρησιμοποιείται στην μονοφασική φόρτιση. Μια είναι η γείωση και οι υπόλοιπες δυο είναι για λόγους επικοινωνίας ανάμεσα στο όχημα και το δίκτυο. Ταχύτητες φόρτισης έως 43 kW. Κατάλληλο για AC φόρτιση.



Σχήμα 18: Βύσμα φόρτισης τύπου 2

- CHAdeMO

Χρησιμοποιείται κυρίως από τα ιαπωνικά και κορεάτικα μοντέλα. Ταχύτητες φόρτισης έως 100 kW. Κατάλληλο για DC φόρτιση.



Σχήμα 19: Βύσμα φόρτισης τύπου CHAdeMO

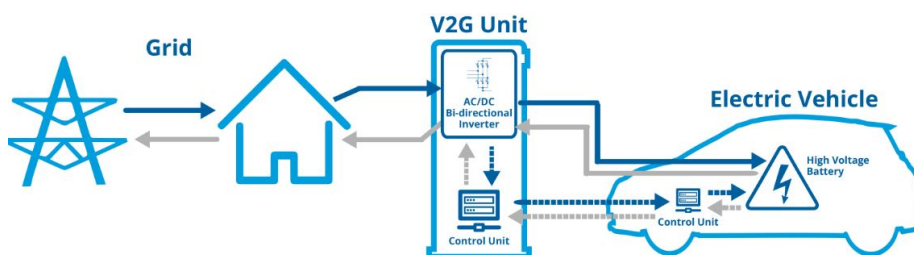
- Combined Charging System (CCS)

Οι πιο δημοφιλείς ακαριαίοι φορτιστές παγκοσμίως είναι αυτής της μορφής. Ενσωματώνουν την δυνατότητα τόσο AC όσο και DC φόρτισης. Ταχύτητες έως 350 kW. Ουσιαστικά είναι οι φορτιστές τύπου 1 και 2 που αναλύθηκαν παραπάνω με μία προσθήκη δυο ακόμα βυσμάτων που επιτρέπουν την DC φόρτιση.



Σχήμα 20: Βύσματα συνδιαστικού τρόπου φόρτισης τύπου 1 και 2

1.9 Τεχνολογία Vehicle to Grid (V2G)



Σχήμα 21: V2G τεχνολογία

Η τεχνολογία V2G επιτρέπει την αμφίδρομη ροή ισχύος, τόσο από το δίκτυο προς το όχημα, όσο και από το όχημα προς το δίκτυο. Με την τεχνολογία αυτή, οι μπαταρίες των ΗΟ μπορούν να φορτίζουν ή να προσφέρουν ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο ανάλογα με τις συνθήκες και τις ανάγκες που επικρατούν, χωρίς ωστόσο να επηρεάζεται η επιθυμητή προγραμματισμένη φόρτιση του κάθε αμαξίου. Προκειμένου να είναι δυνατή αυτή η τεχνολογία, χρειάζονται συγκεκριμένα συστήματα στην εγκατάσταση του φορτιστή. Πιο συγκεκριμένα χρειάζεται ο φορτιστής και τα καλώδια που χρησιμοποιούνται να είναι συμβατά με την τεχνολογία αυτή και να επιτρέπουν την αμφίδρομη ροή ισχύος. Ακόμα, είναι αναγκαστικό να υπάρχει το κατάλληλο πρωτόκολλο επικοινωνίας ανάμεσα στο όχημα και το δίκτυο. Επίσης χρειάζεται ένα λογισμικό το οποίο θα προγραμματίζει την φόρτιση και την εκφόρτιση της μπαταρίας του αμαξίου, λαμβάνοντας υπόψιν την επιθυμητή ενέργεια που επιθυμεί να έχει ο χρήστης του οχήματος μετά από την αποσύνδεση του αυτοκινήτου από τον φορτιστή, τις απαιτήσεις του δικτύου σε ηλεκτρική ενέργεια, την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κάθε χρονική στιγμή κτλ. Συνδυάζοντας όλους αυτούς τους παράγοντες, το λογισμικό θα πρέπει να αποφασίσει τη βέλτιστη ροή ισχύος ανάμεσα στο δίκτυο και το αμάξι.

Για να γίνει πιο κατανοητή η τεχνολογία αυτή, μπορούμε να παρομοιάσουμε ένα σύνολο παρκαρισμένων ηλεκτρικών οχημάτων που είναι συνδεδεμένα με φορτιστές, με έναν μεγάλο συσσωρευτή ενέργειας, ο οποίος θα έχει την δυνατότητα να προσφέρει ισχύ στο δίκτυο, όποτε αυτό είναι αναγκαίο λόγω του υψηλού φορτίου ή λόγω της ανάγκης σταθεροποίησης της συχνότητας ή λόγω της αυξημένης τιμής παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Ακόμα, όπως είναι γνωστό, οι ανανεώσιμες μορ-

φές ενέργειας (όπως είναι η αιολική και η ηλιακή) μπορούν είτε να χρησιμοποιηθούν την ίδια στιγμή που παράγονται (πχ την περίοδο ηλιοφάνειας για τα φωτοβολταϊκά πάνελ), είτε να αποθηκευτούν και να χρησιμοποιηθούν κάποια στιγμή που είναι αναγκαίες. Ο βασικός τρόπος αποθήκευσης της ενέργειας αυτής είναι με την χρήση συσσωρευτών. Ωστόσο για την αποθήκευση τόσο μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας, θα χρειαζόντουσαν τεράστιες μπαταρίες, οι οποίες εκτός από τον μεγάλο όγκο τους, είναι και πολύ ακριβές. Είναι δηλαδή κατανοητή η τεράστια συνεισφορά της V2G τεχνολογίας στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ), καθώς και στην επέκτασή τους. Με την τεχνολογία αυτή τα οχήματα λειτουργούν σαν κινητές μονάδες αποθήκευσης ενέργειας και αθροιστικά η χωρητικότητα των συσσωρευτών τους ισοδυναμεί με αυτήν μιας πολύ μεγάλης μπαταρίας. Μέχρι το 2030, εκτιμάται να υπάρχουν γύρω στα 140-240 εκατομμύρια ηλεκτρικά οχήματα. Αυτό σημαίνει ότι θα έχουμε τουλάχιστον 120 εκατομμύρια μικρές κινητές μπαταρίες, που αθροιστικά με την τεχνολογία V2G, ισοδυναμούν με έναν συσσωρευτή χωρητικότητας 7 TW.



Σχήμα 22: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ηλεκτρικά οχήματα

Είναι φανερό λοιπόν, ότι με την διείσδυση αυτής της τεχνολογίας, θα δημιουργηθεί έφορο έδαφος για την απεξάρτησή μας από την καύση ορυκτών καυσίμων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την στροφή μας στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Εκτός δηλαδή από τους μηδενικούς ρύπους που απελευθερώνουν τα ηλεκτρικά οχήματα, η χρήση τους μπορεί να συμβάλλει στο μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παγκόσμιας βιομηχανίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Με αυτόν τον τρόπο θα βοηθήσουμε το περιβάλλον μας, καθώς θα μειωθούν οι εκπομπές CO_2 , το οποίο οφείλεται για την δημιουργία του φαινομένου του θερμοκηπίου. Η μεγάλη αυτή αποθηκευτική ικανότητα των ηλεκτρικών οχημάτων, μπορεί ακόμα να βοηθήσει στην σταθεροποίηση του ηλεκτρικού δικτύου, παρέχοντας μια πηγή

άμεσης ενέργειας όποτε αυτό κριθεί αναγκαίο. Πιο συγκεκριμένα, με την V2G τεχνολογία, τα οχήματα μπορούν να παρέχουν ισχύ σε περιόδους αιχμής ζήτησης και αυξημένου φορτίου, αποφεύγοντας έτσι το ενδεχόμενο διακοπής ρεύματος. Αξίζει ακόμα να τονιστεί ότι η χρήση του V2G, θα αποτελέσει μια μορφή οικονομικής βοήθειας του κάθε χρήστη ηλεκτρικού οχήματος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι ο χρήστης θα έχει την δυνατότητα να πουλήσει την αποθηκευμένη στο όχημά του ηλεκτρική ενέργεια, διοχετεύοντας την στο δίκτυο. Επίσης σε περιόδους αυξημένης τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος, θα μπορεί να χρησιμοποιεί την ενέργεια του αυτοκινήτου του. Με αυτόν τον τρόπο, ο κάθε χρήστης ηλεκτρικού οχήματος, θα κάνει απόσβεση του αμαξίου του πολύ πιο γρήγορα.

2 Περιγραφή αλγορίθμου

Σκοπός της διπλωματικής αυτής είναι η προσομοίωση της λειτουργίας μεγάλου πλήθους διασυνδεδεμένων με το δίκτυο ηλεκτρικών οχημάτων ως ισοδύναμη μονάδα αποθήκευσης καθώς και η σύγκριση του προγραμματισμού φόρτισης των αυτοκινήτων αυτών, ως ένα ενιαίο σύνολο ή ως καθένα ξεχωριστά. Ο αλγόριθμος παρουσιάζεται συνοπτικά στα παρακάτω βήματα:

1. Ορισμός της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος ανά 15 λεπτά της ώρας για μία μέρα.
2. Αρχικοποίηση των 1500 διαθέσιμων φορτιστών του δικτύου.
3. Καθορισμός του στόλου των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και των ωρών άφιξης και αναχώρησης για κάθε τύπο φόρτισης ξεχωριστά, βασιζόμενοι στις αντίστοιχες κατανομές πιθανότητας.
4. Σύνδεση του κάθε αυτοκινήτου στον πρώτο διαθέσιμο φορτιστή, την στιγμή της άφιξής του στο δίκτυο.
5. Καθορισμός του επιθυμητού SOCtarget του κάθε χρήστη.
6. Προγραμματισμός των άνω και κάτω ορίων φόρτισης (Eup – Edown, Pup – Pdown), σεβόμενοι πάντα τις απαιτήσεις του χρήστη, τους περιορισμούς του κάθε τύπου φορτιστή (work – social – home), αμαξιού (κάθε HO έχει διαφορετικά άνω όρια στην ισχύ φόρτισής του) και της τεχνολογίας φόρτισης (V2G/G2V/dump).
7. Προγραμματισμός της βέλτιστης φόρτισης με κύριο γνώμονα το κόστος κάθε αμαξιού λαμβάνοντας υπόψιν τα όρια φόρτισης και την τιμή ηλεκτρικού ρεύματος κάθε δεκαπεντάλεπτου.
8. Προσομοίωση της λειτουργίας των διασυνδεδεμένων με το δίκτυο ηλεκτρικών οχημάτων ως ισοδύναμη μονάδα αποθήκευσης, τόσο ως ένα ενιαίο σύνολο (aggregated), όσο και ως κάθε μονάδα φορτιστή ξεχωριστά. Η προσομοίωση εστιάζει στο δεύτερο 24ωρο.

Αξίζει να γίνει αναφορά στις τεχνολογίες φόρτισης που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση αυτή. Πιο συγκεκριμένα, οι 3 τρόποι φόρτισης είναι οι εξής: η δυνατότητα χρήσης του V2G, η μη δυνατότητα χρήσης του και ο απλός τρόπος φόρτισης. Στον πρώτο τρόπο, το αυτοκίνητο μπορεί να “παίρνει” και να “δίνει” ενέργεια στο δίκτυο, ανάλογα με την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος. Όταν ο χρόνος παραμονής του αμαξιού είναι τουλάχιστον ίσος με τον χρόνο που απαιτείται για να φτάσει στο επιθυμητό ποσοστό φόρτισης του χρήστη, η φόρτιση του γίνεται με έξυπνο τρόπο, καθώς θα λαμβάνει ενέργεια τις στιγμές όπου η τιμή του ρεύματος είναι χαμηλή και θα εκφορτίζεται τις στιγμές όπου είναι υψηλή. Την στιγμή αποσύνδεσής του από το δίκτυο, θα έχει το επιθυμητό SOC. Ο δεύτερος τρόπος φόρτισης, είναι παρόμοιος με τον προηγούμενο, με την μόνη διαφορά ότι το ηλεκτρικό όχημα, δεν μπορεί να προσφέρει ενέργεια προς το δίκτυο. Δεν έχει

δηλαδή την δυνατότητα V2G ροής ενέργειας. Έτσι, όταν ο χρόνος παραμονής του αμαξιού είναι τουλάχιστον ίσος με τον χρόνο που απαιτείται για να φτάσει στο επιθυμητό ποσοστό φόρτισης του χρήστη, το αυτοκίνητο θα λαμβάνει ενέργεια μόνο τις στιγμές όπου η τιμή του ρεύματος είναι χαμηλή και όταν είναι υψηλή δεν θα υπάρχει ροή ενέργειας προς καμία κατεύθυνση. Την στιγμή αποσύνδεσής του από το δίκτυο, θα έχει το επιθυμητό SOC. Στον τρίτο τρόπο, το ΗΟ φορτίζεται με τον απλό – κλασικό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, λαμβάνει μόνιμα ενέργεια από το δίκτυο, ανεξάρτητα από την τιμή του ρεύματος, μέχρι να φτάσει στο επιθυμητό ποσοστό φόρτισης (SOC). Η ισχύς με την οποία γίνεται η φόρτιση αυτή είναι προσαρμοσμένη έτσι ώστε το όχημα να φτάσει στο επιθυμητό ποσοστό την στιγμή της αποσύνδεσής του, με σεβασμό πάντα στους περιορισμούς φόρτισης.

3 Δεδομένα

Όλα τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν σε αυτή την έρευνα είναι ρεαλιστικά. Οι τιμές του ηλεκτρικού ρεύματος είναι πολύ κοντά σε αυτές της καθημερινότητάς μας. Τα χαρακτηριστικά των συσσωρευτών των ηλεκτρικών οχημάτων και οι περιορισμοί στην φόρτισή τους, ταυτίζονται πλήρως με συγκεκριμένα πραγματικά μοντέλα. Οι κατανομές πιθανότητας για τους χρόνους άφιξης και παραμονής των οχημάτων στους διάφορους τύπους φορτιστών (home – work – social), βασίζονται σε πιθανότητες βγαλμένες από την καθημερινότητά μας. Είναι δηλαδή εμφανές ότι τα συμπεράσματα της προσομοίωσης αυτής, θα είναι ρεαλιστικά και θα μπορούν να εφαρμοστούν στην καθημερινότητά μας.

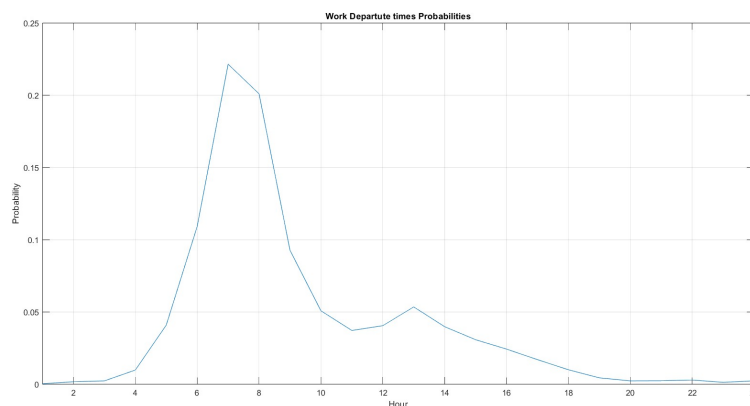
3.1 Χρόνοι άφιξης και παραμονής των ηλεκτρικών οχημάτων στους φορτιστές

Οι προαναφερόμενοι χρόνοι, λήφθηκαν από συγκεκριμένες κατανομές πυκνότητας πιθανοτήτων που βασίζονται σε ρεαλιστικά μοντέλα.

Οι χρόνοι άφιξης των αυτοκινήτων στους φορτιστές, πάρθηκαν με αμερόληπτο τρόπο από το σύνολο των ωρών της ημέρας, με βάση τις κατανομές πυκνότητας πιθανοτήτων. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι κατανομές πιθανοτήτων για τις ώρες άφιξης και παραμονής των ΗΟ σε κάθε φορτιστή, ανάλογα με τον τύπο του.

