



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Σχεδιασμός Για Την Εγκατάσταση Δικτύου Φορτιστών Για Ηλεκτρικά Αυτοκίνητα Σε Μια Πόλη

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Γ. Ηλιόπουλος

Επιβλέπων : Εμμανουήλ Βαρβαρίγος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ & ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Γ. Ηλιόπουλος

Επιβλέπων : Εμμανουήλ Βαρβαρίγος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22η Φεβρουαρίου 2023.

.....

Εμμανουήλ Βαρβαρίγος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

.....

Θεοδώρα Βαρβαρίγου
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

.....

Ηρακλής Αβραμόπουλος
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Φεβρουάριος 2023

.....

Νικόλαος Γ. Ηλιόπουλος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Νικόλαος Γ. Ηλιόπουλος, 2023.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Περίληψη

Αντικείμενο της συγκεκριμένης εργασίας είναι η μελέτη εγκατάστασης ενός σταθμού φορτιστών σε μια πόλη. Στην διπλωματική αυτή αρχικά γίνεται μια ιστορική αναφορά σε ότι αφορά την εξέλιξη των ηλεκτρικών οχημάτων και την ευρύτερη αγορά στον κόσμο αλλά και στην Ελλάδα καθώς και την μελλοντική εξέλιξή τους η οποία είναι αναπόφευκτη. Στην συνέχεια γίνεται μια εκτενής περιγραφή των μπαταριών μιας και είναι το πιο βασικό κομμάτι στα ηλεκτρικά οχήματα. Επιπλέον περιγράφονται οι υποδοχείς που χρησιμοποιούνται για να πραγματοποιηθεί η φόρτιση καθώς και οι περιοχές που μπορεί να φορτίσει ένας χρήστης ηλεκτρικού οχήματος. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η βιβλιογραφία που χρειάστηκε για την μελέτη και την ανάπτυξη του αλγόριθμου βελτιστοποίησης. Στη συνέχεια πραγματοποιείται η μαθηματική μοντελοποίηση και περιγράφεται τόσο τα διάφορα μοντέλα εξυπηρέτησης των χρηστών όσο και η ποιότητα εξυπηρέτησης με όποια πιθανή καθυστέρηση μπορεί να υφίσταται για να ακολουθήσουν στο επόμενο κεφάλαιο τα αποτελέσματα και οι δοκιμές για τα μοντέλα φόρτισης και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την φόρτιση. Τέλος παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που προέκυψαν καθώς και προτάσεις για περισσότερη έρευνα.

Λέξεις κλειδιά: : Ηλεκτροκίνηση, Ηλεκτρικά Οχήματα, Υβριδικά Ηλεκτρικά Οχήματα, Ισχύς, Μπαταρίες, Υπερπυκνωτές, Κυψέλες καυσίμου, Υποδοχείς, Σημεία Φόρτισης Ηλεκτρικών Οχημάτων, Σταθμός Φόρτισης, Είδη Φόρτισης, Βέλτιστος προγραμματισμός, Μοντέλα Φόρτισης, Ποιότητα Εξυπηρέτησης.

Abstract

The subject of this research paper concerns the installation of a charging station within a city. Firstly, the development of electric vehicles is examined and their evolution throughout the years, the wider electric vehicle market in the world, as well as in Greece, including their future evolution, which is inevitable. The description and use of batteries within electric vehicles are carefully illustrated as they play a vital role in their functionality. Furthermore, the receptacles used to carry out the charging are described including the areas where electric vehicle users can charge the vehicles. The next chapter presents the literature needed for the study and development of the optimization algorithm. Mathematical modeling is then carried out and both the different user service models and the quality of service with any potential delay that may exist are described. Followed by the next chapter, which contains the results and tests on the charging models and other factors affecting charging. Finally, the conclusions that were reached are presented as well as suggestions for further research.

Keywords: Electromobility, Electric Vehicles, Hybrid Electric Vehicles, Power, Batteries, Supercapacitors, Fuel Cells, Receptors, Electric Vehicle Charging Points, Charging Station, Charging Types, Optimal Scheduling, Charging Models, Quality of Service.

Ευχαριστίες

Στα πλαίσια αυτής της πτυχιακής εργασίας θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. Βαρβαρίγο που μου εμπιστεύθηκε την συγγραφή αυτής της διπλωματικής εργασίας για ένα ιδιαιτέρως ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα, για το ενδιαφέρον του και την καταλυτική επιστημονική του καθοδήγηση για την διεκπεραίωσή της .

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον συνεπιβλέπωντα Ερευνητή και υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κ. Κώστα Στεργιώτη για τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε για να μου δώσει γνώσεις και πληροφορίες σχετικά με το θέμα της διπλωματικής εργασίας αλλά και για την προθυμία του και τη βοήθεια, που ποτέ δεν δίστασε να μου δώσει.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συναδέλφους για την στήριξη και συμπαράστασή τους.

Τέλος, τη μεγαλύτερη ευγνωμοσύνη την οφείλω στην οικογένεια μου που είναι πάντα δίπλα μου σε κάθε βήμα της ζωής μου και με υποστήριξαν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Ιδιαιτέρως ευχαριστώ τα αδέρφια μου Αναστάση και Μάριο Ηλιόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά τους για την εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Η διπλωματική εργασία αφιερώνεται σε αυτούς.

Πίνακας περιεχομένων

Κεφάλαιο 1	10
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1	1.1
1.2	1.2
1.2.1	1.2.1
1.2.2	1.2.2
1.2.3	1.2.3
1.3	1.3
1.4	1.4
1.5	1.5
1.6	1.6
1.6.1	1.6.1
1.6.2	1.6.2
1.6.3	1.6.3
1.6.4	1.6.4
1.6.5	1.6.5
1.6.6	1.6.6
1.7	1.7
1.8	1.8
Κεφάλαιο 2	38
2 Εισαγωγή	38
2.1	2.1
2.1.1	2.1.1
2.1.2	2.1.2
2.1.3	2.1.3
2.1.4	2.1.4
2.2	2.2
2.3	2.3
2.3.1	2.3.1
2.3.2	2.3.2
2.3.3	2.3.3

2.3.4	Υποδοχείς CHAdeMO	48
2.3.5	Υπερφορτιστής Tesla	49
Κεφάλαιο 3		50
3	Ανασκόπηση της Βιβλιογραφίας.....	50
Κεφάλαιο 4		56
4.1	Εισαγωγή.....	56
4.2	Μαθηματική Μοντελοποίηση.....	57
4.2.1	Μοντέλα Εξυπηρέτησης Χρηστών.....	59
4.2.2	Περιορισμοί για το QoS (Quality of Service)	62
Κεφάλαιο 5		65
5	Εισαγωγή.....	65
5.1	Δεδομένα και ρυθμίσεις	65
5.2	Αποτελέσματα.....	67
5.2.1	Εξέταση κόστους CS για Model_Selection σε σχέση με Number_of_EVs	67
5.2.2	Εξέταση κόστους CS για USE_CASE σε σχέση με Number_of_EVs	69
5.2.3	Εξέταση κόστους CS για Model_Selection σε σχέση με std_arrival.....	70
5.2.4	Εξέταση κόστους CS για Use_Case σε σχέση με std_arrival	72
5.2.5	Εξέταση κόστους CS για Model_Selection σε σχέση με το Γ.....	74
5.2.6	Εξέταση κόστους CS για Model_Selection σε σχέση με το ε	75
5.2.7	Εξέταση κόστους CS για Model_Selection σε σχέση με το πόσα slot delay έχουμε 77	
5.2.8	Εξέταση του CS ποσοστό κάθε τύπου φορτιστών για Model_Selection και Use_case.....	78
Κεφάλαιο 6		80
6	Συμπεράσματα και προτάσεις	80

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 1:	Παγκόσμια ανάπτυξη της αγοράς των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	14
Εικόνα 2:	Παγκόσμια ανάπτυξη της αγοράς των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.....	14
Εικόνα 3:	Ποσοστό φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων για το 2019	16
Εικόνα 4:	Πρόβλεψη για τις πωλήσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων μέχρι το 2040	18
Εικόνα 5:	Το εσωτερικό ενός EV.....	20
Εικόνα 6:	Μπαταρία μολύβδου οξέος.	26
Εικόνα 7:	Μπαταρία νικελίου καδμίου.....	27
Εικόνα 8:	Μπαταρία νικελίου μετάλλου υδριδίου.	28
Εικόνα 9:	Μπαταρία ιόντων λιθίου.....	31
Εικόνα 10:	Μπαταρία λιθίου πολυμερούς	32
Εικόνα 11:	Μπαταρία θειούχου νατρίου	32

Εικόνα 12: Εσωτερική δομή ενός υπερ-πυκνωτή.	35
Εικόνα 13: Αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου	36
Εικόνα 14: Φόρτιση στο σπίτι	39
Εικόνα 15: Φόρτιση σε δημόσια σημεία φόρτισης.....	41
Εικόνα 16: Φόρτιση στον χώρο εργασίας.	42
Εικόνα 17: Είδη φόρτισης και χαρακτηριστικά.....	44
Εικόνα 18: Είδη βυσμάτων ανά τον κόσμο.	45
Εικόνα 19: Υποδοχή και βύσμα τύπου 1.....	46
Εικόνα 20: Υποδοχή και βύσμα τύπου 2.....	47
Εικόνα 21: Υποδοχή τύπου CCS.....	48
Εικόνα 22: Υποδοχή και βύσμα τύπου CHAdeMO.....	49
Εικόνα 23: Βύσματα που χρησιμοποιεί η Tesla.	50
Εικόνα 24: Smart_Scheduling.....	59
Εικόνα 25: Smart_Charging.	60
Εικόνα 26: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών σε συνάρτηση με τον αριθμό οχημάτων EV για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης.....	68
Εικόνα 27: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών σε συνάρτηση με τον αριθμό οχημάτων EV για τις τρεις περιπτώσεις του QoS.	69
Εικόνα 28: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης ανάλογα με την τυπική απόκλιση άφιξης των EVs.	71
Εικόνα 29: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών για τις τρεις περιπτώσεις καθυστέρησης ανάλογα με την τυπική απόκλιση άφιξης των EVs.	73
Εικόνα 30: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης με σταθερό ϵ ανάλογα με την μεταβλητή Γ	75
Εικόνα 31: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης με σταθερό Γ ανάλογα με την μεταβλητή ϵ	76
Εικόνα 32: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης ανάλογα με τον χρόνο καθυστέρησης slots.....	78
Εικόνα 33: Ποσοστό εγκαταστημένων φορτιστών κάθε τύπου για κάθε μοντέλο ελέγχου φόρτισης και κάθε περίπτωση καθυστέρησης.....	80

Πίνακας πινάκων

Πίνακας 1: Ονοματολογία και μεταβλητές απόφασης.....	58
Πίνακας 2: Παράμετροι.....	59
Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά των EVs.....	66
Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά φορτιστών.....	66
Πίνακας 6: Κόστος σε σχέση με το QoS.	69
Πίνακας 7: Κόστος ανάλογα με τα μοντέλα φόρτισης και την τυπική απόκλιση άφιξης.....	70
Πίνακας 8: Κόστος ανάλογα με τις περιπτώσεις QoS και την τυπική απόκλιση άφιξης.	73
Πίνακας 9: Κόστος ανάλογα με τα μοντέλα φόρτισης και την παράμετρο Γ	74
Πίνακας 10: Κόστος ανάλογα με τα μοντέλα φόρτισης και την παράμετρο ϵ	76
Πίνακας 11: Κόστος ανάλογα με τα μοντέλα φόρτισης και την καθυστέρηση των οχημάτων.	77
Πίνακας 12: Ποσοστό φορτιστών σε όλα τα μοντέλα φόρτισης.	79