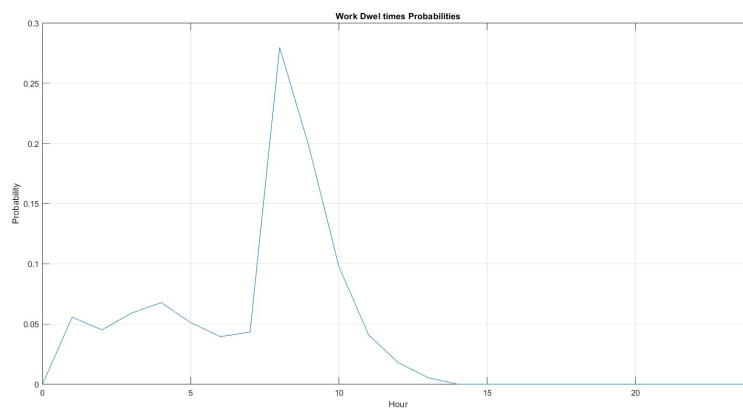
Φορτιστές στο περιβάλλον εργασίας (Work chargers):

Σε αυτήν την κατηγορία φόρτισης, όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχει αυξημένη διασύνδεση των αυτοκινήτων με το δίκτυο τις πρωινές ώρες (6πμ – 9πμ), καθώς οι περισσότεροι χρήστες ΗΟ, πηγαίνουν στην δουλειά τους αυτές τις ώρες. Αναλυτικότερα, η κατανομή πιθανοτήτων ολόκληρης της μέρας, φαίνεται στο εξής διάγραμμα:



Σχήμα 23: Κατανομή πιθανοτήτων ωρών άφιξης στο περιβάλλον εργασίας

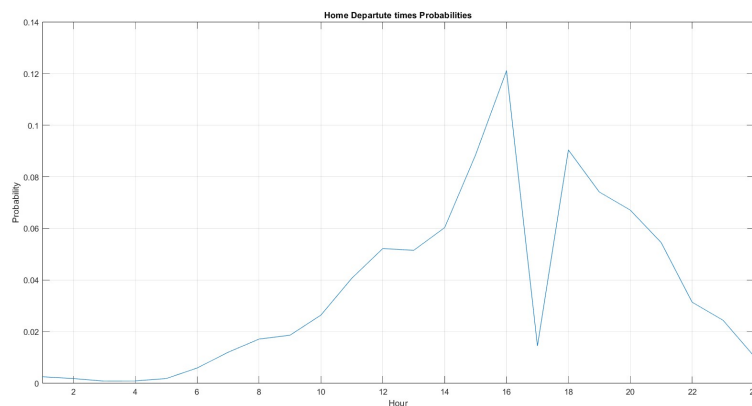
Όπως φαίνεται και παρακάτω, όσον αφορά τις ώρες παραμονής των αυτοκινήτων στο δίκτυο, η πιο πιθανή διάρκεια είναι 8 – 9 ώρες, καθώς τόσο κάθονται οι περισσότεροι εργαζόμενοι στις δουλειές τους. Η κατανομή πιθανοτήτων της διάρκειας φόρτισης των αμαξιών στο περιβάλλον εργασίας φαίνεται στο εξής διάγραμμα:



Σχήμα 24: Κατανομή πιθανοτήτων ωρών παραμονής στο περιβάλλον εργασίας

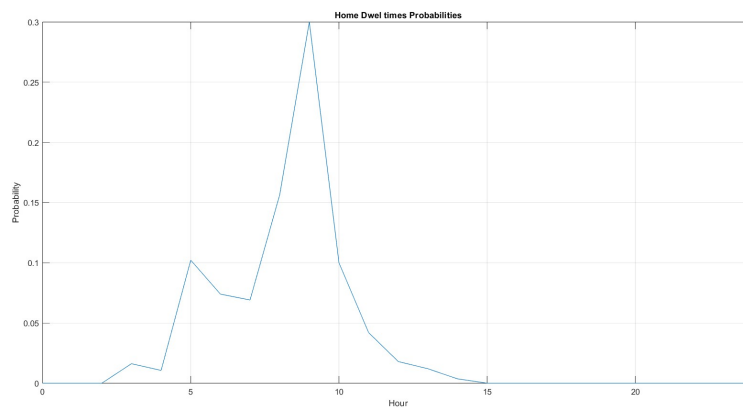
Φορτιστές στο οικιακό περιβάλλον (Home chargers):

Σε αυτήν την κατηγορία φόρτισης, όπως είναι αναμενόμενο, υπάρχει αυξημένη διασύνδεση των αυτοκινήτων με το δίκτυο τις μεσημεριανές και απογευματινές ώρες (2μμ – 4μμ και 6μμ - 9μμ), καθώς οι περισσότεροι χρήστες ΗΟ, γυρίζουν από τις δουλειές και τις υποχρεώσεις τους πίσω στο σπίτι. Αναλυτικότερα, η κατανομή πιθανοτήτων ολόκληρης της μέρας, φαίνεται στο εξής διάγραμμα:



Σχήμα 25: Κατανομή πιθανοτήτων ωρών άφιξης στο οικιακό περιβάλλον

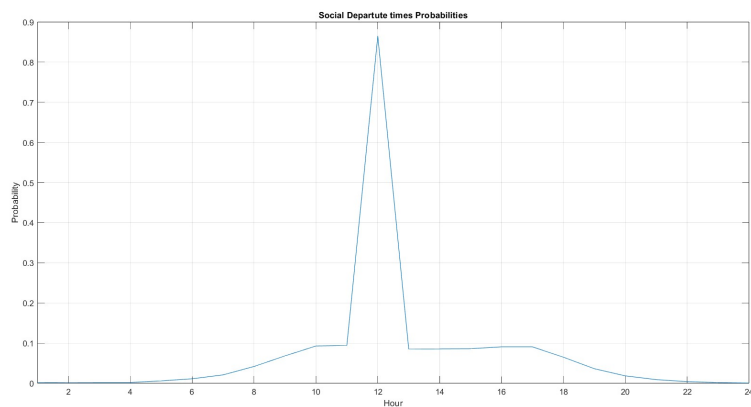
Σε αυτού του τύπου φορτίσεων, η πιο πιθανή διάρκεια φόρτισης είναι πάλι 8 – 10 ώρες, καθώς οι περισσότεροι χρήστες αφήνουν σταθμευμένα τα οχήματά τους κατά την διάρκεια της νύχτας. Επίσης, υπάρχει μια αυξημένη πιθανότητα στην 5ωρη διάρκεια φόρτισης, καθώς τόσο είναι το χρονικό διάστημα που οι περισσότεροι μένουν στο σπίτι μετά την εργασία τους. Η κατανομή πιθανοτήτων της διάρκειας φόρτισης των αμαξιών στο σπίτι φαίνεται στο εξής διάγραμμα:



Σχήμα 26: Κατανομή πιθανοτήτων ωρών παραμονής στο οικιακό περιβάλλον

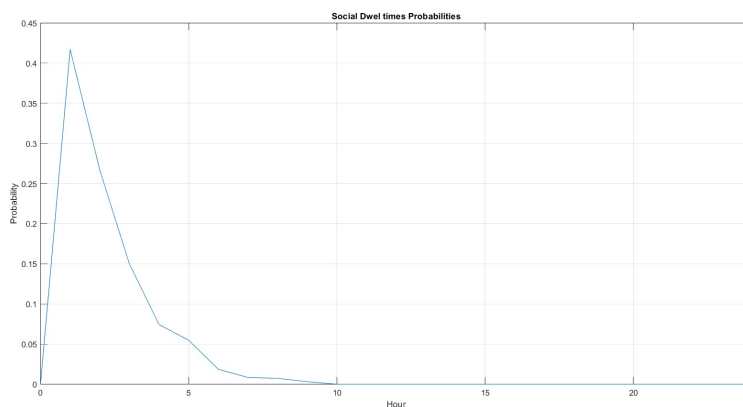
Φορτιστές σε δημόσιους χώρους (Social chargers):

Σε αυτήν την κατηγορία φόρτισης υπάρχει αυξημένη διασύνδεση των αυτοκινήτων με το δίκτυο γύρω στις 12 το μεσημέρι. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι περισσότεροι άνθρωποι βγαίνουν για τις υποχρεώσεις τους (ψώνια, διασκέδαση κλπ) την ώρα αυτή. Αναλυτικότερα, η κατανομή πιθανοτήτων ολόκληρης της μέρας, φαίνεται στο εξής διάγραμμα:



Σχήμα 27: Κατανομή πιθανοτήτων ωρών άφιξης σε δημόσιους χώρους

Οι περισσότεροι άνθρωποι, παραμένουν συνήθως στους δημόσιους χώρους για να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους, από 1 έως 3 ώρες. Αυτό πράγματι φαίνεται και στην κατανομή πιθανοτήτων της διάρκειας παραμονής των ΗΟ σε δημόσιους χώρους που παρουσιάζεται παρακάτω:



Σχήμα 28: Κατανομή πιθανοτήτων ωρών παραμονής σε δημόσιους χώρους

3.2 Τύποι ηλεκτρικών αυτοκινήτων και περιορισμοί φόρτισης

Στην συγκεκριμένη προσομοίωση, θεωρήσαμε ένα δίκτυο με 1500 φορτιστές. Το συγκεκριμένο δίκτυο, χρησιμοποιείται από έναν στόλο ηλεκτρικών αυτοκινήτων, των οποίων οι χρόνοι σύνδεσης και παραμονής στους φορτιστές, καθορίζονται

από τις παραπάνω κατανομές πιθανοτήτων. Ο στόλος των ηλεκτρικών οχημάτων αποτελείται ενδεικτικά από κάποια πραγματικά μοντέλα. Τα χαρακτηριστικά και οι προδιαγραφές φόρτισης καθενός μοντέλου, φαίνονται παρακάτω:

EV (model)	E _{max} (kWh)	E _{min} (kWh)	P _{max} (kW)	P _{min} (kW)
Skoda_Enyaq	77	11.55	11	-11
Nissan_Leaf	37	5.55	3.6	-3.6
Tesla_Model 3	51	7.65	11	-11
BMW_i3	38	5.7	11	-11

Πίνακας 2: Πληροφορίες Ηλεκτρικών Οχημάτων

Είναι εμφανές, ότι κάθε αμάξι έχει τα δικά του όρια στην φόρτισή του και ξεχωριστή μπαταρία. Αξίζει να τονίσουμε, ότι η ενέργεια E_{max} αντιστοιχεί στην μέγιστη και η E_{min} στην ελάχιστη χωρητικότητα του συσσωρευτή κάθε οχήματος. Η ισχύς P_{max} αντιστοιχεί στην μέγιστη ισχύ με την οποία μπορεί να φορτιστεί κάθε HO (G2V λειτουργία) και η P_{min} στην μέγιστη ισχύ με την οποία μπορεί να προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια στο δίκτυο (V2G λειτουργία). Το αρνητικό πρόσημο της P_{min} υποδεικνύει την φορά της ισχύος από το όχημα προς το δίκτυο. Επιπρόσθετα, αξίζει να αναφερθεί το γεγονός ότι στην περίπτωση μη ύπαρξης V2G λειτουργίας, η P_{min} γίνεται ίση με μηδέν, καθώς δεν υπάρχει η δυνατότητα να προσφέρει ηλεκτρική ενέργεια το HO.

Εκτός από τους περιορισμούς που επιβάλλουν οι προδιαγραφές του HO, υπάρχουν και οι περιορισμοί που καθορίζουν οι τρόποι φόρτισης. Πιο συγκεκριμένα, η αμφίδρομη ισχύς φόρτισης, εξαρτάται από τον τύπο του φορτιστή (home – social – work) με τον τρόπο που φαίνεται στον εξής πίνακα:

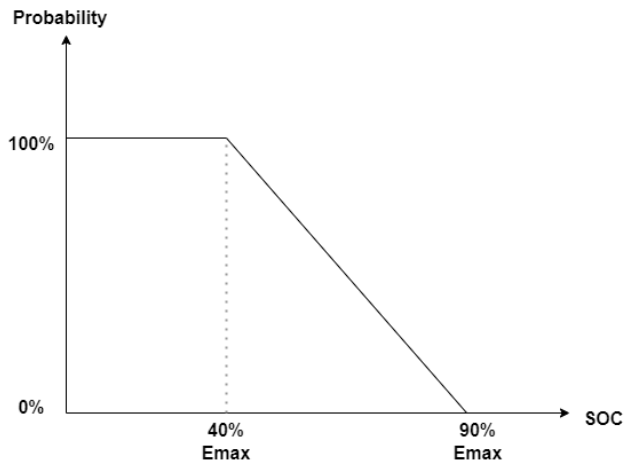
Μέρος φόρτισης	Περιορισμοί φόρτισης (kW)
Οικιακό περιβάλλον	3.6
Περιβάλλον εργασίας	7.4
Δημόσιος χώρος	22

Πίνακας 3: Περιορισμοί φόρτισης ανά τοποθεσία φορτιστή

Σε κάθε φόρτιση, γίνεται σύγκριση ανάμεσα σε όλους τους περιορισμούς και επικρατεί η χαμηλότερη τιμή. Για παράδειγμα, αν έχουμε το HO “BMW i3” (P_{max} = 11kW, P_{min} = -11kW) και το συνδέσουμε σε φορτιστή σε περιβάλλον εργασίας (P = 7,4kW) με δυνατότητα V2G, η φόρτιση θα γίνει με P_{max} = 7,4kW και P_{min} = -7,4kW. Ενώ αν έχουμε το HO “Nissan Leaf” (P_{max} = 3,6kW, P_{min} = -3,6kW) και το συνδέσουμε σε φορτιστή δημόσιου χώρου (P = 22kW) χωρίς δυνατότητα V2G, η φόρτιση θα γίνει με P_{max} = 3,6kW και P_{min} = 0kW.

3.3 Ανάλυση αλγορίθμου σύνδεσης ΗΟ στους φορτιστές και παραγωγή άνω και κάτω ορίων φόρτισης

Όπως αναφέραμε και νωρίτερα, έχουμε έναν στόλο από ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τα οποία έχουν συγκεκριμένους χρόνους άφιξης και παραμονής στο δίκτυο και συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά. Ο στόλος αυτός αποτελείται από τύπους φόρτισης όλων των ειδών (home – work – social). Ο τύπος κάθε αμαξίου και κατ' επέκταση τα τεχνικά του χαρακτηριστικά, καθορίζονται τυχαία ανάμεσα στα μοντέλα της λίστας που παρουσιάστηκε παραπάνω. Κατόπιν, καταχωρούνται τιμές στις βασικές μεταβλητές φόρτισης, που είναι αυτή του αρχικού (SOC_0) και του τελικού - επιθυμητού ποσοστού φόρτισης (SOC_{target}). Οι τιμές αυτές, ισούνται με ένα ποσοστό της συνολικής χωρητικότητας του κάθε συσσωρευτή του αμαξίου (E_{max}). Το ποσοστό αυτό διαφέρει κάθε φορά, και λαμβάνεται με τυχαίο τρόπο, ανάμεσα σε ένα σύνολο τιμών. Το SOC_0 κυμαίνεται ανάμεσα στο 55 – 75% του E_{max} και το SOC_0 κυμαίνεται ανάμεσα στο 85 – 90% του E_{max} . Έπειτα, καθορίζεται η σύνδεση ή μη του αυτοκινήτου στον φορτιστή, πιθανολογικά με βάση το παρακάτω μοντέλο:



Σχήμα 29: Πιθανότητα φόρτισης ηλεκτρικού οχήματος

Από την παραπάνω γραφική, είναι φανερό ότι αν το αυτοκίνητο έχει ποσοστό φόρτισης μικρότερο ή ίσο από το 40% του E_{max} , θα φορτιστεί με πιθανότητα 1. Αν έχει ποσοστό φόρτισης μεγαλύτερο ή ίσο από το 90% του E_{max} , δεν θα φορτιστεί. Για τις ενδιάμεσες τιμές του ποσοστού φόρτισης, η πιθανότητα υπολογίζεται ως

εξής:

$$\begin{aligned}
P(SOC) &= a \cdot SOC + b \Rightarrow \\
\text{Με αντικατάσταση του σημείου (0,9 0)} \\
0 &= a \cdot 0.9 + b \Rightarrow \\
b &= -a \cdot 0.9 \\
\text{Άρα: } P(SOC) &= a \cdot SOC - a \cdot 0.9 \Rightarrow \\
\text{Με αντικατάσταση του σημείου (0.4 1)} \\
1 &= a \cdot 0.4 - a \cdot 0.9 \Rightarrow \\
a &= -2 \quad b = 1.8 \\
\text{Άρα: } P(SOC) &= -2 \cdot SOC + 1.8
\end{aligned}$$

Κάθε όχημα που καταφτάνει στο δίκτυο και πρόκειται να φορτιστεί, με βάση τον χρόνο άφιξής του (ξεκινώντας από αυτά που έρχονται νωρίτερα), συνδέεται στον πρώτο ελεύθερο και διαθέσιμο για χρήση φορτιστή εκείνης της χρονικής στιγμής. Στη συνέχεια, εστιάζουμε στην παραγωγή του άνω (Eur) και κάτω (Edown) ορίου φόρτισης. Κατασκευάζουμε δηλαδή το πεδίο, μέσα στο οποίο μπορεί να “κινηθεί” η γραφική παράσταση του επιπέδου φόρτισης κάθε ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Η μορφή των ορίων αυτών εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά (V2G – G2V – dump way) και τις ιδιαιτερότητες κάθε φόρτισης.

3.4 Παραγωγή άνω και κάτω ορίων φόρτισης (Eur και Edown, Pmax και Pmin)

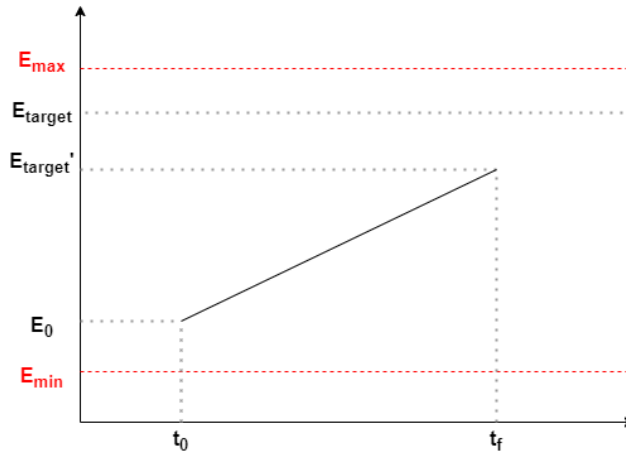
Αξίζει να αναφερθεί ότι υπάρχουν 3 διαφορετικές περιπτώσεις φόρτισης, άρα και 3 διαφορετικοί τρόποι παραγωγής άνω και κάτω ορίων φόρτισης. Η πρώτη περίπτωση είναι η ύπαρξη τόσο της λειτουργίας G2V, όσο και της V2G. Όπως είναι γνωστό, το αυτοκίνητο μπορεί τόσο να “παίρνει” ενέργεια από το δίκτυο, όσο και να “δίνει” σε αυτό, με ρυθμό P_{max} και P_{min} αντίστοιχα. Η δεύτερη περίπτωση είναι η ύπαρξη μόνο της λειτουργίας G2V, στην οποία το αυτοκίνητο μπορεί μόνο να “παίρνει” ενέργεια από το δίκτυο με ρυθμό P_{max} . Η τρίτη, είναι η φόρτιση με έναν συμβατικό τρόπο, στον οποίο το αυτοκίνητο “παίρνει” ενέργεια από το δίκτυο με ρυθμό $P_{dump} = \frac{E_{target} - E_0}{dwel_time}$. Σε όλες τις παραπάνω περιπτώσεις, γίνεται σεβασμός στους περιορισμούς φόρτισης που επιβάλλουν οι συνθήκες κάθε φορά.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι 3 περιπτώσεις για την καμπύλη που θα ακολουθήσει η E_{up} (Περίπτωση V2G και G2V φόρτισης):

- Περίπτωση στην οποία ο χρόνος παραμονής δεν είναι αρκετός για να φτάσει το αμάξι από το E_0 στο E_{target} . Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ένα νέο E'_{target} το οποίο ισούται με την τιμή της ενέργειας που θα αποθηκευτεί στο αμάξι, αν φορτιστεί με ισχύ P_{max} για ολόκληρο το χρονικό διάστημα της

παραμονής του.

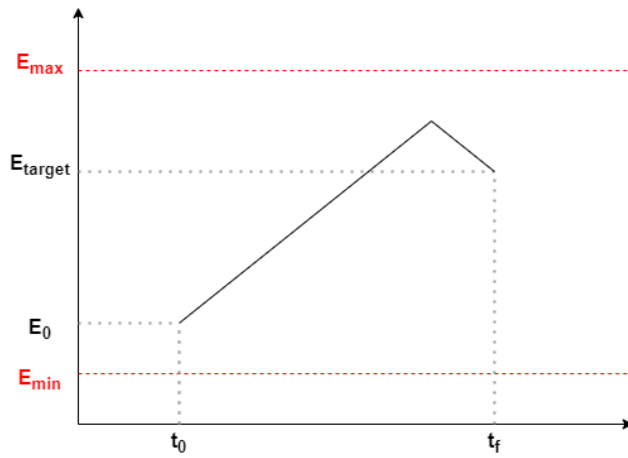
Η αντίστοιχη γραφική παρατίθεται παρακάτω:



Σχήμα 30: Άνω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (V2G and G2V)

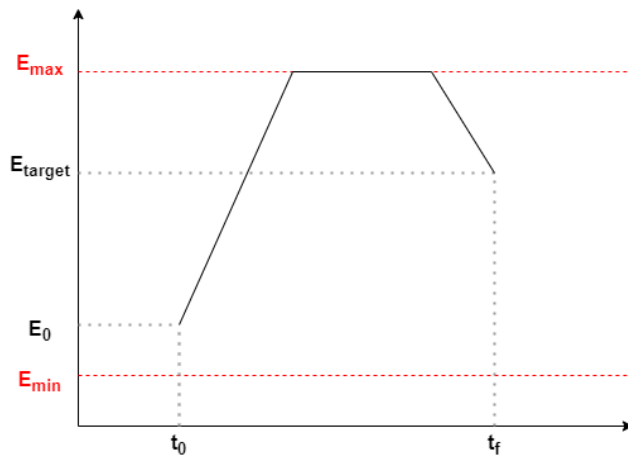
- Περίπτωση στην οποία ο χρόνος παραμονής δεν είναι αρκετός για να φτάσει η αποθηκευμένη ενέργεια στο E_{max} και μετά να "πέσει" στο E_{target} . Σε αυτήν την περίπτωση, η μέγιστη τιμή της αποθηκευμένης ενέργειας, δεν θα γίνει ίση με το E_{max} , αλλά θα είναι μικρότερη. Το άνω όριο φόρτισης, θα δημιουργηθεί ως εξής: η μπαταρία του αυτοκινήτου θα δεχτεί ισχύ ίση με P_{max} και ακριβώς μετά θα εκφορτιστεί με ισχύ P_{min} , έτσι ώστε την στιγμή της αποσύνδεσής του, να έχει τελικά ενέργεια ίση με E_{target} .

Η αντίστοιχη γραφική παρατίθεται παρακάτω:



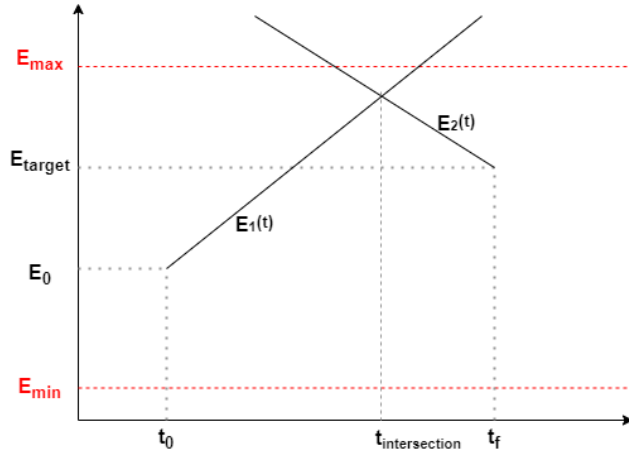
Σχήμα 31: Άνω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (V2G and G2V)

- Η περίπτωση στην οποία ο χρόνος παραμονής είναι αρκετός για να μπορέσει η αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας να φτάσει την μέγιστη δυνατή τιμή του E_{max} . Το άνω όριο φόρτισης, θα δημιουργηθεί ως εξής: αρχικά το όχημα φορτίζεται με ισχύ P_{max} μέχρι η αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας να γίνει ίση με την μέγιστη δυνατή τιμή, E_{max} . Στη συνέχεια το άνω όριο παραμένει στην τιμή αυτή, όσο χρονικό διάστημα είναι αυτό απαραίτητο, έτσι ώστε στη συνέχεια να αποφορτιστεί με ισχύ P_{min} και τελικά την χρονική στιγμή της αποσύνδεσής του, να έχει ενέργεια ίση με E_{target} . Η αντίστοιχη γραφική παρατίθεται παρακάτω:



Σχήμα 32: Άνω όριο ενέργειας - 3η περίπτωση (V2G and G2V)

Η οριακή συνθήκη για το E_{up} , στην οποία ο χρόνος παραμονής του αυτοκινήτου φτάνει οριακά για την “φυσιολογική” φόρτιση, υπολογίστηκε ως εξής:



Σχήμα 33: Οριακή συνθήκη για το άνω όριο ενέργειας - Σημείο τομής $E_1(t)$ και $E_2(t)$

Για τον υπολογισμό του $E_1(t)$:

$$E_1(t) = E_0 + \frac{P_{max}}{60} \cdot t$$

Για τον υπολογισμό του $E_2(t)$ με εφαρμογή του σημείου ($dwell_time, E_{tar}$):

$$E_2(t) = a \cdot t + b \Rightarrow$$

$$E_{tar} = \frac{P_{min}}{60} \cdot dwell_time + b \Rightarrow$$

$$b = E_{tar} - \frac{P_{min}}{60} \cdot dwell_time$$

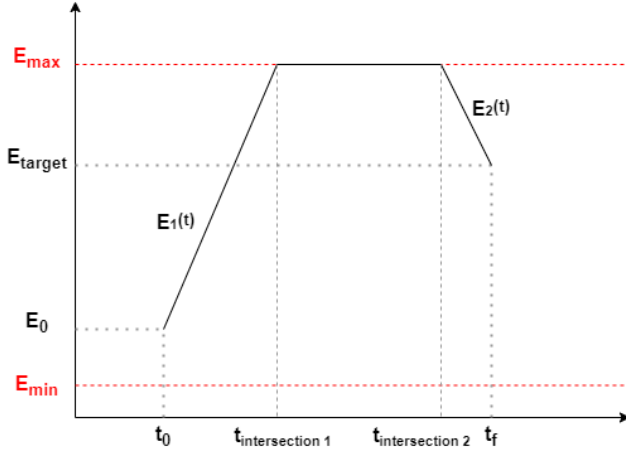
$$\text{Άρα: } E_2(t) = \frac{P_{min}}{60} \cdot t + E_{tar} - \frac{P_{min}}{60} \cdot dwell_time$$

Για τον υπολογισμό του σημείου τομής των $E_1(t)$ και $E_2(t)$ ($t_{intersection}$):

$$\begin{aligned}
 E_1(t) &= E_2(t) \Rightarrow \\
 E_0 + \frac{P_{max}}{60} \cdot t &= \frac{P_{min}}{60} \cdot t + E_{tar} - \frac{P_{min}}{60} \cdot dwell_time \Rightarrow \\
 \frac{P_{max}}{60} \cdot t - \frac{P_{min}}{60} \cdot t &= E_{tar} - \frac{P_{min}}{60} \cdot dwell_time - E_0 \Rightarrow (P_{min} = -P_{max}) \\
 \frac{P_{max}}{30} \cdot t &= E_{tar} + \frac{P_{max}}{60} \cdot dwell_time - E_0 \Rightarrow \\
 t &= \frac{30 \cdot E_{tar}}{P_{max}} + \frac{dwell_time}{2} - \frac{30 \cdot E_0}{P_{max}} \Rightarrow \\
 t &= \frac{dwell_time}{2} + \frac{30 \cdot (E_{tar} - E_0)}{P_{max}}
 \end{aligned}$$

Έχοντας βρει τον χρόνο στον οποίο τέμνονται οι δύο ευθείες, θα υπολογίσουμε την τιμή της ενέργειας σε αυτό το σημείο. Ο υπολογισμός αυτός, γίνεται αντικαθιστώντας το $t_{intersection}$ στην εξίσωση του $E_1(t)$ ($E_1(t_{intersection})$). Μετά συγκρίνω την τιμή αυτή με το E_{max} και προκύπτουν δυο περιπτώσεις. Αν $E_1(t_{intersection}) \leq E_{max}$, δηλαδή οι ευθείες τέμνονται κάτω από την τιμή του E_{max} , τότε θα έχω την δεύτερη περίπτωση φόρτισης. Διαφορετικά, αν $E_1(t_{intersection}) > E_{max}$, δηλαδή οι ευθείες τέμνονται πάνω από την τιμή του E_{max} , τότε θα έχω την τρίτη περίπτωση φόρτισης.

Ο υπολογισμός των οριακών χρόνων όπου οι ευθείες $E_1(t)$ και $E_2(t)$ τέμνονται με την ευθεία E_{max} , γίνεται ως εξής:



Σχήμα 34: Σημεία τομής του άνω ορίου ενέργειας E_{up} και του E_{max}

Για τον υπολογισμό του $t_{intersection1}$:

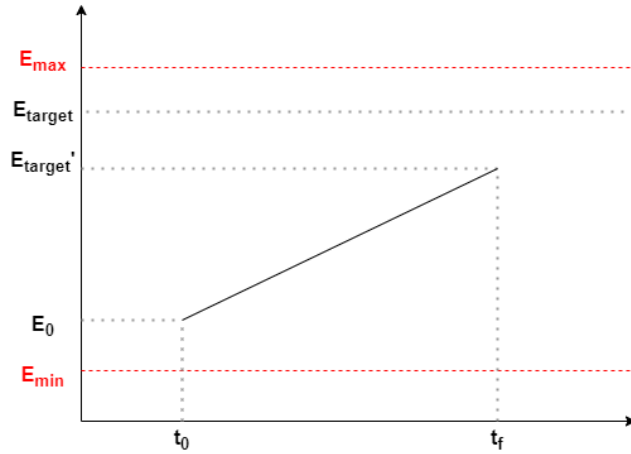
$$\begin{aligned} E_1(t) &= E_{max} \Rightarrow \\ E_0 + \frac{P_{max}}{60} \cdot t &= E_{max} \Rightarrow \\ t_{intersection1} &= \frac{(E_{max} - E_0) \cdot 60}{P_{max}} \end{aligned}$$

Για τον υπολογισμό του $t_{intersection2}$:

$$\begin{aligned} E_2(t) &= E_{max} \Rightarrow \\ \frac{P_{min}}{60} \cdot t + E_{tar} - \frac{P_{min}}{60} \cdot dwel_time &= E_{max} \Rightarrow \\ t_{intersection2} &= \frac{(E_{max} - E_{tar} + \frac{P_{min}}{60} \cdot dwel_time) \cdot 60}{P_{min}} \end{aligned}$$

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι 3 περιπτώσεις για την καμπύλη που θα ακολουθήσει η E_{down} (Περίπτωση V2G και G2V φόρτισης):

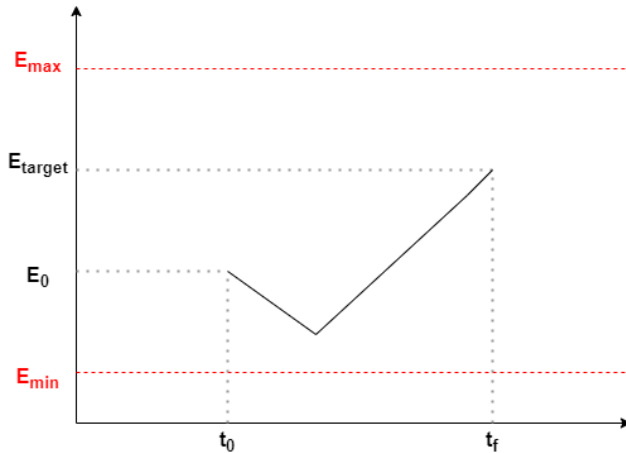
- Περίπτωση στην οποία ο χρόνος παραμονής δεν είναι αρκετός για να φτάσει το αμάξι από το E_0 στο E_{target} . Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ένα νέο E'_{target} το οποίο ισούται με την τιμή της ενέργειας που θα αποθηκευτεί στο αμάξι, αν φορτιστεί με ισχύ P_{max} για ολόκληρο το χρονικό διάστημα της παραμονής του.



Σχήμα 35: Κάτω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (V2G and G2V)

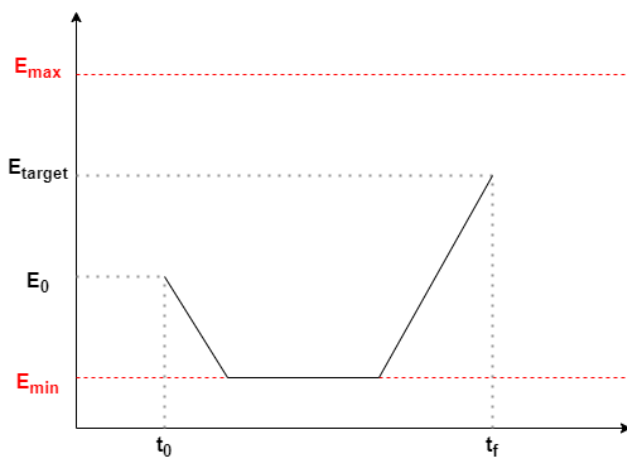
- Περίπτωση στην οποία ο χρόνος παραμονής δεν είναι αρκετός για να φτάσει η αποθηκευμένη ενέργεια στο E_{min} και μετά να ανέβει στο E_{target} . Σε αυτήν

την περίπτωση, η ελάχιστη τιμή της αποθηκευμένης ενέργειας, δεν θα γίνει ίση με το E_{min} , αλλά θα έχει μικρότερο μέτρο. Το κάτω όριο φόρτισης, θα δημιουργηθεί ως εξής: η μπαταρία του αυτοκινήτου θα αποφορτιστεί με ισχύ P_{min} και ακριβώς μετά θα φορτιστεί με ισχύ P_{max} , έτσι ώστε την στιγμή της αποσύνδεσής του, να έχει τελικά ενέργεια ίση με E_{target} . Η αντίστοιχη γραφική παρατίθεται παρακάτω:



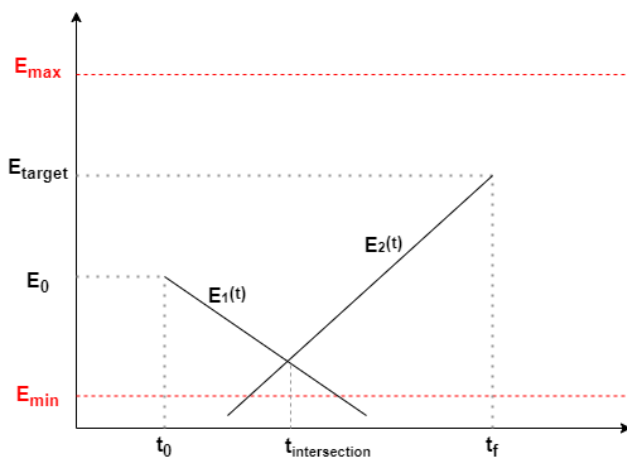
Σχήμα 36: Κάτω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (V2G and G2V)

- Η περίπτωση στην οποία ο χρόνος παραμονής είναι αρκετός για να μπορέσει η αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας να φτάσει την ελάχιστη δυνατή τιμή του E_{min} . Το κάτω όριο φόρτισης, θα δημιουργηθεί ως εξής: αρχικά το όχημα εκφορτίζεται με ισχύ P_{min} μέχρι η αποθηκευμένη ενέργεια της μπαταρίας να γίνει ίση με την ελάχιστη δυνατή τιμή, E_{min} . Στη συνέχεια το κάτω όριο παραμένει στην τιμή αυτή, για όσο χρονικό διάστημα είναι αυτό απαραίτητο, έτσι ώστε στη συνέχεια να φορτιστεί με ισχύ P_{max} και τελικά την χρονική στιγμή της αποσύνδεσής του, να έχει ενέργεια ίση με E_{target} . Η αντίστοιχη γραφική παρατήθεται παρακάτω:



Σχήμα 37: Κάτω όριο ενέργειας - 3η περίπτωση (V2G and G2V)

Η οριακή συνθήκη για το E_{down} , στην οποία ο χρόνος παραμονής του αυτοκινήτου φτάνει οριακά για την “φυσιολογική” φόρτιση, υπολογίστηκε ως εξής:



Σχήμα 38: Οριακή συνθήκη για το άνω όριο ενέργειας - Σημείο τομής $E_1(t)$ και $E_2(t)$

Για τον υπολογισμό του $E_1(t)$:

$$E_1(t) = E_0 + \frac{P_{min}}{60} \cdot t$$

Για τον υπολογισμό του $E_2(t)$ με εφαρμογή του σημείου ($dwell_time, E_{tar}$):

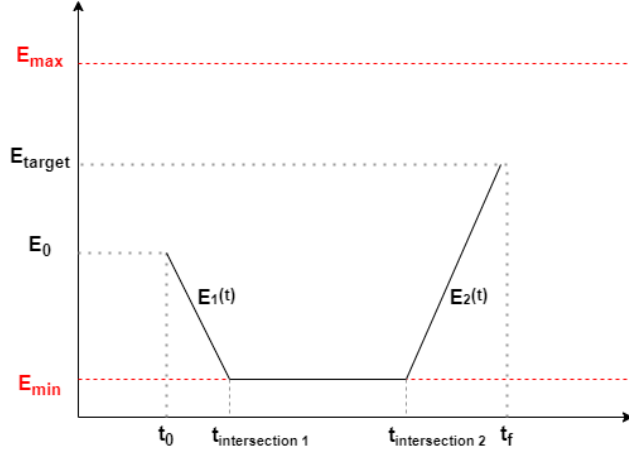
$$\begin{aligned}
E_2(t) &= a \cdot t + b \Rightarrow \\
E_{tar} &= \frac{P_{max}}{60} \cdot dwell_time + b \Rightarrow \\
b &= E_{tar} - \frac{P_{max}}{60} \cdot dwell_time \\
\text{Άρα: } E_2(t) &= \frac{P_{max}}{60} \cdot t + E_{tar} - \frac{P_{max}}{60} \cdot dwell_time
\end{aligned}$$

Για τον υπολογισμό του σημείου τομής των $E_1(t)$ και $E_2(t)$ ($t_{intersection}$):

$$\begin{aligned}
E_1(t) &= E_2(t) \Rightarrow \\
E_0 + \frac{P_{min}}{60} \cdot t &= \frac{P_{max}}{60} \cdot t + E_{tar} - \frac{P_{max}}{60} \cdot dwell_time \Rightarrow \\
\frac{P_{min}}{30} \cdot t &= E_{tar} + \frac{P_{min}}{60} \cdot dwell_time - E_0 \Rightarrow \\
t &= \frac{30 \cdot E_{tar}}{P_{min}} + \frac{dwell_time}{2} - \frac{30 \cdot E_0}{P_{min}} \Rightarrow \\
t &= \frac{dwell_time}{2} + \frac{30 \cdot (E_{tar} - E_0)}{P_{min}}
\end{aligned}$$

Έχοντας βρει τον χρόνο στον οποίο τέμνονται οι δύο ευθείες, θα υπολογίσω την τιμή της ενέργειας σε αυτό το σημείο. Ο υπολογισμός αυτός, γίνεται αντικαθιστώντας το $t_{intersection}$ στην εξίσωση του $E_1(t)$ ($E_1(t_{intersection})$). Μετά συγκρίνω την τιμή αυτή με το E_{min} και προκύπτουν δυο περιπτώσεις. Αν $E_1(t_{intersection}) \geq E_{min}$, δηλαδή οι ευθείες τέμνονται πάνω από την τιμή του E_{min} , τότε θα έχω την δεύτερη περίπτωση φόρτισης. Διαφορετικά, αν $E_1(t_{intersection}) < E_{min}$, δηλαδή οι ευθείες τέμνονται κάτω από την τιμή του E_{max} , τότε θα έχω την τρίτη περίπτωση φόρτισης.

Ο υπολογισμός των οριακών χρόνων όπου οι ευθείες $E_1(t)$ και $E_2(t)$ τέμνονται με την ευθεία E_{min} , γίνεται ως εξής:



Σχήμα 39: Σημεία τομής του κάτω ορίου ενέργειας E_{down} και του E_{min}

Για τον υπολογισμό του $t_{intersection1}$:

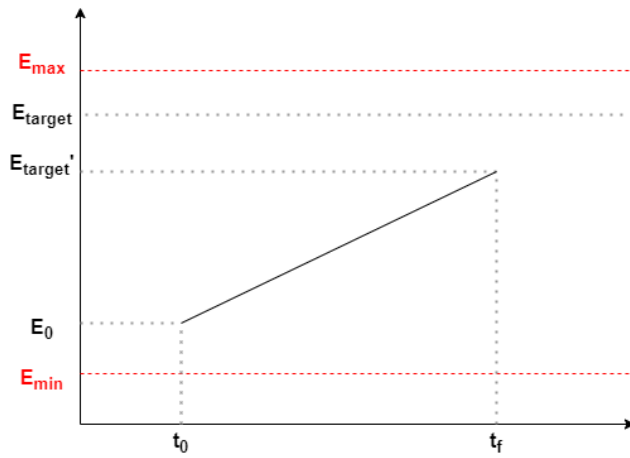
$$\begin{aligned}
 E_1(t) &= E_{min} \Rightarrow \\
 E_0 + \frac{P_{min}}{60} \cdot t &= E_{min} \Rightarrow \\
 t_{intersection1} &= \frac{(E_{min} - E_0) \cdot 60}{P_{min}}
 \end{aligned}$$

Για τον υπολογισμό του $t_{intersection2}$:

$$\begin{aligned}
 E_2(t) &= E_{min} \Rightarrow \\
 \frac{P_{max}}{60} \cdot t + E_{tar} - \frac{P_{max}}{60} \cdot dwel_time &= E_{min} \Rightarrow \\
 t_{intersection2} &= \frac{(E_{min} - E_{tar} + \frac{P_{max}}{60} \cdot dwel_time) \cdot 60}{P_{max}}
 \end{aligned}$$

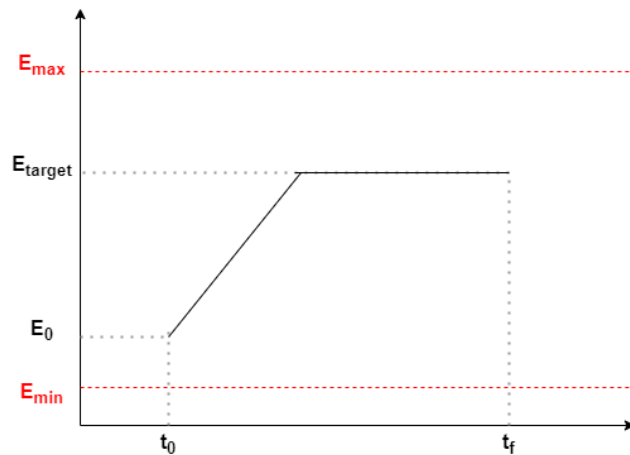
Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι 2 περιπτώσεις για την καμπύλη που θα ακολουθήσει η E_{up} (Περίπτωση G2V φόρτισης):

- Περίπτωση που ο χρόνος παραμονής δεν είναι αρκετός για να φτάσει το αμάξι από το E_0 στο E_{target} . Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ένα νέο E'_{target} το οποίο ισούται με την τιμή της ενέργειας που θα αποθηκευτεί στο αμάξι, αν φορτιστεί με ισχύ P_{max} για το χρονικό διάστημα της παραμονής του. Η αντίστοιχη γραφική παρατίθεται παρακάτω:



Σχήμα 40: Άνω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (Μόνο G2V)

- Σε αυτήν την περίπτωση, ο χρόνος παραμονής είναι αρκετός για να φτάσει το αμάξι από το E_0 στο E_{target} . Το αυτοκίνητο φορτίζει με ισχύ P_{max} μέχρι να φτάσει στο E_{target} και στην συνέχεια παραμένει εκεί μέχρι την αποσύνδεσή του από το δίκτυο.
Η αντίστοιχη γραφική παρατίθεται παρακάτω:

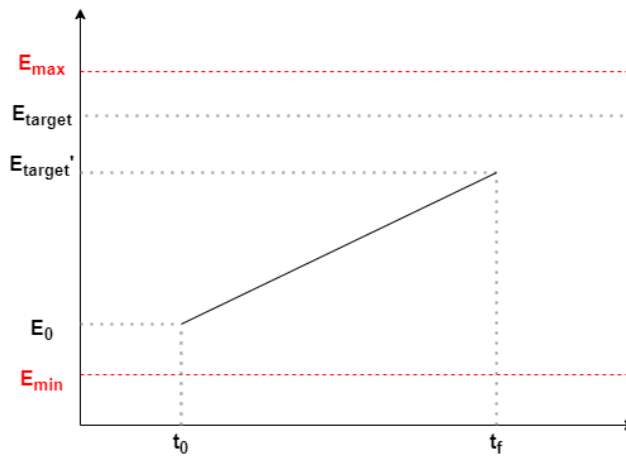


Σχήμα 41: Άνω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (Μόνο G2V)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι 2 περιπτώσεις για την καμπύλη που θα ακολουθήσει η E_{down} (Περίπτωση G2V φόρτισης):

- Περίπτωση που ο χρόνος παραμονής δεν είναι αρκετός για να φτάσει το αμάξι

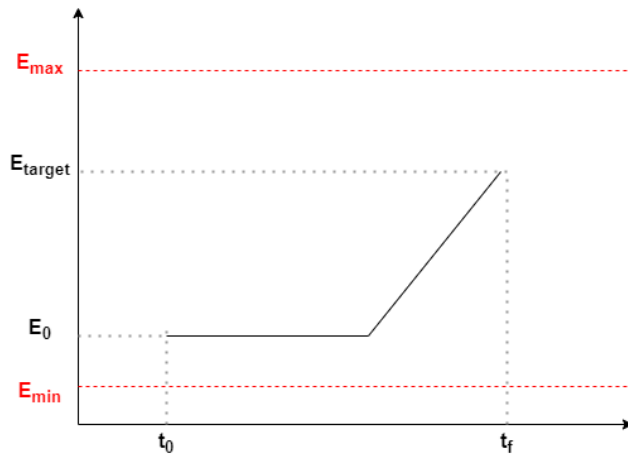
από το E_0 στο E_{target} . Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ένα νέο E'_{target} το οποίο ισούται με την τιμή της ενέργειας που θα αποθηκευτεί στο αμάξι, αν φορτιστεί με ισχύ P_{max} για το χρονικό διάστημα της παραμονής του. Η αντίστοιχη γραφική παρατίθεται παρακάτω:



Σχήμα 42: Κάτω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (Μόνο G2V)

- Σε αυτήν την περίπτωση, ο χρόνος παραμονής είναι αρκετός για να φτάσει το αμάξι από το E_0 στο E_{target} . Το αυτοκίνητο παραμένει στο επίπεδο του E_0 για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και στη συνέχεια, φορτίζει με ισχύ P_{max} μέχρι να φτάσει στο E_{target} την στιγμή της αποσύνδεσής του από το δίκτυο.

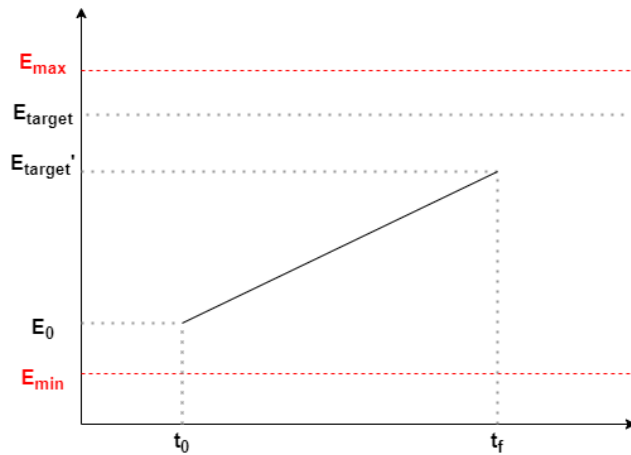
Η αντίστοιχη γραφική παρατίθεται παρακάτω:



Σχήμα 43: Κάτω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (Μόνο G2V)

Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι 2 περιπτώσεις για την καμπύλη που θα ακολουθήσει η E_{up} (Περίπτωση "dump" φόρτισης):

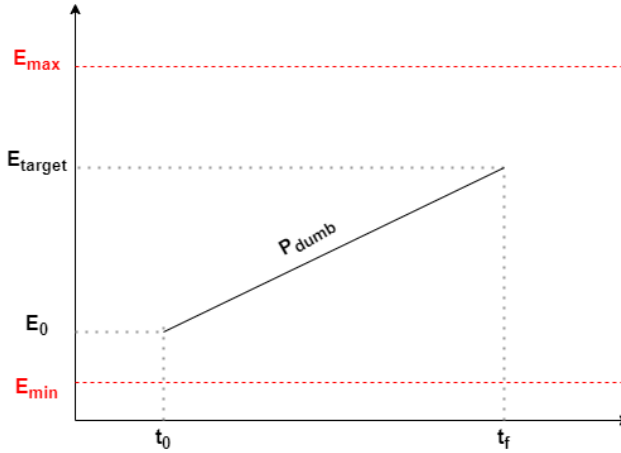
- Περίπτωση που ο χρόνος παραμονής δεν είναι αρκετός για να φτάσει το αμάξι από το E_0 στο E_{target} . Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ένα νέο E'_{target} το οποίο ισούται με την τιμή της ενέργειας που θα αποθηκευτεί στο αμάξι, αν φορτιστεί με ισχύ P_{max} για το χρονικό διάστημα της παραμονής του. Η αντίστοιχη γραφική παρατίθεται παρακάτω:



Σχήμα 44: Άνω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (Ανόητη φόρτιση)

- Σε αυτήν την περίπτωση, ο χρόνος παραμονής είναι αρκετός για να φτάσει

το αμάξι από το E_0 στο E_{target} . Η ισχύς φόρτισής του ισούται με $P_{dump} = \frac{E_{target} - E_0}{dwell_time}$.
 Η αντίστοιχη γραφική παρατήθεται παρακάτω:

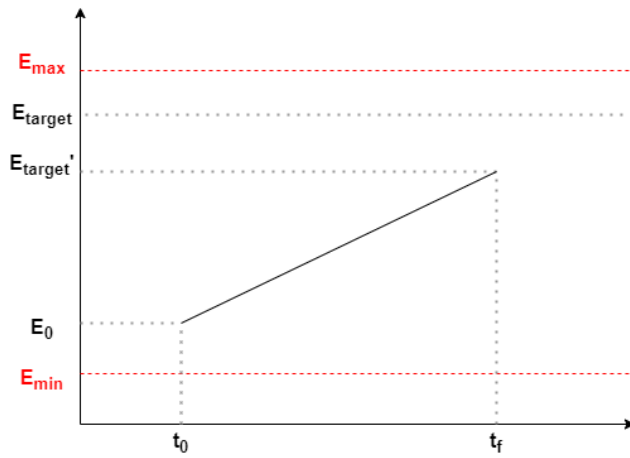


Σχήμα 45: Άνω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (Ανόητη φόρτιση)

Αν η τιμή του P_{dump} υπερβαίνει τα ανώτερα όρια φόρτισης, τότε η φόρτιση γίνεται με το αντίστοιχο όριο.