Κεφάλαιο 1

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όλο και περισσότερο τα τελευταία χρόνια γίνεται λόγος για την ρύπανση του περιβάλλοντος, αν και πολλές φορές δεν είναι απόλυτα κατανοητό τι ακριβώς σημαίνει, πως προκαλείται, αν υπάρχουν τρόποι να αντιμετωπισθεί και ποιες είναι οι επιπτώσεις στην υγεία μας. Η περιβαλλοντική ρύπανση είναι άμεσα συνυφασμένη με την εξέλιξη της τεχνολογίας και της επιστήμης, η πρόοδος των οποίων εκτός από τα σημαντικά οφέλη που προσφέρει στον άνθρωπο έχει επίσης και δυσμενείς επιπτώσεις στην υγεία του και στο περιβάλλον. Έτσι η ολοένα και μεγαλύτερη ευαισθησία που δημιουργείται πάνω σε περιβαλλοντικά ζητήματα σε συνδυασμό με την αλόγιστη χρήση των ορυκτών πόρων ανάγκασε τους ανθρώπους και τις επιχειρήσεις να αναζητήσουν πιο εναλλακτικές και οικολογικές λύσεις. Στο πνεύμα των νέων δεδομένων οι κατασκευαστές οχημάτων οδηγήθηκαν στον σχεδιασμό και την κατασκευή ηλεκτρικών οχημάτων. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα εξασφαλίζουν πολύ μικρή εκπομπή ρύπων, καθώς μπορεί κατά την λειτουργία τους η εκπομπή να είναι μηδαμινή, αλλά αν χρησιμοποιούνται συμβατικές μορφές καυσίμων, όπως ο λιγνίτης για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος, τότε η ρύπανση συνεχίζει να υπάρχει. Βέβαια, με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, μπορεί να εκμηδενίσει αυτό το πρόβλημα. Αυτό σε συνδυασμό με την μαζικότερη παραγωγή και χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων θα έχει ως αποτέλεσμα την βελτίωση της ποιότητας του αέρα στις αστικές πόλεις ακόμα και την μείωση του θορύβου. Η ευρεία χρήση των ηλεκτρικών οχημάτων μπορεί να είναι κοινωνικά και τεχνικά αποδεκτή αλλά κρύβει και περιορισμούς όπως οι υποδομές και η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Στην συνέχεια της εργασίας θα δούμε ποιες είναι οι προϋποθέσεις και ποιες οι ευκαιρίες που δημιουργούνται με την χρήση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων τόσο επιχειρησιακά όσο και σε προσωπικό επίπεδο στον άνθρωπο.

1.1 Ιστορική Αναδρομή

Μπορεί τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα να είναι αρκετά δημοφιλή στις μέρες μας, αλλά αποτελούν δημιούργημα των προηγούμενων αιώνων. Πιο συγκεκριμένα η εφεύρεση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι μια συνεχής ανακάλυψη αντικειμένων, όπως η μπαταρία και ο ηλεκτρικός κινητήρας που αρχίζει από το 1800. Βέβαια δεν μπορούμε να πούμε με ακρίβεια ποιες είναι ο εφευρέτης και ποια η χώρα προέλευσης, καθώς χώρες όπως η Ουγγαρία, η Ολλανδία και οι Ηνωμένες Πολιτείες ασχολήθηκαν με την δημιουργία ηλεκτρικών αυτοκινήτων μικρής

κλίμακας. Στις ΗΠΑ το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο κατασκευάστηκε το 1890 από τον William Morrison, ήταν ένα αυτοκίνητο έξι επιβατών που μπορούσε να φτάσει τα 22 χιλιόμετρα. Τα επόμενα χρόνια πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες έδειξαν ενδιαφέρον για τα ηλεκτρικά οχήματα και η Νέα Υόρκη άρχισε να γεμίζει με αυτά, σε μια περίοδο που κυριαρχούσαν τα ατμοκίνητα, τα ηλεκτρικά και τα βενζινοκίνητα οχήματα. Τα οχήματα που βασίστηκαν στον ατμό άρχισαν να κατασκευάζονται στα τέλη του 1700, με βασικά όμως μειονεκτήματα, ότι ο ατμός δεν ήταν πρακτικός για προσωπικά οχήματα και ότι χρειαζόταν αρκετός χρόνος αναμονής κατά την εκκίνηση, ιδιαίτερα όταν έκανε κρύο. Όσο για τα βενζινοκίνητα οχήματα, έκαναν την εμφάνιση τους μαζί με τα ηλεκτρικά λόγω των βελτιώσεων που έγιναν στους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Βέβαια είχαν και αυτά τα αρνητικά τους, καθώς χρειαζόνταν πολλή χειροκίνητη προσπάθεια στην οδήγηση (χρήση μανιβέλας χειρός, αλλαγή ταχυτήτων) που τα καθιστούσαν δύσκολα σε κάποιον να τα λειτουργήσει. Επίσης, ήταν θορυβώδες και η εξάτμισή τους απελευθέρωνε ρύπους βλαβερούς για το περιβάλλον και τον άνθρωπο. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα από την άλλη, δεν είχαν κανένα πρόβλημα που σχετίζεται με τον ατμό ή τη βενζίνη. Δεν έκαναν θόρυβο κατά την λειτουργία τους, ήταν εύκολα στην οδήγηση και δεν εξέπεμπαν δύσσομους ρύπους, όπως τα άλλα οχήματα της εποχής. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα έγιναν γρήγορα δημοφιλή στους κατοίκους των πόλεων. Ήταν ιδανικά για σύντομα ταξίδια γύρω από την πόλη, και οι κακοί δρόμοι εκτός πόλεων σήμαναν ότι λίγα αυτοκίνητα οποιουδήποτε τύπου θα μπορούσαν να βγουν πιο μακριά. Καθώς περισσότεροι άνθρωποι αποκτούσαν πρόσβαση στην ηλεκτρική ενέργεια τη δεκαετία του 1910, έγινε πιο εύκολο να φορτίζονται ηλεκτρικά αυτοκίνητα, κάτι που τα έκανε δημοφιλή σε όλα τα κοινωνικά στρώματα. Πολλοί καινοτόμοι τότε σημείωσαν την υψηλή ζήτηση του ηλεκτρικού οχήματος, εξερευνώντας τρόπους βελτίωσης της τεχνολογίας. Για παράδειγμα, ο Ferdinand Porsche, ιδρυτής της εταιρείας σπορ αυτοκινήτων Porsche, ανέπτυξε ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο που ονομάζεται P1 το 1898. Την ίδια στιγμή, δημιούργησε το πρώτο υβριδικό ηλεκτρικό αυτοκίνητο στον κόσμο, ένα όχημα που τροφοδοτείται από ηλεκτρισμό και μια μηχανή αερίου. Ο Thomas Edison, ένας από τους πιο παραγωγικούς εφευρέτες στον κόσμο, θεωρούσε ότι τα ηλεκτρικά οχήματα ήταν ανώτερη τεχνολογία και εργάστηκε για την κατασκευή μιας καλύτερης μπαταρίας ηλεκτρικών οχημάτων. Ακόμα και ο Henry Ford, ο οποίος ήταν φίλος με τον Edison, συνεργάστηκε με τον Edison για να διερευνήσει επιλογές για ηλεκτρικό αυτοκίνητο χαμηλού κόστους το 1914, σύμφωνα με τον Wired. Ωστόσο, η παρουσίαση ενός βενζινοκίνητου οχήματος του Henry Ford, είχε αρνητικές συνέπειες για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Το 1908 παρουσιάστηκε το Model T, που έκανε τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα ευρέως διαθέσιμα και προσιτά. Μέχρι το 1912, το βενζινοκίνητο αυτοκίνητο

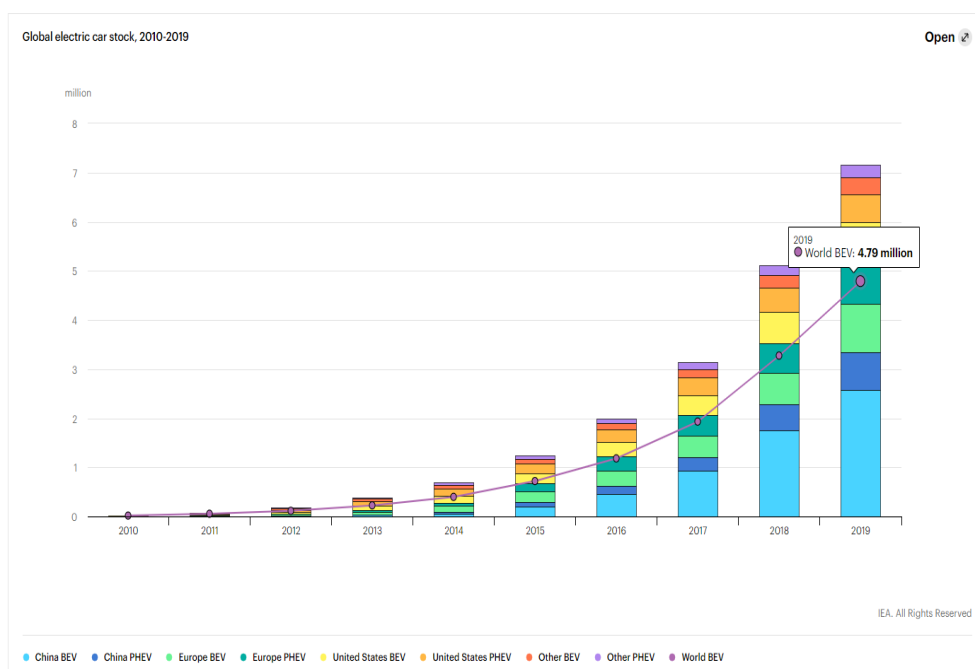
κόστιζε μόνο 650 δολάρια, ενώ ένα ηλεκτρικό είχε τιμή κοντά στα 1.750 δολάρια. Παραπάνω από την διπλάσια αξία του βενζινοκίνητου. Την ίδια χρονιά, ο Charles Kettering παρουσίασε τον ηλεκτρικό εκκινητή, εξαλείφοντας την ανάγκη για μανιβέλα χειρός και προκαλώντας περισσότερες πωλήσεις οχημάτων με βενζίνη. Δεν ήταν μόνο ο οικονομικός παράγοντας που μείωσε την ζήτηση των ηλεκτρικών οχημάτων. Μέχρι το 1920 στις ΗΠΑ δημιουργήθηκαν δρόμοι που συνέδεαν τις πόλεις και πολλοί ήταν αυτοί που ήθελαν να τις επισκεφθούν. Επίσης με την ανακάλυψη του αργού πετρελαίου, το φυσικό αέριο έγινε φθηνό και άμεσα διαθέσιμο για τους Αμερικανούς της υπαίθρου και τα πρατήρια καυσίμων άρχισαν να εμφανίζονται σε ολόκληρη τη χώρα. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα να εξαφανιστούν μέχρι το 1935. Η φθηνή, άφθονη βενζίνη και η συνεχής βελτίωση του κινητήρα εσωτερικής καύσης είχε ως αποτέλεσμα την μειωμένη ζήτηση για οχήματα εναλλακτικών καυσίμων. Χρειάστηκαν κοντά στα 60 χρόνια για να επανέλθουν ξανά στο προσκήνιο. Κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου, οι αυτοκινητοβιομηχανίες άρχισαν να τροποποιούν ορισμένα από τα δημοφιλή μοντέλα οχημάτων τους σε ηλεκτρικά οχήματα. Αυτό σήμαινε ότι τα ηλεκτρικά οχήματα πέτυχαν ταχύτητες και επιδόσεις πολύ πιο κοντά στα βενζινοκίνητα οχήματα, και πολλά από αυτά μπορούσαν να κάνουν αποστάσεις κοντά στα 60 χιλιόμετρα. Όμως η ακμάζουσα οικονομία και οι χαμηλές τιμές φυσικού αερίου στα τέλη της δεκαετίας του 1990, δεν ανησυχούσαν τους καταναλωτές. Κάποια γεγονότα όμως άλλαξαν εντελώς την ιστορία για τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Το πρώτο σημείο καμπής, ήταν η εισαγωγή του Toyota Prius. Κυκλοφόρησε στην Ιαπωνία το 1997 και έγινε το πρώτο υβριδικό ηλεκτρικό όχημα μαζικής παραγωγής στον κόσμο. Το 2000, το Prius κυκλοφόρησε παγκοσμίως έχοντας πάρα πολλές πωλήσεις. Για να κάνει το Prius πραγματικότητα, η Toyota χρησιμοποίησε μια μπαταρία υδριδίου νικελίου. Έκτοτε, οι αυξανόμενες τιμές της βενζίνης και η αυξανόμενη ανησυχία για τη ρύπανση, έχουν βοηθήσει το Prius να είναι το υβριδικό με τις μεγαλύτερες πωλήσεις παγκοσμίως κατά την τελευταία δεκαετία. Το άλλο γεγονός που βοήθησε στη διαμόρφωση των ηλεκτρικών οχημάτων, ήταν το 2006 με την Tesla Motors να ανακοινώνει ότι θα άρχιζε να παράγει ένα πολυτελές ηλεκτρικό σπορ αυτοκίνητο, που θα μπορούσε να φτάσει περισσότερα από 200 χιλιόμετρα με μία μόνο φόρτιση. Η ανακοίνωση και η επακόλουθη επιτυχία της Tesla ώθησαν πολλές μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες, να επιταχύνουν την εργασία με τα δικά τους ηλεκτρικά οχήματα έτσι ώστε να αρχίσουν να γίνονται και αυτές ανταγωνιστικές σε αυτή την αγορά. Στα τέλη του 2010, το Chevy Volt και το Nissan LEAF κυκλοφόρησαν στην αγορά προτείνοντας μία πιο οικονομική επιλογή, σε σχέση με την Tesla. Έτσι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα άρχισαν να βρίσκονται στο επίκεντρο, αλλά τα αρχικά μειονεκτήματα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου συνέχιζαν να υπάρχουν. Αυτά ήταν οι