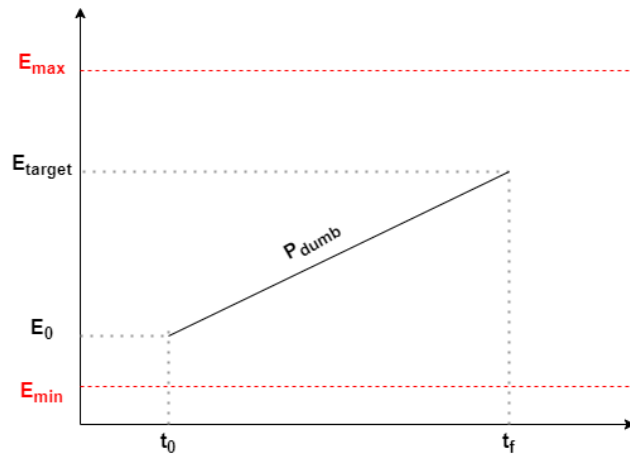
Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι 2 περιπτώσεις για την καμπύλη που θα ακολουθήσει η E_{down} (Περίπτωση "dump" φόρτισης):

- Περίπτωση που ο χρόνος παραμονής δεν είναι αρκετός για να φτάσει το αμάξι από το E_0 στο E_{target} . Σε αυτήν την περίπτωση προκύπτει ένα νέο E'_{target} το οποίο ισούται με την τιμή της ενέργειας που θα αποθηκευτεί στο αμάξι, αν φορτιστεί με ισχύ P_{max} για το χρονικό διάστημα της παραμονής του.
 Η αντίστοιχη γραφική παρατίθεται παρακάτω:



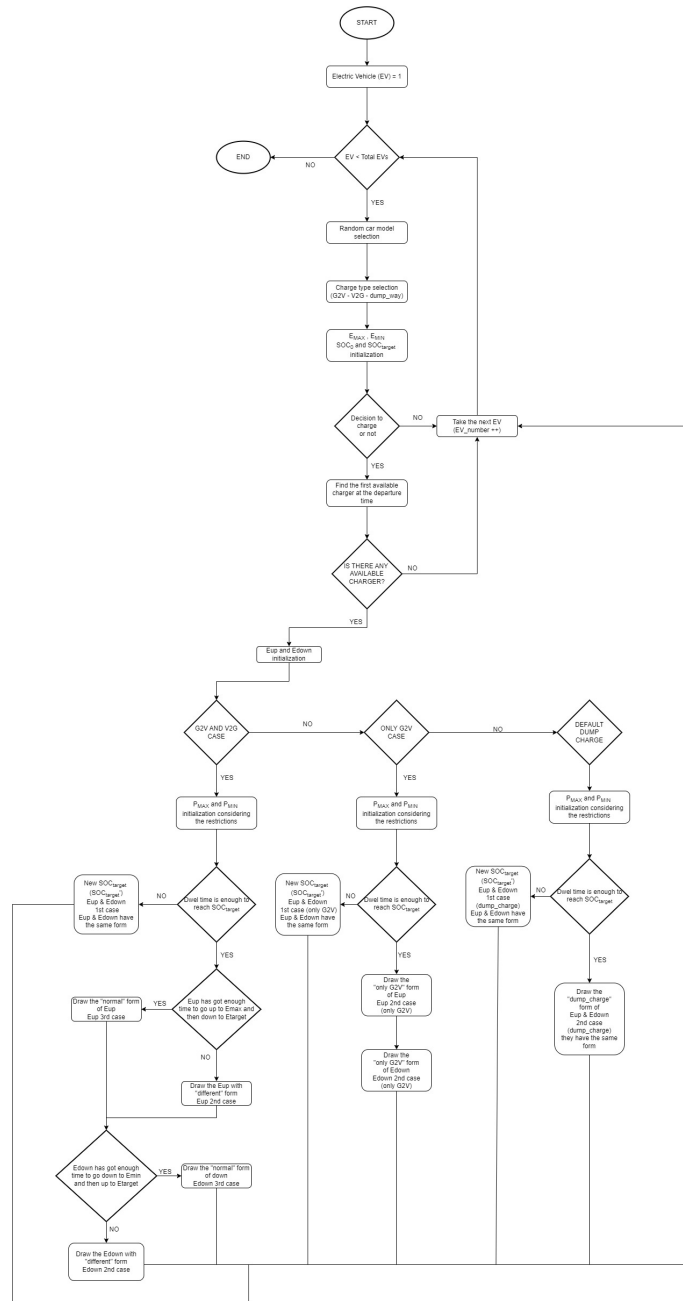
Σχήμα 46: Κάτω όριο ενέργειας - 1η περίπτωση (Ανόητη φόρτιση)

- Σε αυτήν την περίπτωση, ο χρόνος παραμονής είναι αρκετός για να φτάσει το αμάξι από το E_0 στο E_{target} . Η ισχύς φόρτισής του ισούται με $P_{dump} = \frac{E_{target} - E_0}{dwel.time}$. Η αντίστοιχη γραφική παρατήθεται παρακάτω:



Σχήμα 47: Κάτω όριο ενέργειας - 2η περίπτωση (Ανόητη φόρτιση)

Αν η τιμή του P_{dump} υπερβαίνει τα ανώτερα όρια φόρτισης, τότε η φόρτιση γίνεται με το αντίστοιχο όριο.
Παρακάτω παρουσιάζεται η όλη διαδικασία σε ένα συγκεντρωτικό διάγραμμα ροής:



Σχήμα 48: Διάγραμμα ροής

Εκτός από την παραπάνω διαδικασία παραγωγής των E_{up} και E_{down} , σε κάθε φόρτιση δόθηκε έμφαση και στα αντίστοιχα όρια της ισχύος (P_{max} και P_{min}).

Οι τιμές αυτές επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες. Πιο συγκεκριμένα, όπως έχει αναλυθεί και προηγουμένως, εξαρτώνται από το μοντέλο του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, από τον είδος φόρτισης (home – work – social) και από την διαθέσιμη τεχνολογία φόρτισης (G2V, V2G, dump-way). Σε κάθε φόρτιση ξεχωριστά, συγκρίνουμε τους παραπάνω περιορισμούς και κρατάμε την χαμηλότερη τιμή, ως συνολικό περιορισμό. Έτσι, σε κάθε σύνδεση οχήματος στο δίκτυο και καθ' όλη τη διάρκεια παραμονής του, θα επικρατούν δύο σταθερές τιμές για τους περιορισμούς P_{max} και P_{min} . Αξίζει να αναφερθεί ακόμα ότι διατηρούνται οι τιμές E_0 κάθε αμαξιού και αποθηκεύονται στον αντίστοιχο φορτιστή και στην αντίστοιχη χρονική στιγμή που συνδέεται στο δίκτυο. Επίσης, διατηρούνται οι τιμές E_{target} κάθε αμαξιού και αποθηκεύονται στον αντίστοιχο φορτιστή και στην αντίστοιχη χρονική στιγμή που αποσυνδέεται στο δίκτυο. Δηλαδή, θα προκύψουν ακόμα δύο πίνακες όπου ο ένας θα αποτελείται από τις τιμές της ενέργειας ένταξης κάθε αμαξιού και ο δεύτερος από τις τιμές της ενέργειας αποσύνδεσης (τοποθετημένες στην κατάλληλη χρονική στιγμή του πίνακα).

3.5 Υπολογισμός ορίων συγκεντρωτικού μοντέλου φορτιστών (aggregated)

Έχοντας υπολογίσει τα άνω και κάτω όρια ισχύος και ενέργειας για κάθε φορτιστή ξεχωριστά, θα προχωρήσουμε τώρα στον υπολογισμό των συγκεντρωτικών ορίων (aggregated). Αυτό θα γίνει αθροίζοντας τις αντίστοιχες τιμές όλων των φορτιστών. Δηλαδή θα παίρνουμε σαν όρισμα τους αντίστοιχους πίνακες, με περιεχόμενο τις τιμές ανά λεπτό κάθε φορτιστή και θα επιστρέφουμε ένα διάνυσμα για κάθε μεταβλητή (E_{up} , E_{down} , P_{max} , P_{min}) με περιεχόμενο το συγκεντρωτικό άθροισμα των τιμών ανά λεπτό. Θα προκύψουν δηλαδή νέα διανύσματα με τις συγκεντρωτικές τιμές του δικτύου ανά λεπτό. Παρακάτω παρουσιάζεται η αντίστοιχη μαθηματική πράξη για τις συγκεντρωτικές τιμές:

$$\sum_{charger=1}^N X[charger, time] \text{ (where X indicates the value)}$$

Αναλυτικότερα, οι μεταβλητές E_{up} , E_{down} , P_{max} , P_{min} σε aggregated επίπεδο, θα υπολογιστούν ως εξής:

$$\begin{aligned} & \sum_{charger=1}^N E_{up}[charger, time] \\ & \sum_{charger=1}^N E_{down}[charger, time] \\ & \sum_{charger=1}^N P_{max}[charger, time] \end{aligned}$$

$$\sum_{charger=1}^N P_{min}[charger, time]$$

3.6 Προσομοίωση λειτουργίας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ως ισοδύναμο συσσωρευτή

Αρχικά, αξίζει να αναφερθεί ότι η μοντελοποίησή μας ανταποκρίνεται σε ρεαλιστικά γεγονότα και η διασύνδεση των αμαξιών στους φορτιστές δεν ξεκινάει από το μηδέν. Αυτό το πετύχαμε, “τρέχοντας” την διαδικασία διασύνδεσης των οχημάτων στους φορτιστές, με βάση τις κατανομές πιθανοτήτων που αναλύθηκαν παραπάνω, και για δεύτερη ημέρα. Η προσομοίωση του φορτιστή εστίασε στο δεύτερο εικοσιτετράωρο. Με αυτόν τον τρόπο, η ημερήσια χρήση των φορτιστών ανταποκρίνεται σε ένα πλήρως λειτουργικό εικοσιτετράωρο καθώς τα ηλεκτρικά οχήματα στην καθημερινότητά μας αλληλεπιδρούν με αυτούς με έναν συνεχή τρόπο. Έχοντας στην διάθεσή μας τα όρια φόρτισης ($E_{up}, E_{down}, E_{max}, E_{min}, P_{max}, P_{min}$), των οποίων ο τρόπος λήψης έχει αναλυθεί πλήρως, μπορούμε να προχωρήσουμε στην προσομοίωση λειτουργίας φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ως ισοδύναμο συσσωρευτή. Η διαδικασία αυτή εστίασε στο χρονικό διάστημα το οποίο ξεκινάει την στιγμή σύνδεσης του πρώτου οχήματος (που βρίσκεται συνδεδεμένο στον φορτιστή το δεύτερο εικοσιτετράωρο) και τελειώνει την στιγμή αποσύνδεσης του τελευταίου αυτοκινήτου του δεύτερου εικοσιτετράωρου. Στη συνέχεια, αφού έχουμε το χρονικό διάστημα που μας ενδιαφέρει, “παίρνουμε” κάθε αμάξι, που καταφτάνει στον φορτιστή, ξεχωριστά (το ένα μετά το άλλο) και προσομοιώνουμε την φόρτισή του. Πιο συγκεκριμένα, σεβόμενοι πάντα τα όρια ($E_{up}, E_{down}, E_{max}, E_{min}, P_{max}, P_{min}$) και τις απαιτήσεις του κάθε χρήστη (SOC_0, SOC_{target}), βρίσκουμε την βέλτιστη πορεία που θα χαράξει η γραφική παράσταση της φόρτισης του οχήματος, με κύριο γνώμονα το οικονομικό όφελος, ανάλογα με την τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος την διάρκεια της ημέρας. Η δειγματοληψία της όλης διαδικασίας γίνεται κάθε 15 λεπτά της ώρας.

3.7 Συνάθροιση όλων των ξεχωριστών προσομοιώσεων φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων ως ισοδύναμη μπαταρία

Προκειμένου να γίνει σύγκριση ανάμεσα στην αντιμετώπιση των φορτιστών ως ενιαίο σύνολο ή ως κάθε μονάδα ξεχωριστά, πρέπει να αθροίσουμε τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κάθε φορτιστή. Πιο συγκεκριμένα, προσομοιώνουμε έναν προς έναν όλους τους φορτιστές ως ισοδύναμο συσσωρευτή και στη συνέχεια συναθροίζουμε τις βέλτιστες γραφικές φόρτισης που προκύπτουν. Το αποτέλεσμα αυτό που προκύπτει, διαφέρει από την προσομοίωση της συγκεντρωτικής λειτουργίας

φορτιστών, στην οποία ο στόλος των φορτιστών αντιμετωπίζεται ως ενιαία μονάδα και θα αναλυθεί στη συνέχεια. Οι διαφορές ανάμεσα στις δύο αυτές αντιμετωπίσεις, έχουν μεγάλο ενδιαφέρον και θα αναλυθούν παρακάτω.

3.8 Προσομοίωση συγκεντρωτικής λειτουργίας φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων ως ισοδύναμο συσσωρευτή (aggregated)

Η λογική της διαδικασίας που ακολουθήσαμε σε αυτήν την περίπτωση είναι παρόμοια με αυτήν της προσομοίωσης του κάθε φορτιστή, με την μόνη διαφορά ότι έγινε χρήση των ορίων συγκεντρωτικού μοντέλου φορτιστών (aggregated) και όχι των ορίων κάθε φόρτισης ξεχωριστά. Αναλυτικότερα, αντιμετωπίσαμε το σύνολο των φορτιστών ως ένα ενιαίο μοντέλο και προσομοιώσαμε την λειτουργία του. Πιο συγκεκριμένα, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, “τρέξαμε” την διαδικασία διασύνδεσης των οχημάτων στους φορτιστές για 2 μέρες και εστιάσαμε στο δεύτερο εικοσιτετράωρο. Χρησιμοποιήσαμε επίσης, τα συγκεντρωτικά όρια φόρτισης ($E_{up}, E_{down}, P_{max}, P_{min}$), των οποίων ο τρόπος λήψης έχει αναλυθεί πλήρως. Ακόμα θεωρήσαμε ως αρχικό επίπεδο ενέργειας (E_0) την μέση τιμή του αθροίσματος του συγκεντρωτικού άνω και κάτω ορίου της ενέργειας ($E_{up} + E_{down}$) την χρονική στιγμή 24h ή 1441 min (αρχή της δεύτερης ημέρας). Επίσης, ως τελικό επίπεδο ενέργειας (E_{target}) ορίσαμε το αρχικό, αυξημένο κατά το ποσό της ενέργειας που κατανάλωσαν όλα τα αυτοκίνητα σύμφωνα με τον ΑΤΠ.

$$E_0 = \frac{E_{up}(t_0) + E_{down}(t_0)}{2} \quad E_{target} = E_0 + E_{consumed}$$

Έχοντας στην διάθεσή μας τόσο το αρχικό και το τελικό επίπεδο ενέργειας, όσο και τα όρια φόρτισης ($E_{up}, E_{down}, P_{max}, P_{min}$), μπορούμε να προχωρήσουμε στην προσομοίωση της συγκεντρωτικής λειτουργίας φορτιστών και να λάβουμε τον βέλτιστο τρόπο φόρτισης του συνόλου των ηλεκτρικών οχημάτων, αντιμετωπίζοντας όλους τους φορτιστές ως ενιαία μονάδα. Αξίζει ακόμα να αναφερθεί ότι στην προσομοίωση ολόκληρου του δικτύου, στο άνω και κάτω όριο φόρτισης $E_{up}(aggregated)$ και $E_{down}(aggregated)$ αφαιρέθηκε το εξής offset:

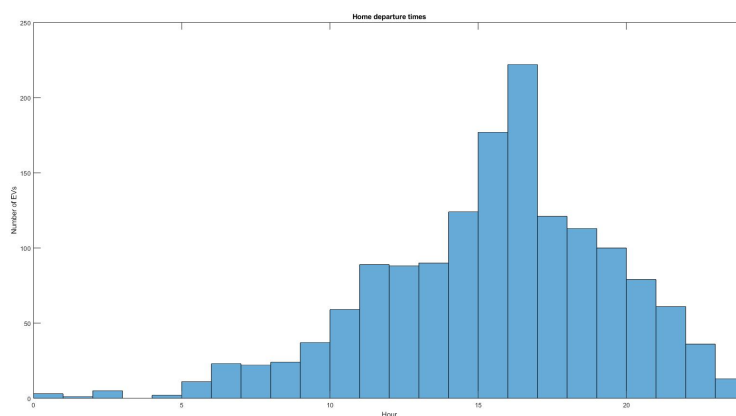
$$\left\{ \sum_{t=0}^t E_{0aggregated}(t) - \sum_{t=0}^t E_{targetaggregated}(t) \right\}$$

Υπολογίστηκε δηλαδή το συνολικό ποσό της ενέργειας που συνδέθηκε στο δίκτυο από το σύνολο των φορτιστών, αφαιρώντας από αυτό, το συνολικό ποσό της ενέργειας που αποσυνδέθηκε ανά λεπτό. Αυτό έγινε επειδή κάθε φορτιστής λειτουργεί σαν “κυψέλη” της ισοδύναμης μπαταρίας και κάθε σύνδεση και αποσύνδεση ενός οχήματος επηρεάζει την συνολική προσομοίωση.