χώροι φόρτισης και τα είδη των μπαταριών. Όσον αφορά τους χώρους φόρτισης, σε πολλές χώρες έχουν εγκατασταθεί πρίζες φόρτισης, είτε από τα εκάστοτε υπουργεία είτε από τις αυτοκινητοβιομηχανίες και άλλες ιδιωτικές επιχειρήσεις, ενώ μετά από έρευνες το κόστος της μπαταρίας μειώθηκε στο μισό και η απόδοση της αυξήθηκε. Αυτές οι αλλαγές βοήθησαν με την σειρά τους στη μείωση του κόστους των ηλεκτρικών οχημάτων, καθιστώντας τα πιο προσιτά για τους καταναλωτές [1, 2, 3].

1.2 Η αγορά

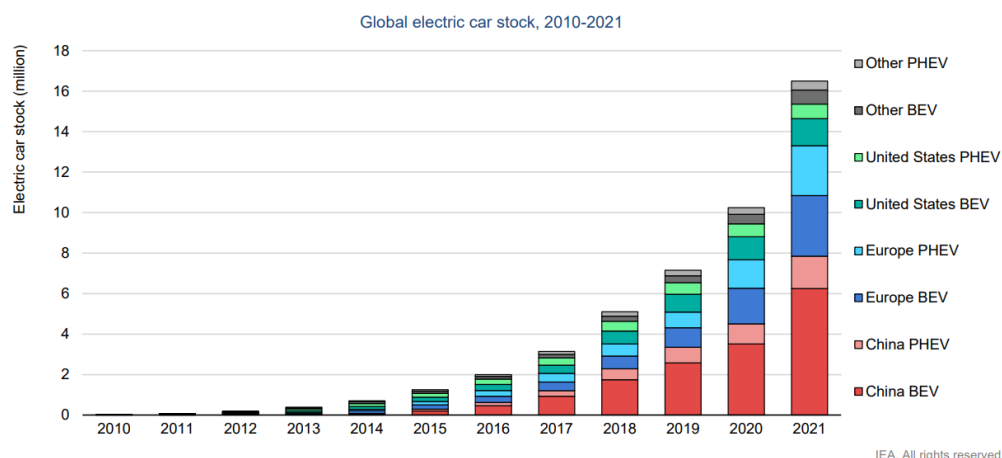
1.2.1 Η παγκόσμια αγορά

Οι πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων ξεπέρασαν τα 2,1 εκατομμύρια παγκοσμίως το 2019, ξεπερνώντας το 2018 για να αυξήσουν το απόθεμα σε 7,2 εκατομμύρια ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, τα οποία αντιπροσώπευαν το 2,6% των παγκόσμιων πωλήσεων αυτοκινήτων και περίπου το 1% του παγκόσμιου αποθέματος αυτοκινήτων το 2019, σημείωσαν αύξηση 40% από έτος σε έτος. Καθώς η πρόοδος της τεχνολογίας στην ηλεκτροκίνηση των δίκυκλων, λεωφορείων και φορτηγών ακόμα πλέον και στα ποδήλατα, εξελίσσεται και η αγορά τους αυξάνεται, τα ηλεκτρικά οχήματα επεκτείνονται σημαντικά. Κάτι που ευνοεί την πώληση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι οι πλεονεκτικές νομοθεσίες καθώς και οι επιδοτήσεις που δίνονται από την κάθε κυβέρνηση για οχήματα με μηδενικούς ή ελάχιστους ρύπους. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα εισήχθησαν στις εμπορικές αγορές το πρώτο μισό της δεκαετίας του 20 και από τότε οι πωλήσεις αυτών έχουν αυξηθεί με ραγδαίους ρυθμούς. Από τα 20.000 περίπου αυτοκίνητα το 2010, το 2019 ο στόλος των ηλεκτρικών αυτοκινήτων σε ολόκληρο τον κόσμο έχει φτάσει τα 7,2 εκατομμύρια με τα πιο πολλά να βρίσκονται στην Κίνα. Όλα αυτά τα στοιχεία μπορούμε να τα παρατηρήσουμε στην Εικόνα 1.



Εικόνα 1: Παγκόσμια ανάπτυξη της αγοράς των ηλεκτρικών αυτοκινήτων

Over 16.5 million electric cars were on the road in 2021, a tripling in just three years



Notes: BEV = battery electric vehicle; PHEV = plug-in hybrid electric vehicle. Electric car stock in this figure refers to passenger light-duty vehicles.

"Other" includes Australia, Brazil, Canada, Chile, India, Japan, Korea, Malaysia, Mexico, New Zealand, South Africa and Thailand. Europe in this figure includes the EU27, Norway, Iceland, Switzerland and United Kingdom.

Sources: IEA analysis based on country submissions, complemented by [ACEA](#), [CAAM](#), [EAFO](#), [EV Volumes](#), [Marklines](#).

Εικόνα 2: Παγκόσμια ανάπτυξη της αγοράς των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

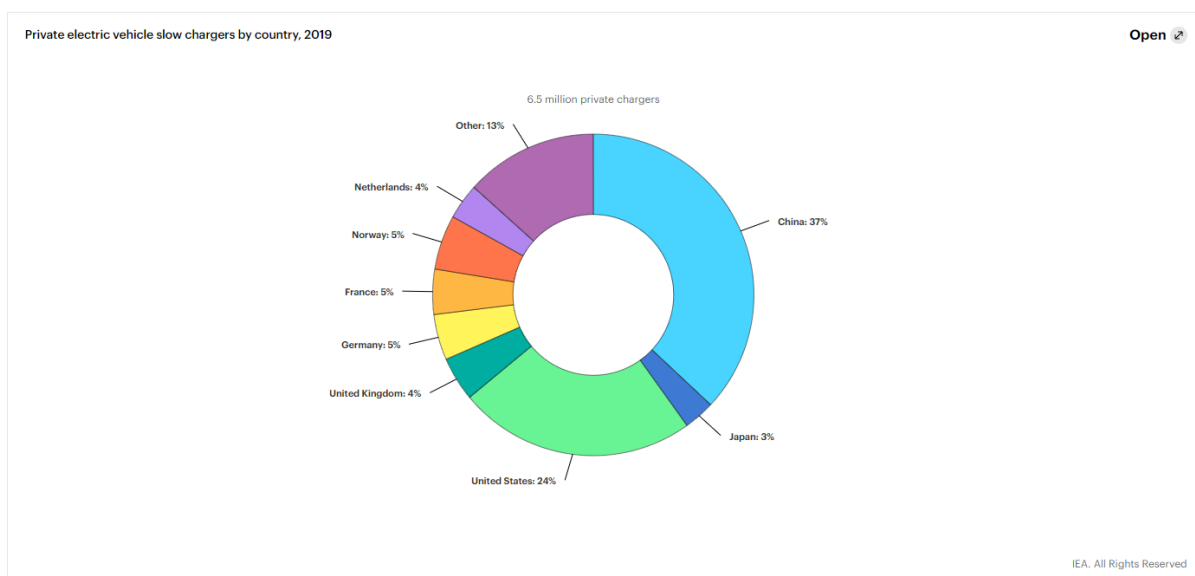
Το 2019 πωλήθηκαν 2,1 εκατομμύρια ηλεκτρικά αυτοκίνητα δίνοντας μια αύξηση της τάξεως του 6% από το προηγούμενο έτος, σε σύγκριση με την αύξηση των πωλήσεων από έτος σε έτος που ήταν τουλάχιστον πάνω από 30% από το 2016. Βλέπουμε και από την Εικόνα

2 τριπλάσια αύξηση στον αριθμό EV που βρίσκονται στους δρόμους από το 2018 μέχρι το 2021. Τρεις βασικοί λόγοι εξηγούν αυτήν την τάση:

- Οι αγορές αυτοκινήτων συρρικνώθηκαν. Οι συνολικές πωλήσεις επιβατικών αυτοκινήτων μειώθηκαν το 2019 σε πολλές βασικές χώρες. Οι ταχέως αναπτυσσόμενες αγορές, όπως η Κίνα και η Ινδία για όλους τους τύπους οχημάτων είχαν χαμηλότερες πωλήσεις το 2019 από ότι το 2018. Σε αυτό το πλαίσιο αργών πωλήσεων το 2019, το μερίδιο αγοράς ηλεκτρικών αυτοκινήτων 2,6% στις παγκόσμιες πωλήσεις αυτοκινήτων αποτελεί ρεκόρ. Συγκεκριμένα, η Κίνα (στο 4,9%) και η Ευρώπη (στο 3,5%) πέτυχαν νέα ρεκόρ στο μερίδιο αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων το 2019.
- Οι επιδοτήσεις αγοράς μειώθηκαν σε βασικές αγορές. Η Κίνα μείωσε τις επιδοτήσεις αγοράς ηλεκτρικών αυτοκινήτων κατά περίπου το ήμισυ το 2019. Το αμερικανικό ομοσπονδιακό πρόγραμμα πίστωσης φόρου έληξε για βασικές αυτοκινητοβιομηχανίες ηλεκτρικών οχημάτων, όπως η General Motors και η Tesla. Αυτές οι ενέργειες συνέβαλαν στη σημαντική μείωση των πωλήσεων ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην Κίνα το δεύτερο εξάμηνο του 2019 και σε πτώση 10% στις Ηνωμένες Πολιτείες κατά τη διάρκεια του έτους. Με το 90% των παγκόσμιων πωλήσεων ηλεκτρικών αυτοκινήτων να συγκεντρώνονται στην Κίνα, την Ευρώπη και τις Ηνωμένες Πολιτείες, η μείωση των επιδοτήσεων σε Κίνα και Ηνωμένες Πολιτείες επηρέασε τις παγκόσμιες πωλήσεις και επισκίασε την αξιοσημείωτη αύξηση των πωλήσεων κατά 50% στην Ευρώπη το 2019, επιβραδύνοντας έτσι την τάση ανάπτυξης.

Οι προσδοκίες των καταναλωτών για περαιτέρω τεχνολογικές βελτιώσεις και νέα μοντέλα, σημαντικές βελτιώσεις στην τεχνολογία και μια ευρύτερη ποικιλία μοντέλων ηλεκτρικών αυτοκινήτων που προσφέρονται έχουν δώσει ώθηση στις αποφάσεις αγοράς των καταναλωτών. Οι εκδόσεις 2018-19 ορισμένων κοινών μοντέλων ηλεκτρικών αυτοκινήτων εμφανίζουν πυκνότητα ενέργειας μπαταρίας που είναι 20-100% υψηλότερη από ότι τα αντίστοιχα τους το 2012. Επιπλέον, το κόστος της μπαταρίας έχει μειωθεί περισσότερο από 85% από το 2010. Η παράδοση νέων μοντέλων στην αγορά όπως το Tesla Model 3 προκάλεσαν μια αύξηση των πωλήσεων το 2018 σε βασικές αγορές όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες. Οι αυτοκινητοβιομηχανίες ανακοίνωσαν ένα διαφοροποιημένο μενού ηλεκτρικών αυτοκινήτων, πολλά από τα οποία αναμένονται το 2020 ή το 2021. Για τα επόμενα πέντε χρόνια, οι αυτοκινητοβιομηχανίες ανακοίνωσαν σχέδια για την κυκλοφορία άλλων 200 νέων μοντέλων ηλεκτρικών αυτοκινήτων, πολλά από τα οποία

βρίσκονται στη δημοφιλή αγορά σπορ οχημάτων. Για αυτόν το λόγο οι καταναλωτές θεωρούν ότι τα μελλοντικά μοντέλα θα είναι καλύτερα τόσο στο θέμα απόδοσης όσο και στο θέμα τιμής και για αυτό δεν πραγματοποιούν ακόμα την αγορά τους. Εκτός από το ηλεκτρικό αυτοκίνητο καθ' αυτό πρέπει να δώσουμε εμφάνιση και στους φορτιστές που υπάρχουν. Η υποδομή για φόρτιση ηλεκτρικών οχημάτων συνεχίζει να επεκτείνεται καθώς το 2019, υπήρχαν περίπου 7,3 εκατομμύρια φορτιστές παγκοσμίως, εκ των οποίων περίπου 6,5 εκατομμύρια ήταν ιδιωτικοί, σε σπίτια, πολυκατοικίες και χώρους εργασίας. Η ευκολία, η αποδοτικότητα κόστους και μια ποικιλία πολιτικών υποστήριξης είναι οι κύριοι παράγοντες για την επικράτηση της ιδιωτικής χρέωσης. Οι δημόσιοι φορτιστές αντιπροσώπευαν το 12% των παγκόσμιων φορτιστών το 2019, οι περισσότεροι από τους οποίους είναι αργοί φορτιστές. Σε παγκόσμιο επίπεδο, ο αριθμός των προσβάσιμων στο κοινό φορτιστών αυξήθηκε κατά 60% το 2019 σε σύγκριση με το προηγούμενο έτος. Η Κίνα συνεχίζει να πρωτοστατεί στην κυκλοφορία φορτιστών που είναι προσβάσιμες από το κοινό, ιδιαίτερα των γρήγορων φορτιστών, οι οποίοι ταιριάζουν στις πυκνές αστικές περιοχές της με λιγότερες ευκαιρίες για ιδιωτική χρέωση στο σπίτι [4, 5]. Όπως παρατηρούμε και στην Εικόνα 3 η Κίνα είναι η χώρα με τους πιο πολλούς ιδιωτικούς φορτιστές αργής φόρτισης για το έτος 2019, με τις Ηνωμένες Πολιτείες και την Νορβηγία να ακολουθούν.



Εικόνα 3: Ποσοστό φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων για το 2019

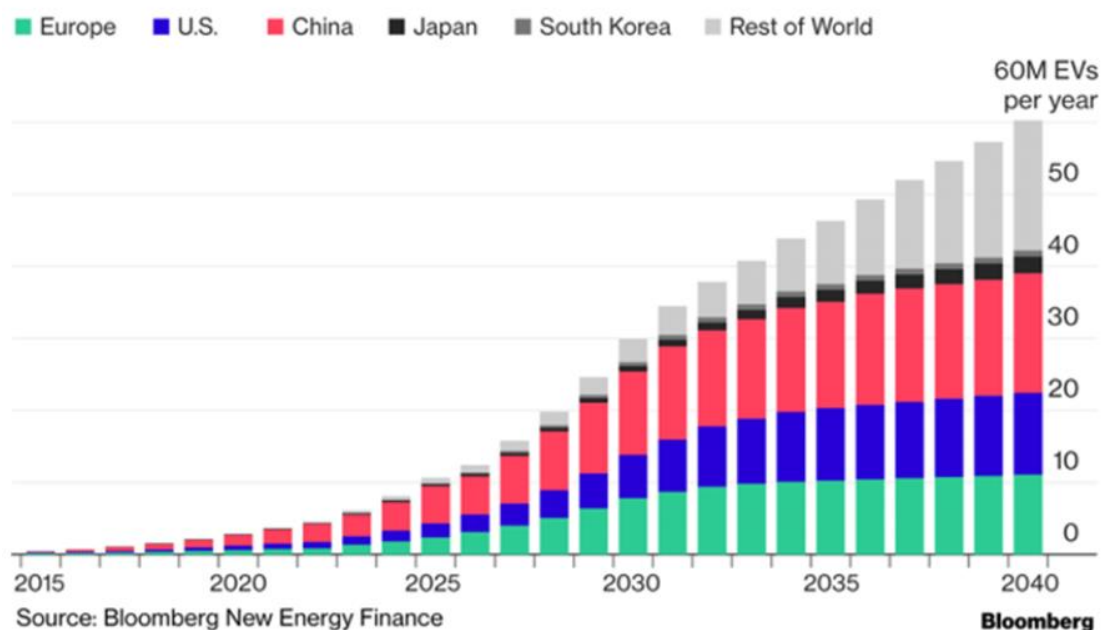
1.2.2 Η αγορά στην Ελλάδα

Σε εξαίρεση με την Κίνα και τις Ηνωμένες Πολιτείες οι χώρες της Ευρώπης είχαν μεγάλη αύξηση των πωλήσεων των ηλεκτρικών αυτοκινήτων το 2019, με την Νορβηγία να πρωτοστατεί και να είναι η μεγαλύτερη δύναμη της Ευρώπης, καθώς περισσότερα από τα μισά αυτοκίνητα που κυκλοφορούν στην χώρα είναι ηλεκτρικά. Η Ελλάδα είναι μία χώρα η οποία άρχισε να ασχοληθεί με την πώληση ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς το 2015 άρχισαν οι πωλήσεις με την ανταπόκριση να ήταν ελάχιστη. Το 2017 έγινε η ουσιαστική εισαγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων στην Ελλάδα, αφού με την κυκλοφορία δύο μοντέλων της BMW (BMW 330e, BMW 225xe Active Tourer) τα επιβατικά έφτασαν τα 334 παρουσιάζοντας μία αύξηση από το 0,06% στο 0,19%. Η Ελλάδα ακολουθώντας πρότυπα άλλων χωρών εφάρμοσε επιδοτήσεις και προνομιακές νομοθεσίες το 2020, έτσι ώστε οι καταναλωτές να στραφούν στην αγορά των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Πιο συγκεκριμένα, ο νόμος περιλαμβάνει μια σειρά φορολογικών πλεονεκτημάτων για την απόκτηση ή τη μίσθωση ηλεκτρικών οχημάτων ή υβριδικών οχημάτων plug-in, με οχήματα που χρησιμοποιούνται για επαγγελματικούς σκοπούς και βρίσκονται σε νησιά να έχουν περαιτέρω φορολογικές εκπτώσεις. Για αυτό τον λόγο, μετά τον Αύγουστο που άρχισαν οι συγκεκριμένες επιδοτήσεις, υπάρχει μία τεράστια αύξηση στις πωλήσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, αφού η έκπτωση ξεπερνάει τα 6.000 ευρώ. Τον Νοέμβριο πουλήθηκαν 340 μοντέλα αυξάνοντας το ποσοστό επί του συνόλου των νέων αυτοκινήτων σε 4,45% όταν την προηγούμενη χρονιά ήταν 0,55%. Εκτός από τους οικονομικούς λόγους που έχουν κάνει τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ευρέως διαδεδομένα στην χώρα μας υπάρχουν και άλλοι δύο λόγοι που έχουν συμβάλει σε αυτό. Ο πρώτος είναι ο αριθμός των μοντέλων που είναι διαθέσιμος στην ελληνική αγορά, καθώς ξεπερνάει τα 15 και έτσι δίνονται παραπάνω επιλογές στους καταναλωτές. Ο δεύτερος και πιο σημαντικός είναι οι επενδύσεις που κάνουν εταιρείες κολοσσοί που ασχολούνται αποκλειστικά με την παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων όπως η Tesla και η Next.e.GO φέρνοντας πιο κοντά τα ηλεκτρικά οχήματα στο ελληνικό καταναλωτικό κοινό [6].