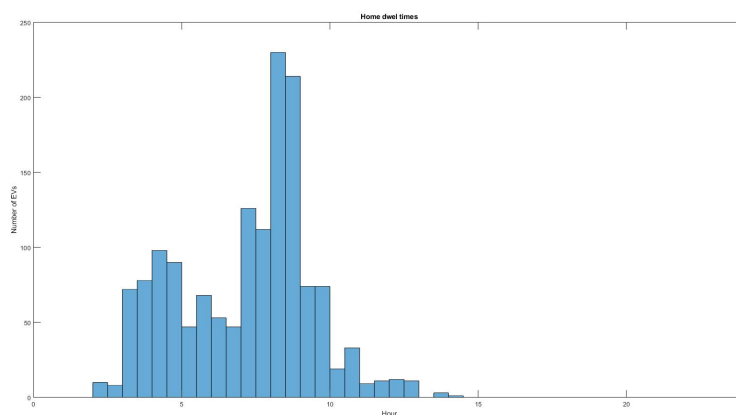
4 Αποτελέσματα μοντελοποίησης

4.1 Ρυθμός άφιξης και αναχώρησης του στόλου των ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Αρχικά, παρουσιάζεται ο ρυθμός με τον οποίο καταφτάνουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα στους διάφορους τύπους φορτιστών (home – social – work). Επίσης, παραθέτονται και οι αντίστοιχοι χρόνοι παραμονής. Οι χρόνοι αυτοί, βασίζονται στις κατανομές πιθανοτήτων που αναφέρθηκαν στο θεωρητικό κομμάτι παραπάνω. Χρόνοι άφιξης και παραμονής σε φορτιστές στο οικιακό περιβάλλον:

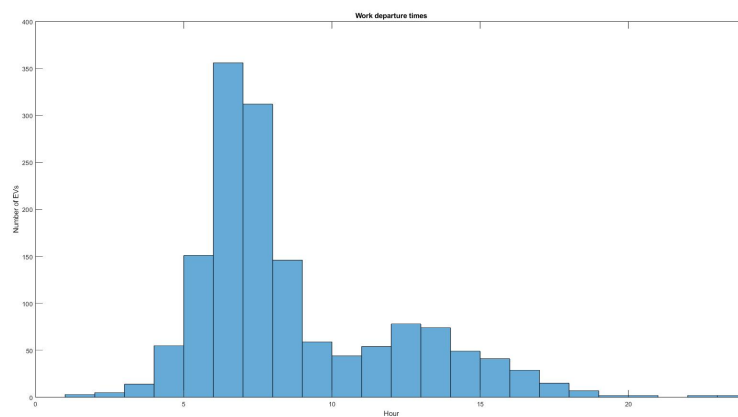


Σχήμα 49: Ώρες άφιξης στο οικιακό περιβάλλον

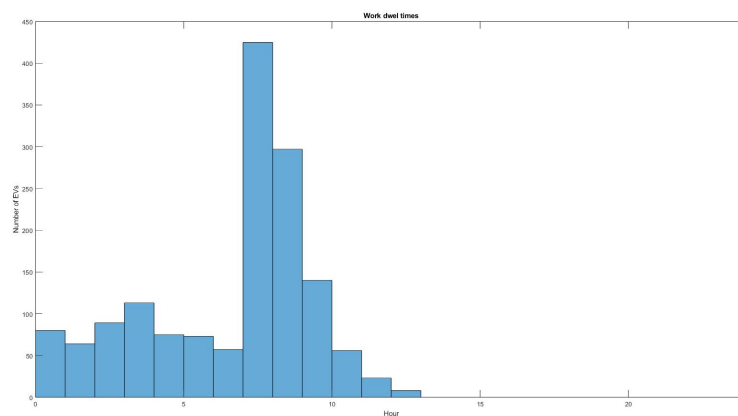


Σχήμα 50: Ώρες παραμονής στο οικιακό περιβάλλον

Χρόνοι άφιξης και παραμονής σε φορτιστές στο περιβάλλον εργασίας:

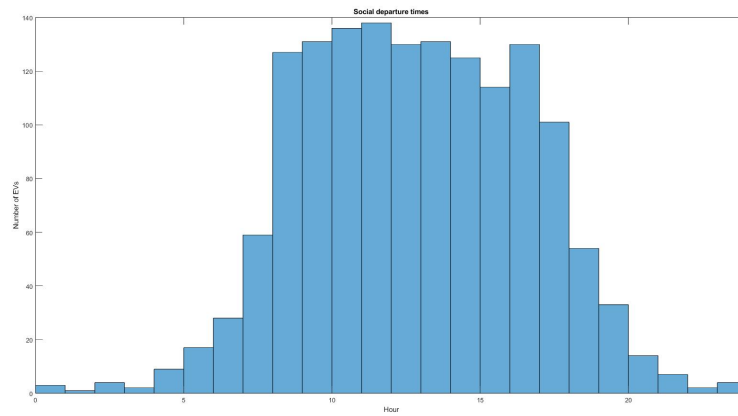


Σχήμα 51: Ώρες άφιξης στο περιβάλλον εργασίας

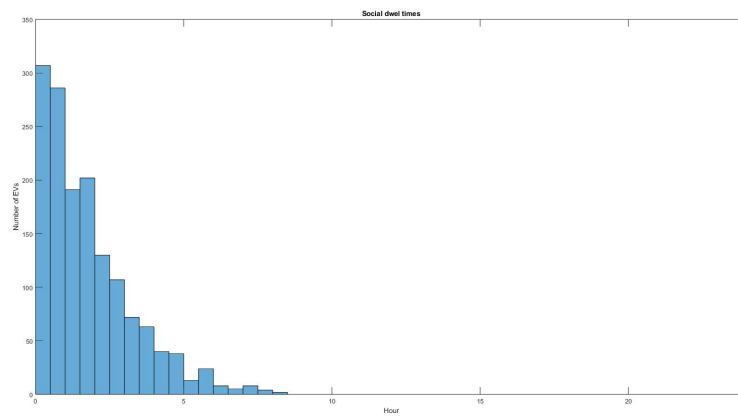


Σχήμα 52: Ώρες παραμονής στο περιβάλλον εργασίας

Χρόνοι άφιξης και παραμονής σε φορτιστές δημόσιων χώρων:



Σχήμα 53: Ώρες άφιξης σε δημόσιους χώρους



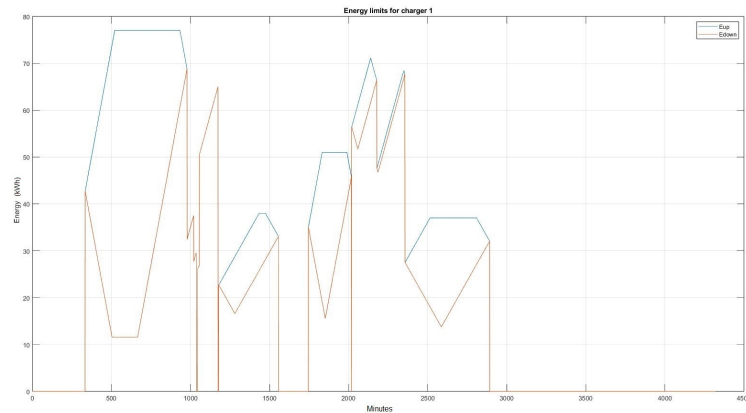
Σχήμα 54: Ώρες παραμονής σε δημόσιους χώρους

Είναι εμφανές ότι η μορφή των κατανομών δεδομένων των χρόνων άφιξης και παραμονής των οχημάτων στους φορτιστές, ταυτίζεται πλήρως με την αντίστοιχη μορφή των κατανομών πιθανοτήτων του θεωρητικού μέρους.

4.2 Άνω και κάτω όρια φόρτισης ηλεκτρικών αυτοκινήτων ανά φορτιστή

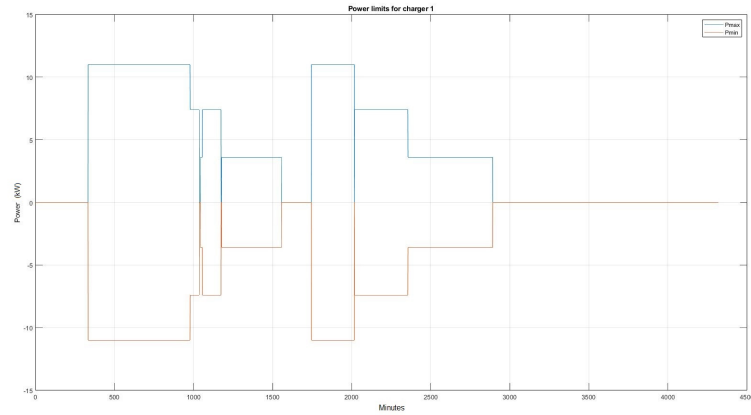
Στη συνέχεια, συνδέθηκαν τα οχήματα στους διαθέσιμους φορτιστές και προέκυψαν τα όρια φόρτισης για την ενέργεια και την ισχύ φόρτισης με βάση τον αλ-

γόριθμο παραγωγής των ορίων που αναλύθηκε παραπάνω. Έτσι, ανάλογα με την διαθέσιμη τεχνολογία φόρτισης κάθε φορά (G2V – V2G - dump charge), έχουμε κάποιες διαφορές στην μορφή των γραφικών απεικονίσεων των ορίων αυτών. Περίπτωση G2V και V2G τεχνολογίας:



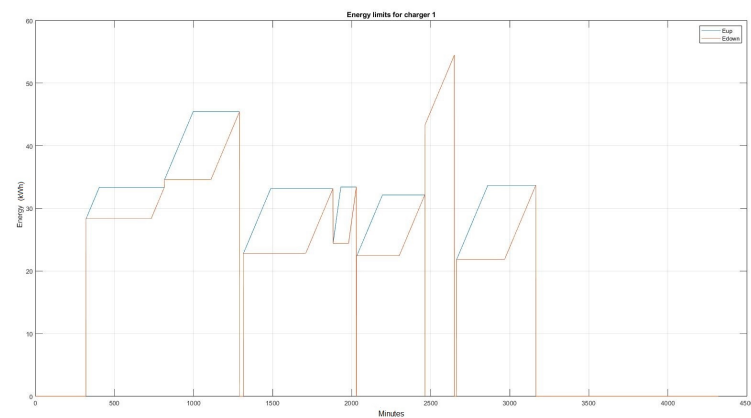
Σχήμα 55: Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης για τον φορτιστή 1 (G2V and V2G)

Είναι εμφανές από την παραπάνω γραφική ότι συνδέθηκαν συνολικά στον φορτιστή αυτό 10 αμάξια σε βάθος δύο εικοσιτετράωρων. Επίσης φαίνονται όλες οι πιθανές περιπτώσεις που μπορεί να ακολουθήσει η γραφική των ορίων της ενέργειας. Για παράδειγμα στο δεύτερο όχημα έχουμε την περίπτωση όπου ο χρόνος παραμονής του οχήματος δεν αρκεί να φτάσει στο επιθυμητό ποσοστό η μπαταρία και φορτίζει όσο προλάβει στο χρονικό αυτό διάστημα (case 1 G2V and V2G). Στο όγδοο αυτοκίνητο, έχουμε την περίπτωση όπου το άνω και κάτω όριο δεν “φτάνει” αντίστοιχα στο Emax και Emin (case 2 G2V and V2G). Από την άλλη, στο πρώτο όχημα, το άνω και κάτω όριο προλαβαίνει να φτάσει στις ακραίες τιμές Emax και Emin (case 3 G2V and V2G). Παρακάτω φαίνονται και τα αντίστοιχα όρια της ισχύς για τον ίδιο φορτιστή. Αξίζει να τονιστεί ότι η ισχύς φόρτισης (Pmax) και προσφοράς στο δίκτυο (Pmin) έχουν σε κάθε φόρτιση ίδιο μέτρο. Αυτό οφείλεται στην δυνατότητα της αμφίδρομης ροής ισχύος που μας προσφέρει η τεχνολογία V2G.



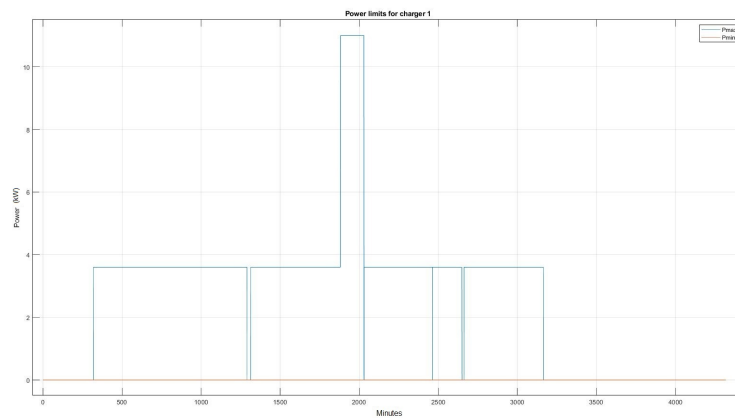
Σχήμα 56: Άνω και κάτω όρια ισχύος φόρτισης για τον φορτιστή 1 (G2V and V2G)

Περίπτωση G2V και απουσία της V2G τεχνολογίας:



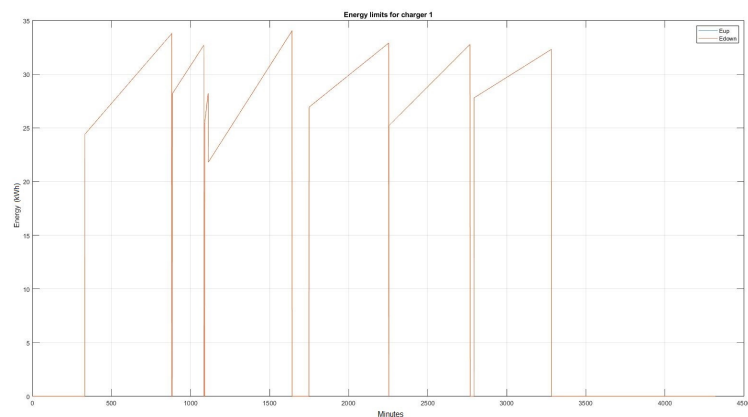
Σχήμα 57: Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Μόνο G2V)

Είναι εμφανές από την παραπάνω γραφική ότι συνδέθηκαν συνολικά στον φορτιστή αυτό 7 αμάξια σε βάθος δύο εικοσιτετράωρων. Ακόμα, είναι φανερή η απουσία της V2G τεχνολογίας από το γεγονός ότι δεν έχουμε αρνητική, παρά μόνο θετική κλίση στα άνω και κάτω όρια της ενέργειας. Η απουσία της V2G τεχνολογίας, είναι πιο ευδιάκριτη από την γραφική των ορίων της ισχύος, στις οποίες η ισχύς προσφοράς στο δίκτυο (P_{min}), είναι μόνιμα ίση με το μηδέν.



Σχήμα 58: Άνω και κάτω όρια ισχύος φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Μόνο G2V)

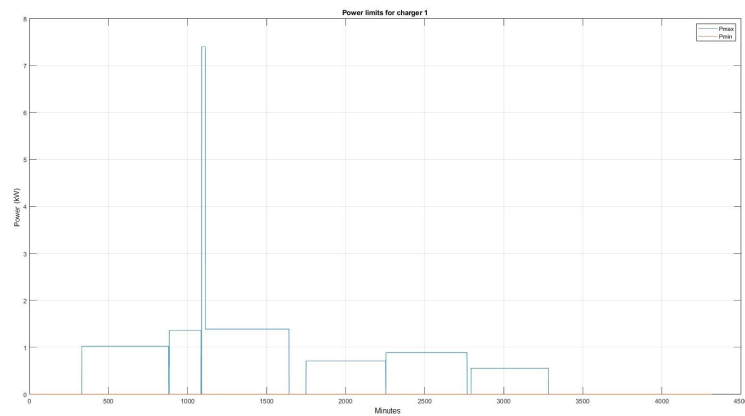
Περίπτωση DUMP τρόπου φόρτισης:



Σχήμα 59: Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Ανόητος τρόπος)

Είναι εμφανές από την παραπάνω γραφική ότι συνδέθηκαν συνολικά στον φορτιστή αυτό 7 αμάξια σε βάθος δύο εικοσιτετράωρων. Ακόμα, είναι φανερό το γεγονός ότι όλα τα οχήματα φορτίζουν με συνεχή απορρόφηση ισχύος από το δίκτυο καθ' όλη την διάρκεια παραμονής τους σε αυτό. Αυτό οφείλεται στο ότι φορτίζουν είτε με την μέγιστη επιτρεπτή ισχύ P_{max} (όταν ο χρόνος παραμονής του οχήματος δεν αρκεί να φτάσει η μπαταρία στο επιθυμητό ποσοστό του χρήστη) (case 1 “dump” way) είτε με προσαρμοσμένη ισχύ έτσι ώστε την στιγμή αποσύνδεσης του αμαξίου η μπαταρία να φτάσει στο επιθυμητό ποσοστό (περίπτωση που

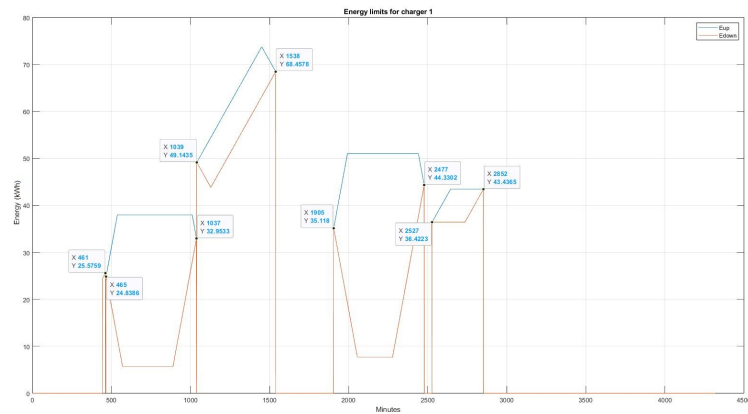
ο χρόνος παραμονής του οχήματος επαρκεί) (case 2 “dump” way). Τα αντίστοιχα όρια της ισχύος φαίνονται παρακάτω. Πάλι είναι εμφανής η απουσία της V2G τεχνολογίας.



Σχήμα 60: Άνω και κάτω όρια ισχύος φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Ανόητος τρόπος)

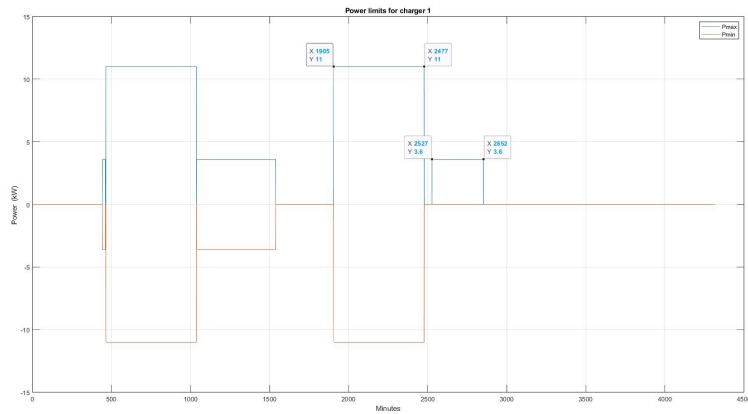
4.3 Προσομοίωση φορτιστή με όλες τις παραπάνω περιπτώσεις διαθέσιμες

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα όρια φόρτισης ενός φορτιστή, του οποίου τα συνδεδεμένα αυτοκίνητα, εκπροσωπούν όλες τις παραπάνω περιπτώσεις.