1.2.3 Το μέλλον στην αγορά των ηλεκτρικών οχημάτων

Καθώς η ρύπανση του περιβάλλοντος, η αντιμετώπιση της και η αλόγιστη χρήση των ορυκτών πόρων θα συνεχίσει να απασχολεί την ανθρωπότητα, τα ηλεκτρικά οχήματα θα βρίσκονται στο προσκήνιο και όσο περνάνε τα χρόνια ο αριθμός τους θα αυξάνεται. Σε αυτό θα συμβάλλουν δύο τομείς. Ο πρώτος είναι οι έρευνες που γίνονται για την ανάπτυξη της

τεχνολογίας και ότι αφορά τους φορτιστές, τα Charging Stations, το πόσο γρήγορα φορτίζεται ένα ηλεκτρικό όχημα καθώς και η επικοινωνία του Charging Station με το Charging Station Management System μέσω του πρωτοκόλλου OCPP (Open Charge Point Protocol) 2.0.1 το οποίο θα αρχίσει να εφαρμόζεται στο μέλλον. Το δεύτερο είναι οι έρευνες που γίνονται πάνω στην κατασκευή νέων μπαταριών που θα είναι πιο αποδοτικές, επιτρέποντας στο αυτοκίνητο να διανύει περισσότερα χιλιόμετρα και με λιγότερο κόστος κατασκευής, μειώνοντας έτσι και την τιμή πώληση. Έτσι με το πέρασμα των χρόνων τα ηλεκτρικά θα είναι όλο και πιο ανταγωνιστικά σε σχέση με τα συμβατικά, γιατί θα φτάνουν την αυτονομία τους με μία φόρτιση καθώς και την τιμή τους. Παράλληλα, θα λυθεί το ζήτημα της γρήγορης φόρτισης τόσο σε ιδιωτικούς χώρους όσο και σε δημοσίους, που ακόμα και εν κινήσει προβλέπεται ότι θα μπορούν να φορτιστούν. Επίσης, χώρες που δεν ασχολούνται καθόλου ή ασχολούνται ελάχιστα με την πώληση των ηλεκτρικών οχημάτων θα ασχοληθούν με αυτή την νέα τάση. Έτσι αυτές οι βελτιώσεις θα αντικατοπτρίζονται στην αγορά, καθώς το 2040 προβλέπεται να πωλούνται 60 εκατομμύρια αυτοκίνητα, ένας αριθμός 30 φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό πωλήσεων σήμερα. Η Κίνα θα συνεχίσει να έχει τον μεγαλύτερο στόλο ηλεκτρικών αυτοκινήτων με την Ευρώπη να είναι μία πολύ σημαντική δύναμη, όπως διακρίνεται και από την Εικόνα 4.



Global Electric-car revolution set to take off.

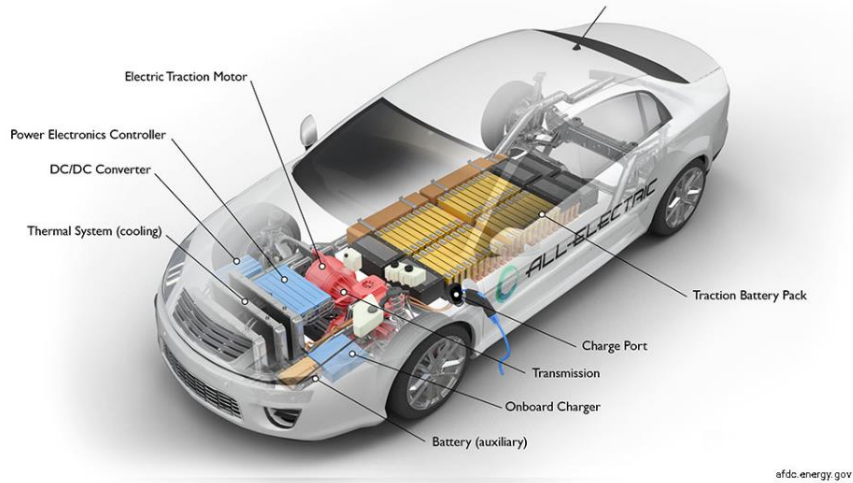
Εικόνα 4: Πρόβλεψη για τις πωλήσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων μέχρι το 2040

Εκτός από τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μέλλον φαίνεται να έχουν και οχήματα που οι εκπομπές είναι δύσκολο να μειωθούν, όπως τα βαρέα φορτηγά και η ναυτιλία. Οι παγκόσμιες πωλήσεις

ηλεκτρικών φορτηγών σημείωσαν ρεκόρ το 2019 με πάνω από 6.000 μονάδες, ενώ ο αριθμός των μοντέλων συνεχίζει να επεκτείνεται. Οι φορτιστές υψηλής ισχύος αναπτύσσονται και τυποποιούνται παγκοσμίως ωστόσο στην αγορά πλέον μπαίνουν και φορτιστές υπερταχείας φόρτισης. Η ηλεκτροδότηση των ναυτιλιακών εργασιών στα λιμάνια είναι όλο και πιο συχνή και σταδιακά επιβάλλεται από νομοθεσία στην Ευρώπη, την Κίνα και, στις Ηνωμένες Πολιτείες, στην Καλιφόρνια. Στην αεροπορία, η ηλεκτροδότηση των επίγειων πτητικών λειτουργιών στα αεροσκάφη προσφέρει άμεση δυνατότητα μείωσης των εκπομπών ρύπων και CO₂ και εξοικονόμηση λειτουργικού κόστους για τις αεροπορικές εταιρείες [4].

1.3 Ηλεκτρικό Όχημα

Ένα ηλεκτροκίνητο όχημα διαφέρει σημαντικά από ένα αντίστοιχο συμβατικό, όσον αφορά τη δομή του κινητήριου συστήματος. Από τεχνικής απόψεως τα ηλεκτρικά οχήματα απαντώνται σε διάφορες παραλλαγές, είτε όσον αφορά την πηγή της ηλεκτρικής ενέργειας, είτε τον τρόπο που παράγεται η κίνηση. Ωστόσο, όλα έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό, που είναι η ύπαρξη ενός τουλάχιστον ηλεκτρικού κινητήρα για την προώθηση του οχήματος. Ουσιαστικά υπάρχουν δύο μεγάλες κατηγορίες ηλεκτροκίνητων οχημάτων σε σχέση με τις εκπομπές ρύπων: τα οχήματα μηδενικών ρύπων και τα οχήματα χαμηλών ρύπων, στα οποία ανήκουν τα υβριδικά οχήματα. Το κύριο στοιχείο που διαφοροποιεί τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα από τα υβριδικά, είναι η απουσία βενζινοκινητήρα. Και για τα δύο είδη αυτοκινήτων όμως, υπάρχουν πηγές ενέργειας που αποθηκεύουν, παρέχουν και δέχονται ενέργεια από εξωτερική πηγή. Υπάρχουν διάφοροι τύποι πηγών ενέργειας που έχουν προταθεί για ηλεκτρικά οχήματα, οι πιο σημαντικές από τις οποίες είναι: οι συσσωρευτές ή μπαταρίες, οι υπερπυκνωτές και οι σφόνδυλοι υπερυψηλών ταχυτήτων. Επίσης, υπάρχει και η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου, που είναι ένας τύπος μετατροπών ενέργειας. Στην Εικόνα 5 παρουσιάζονται τα βασικά μέρη του εσωτερικού ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου.



Εικόνα 5: Το εσωτερικό ενός EV

1.4 Τύποι ηλεκτρικών οχημάτων

Ανάλογα τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των ηλεκτρικών οχημάτων, αυτά κατατάσσονται σε τρεις κατηγορίες.

- Η πρώτη είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, που κινούνται με ηλεκτρική ενέργεια που αποθηκεύεται στους συσσωρευτές του οχήματος και φορτίζονται από το δίκτυο ή από κάποια μονάδα ηλεκτροπαραγωγής.
- Η δεύτερη κατηγορία είναι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, που τροφοδοτούν τους συσσωρευτές τους με ηλεκτρική ενέργεια όταν αυτοί εκφορτιστούν. Αυτά είναι γνωστά ως ηλεκτρικά αυτοκίνητα με μονάδα επέκτασης της αυτονομίας τους και δεν διαφέρουν με τα κλασικά στον τρόπο φόρτισης τους, αλλά ανεφοδιάζονται επίσης και με το είδος καυσίμου που τους επιτρέπει την επέκταση της αυτονομίας τους (βενζίνη, πετρέλαιο, υγραέριο κ.λπ.).
- Τέλος υπάρχουν και τα επαναφορτιζόμενα υβριδικά αυτοκίνητα, που κινούνται με συνδυασμό ηλεκτροκινητήρα και θερμικού κινητήρα τα οποία εφοδιάζονται με συμβατό καύσιμο στον θερμικό κινητήρα αλλά και με ηλεκτρική ενέργεια στους συσσωρευτές.

Το κοινό και των τριών κατηγοριών είναι ότι τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπορούν να συνδεθούν με ένα δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό την μερική ή την πλήρη φόρτιση των συσσωρευτών τους [3].

1.5 Δομή ηλεκτρικού οχήματος

Η δομή ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου διαφέρει σε μεγάλο βαθμό από εκείνη ενός αυτοκινήτου που χρησιμοποιεί μηχανή εσωτερικής καύσης. Μπορεί πολλά βασικά μέρη να παραμένουν ίδια, όπως το αμάξωμα, το πλαίσιο, το σύστημα διεύθυνσης, η ανάρτηση και τα φρένα αλλά κάτω από το αμάξωμα παρατηρούνται οι κύριες διαφορές σε σχέση με τα αυτοκίνητα εσωτερικής καύσης. Τα βασικά μέρη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι:

- οι συσσωρευτές (μπαταρίες)
- ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος (ελεγκτής)
- ο ηλεκτροκινητήρας

Οι συσσωρευτές αποτελούν ίσως το πιο βασικό μέρος του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, καθώς εκεί αποθηκεύεται η ενέργεια που χρειάζεται για να λειτουργήσει το όχημα. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος ευθύνεται για τον έλεγχο και την διαμόρφωση της τάσης της ενέργειας, που πήρε από τους συσσωρευτές, έτσι ώστε να τροφοδοτήσει τον κινητήρα. Επίσης, είναι υπεύθυνος για την ταχύτητα και την ροπή του του κινητήρα. Ο ηλεκτροκινητήρας τέλος, είναι υπεύθυνος για την κίνηση του οχήματος. Παρακάτω αναφέρουμε τα κύρια μέρη που χρησιμοποιούνται για τον ανεφοδιασμό των ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

1. Οι τύποι πηγών ενέργειας που χρησιμοποιούνται στα ηλεκτρικά και στα υβριδικά αυτοκίνητα. Αυτοί είναι οι συσσωρευτές, γνωστοί και ως μπαταρίες που για την ώρα έχουν την πιο διαδεδομένη χρήση, οι υπερπυκνωτές και η τεχνολογία κυψελών καυσίμου.
2. Ο ηλεκτρικός ακροδέκτης σύνδεσης των συσσωρευτών με το ηλεκτρικό δίκτυο ή αλλιώς η υποδοχή για το καλώδιο φόρτισης. Μπορούμε να πούμε ότι μοιάζει με το στόμιο πλήρωσης καυσίμου σε ένα συμβατικό αυτοκίνητο. Πίσω από την υποδοχή υπάρχουν ηλεκτρικές μονάδες με σκοπό τόσο τον μετασχηματισμό των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών της ηλεκτρικής ενέργειας, που έρχεται από το δίκτυο καθώς και τη διαχείριση της διαδικασίας φόρτισης, ώστε η διαδικασία αυτή να γίνει με ασφάλεια. Στα συμβατικά αυτοκίνητα δεν συναντάμε κάτι ανάμεσα στο στόμιο και την μηχανή, εκτός από κάποια φίλτρα επιστροφής καυσίμου ή αερισμού.
3. Το καλώδιο σύνδεσης που ενώνει την υποδοχή του αυτοκινήτου με το δίκτυο. Το συγκεκριμένο καλώδιο μπορεί να βρίσκεται στο αυτοκίνητο σε κάποιο αποθηκευτικό του χώρο, συνήθως παρεχόμενο από τον κατασκευαστή ή αγορασμένο από τον χρήστη. Ο κάθε χρήστης θα πρέπει να έχει τους κατάλληλους ακροδέκτες, έτσι ώστε να μπορεί να φορτίσει το όχημα σε οποιαδήποτε υποδοχή. Επίσης υπάρχουν και

καλώδια τα οποία είναι τοποθετημένα σε σημεία φόρτισης, κάτι που μοιάζει με τις γνωστές μάνικες που συναντάμε στους παρόχους καυσίμων για τα συμβατικά αυτοκίνητα.

4. Τα σημεία ηλεκτρικής παροχής ενέργειας για την φόρτιση των οχημάτων οι φορτιστές δηλαδή, κάτι που είναι παρόμοια με τα πρατήρια καυσίμων που συναντάμε για τα συμβατικά αυτοκίνητα. Βέβαια μπορούμε να τα συναντήσουμε και στο σπίτι, αρκεί να υπάρχει μία απλή εγκατάσταση για να φορτίζεται το αυτοκίνητο το βραδύ, καθώς και μέσα στην πόλη, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται φόρτιση όσο ο οδηγός εργάζεται. Ωστόσο μελέτες γίνονται για την εγκατάσταση ολόκληρων πάρκων με δημόσιους φορτιστές. Επίσης στα συμβατικά πρατήρια καυσίμων βρίσκουμε τέτοιες εγκαταστάσεις. Τα σημεία ηλεκτρικής παροχής ανάλογα με τον τρόπο τροφοδοσίας χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.
 - Η πρώτη είναι αυτή που επιτρέπει την φόρτιση των συσσωρευτών με τα χαρακτηριστικά του δικτύου διανομής, κάτι που συναντάται στην οικιακή φόρτιση ή σε φόρτιση από κοινόχρηστα σημεία, δηλαδή σε σημεία που η φόρτιση γίνεται κάτω από ήπιους ρυθμούς.
 - Η δεύτερη κατηγορία είναι αυτή που επιτρέπει την απευθείας τροφοδοσία των συσσωρευτών, ένα είδος φόρτισης που επιλέγεται για γρήγορες φορτίσεις, καθώς επιτρέπεται η μεταφορά μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας και ισχύος. Αυτές οι εγκαταστάσεις που επιτρέπουν τέτοιου είδους φόρτιση, γνωστές ως υπερφορτιστές πρέπει να έχουν μια ηλεκτρονική διάταξη για την διαχείριση του ρυθμού φόρτισης, για να αποτρέπεται ο κίνδυνος να καταστραφούν οι συσσωρευτές από υπερθέρμανση ή από άλλες δυσλειτουργίες.
5. Ο ηλεκτρονικός μετατροπέας ισχύος, που μετατρέπει την συνεχή τάση των συσσωρευτών σε κατάλληλη μορφή, έτσι ώστε να τροφοδοτεί τον κινητήρα. Υπεύθυνος για τον τύπο του μετατροπέα ισχύος είναι ο ηλεκτρικός κινητήρας, καθώς ανάλογα τον κινητήρα που χρησιμοποιείται (συνεχές ή εναλλασσόμενο ρεύματος) χρησιμοποιούνται μετατροπείς συνεχούς τάσης σε συνεχή τάση "τύπου chopper" και μετατροπείς συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη τάση τύπου inverter. Επιπλέον, μία σημαντική διεργασία που πραγματοποιεί ο μετατροπέας είναι ο έλεγχος της ροπής και των στροφών του κινητήρα, κάτι που επιτυγχάνεται με την χρήση των inverter.
6. Ο ηλεκτρικός κινητήρας, που είναι το σημαντικότερο τμήμα ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου, χωρίζεται σε δύο κατηγορίες τον κινητήρα συνεχούς ρεύματος και τον

κινητήρα εναλλασσόμενου ρεύματος. Οι τύποι κινητήρων συνεχούς ρεύματος που χρησιμοποιούνται είναι: α) οι κινητήρες ανεξάρτητης διέγερσης β) οι κινητήρες παράλληλης διέγερσης γ) οι κινητήρες διέγερσης σε σειρά και δ) οι κινητήρες σύνθετης διέγερσης. Από την άλλη, στους κινητήρες εναλλασσόμενου ρεύματος υπάρχουν οι κινητήρες με ημιτονοειδή τάση τροφοδοσίας και οι κινητήρες που τροφοδοτούνται με τετραγωνικό παλμό. Στην πρώτη περίπτωση συγκαταλέγονται κινητήρες όπως: α) ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας βραχυκυκλωμένου κλωβού β) ο ασύγχρονος τριφασικός κινητήρας δακτυλιοφόρου δρομέα και γ) ο σύγχρονος τριφασικός με ή χωρίς μόνιμο μαγνήτη. Στην δεύτερη περίπτωση οι κινητήρες είναι) τύπου Brushless DC και β) τύπου Switched Reluctance [3].

1.6 Συσσωρευτές

Οι συσσωρευτές είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις, που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική ενέργεια κατά την εκφόρτιση τους και το αντίστροφο κατά τη φόρτισή τους. Οι συσσωρευτές μπορεί να φορτίζονται από διάφορες διατάξεις και με διάφορους τρόπους. Αποτελούνται από μικρές κυψέλες, κάθε μία από τις οποίες αποτελεί ανεξάρτητη και ολοκληρωμένη μονάδα, και οι οποίες συνδέονται σε σειρά ή παράλληλα με σκοπό την ικανοποίηση των απαιτήσεων ισχύος της εκάστοτε εφαρμογής. Στα ηλεκτροκίνητα οχήματα, τον πιο βασικό ρόλο τον παίζουν οι συσσωρευτές καθώς παρέχουν συνεχές ηλεκτρικό ρεύμα στους ηλεκτροκινητήρες για μεγάλο χρονικό διάστημα. Κατανοούμε έτσι, ότι χρειάζονται πολύ ισχυρότερες μπαταρίες στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα σε σχέση με τα συμβατικά. Σε αντίθεση λοιπόν με τα συμβατικά οχήματα, που χρειάζονται μια μπαταρία εκκίνησης (χρησιμοποιείται για να εκκινήσει ο βενζινοκινητήρας) και μια μπαταρία υψηλής τάσης τα ηλεκτρικά οχήματα δεν χρειάζονται την μπαταρία εκκίνησης. Αυτό δεν σημαίνει όμως ότι τα ηλεκτρικά χρειάζονται μόνο μπαταρίες υψηλής τάσης, υψηλής ενέργειας και υψηλής ισχύος, καθώς είναι αναγκαίες μπαταρίες με δυνατότητα συχνής, πλήρους εκφόρτισης ή πλήρους φόρτισης. Τέτοιες είναι οι μπαταρίες βαθιάς φόρτισης που μπορούν να προσδώσουν ηλεκτρική ενέργεια για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, καθώς και να υποστούν περισσότερες βαθιές εκφορτίσεις. Τα ηλεκτροκίνητα οχήματα τυπικά απαιτούν τάση 100-600V. Οι μπαταρίες μπορεί να σχηματίζουν συστοιχίες μονάδων των 6V ή 12V συνδεδεμένων σε σειρά. Σε πολλές περιπτώσεις, εκατοντάδες μεμονωμένα κελιά μπαταριών, συνδέονται μεταξύ τους για να παρέχουν την απαιτούμενη ισχύ. Πολλοί διαφορετικοί τύποι μπαταριών είναι διαθέσιμοι και υπό έρευνα για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της ηλεκτροκίνησης στα οχήματα. Προκειμένου να γίνει αντιληπτή η ανάγκη χρήσης μπαταριών υψηλής τάσης στα υβριδικά οχήματα, θεωρείται σκόπιμο να αναφερθούν τα πλεονεκτήματα που

προέκυψαν από την αύξηση της τάσης στις μπαταρίες των συμβατικών οχημάτων στη δεκαετία του 1950 από τα 6V στα 12V.

Καταρχήν, η φόρτιση των μπαταριών μπορούσε να γίνει ταχύτερη και με μικρότερη καταπόνηση για την μπαταρία. Επιτράπηκε η μείωση του μεγέθους των καλωδίων, δεδομένου ότι με διπλάσια τάση απαιτούνταν πλέον η μισή ένταση για την παροχή της ίδιας ποσότητας ισχύος. Τα ίδια πλεονεκτήματα ισχύουν και για τα σύγχρονα συμβατικά οχήματα. Εδώ, βέβαια, θα πρέπει να προστεθεί και η διαρκώς αυξανόμενη χρήση ηλεκτρικών συστημάτων. Η αύξηση αυτή μπορεί να καλυφθεί είτε αυξάνοντας τη χωρητικότητα της μπαταρίας και του συστήματος φόρτισης, είτε αυξάνοντας την τάση. Η δεύτερη λύση είναι προτιμότερη, παρά το γεγονός ότι οδηγεί σε μεγαλύτερες και πιο βαριές μπαταρίες, γιατί η ένταση των ρευμάτων θα είναι μικρότερη, το μέγεθος των καλωδίων θα είναι μικρότερο και έτσι είναι πιθανή η αντιστάθμιση της αύξησης του βάρους της μπαταρίας. Με την ίδια λογική, προωθείται και η αύξηση από τα 12V στα 42V. Παρόμοια λογική χρησιμοποιείται και στη σχεδίαση ηλεκτρικών και υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων. Η υψηλή τάση απαιτείται για να αποτρέψει την ανάγκη για μεγάλα καλώδια και αγωγούς. Επίσης, διατηρώντας την ένταση του ρεύματος χαμηλή είναι καλύτερο και για τις μπαταρίες. Η πρώτη γενιά του ηλεκτρικού οχήματος χρησιμοποιούσε είκοσι έξι (26) μπαταρίες μόλυβδου οξέος των 12V. Οι μεμονωμένες μπαταρίες συνδέονταν σε σειρά. Έτσι, ο συνολικός συσσωρευτής παρείχε 312V τάσης και ζύγιζε 595kg. Η απόσταση αυτονομίας ανάμεσα σε δύο διαδοχικές φορτίσεις ήταν 88 έως 153km. Η επόμενη γενιά των ηλεκτρικών οχημάτων χρησιμοποιούσε μπαταρίες Νικελίου μετάλλου υβριδίου και χαρακτηρίζονταν από ελαφρώς μεγαλύτερη αυτονομία. Οι πιο σημαντικοί τύποι μπαταριών που σχετίζονται με ηλεκτρικά ή υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα είναι:

- Μόλυβδου οξέος (lead acid)
- Νικελίου καδμίου (nickel cadmium)
- Νικελίου μετάλλου υδριδίου (nickel metal hydride)
- Ιόντων λιθίου (lithium ion)
- Λιθίου πολυμερούς (lithium polymer)
- Θειούχου νατρίου (sodium sulfur)

Η συντήρηση και ο χρόνος επαναφόρτισης πρέπει να είναι όσο το δυνατόν πιο μικροί, ενώ η διάρκεια ζωής μεγάλη και κατά το δυνατόν να προσεγγίζει τη διάρκεια ζωής του οχήματος. Δυστυχώς όμως, οι χημικές αντιδράσεις που παράγουν ρεύμα φθείρουν παράλληλα το υλικό της μπαταρίας. Επιπλέον πρέπει η μπαταρία να μην υφίσταται υψηλό βαθμό αυτοεκφόρτισης, δεδομένου πως ένα όχημα μπορεί να παραμείνει σταθμευμένο για μεγάλο

χρονικό διάστημα και υπάρχει η απαίτηση να είναι σε θέση να εκκινήσει ανά πάσα χρονική στιγμή. Στην συνέχεια θα αναλύσουμε το κάθε είδος μπαταρίας και θα επισημάνουμε τα χαρακτηριστικά τους [3, 7].