Σχήμα 61: Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)

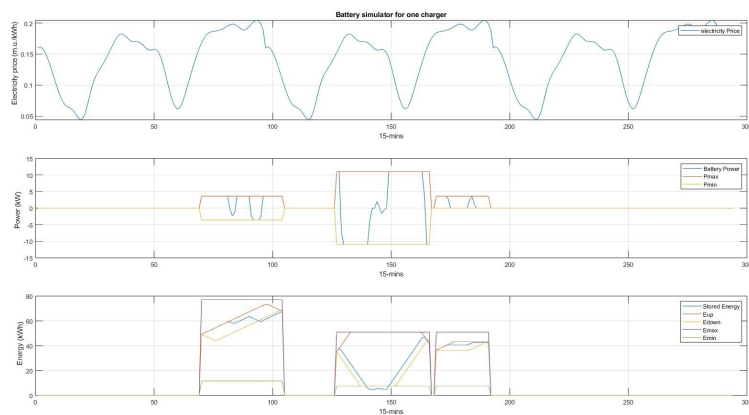
Αντίστοιχα οι γραφικές για την ισχύ παραθέτονται παρακάτω:



Σχήμα 62: Άνω και κάτω όρια ισχύος φόρτισης για τον φορτιστή 1 (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)

Βλέπουμε από τις παραπάνω απεικονίσεις ότι συνολικά συνδέθηκαν 5 ηλεκτρικά αυτοκίνητα σε βάθος δυο ημερών. Κάθε όχημα από αυτά, είχε τους δικούς του περιορισμούς όσον αφορά την τεχνολογία φόρτισής του. Για παράδειγμα, το τέταρτο αμάξι το οποίο συνδέθηκε το 1905ο λεπτό και αποσυνδέθηκε το 2477, είναι φανερό ότι φορτίστηκε με G2V και V2G δυνατότητα καθώς η ισχύς του μπορεί να πάρει τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές. Από την άλλη το πέμπτο αμάξι το οποίο συνδέθηκε το 2527ο λεπτό και αποσυνδέθηκε το 2852ο, είναι φανερό ότι

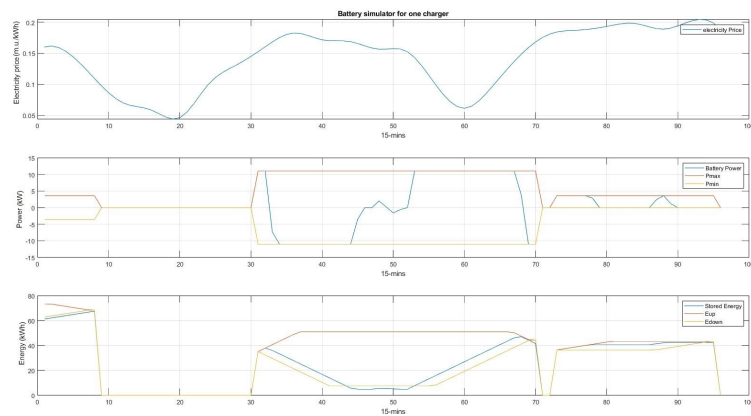
έχει διαθέσιμη μόνο την G2V λειτουργία, καθώς η ισχύς του δεν μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές, δηλαδή δεν μπορεί να προσφέρει ενέργεια στο δίκτυο. Εφόσον παρουσιάσαμε τα άνω και κάτω όρια της ενέργειας και ισχύος του φορτιστή, μπορούμε τώρα να προχωρήσουμε στην προσομοίωση της λειτουργίας του ως ισοδύναμο συσσωρευτή. Έτσι, θα προκύψουν οι εξής γραφικές:



Σχήμα 63: Προσομοίωση λειτουργίας του φορτιστή 1 ως ισοδύναμη μπαταρία (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)

Η προσομοίωση γίνεται με χρονικό βήμα 15 λεπτών και εστιάζει στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που είναι συνδεδεμένα με αυτόν το δεύτερο εικοσιτετράωρο (24 – 48 ώρες ή 96 – 192 δεκαπεντάλεπτα ή 1441 – 2880 λεπτά). Το πρώτο αυτοκίνητο που βρίσκεται συνδεδεμένο με τον φορτιστή αυτόν στην διάρκεια της δεύτερης ημέρας είναι το τρίτο αμάξι του οποίου η φόρτιση ξεκινά το 1039ο λεπτό και τελειώνει το 1538ο. Από την άλλη το τελευταίο όχημα που βρίσκεται συνδεδεμένο με τον φορτιστή αυτόν στην διάρκεια της δεύτερης ημέρας είναι το πέμπτο αμάξι του οποίου η φόρτιση ξεκινά το 2527ο λεπτό και τελειώνει το 2852ο. Έχοντας βρει τις φορτίσεις των ΗΟ που μας ενδιαφέρουν, μπορούμε να προγραμματίσουμε την βέλτιστη ροή ισχύος ανάμεσα στο όχημα και το δίκτυο με κύριο γνώμονα το οικονομικό όφελος, σεβόμενοι πάντα τα όρια και τους περιορισμούς κάθε αμαξιού. Τα αποτελέσματα του προγραμματισμού αυτού φαίνονται και στις παραπάνω γραφικές παραστάσεις. Πιο συγκεκριμένα στην πρώτη αναπαριστάται η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος (m.u./kWh), στην δεύτερη η ροή ισχύος ανάμεσα στο ΗΟ και το δίκτυο και στην τρίτη η αποθηκευμένη ενέργεια στην μπαταρία του ΗΟ. Σε κάθε απεικόνιση φαίνονται και τα αντίστοιχα όρια φόρτισης κάθε αμαξιού που αναλύθηκαν και προηγουμένως, με την μόνη διαφορά ότι τώρα το βήμα απεικόνισης είναι κάθε 15 λεπτά. Είναι φανερό ότι σε κάθε φόρτιση, το όχημα αποκτά το επιθυμητό ποσοστό στον συσσωρευτή του την στιγμή της αποσύνδεσής του και δεν υπερβαίνονται τα όρια που έχουμε θέσει. Μόνο στην γραφική αναπαράσταση της αποθηκευμένης ενέργειας υπάρχει η πιθανότητα μιας πολλή μικρής υπέρβασης

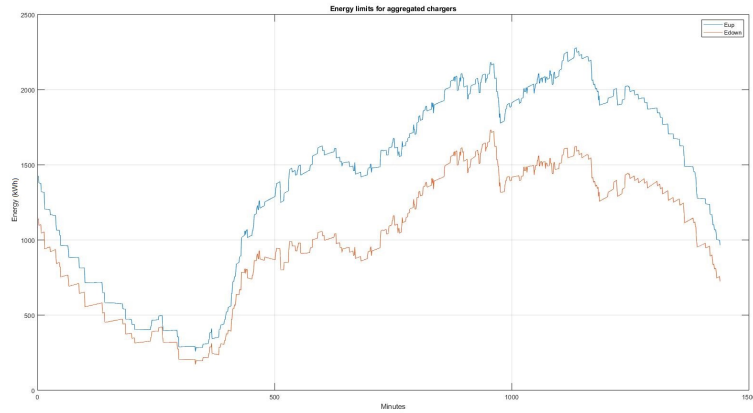
των άνω και κάτω ορίων, για πολύ μικρά χρονικά διαστήματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η βασική συνάρτηση που χρησιμοποιήσαμε για την προσομοίωση της φόρτισης παράγει την κυματομορφή της ισχύος (η οποία υπακούει στα άνω και κάτω όρια). Στη συνέχεια, μέσω του ολοκληρώματος της παραπάνω ισχύος, υπολογίζουμε και την αντίστοιχη αποθηκευμένη ενέργεια, η οποία μπορεί να αποκλίνει για μικράδιαστήματα. Η απόκλιση αυτή δεν επηρεάζει τα αποτελέσματα της συνολικής προσομοίωσης των φορτιστών καθώς όλοι οι υπολογισμοί βασίζονται στις τιμές της ισχύος. Για λόγους ευκολίας, παρακάτω φαίνεται η προηγούμενη προσομοίωση, εστιασμένη μόνο στο δεύτερο 24ωρο.



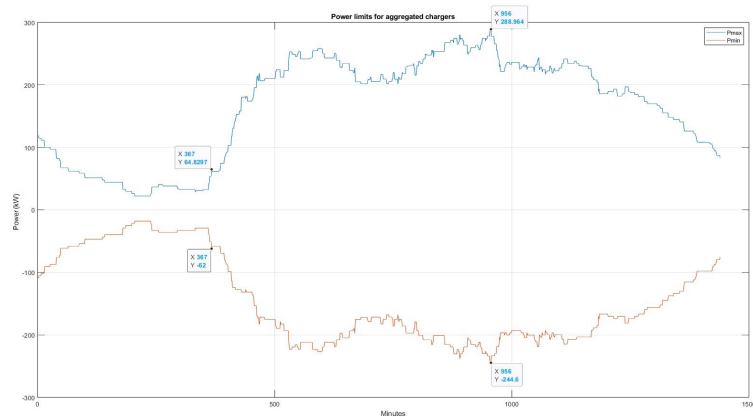
Σχήμα 64: Προσομοίωση λειτουργίας του φορτιστή 1 ως ισοδύναμη μπαταρία εστιάζοντας μόνο στο δεύτερο 24ωρο (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)

4.4 Προσομοίωση λειτουργίας φορτιστών σε συγκεντρωτικό επίπεδο (aggregated)

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η προσομοίωση της λειτουργίας των φορτιστών σε συγκεντρωτικό επίπεδο ως ισοδύναμη μπαταρία. Στην προσομοίωση, χρησιμοποιήθηκαν 300 HO (100 ανά κάθε είδος φόρτισης). Αρχικά, λήφθηκαν τα αντίστοιχα άνω και κάτω όρια φόρτισης, η απεικόνιση των οποίων φαίνεται παρακάτω:



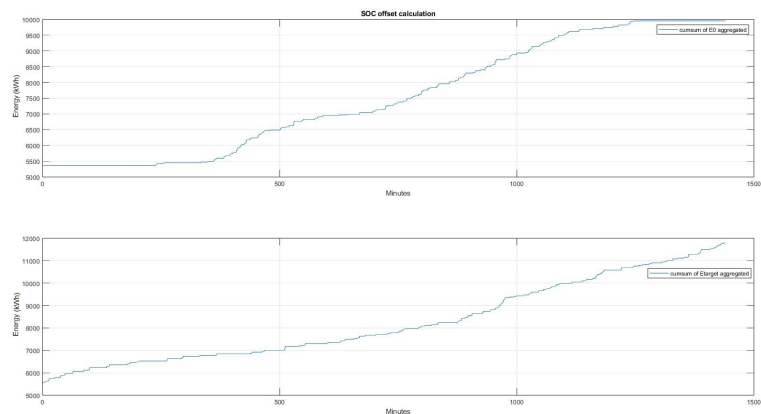
Σχήμα 65: Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης σε συγκεντρωτικό επίπεδο (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)



Σχήμα 66: Άνω και κάτω όρια ισχύος φόρτισης σε συγκεντρωτικό επίπεδο (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)

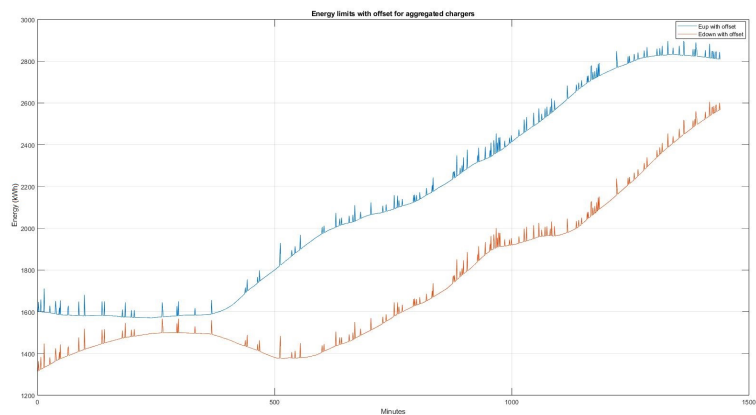
Είναι φανερό ότι τα όρια ισχύος δεν είναι συμμετρικά και συγκεκριμένα το κάτω όριο P_{min} , έχει χαμηλότερες τιμές από αυτές του P_{max} . Αυτό είναι λογικό και οφείλεται στο γεγονός ότι ανάμεσα στον στόλο των οχημάτων, πολλά από αυτά, δεν διαθέτουν την δυνατότητα V2G και δεν μπορούν να αποδώσουν ενέργεια στο δίκτυο, παρά μόνο να λάβουν από αυτό. Ακόμα, αξίζει να αναφερθεί και η σημασία του ποσού που χρησιμοποιήθηκε για την αντιστάθμιση των άνω και κάτω ορίων ενέργειας στους φορτιστές σε συγκεντρωτικό επίπεδο. Πιο συγκεκριμένα, αναφερόμαστε στο SOC offset, στο οποίο όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως,

υπολογίστηκε το συνολικό ποσό της ενέργειας που συνδέθηκε στο δίκτυο από το σύνολο των φορτιστών, αφαιρώντας από αυτό, το συνολικό ποσό της ενέργειας που αποσυνδέθηκε ανά λεπτό. Αυτό έγινε επειδή κάθε φορτιστής λειτουργεί σαν 'κυψέλη' της ισοδύναμης μπαταρίας και κάθε σύνδεση και αποσύνδεση ενός οχήματος επηρεάζει την συνολική προσομοίωση. Οι αντίστοιχες γραφικές φαίνονται παρακάτω:



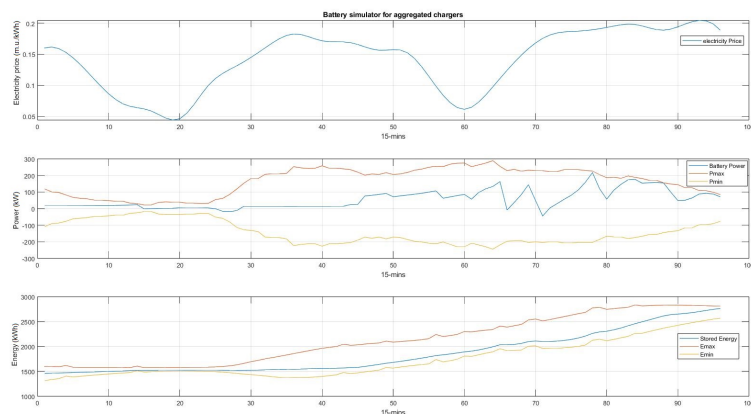
Σχήμα 67: SOC offset

Μεγάλο ενδιαφέρον έχει η επίδραση του SOC offset στα συγκεντρωτικά άνω και κάτω όρια της ενέργειας, η οποία φαίνεται στην παρακάτω γραφική:



Σχήμα 68: Άνω και κάτω όρια ενέργειας φόρτισης επηρεασμένα από το SOC offset σε συγκεντρωτικό επίπεδο (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)

Στη συνέχεια θα προχωρήσουμε στην προσομοίωση του συγκεντρωτικού μοντέλου φορτιστών ως ισοδύναμο συσσωρευτή. Έτσι, εστιάζοντας στο δεύτερο εικοσιτετράωρο, θα προκύψουν οι εξής γραφικές:

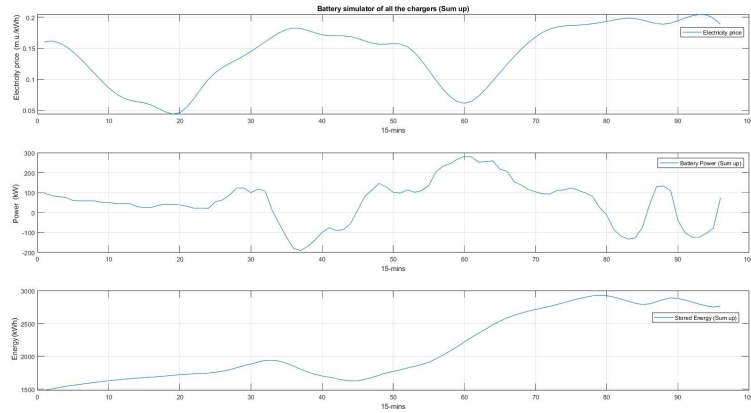


Σχήμα 69: Προσομοίωση λειτουργίας συγκεντρωτικού επιπέδου ως ισοδύναμη μπαταρία (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)

Στις γραφικές, φαίνονται και τα άνω και τα κάτω όρια ισχύος και ενέργειας αντίστοιχα. Είναι φανερό ότι το συγκεντρωτικό μοντέλο προσομοίωσης, δεν υπερβαίνει τα όρια αυτά.