Μια συστοιχία συσσωρευτών, που προορίζεται για ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο, θα πρέπει να έχει:

- υψηλή πυκνότητα ενέργειας
- μεγάλο κύκλο ζωής
- απουσία φαινομένων μνήμης
- γρήγορη φόρτιση
- υψηλό βαθμό απόδοσης
- μεγάλη αξιοπιστία
- χαμηλό κόστος
- υψηλή απόδοση φόρτισης/εκφόρτισης
- μεγάλο εύρος λειτουργίας μεταξύ χαμηλών και υψηλών θερμοκρασιών
- πολύ χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης
- καλό βαθμό θερμοκρασίας αποθήκευσης
- χαμηλή εσωτερική αντίσταση
- δυνατότητα ανακύκλωσης.

1.6.1 Μπαταρία μολυβδου οξέους(lead acid)

Οι μπαταρίες μολυβδου είναι οι πιο γνωστές στην αυτοκινητοβιομηχανία για την εκκίνηση των οχημάτων. Αυτού του είδους οι μπαταρίες μπορούν να επαναφορτιστούν. Αρκετές τέτοιες μπαταρίες μολυβδου είναι συνδεδεμένες σε σειρά με σκοπό την απόδοση υψηλής τάσης σε ηλεκτρικά οχήματα. Μπορεί να υπάρχουν αρκετές παραλλαγές τέτοιων μπαταριών, ωστόσο όλες έχουν την ίδια αρχή λειτουργίας και κατασκευάζονται με τον ίδιο τρόπο. Τα κελιά αυτών των μπαταριών έχουν ηλεκτρόδια φτιαγμένα από μολυβδο και από οξείδιο του μολυβδου. Οι μπαταρίες μολυβδου είναι από τις παλιότερες σχεδιαστικά μπαταρίες στο εμπόριο. Στην Εικόνα 6 παρουσιάζεται η συγκεκριμένη μπαταρία.



Εικόνα 6: Μπαταρία μολυβδου οξέος.

1.6.2 Μπαταρία νικελίου καδμίου (nickel cadmium)

Οι μπαταρίες Ni-Cd χρησιμοποιούνται σε φορητά ραδιόφωνα, σε ιατρικούς εξοπλισμούς και σε επαγγελματικές κάμερες. Τα ηλεκτρόδια στα κελιά σε μία τέτοια μπαταρία είναι από υδροξείδιο του νικελίου και από κάδμιο. Ο ηλεκτρολύτης είναι υδροξείδιο του καλίου. Τα χαρακτηριστικά αυτών των μπαταριών είναι η αντοχή τους και ότι είναι αρκετά οικονομικές. Ωστόσο το κάδμιο είναι επιβλαβές για το περιβάλλον ο οποίος είναι και ο λόγος για τον οποίο έχουν αντικατασταθεί από άλλους τύπους μπαταριών. Το φαινόμενο μνήμης ήταν ένα από τα προβλήματα των συσσωρευτών Νικελίου - Καδμίου. Κατά το φαινόμενο αυτό η διαθέσιμη ποσότητα ενέργειας μειώνεται σε κάθε φόρτιση, όταν η μπαταρία δεν είναι εντελώς άδεια [3]. Στην Εικόνα 7 διακρίνεται η μπαταρία νικελίου καδμίου.



Εικόνα 7: Μπαταρία νικελίου καδμίου.

1.6.3 Μπαταρία νικελίου μετάλλου υδριδίου (nickel metal hydride)

Στα σύγχρονα ηλεκτρικά οχήματα, η μπαταρία που χρησιμοποιείται κατά βάση είναι η μπαταρία Νικελίου Μετάλλου Υδριδίου (NiMH). Πρόκειται για μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία, παρόμοια με την μπαταρία Νικελίου Καδμίου (Ni-Cd) που περιγράψαμε παραπάνω, με τη διαφορά ότι αντί για κάδμιο στην άνοδο της έχει ένα κράμα απορροφητικό σε υδρογόνο. Στην κάθοδο, όπως και στις Ni-Cd μπαταρίες, χρησιμοποιεί νικέλιο. Μια NiMH μπαταρία έχει δυο με τρεις φορές τη χωρητικότητα μιας ισοδύναμου μεγέθους μπαταρίας Ni-Cd. Το μέταλλο στην άνοδο μιας NiMH μπαταρίας είναι ουσιαστικά μια σύνθετη μεταλλική ένωση. Πολλές χημικές ενώσεις έχουν αναπτυχθεί για την εφαρμογή αυτή αλλά αυτές που εφαρμόζονται ανήκουν σε δυο κατηγορίες. Ο πιο κοινός χημικός τύπος είναι ο AB₅, όπου Α είναι ένα μίγμα σπάνιων γαιών, λανθανίου, δημητρίου, νεοδυμίου, πρασινοδυμίου και Β είναι νικέλιο, κοβάλτιο, μαγγάνιο, και αλουμίνιο. Μερικές άλλες μπαταρίες κάνουν χρήση αρνητικών ηλεκτροδίων υψηλότερης χωρητικότητας, βασισμένα σε χημικές ενώσεις τύπου AB₂, όπου Α είναι τιτάνιο ή βανάδιο και Β είναι ζιρκόνιο ή νικέλιο, τροποποιημένο με χρώμιο, κοβάλτιο, σίδηρο και μαγγάνιο, εξαιτίας της μειωμένης διάρκειας ζωής της μπαταρίας. Οι μπαταρίες NiMH αποτελούνται από έναν αλκαλικό ηλεκτρολύτη συνήθως υδροξείδιο καλίου. Η τάση φόρτισης είναι 1.4-1.6 V/στοιχείο. Ένα πλήρως φορτισμένο στοιχείο έχει τάση 1.35-1.4 V και παρέχει ονομαστική τάση 1.2V κατά μέσο όρο στη διάρκεια της αποφόρτισης και μέχρι 1.0V, διότι περαιτέρω αποφόρτιση μπορεί να προκαλέσει μόνιμη ζημιά στο στοιχείο της μπαταρίας. Ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης επηρεάζεται κατά πολύ από τη θερμοκρασία στην οποία οι μπαταρίες είναι αποθηκευμένες, με τις πιο ψυχρές θερμοκρασίες αποθήκευσης να έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερο ρυθμό αποφόρτισης και μεγαλύτερη διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Από την άλλη τα υψηλότερης χωρητικότητας στοιχεία που υπάρχουν στην αγορά (> 2700 mAh), φαίνονται να έχουν τους υψηλότερους

ρυθμούς αποφόρτισης. Όσον αφορά τις επιδράσεις των μπαταριών NiMH στο περιβάλλον, αυτές είναι τουλάχιστον πολύ πιο φιλικές από τις μπαταρίες Ni-Cd, που περιέχουν το δηλητηριώδες κάδμιο και άλλωστε υπάρχουν προγράμματα ανακύκλωσης τους. Το κόστος τους δεν είναι υψηλό και η τάση τους και η επίδοση τους είναι παρόμοιες με τις πρότυπες αλκαλικές μπαταρίες του ίδιου μεγέθους. Η ικανότητα τους να επαναφορτίζονται εκατοντάδες φορές, οδηγεί στην εξοικονόμηση πόρων, χρημάτων και είναι και ο λόγος που δεν είναι τόσο ρυπογόνες ως προς το περιβάλλον. Οι μπαταρίες NiMH είναι ιδιαίτερα κατάλληλες για εφαρμογές υψηλής εντάσεως ρεύματος, λόγω της χαμηλής τους εσωτερικής αντίστασης και μπορούν να διαχειριστούν τα ρεύματα υψηλών εντάσεων διατηρώντας την πλήρη χωρητικότητα τους. Επίσης στον κύκλο αποφόρτισης, λόγω της μικρής τους εσωτερικής αντίστασης, μπορούν και τροφοδοτούν το σύστημα με σταθερή περίπου τάση μέχρι να αποφορτιστούν πλήρως. Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι τα υδρίδια μετάλλων είναι σχετικά ασφαλή υλικά για την αποθήκευση ενέργειας και έτσι η προτεινόμενη λύση μέχρι τώρα στα ηλεκτρικά οχήματα, της χρήσης ηλεκτροκινητήρων/ηλεκτρογεννητριών σε συνδυασμό με μια συστοιχία μπαταριών NiMH, παρουσιάζει αρκετά πλεονεκτήματα, όσον αφορά την ευκολία διαχείρισης των αποθεμάτων ενέργειας κάτω από καθεστώς σχετικά αυξημένης ασφάλειας [2, 8]. Στην Εικόνα 8 βλέπουμε την μορφή της συγκεκριμένης μπαταρίας.



Εικόνα 8: Μπαταρία νικελίου μετάλλου υδριδίου.

1.6.4 Μπαταρία ιόντων λιθίου (lithium ion)

Τα τελευταία χρόνια στο χώρο των ηλεκτρικών οχημάτων, βλέπουμε όλο και πιο πολλές προσπάθειες για ανάπτυξη και χρήση ενός είδους μπαταρίας ιόντων Λιθίου (Lithium ion). Οι μπαταρίες Li-Ion αντιπροσωπεύουν σήμερα την πιο χρησιμοποιούμενη τεχνολογία στα