4.5 Προσομοίωση λειτουργίας φορτιστών ως άθροισμα των μονομερών προσομοιώσεων φορτιστών

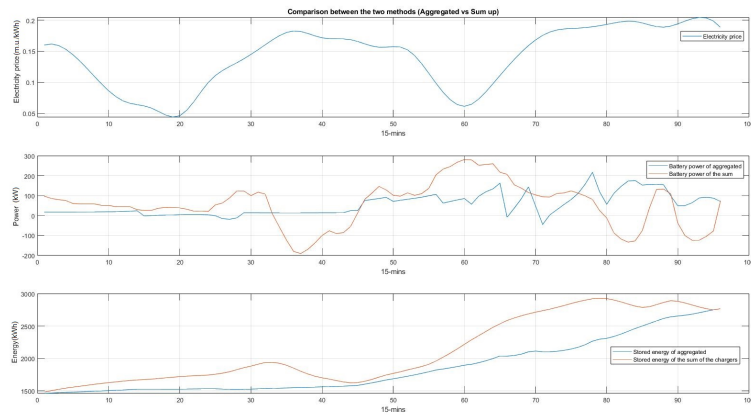
Προηγούμενως, αναλύθηκε η προσομοίωση της λειτουργίας ενός φορτιστή ως ισοδύναμο συσσωρευτή. Εφαρμόζοντας την μέθοδο αυτή για κάθε φορτιστή και αθροίζοντας όλα τα αποτελέσματα, θα προκύψει η συνολική προσομοίωση του συνόλου των φορτιστών. Αυτήν στην φορά όμως, αντιμετωπίζουμε κάθε φορτιστή ξεχωριστά, σε αντίθεση με την προηγούμενη συγκεντρωτική (aggregated) αντιμετώπιση όλων των φορτιστών ως έναν ενιαίο. Αθροίζοντας τις προσομοιώσεις όλων των φορτιστών, θα προκύψουν οι εξής γραφικές που προσομοιώνουν την φόρτιση των 300 HO (100 ανά κάθε είδος φόρτισης):



Σχήμα 70: Αθροιστική προσομοίωση λειτουργίας φορτιστών ως ισοδύναμη μπαταρία (Όλες οι περιπτώσεις διαθέσιμες)

4.6 Σύγκριση αποτελεσμάτων των δύο διαφορετικών μεθόδων προσομοίωσης

Έχοντας στην διάθεσή μας τα αποτελέσματα των δύο διαφορετικών τρόπων αντιμετώπισης του συνόλου των φορτιστών του ίδιου δικτύου, αξίζει να τα συγκρίνουμε και να εστιάσουμε στις διαφορές μεταξύ τους.



Σχήμα 71: Σύγκριση συγκεντρωτικής και αθροιστικής προσομοίωσης λειτουργίας όλων των φορτιστών

Είναι εμφανές ότι έχουν κάποιες διαφορές μεταξύ τους οι δύο αυτοί διαφορετικοί τρόποι προσομοίωσης της λειτουργίας του συνόλου των φορτιστών. Αρχικά, με την συγκεντρωτική (aggregated) αντιμετώπιση των φορτιστών, έχουμε μικρότερη διακύμανση γύρω από την μέση τιμή της ισχύος και οι ακραίες τιμές που παίρνει η ισχύς, έχουν μικρότερο μέτρο από τις αντίστοιχες τιμές της αθροιστικής αντιμετώπισης των μονομερών προσομοιώσεων. Ακόμα, είναι φανερό ότι με την συγκεντρωτική (aggregated) αντιμετώπιση των φορτιστών, έχουμε πολλά απότομα ανεβοκατεβάσματα της τιμής της ισχύος. Από την άλλη με την αθροιστική αντιμετώπιση των μονομερών προσομοιώσεων, η πορεία της ισχύος είναι πιο ομαλή με λίγα ανεβοκατεβάσματα. Επιπρόσθετα, στην αθροιστική αντιμετώπιση παρατηρείται το γεγονός ότι το μέτρο των τιμών που παίρνει η ισχύς του δικτύου είναι πολύ μεγαλύτερο από το αντίστοιχο της συγκεντρωτικής αντιμετώπισης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ανάγκη ενός αναβαθμισμένου και πιο ακριβούς δικτύου, το οποίο θα μπορεί να διαχειρίζεται μεγαλύτερες ισχύς. Παρόμοια εικόνα έχει και η γραφική της αποθηκευμένης ενέργειας, στην οποία φαίνεται ότι η ενέργεια που αποθηκεύεται στα ΗΟ λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές στον ΑΤΠ σε σχέση με τον ΣΤΠ.

4.7 Παρατήρηση της σημασίας του συνολικού αριθμού των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και του ποσοστού χρήσης της λειτουργίας V2G στο τελικό αποτέλεσμα

Παρακάτω, δίνεται έμφαση στη σημασία του συνολικού αριθμού των διασυνδεδεμένων με το δίκτυο ηλεκτρικών αυτοκινήτων στα αποτελέσματα της μοντελοποίησης. Επίσης, εστιάζουμε στον σημαντικό ρόλο που παίζει το ποσοστό χρήσης της λειτουργίας V2G από τα οχήματα.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φόρτισης 4500 ηλεκτρικών αυτοκινήτων (1500 ανά κατηγορία home-work-social) με εναλλαγές στο ποσοστό της δυνατότητας V2G φαίνονται παρακάτω:

	V2G (0%)	V2G (20%)	V2G (50%)	V2G (80%)
Μέση τιμή ισχύος ΣΤΠ (kW)	908.22	914.38	911.35	897.85
Μέση τιμή ισχύος ΑΤΠ (kW)	908.22	916.7	911.35	897.85
Κόστος φόρτισης ΣΤΠ (m.u.)	3256.9	3353	3347.3	3346.3
Κόστος φόρτισης ΑΤΠ (m.u.)	2682	2644.3	2439.8	2025.9
Μέγιστη τιμή ισχύος ΣΤΠ (kW)	1767.33	1824.32	1952.16	2044.24
Ελάχιστη τιμή ισχύος ΣΤΠ (kW)	64.35	-177.68	-580.53	-430.1
Μέγιστη τιμή ισχύος ΑΤΠ (kW)	4420	3844	3762.64	4269.54
Ελάχιστη τιμή ισχύος ΑΤΠ (kW)	118.36	-442.75	-1557.25	-3137.07

Πίνακας 4: Αποτελέσματα προσομοίωσης φόρτισης 4500 ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φόρτισης 1500 ηλεκτρικών αυτοκινήτων (500 ανά κατηγορία home-work-social) με εναλλαγές στο ποσοστό της δυνατότητας V2G φαίνονται παρακάτω:

	V2G (0%)	V2G (20%)	V2G (50%)	V2G (80%)
Μέση τιμή ισχύος ΣΤΠ (kW)	293.43	292.92	296.75	294.92
Μέση τιμή ισχύος ΑΤΠ (kW)	295.28	298.79	301.81	294.92
Κόστος φόρτισης ΣΤΠ (m.u.)	1087.9	1099.8	1125.6	1130.2
Κόστος φόρτισης ΑΤΠ (m.u.)	868.03	849.8	795.56	675.44
Μέγιστη τιμή ισχύος ΣΤΠ (kW)	629.92	637.57	702.06	763.45
Ελάχιστη τιμή ισχύος ΣΤΠ (kW)	2.61	-148.17	-300.38	-355.74
Μέγιστη τιμή ισχύος ΑΤΠ (kW)	1513.04	1414.08	1306.03	1472.58
Ελάχιστη τιμή ισχύος ΑΤΠ (kW)	23.94	-93.01	-493.1	-889.97

Πίνακας 5: Αποτελέσματα προσομοίωσης φόρτισης 1500 ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης φόρτισης 300 ηλεκτρικών αυτοκινήτων (100 ανά κατηγορία home-work-social) με εναλλαγές στο ποσοστό της δυνατότητας V2G φαίνονται παρακάτω:

	V2G (0%)	V2G (20%)	V2G (50%)	V2G (80%)
Μέση τιμή ισχύος ΣΤΠ (kW)	38	43.39	45.62	48.56
Μέση τιμή ισχύος ΑΤΠ (kW)	62.58	63.41	62.92	63.27
Κόστος φόρτισης ΣΤΠ (m.u.)	139.9	163.8	170.72	184.24
Κόστος φόρτισης ΑΤΠ (m.u.)	186.32	179.94	162.35	155.14
Μέγιστη τιμή ισχύος ΣΤΠ (kW)	121.33	116.13	132.99	148.35
Ελάχιστη τιμή ισχύος ΣΤΠ (kW)	0.06	-41.94	-18.38	-17.4
Μέγιστη τιμή ισχύος ΑΤΠ (kW)	339.5	313.28	313.28	345.85
Ελάχιστη τιμή ισχύος ΑΤΠ (kW)	2.13	-25.62	-141.58	-179.11

Πίνακας 6: Αποτελέσματα προσομοίωσης φόρτισης 300 ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των παραπάνω πινάκων, προκύπτουν κάποια συμπεράσματα που αξίζει να αναφερθούν. Αρχικά, στον συγκεντρωτικό τρόπο προσομοίωσης (ΣΤΠ), το κόστος φόρτισης παραμένει σχετικά σταθερό ανεξαρτήτως από το ποσοστό χρήσης V2G. Από την άλλη, το κόστος φόρτισης στον αθροιστικό τρόπο προσομοίωσης(ΑΤΠ), παρουσιάζει σημαντική πτώση με την αύξηση του ποσοστού V2G. Αυτό είναι λογικό, καθώς με την αύξηση του ποσοστού αυτού, ολοένα και περισσότερα ΗΟ αποδεδμεύουν ηλεκτρική ισχύ στο δίκτυο, με αποτέλεσμα η συνολική φόρτιση να βγαίνει πιο οικονομική. Το οικονομικό όφελος στον ΑΤΠ είναι πολύ περισσότερο κυρίως σε μεγάλο στόλο ΗΟ, καθώς ο προγραμματισμός φόρτισης κάθε φορτιστή γίνεται μεμονωμένα και είναι βελτιστοποιημένος, σε αντίθεση με τον ΣΤΠ όπου ο προγραμματισμός φόρτισης γίνεται με έναν συγκεντρωτικό τρόπο. Επομένως, θα οδηγηθούμε στο αποτέλεσμα ότι με τον

αθροιστικό τρόπο προσομοίωσης, έχουμε συνολικά λιγότερα έξοδα φόρτισης σε κάθε ποσοστό διείσδυσης της V2G. Μοναδική εξαίρεση σε αυτό, είναι η περίπτωση ενός μικρού στόλου ΗΟ (πχ 100 οχήματα) σε συνδιασμό με το χαμηλό ποσοστό χρήσης V2G . Ακόμα με την αύξηση του ποσοστού V2G , δεν παρατηρούμε κάποια σπουδαία μεταβολή στις μέγιστες τιμές της ισχύος και στους δυο τρόπους προσομοίωσης. Αντιθέτως, είναι φανερό η μεγάλη αύξηση του μέτρου της ελάχιστης τιμής της ισχύος. Ειδικά στον ΑΤΠ η αύξηση αυτή είναι ραγδαία. Η αύξηση αυτή των ελάχιστων τιμών, οφείλεται στην ολοένα και περισσότερη προσφερόμενη ισχύ από τα ΗΟ προς το δίκτυο. Όσον αφορά τις μέσες τιμές, και στους δύο τρόπους προσομοίωσης, είναι περίπου ίσες και σχετικά αμετάβλητες από το ποσοστό V2G . Επιπρόσθετα, οι ακραίες τιμές και οι διακυμάνσεις των τιμών της ισχύος γύρω από την μέση τιμή του αθροιστικού τρόπου προσομοίωσης, είναι πολύ μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες του ΣΤΠ. Το γεγονός αυτό, έχει σαν αποτέλεσμα την ανάγκη ενός ισχυρότερου δικτύου, το οποίο θα αντέχει να διαχειριστεί τις μεγάλες αυτές τιμές. Συνεπώς, στον ΑΤΠ, είναι αναγκαία η εγκατάσταση ενός ακριβότερου ηλεκτρικού δικτύου, με μεγαλύτερα καλώδια και πιο ακριβά ηλεκτρικά συστήματα και ηλεκτρικά ισχύος.

Τέλος, όπως είναι λογικό, όσο περισσότερα ηλεκτρικά αυτοκίνητα συνδέονται στο δίκτυο, τόσο μεγαλύτερες είναι και οι τιμές της ισχύος που πρέπει να αντέχει το κύκλωμα. Επίσης, με την αύξηση των διασυνδεδεμένων οχημάτων, θα παρατηρηθεί και η αναμενόμενη αύξηση στο κόστος φόρτισής τους. Ωστόσο με την αύξηση του στόλου των αυτοκινήτων, παρουσιάζεται μια ολοένα και μεγαλύτερη διαφορά ανάμεσα στα κόστη φόρτισης των δυο τρόπων προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, σε ανεβασμένα ποσοστά χρήσης του V2G , ο ΑΤΠ είναι φθηνότερος από τον ΣΤΠ έως και κατά 40% !

5 Βιβλιογραφία

- Kyriakou, D.G., Kanellos, F.D., Ipsakis, D. , Multi-agent-based real-time operation of microgrids employing plug-in electric vehicles and building prosumers , (2024)
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85180754126&doi=10.1016%2fj.segan.2023.101229&partnerID=40&md5=572f5756e799b7b007e5e4702c899a75>
- Manousakis, N.M., Karagiannopoulos, P.S., Tsekouras, G.J., Kanellos, F.D. , Integration of Renewable Energy and Electric Vehicles in Power Systems: A Review (2023)
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85160745215&doi=10.3390%2fpr11051544&partnerID=40&md5=1dc8336bb08fce6dddaae2e608914b44>
- Karandinou, A.A., Kanellos, F.D. , A method for the Assessment of Multi-Objective Optimal Charging of Plug-in Electric Vehicles at Power System Level (2022)
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85134180431&doi=10.37394%2f23203.2022.17.36&partnerID=40&md5=9ff147b258f074866672af53daa6f5ca>
- Kanellos, F.D. , Optimal Scheduling and Real-Time Operation of Distribution Networks With High Penetration of Plug-In Electric Vehicles (2021)
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85151303740&doi=10.1109%2fJSYST.2020.3006002&partnerID=40&md5=a941501d5d69cf8e9af8f618768dfe5d>
- Konstantinidis, G., Kanellos, F.D., Kalaitzakis, K. , A simple multi-parameter method for efficient charging scheduling of electric vehicles (2021)
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85114222473&doi=10.3390%2fasi4030058&partnerID=40&md5=7d129b10847cf1fd6f652753a072017a>
- Kalaitzakis, I., Dakanalis, M., Kanellos, F.D. , Optimal Power Management for Residential PEV Chargers with Frequency Support Capability (2021)
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85112178566&doi=10.1109%2fMOCAS52088.2021.9493342&partnerID=40&md5=442a0aeda953d094d568e1f0895216e>
- Ηλεκτρικό αυτοκίνητο:
https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C_%CE%B1%CF%85%CF%84%CE%BF%CE%BA%CE%AF%CE%BD%CE%B7%CF%84%CE%BF%CE%A0%CE%BB%CE%B5%CE%BF%CE%BD%CE%B5%CE%BA%CF%84%CE%AE%CE%BC%CE%B1%CF%84%CE%B1
- Pros and Cons of EVs:
<https://www.edmunds.com/electric-car/articles/pros-cons-electric-cars.html>

- Διπλωματική εργασία Καρανδινού Αικατερίνης Αγάπης
“Μοντελοποίηση του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας της Κρήτης με μεγάλη διείσδυση ΑΠΕ και ηλεκτρικών οχημάτων”:
<https://dias.library.tuc.gr/view/85820>
- Διπλωματική εργασία Χατζηωαννίδη Λάζαρου “Μοντελοποίηση-Προσομοίωση Συστήματος Ελέγχου Φόρτισης Μεγάλων Στόλων Ηλεκτρικών Αυτοκινήτων”:
<https://dias.library.tuc.gr/view/87752>
- Διπλωματική εργασία Παναγιουλάκη Στέφανου “Αξιολόγηση 2Γ λειτουργίας μεγάλων στόλων ηλεκτρικών οχημάτων”:
<https://dias.library.tuc.gr/view/93020>
- History of the electric vehicle:
https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_the_electric_vehicle
- Types of EVs:
<https://e-amrit.niti.gov.in/types-of-electric-vehicles>
- Charging methods for EVs:
<https://deltrixchargers.com/about-emobility/charging-modes/>
<https://evbox.com/en/ev-charging-guide>
<https://www.kia.com/eu/about-kia/experience-kia/technology/electrification/charging-methods-for-electric-cars/>
- Battery types of EV:
https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_vehicle_battery
<https://www.greencars.com/greencars-101/different-types-of-ev-batteries>
<https://www.businesstoday.in/magazine/corporate/story/as-indias-electric-vehicles-become>
- Charging connectors types:
<https://www.rac.co.uk/drive/electric-cars/charging/charger-types-connectors-speed/#rapid-and-ultra-rapid-charger-connectors>
- V2G:
<https://www.virta.global/vehicle-to-grid-v2g>
- EV database:
<https://ev-database.org>.
- ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΓΡΑΦΕΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ. Γι-ώργος Εμμανουηλίδης
<https://docplayer.gr/1434894-Energeiako-grafeio-aigaioy-ilektrika-aytokinita-giorgos-e.html>
- Image of nowadays EV: <https://community.nasscom.in/communities/engineering-research-design/types-electric-vehicles>
- Image of classic VS electric vehicle:
<https://ulupono.com/newsletter-listing/march-10-2021/mythbusting-gas-vs-electric-vehicle>

- Lead acid battery image:
<https://www.tycorun.com/blogs/news/what-is-the-power-battery-of-an-electric-vehicle>
- Nickel-metal battery image:
https://www.researchgate.net/figure/NiMH-battery-dissection_fig1_286969372
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/nickel-metal-hydride>
- Zebra battery image:
<https://www.semanticscholar.org/paper/Zebra-battery-technologies-for-all-electric-smar-Sullivan-Bingham/496e59c4097d69da7227c2782bd41cacb6742beb>
- Lithium-ion battery image:
<https://www.flashbattery.tech/en/how-solid-state-batteries-work/>
<https://www.renaultgroup.com/en/news-on-air/news/the-electric-car-how-does-its-lithium>
- Ultracapacitor battery image:
<https://interestingengineering.com/science/could-ultracapacitors-replace-batteries-in->