ηλεκτρικά οχήματα, χάρη στην υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και την αυξημένη ισχύ ανά μονάδα μάζας μπαταρίας, επιτρέποντας την ανάπτυξη ορισμένων τύπων μπαταριών με μειωμένο βάρος και διαστάσεις σε ανταγωνιστικές τιμές. Είναι από τις πιο διαδεδομένες μπαταρίες στα φορητά ηλεκτρονικά, με μια από τις καλύτερες αναλογίες ενέργειας προς βάρος, και με αργό ρυθμό αποφόρτισης. Εξαιτίας της υψηλής τους ενεργειακής πυκνότητας, οι μπαταρίες Li-ion άρχισαν να γίνονται αντικείμενο έρευνας για τη χρήση τους στην ηλεκτροκίνηση καθώς και σε άλλες βιομηχανίες. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έκαναν την πρώτη τους εμφάνιση το 1991. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορα μεγέθη και σχήματα αποτελεσματικά για την καλύτερη εξοικονόμηση χώρου της συσκευής που τροφοδοτούν καθώς επίσης είναι ελαφρύτερες από άλλες ισοδύναμες μπαταρίες. Η ενέργεια σε αυτές τις μπαταρίες αποθηκεύεται μέσω της κίνησης των ιόντων λιθίου. Το λίθιο είναι το τρίτο πιο ελαφρύ χημικό στοιχείο, σημαντικό πλεονέκτημα σχετικά με άλλες μπαταρίες που χρησιμοποιούν βαρύτερα μέταλλα. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που έχουν οι μπαταρίες Li-ion είναι η υψηλή τάση ανοιχτού κυκλώματος που επιτυγχάνουν σε σχέση με άλλες υδάτινες μπαταρίες, όπως οι μπαταρίες μόλυβδου, οι μπαταρίες Νικελίου Υδριδίου Μετάλλου και οι μπαταρίες Νικελίου Καδμίου. Ένα άλλο χαρακτηριστικό τους είναι ότι έχουν χαμηλό ρυθμό αυτοεκφόρτισης. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι η έλλειψη φαινομένου μνήμης, με αποτέλεσμα αυξημένο κύκλο ζωής. Ωστόσο παρατηρείτε ένα μοναδικό μειονέκτημα, των μπαταριών Li-ion το οποίο είναι ότι η διάρκεια ζωής τους εξαρτάται και από το χρόνο που έχει περάσει από τη στιγμή της κατασκευής τους, ανεξάρτητα από το αν αυτές έχουν φορτιστεί και ανεξάρτητα από τον αριθμό των κύκλων φόρτισης/αποφόρτισης. Έτσι, μια παλιότερη χρονολογικά μπαταρία θα διαρκέσει λιγότερο απ' ό,τι μια καινούρια, εξαιτίας της ηλικίας της και μόνο, κάτι που δεν συμβαίνει με τις άλλες μπαταρίες. Η μείωση της χωρητικότητας της μπαταρίας ξεκινά λοιπόν από τη στιγμή της κατασκευής της, ανεξάρτητα αν αυτή χρησιμοποιείται και εξαρτάται από τη θερμοκρασία αποθήκευσης. Διαφορετικές θερμοκρασίες αποθήκευσης μπορούν να προκαλέσουν διαφορετικές μειώσεις της χωρητικότητας της. Έτσι σε πλήρη φόρτιση της μπαταρίας (100%) έχουμε: 6% μείωση στους 0 °C, 20% μείωση στους 25 °C και 35% μείωση στους 40 °C. Όταν το επίπεδο φόρτισης της μπαταρίας είναι στο 40%, αυτές οι τιμές μειώνονται σε 2, 4, 15% στους αντίστοιχους βαθμούς Κελσίου. Όσο η διάρκεια ζωής των μπαταριών μεγαλώνει, η εσωτερική τους αντίσταση αυξάνει. Αυτό προκαλεί πτώση της τάσης στους πόλους κάτω από το απαιτούμενο φορτίο, μειώνοντας το μέγιστο ρεύμα που μπορεί να πάρει το σύστημα από αυτούς. Σταδιακά λοιπόν, φτάνουν σε ένα σημείο όπου η μπαταρία δεν μπορεί να λειτουργήσει άλλο. Οι μπαταρίες Li-ion αντιμετωπίζουν επίσης μια κατάσταση που ονομάζεται "πλήρης

αποφόρτιση” (deep discharge). Σε αυτήν την κατάσταση, η μπαταρία μπορεί να κάνει πολύ καιρό να επαναφορτιστεί ή μπορεί και να μην επαναφορτιστεί. Η “πλήρης αποφόρτιση” λαμβάνει χώρα μόνο όταν τα συστήματα ή οι συσκευές των μπαταριών αυτών μείνουν για πολύ καιρό αχρησιμοποίητα (από 2 χρόνια και πάνω) ή όταν επαναφορτίζονται τόσο συχνά, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να διατηρήσουν το φορτίο τους. Κάθε στοιχείο μπαταρίας Li-ion ξεχωριστά δεν πρέπει να αποφορτίζεται, κάτω από μια συγκεκριμένη τάση, για την αποφυγή μη αναστρέψιμης ζημιάς. Επιπλέον, η μπαταρία δεν πρέπει να μένει πλήρως φορτισμένη για μεγάλα διαστήματα γιατί έτσι κινδυνεύει να οδηγηθεί στο φαινόμενο της “πλήρους αποφόρτισης” και να καταστραφεί. Εκτός από τα μειονεκτήματα που προκαλούνται από τη θερμοκρασία και την “πλήρης αποφόρτιση”, υπάρχουν επίσης προβλήματα που σχετίζονται με το υψηλό κόστος παραγωγής και την ικανότητα ανακύκλωσης των μπαταριών. Οι μπαταρίες Lithium- ion έχουν ονομαστική τάση ανοιχτού κυκλώματος 3.6V και τυπική τιμή τάσης φόρτισης 4.2 V. Η διαδικασία φόρτισης γίνεται υπό σταθερή τάση. Στο παρελθόν, οι μπαταρίες αυτές δεν μπορούσαν να φορτιστούν γρήγορα και συνήθως χρειάζονταν τουλάχιστον 2 ώρες για πλήρη φόρτιση. Τα σύγχρονα στοιχεία της μπαταρίας έχουν τη δυνατότητα πλήρους φόρτισης μέσα σε λιγότερο από 45 λεπτά. Μερικές μάλιστα φτάνουν το 90% της φόρτισης τους μέσα σε 10 λεπτά. Η άνοδος ενός συμβατικού Li-ion στοιχείου κατασκευάζεται από άνθρακα, η κάθοδος είναι οξειδίο μετάλλου και ο ηλεκτρολύτης είναι άλας λιθίου σε οργανικό διαλύτη. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή, υπάρχει στην αγορά μια προοπτική αντικατάστασης των μπαταριών NiMH στα ηλεκτρικά οχήματα από τις μπαταρίες Li-ion. Υπάρχει η πεποίθηση πως η ανάπτυξη της τεχνολογίας, που οδηγεί σε μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και ασφάλειας της μπαταρίας, σε συνδυασμό με τη μείωση του κόστους της, θα έχουν ως αποτέλεσμα τη χρήση της μπαταρίας Li-ion στα ηλεκτρικά συστήματα. Μπορεί οι συγκεκριμένοι τύποι μπαταρίες να μην έχουν τόσο πυκνή χωρητικότητα όπως οι άλλες αλλά δεν απαιτούν κοβάλτιο και νικέλιο για την παρασκευή τους κάτι που τις κάνει λιγότερο δαπανηρές και φιλικότερες προς το περιβάλλον. Επίσης έχουν μεγαλύτερη διάρκεια ζωής από άλλες προσεγγίσεις σε μπαταρίες ιόντων λιθίου καθώς είναι πιο ανθεκτικές σε υψηλές θερμοκρασίες. Για αυτό το λόγο, εταιρείες κολοσσοί όπως η Tesla και η Apple ασχολείται με την μελέτη της συγκεκριμένης μπαταρίας [2, 9, 10]. Στην Εικόνα 9 παρουσιάζεται η μπαταρία ιόντων λιθίου.



Εικόνα 9: Μπαταρία ιόντων λιθίου.

1.6.5 Μπαταρία λιθίου πολυμερούς (lithium polymer)

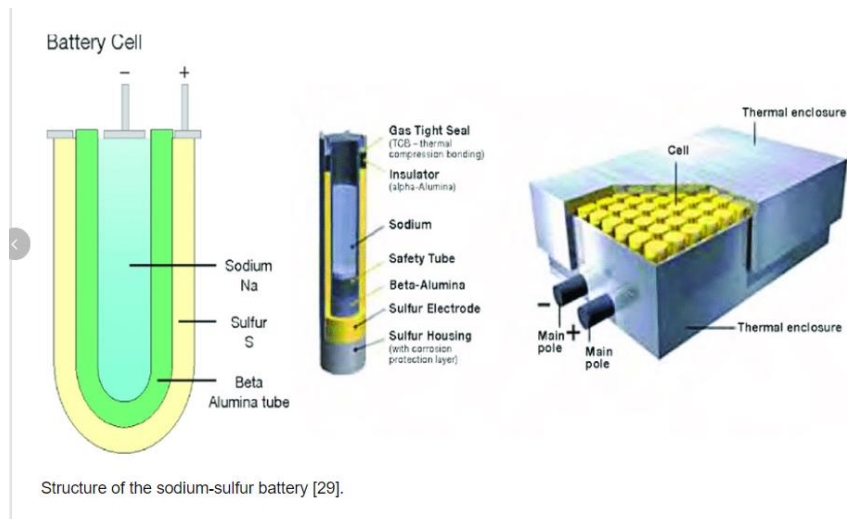
Οι μπαταρίες αυτές μοιάζουν πολύ με τις ιόντων λιθίου. Τα ηλεκτρόδια είναι φτιαγμένα από άνθρακα και από οξείδιο του μετάλλου. Ο στερεός πολυμερής ηλεκτρολύτης δεν είναι εύφλεκτος, επομένως αυτές οι μπαταρίες είναι λιγότερο επικίνδυνες. Επίσης αποθηκεύουν μεγαλύτερη ενέργεια από αυτές του μόλυβδου [2]. Στην Εικόνα 10 βλέπουμε την συγκεκριμένη μπαταρία.



Εικόνα 10: Μπαταρία λιθίου πολυμερούς

1.6.6 Μπαταρία θειούχου νατρίου (sodium sulfur)

Τα ηλεκτρόδια στα κελιά σε μία τέτοια μπαταρία είναι κατασκευασμένα από νάτριο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και από θειάφι(θετικό ηλεκτρόδιο). Αυτός ο τύπος μπαταρίας είναι πολύ αποδοτικός και χρησιμοποιείται στα ηλεκτρικά οχήματα [2]. Στην Εικόνα 11 παρουσιάζεται η δομή και το εξωτερικό της μπαταρίας θειούχου νατρίου.



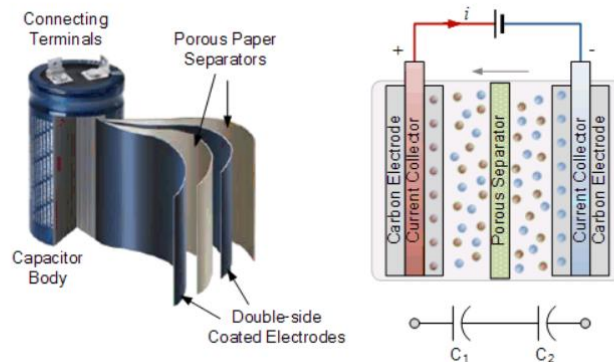
Εικόνα 11: Μπαταρία θειούχου νατρίου

1.7 Υπερ-πυκνωτές

Οι υπερπυκνωτές, που ονομάζονται επίσης super-capacitors ή ultra-capacitors, είναι ένα είδος αποθήκευσης ενέργειας που έχει γίνει αρκετά γνωστό τα τελευταία χρόνια. Μπορούν να θεωρηθούν ότι μοιάζουν μεταξύ ενός συνηθισμένου πυκνωτή και μιας μπαταρίας, ωστόσο διαφέρουν και από τα δύο. Οι οπλισμοί του υπερπυκνωτή βρίσκονται βυθισμένοι σε υγρό ηλεκτρολύτη, ο οποίος περιέχει ελεύθερα φορτία στη μορφή ιόντων. Ανάμεσά τους παρεμβάλλεται μια πολύ λεπτή πορώδης διαχωριστική μεμβράνη, η οποία εμποδίζει την επαφή των οπλισμών αφήνοντας όμως τα ιόντα να την διαπερνούν. Κατά τη φόρτισή του, τα ηλεκτρόδια φορτίζονται με αντίθετα φορτία, το οποίο προκαλεί ηλεκτρικό πεδίο, και με την σειρά του συγκρατεί το συγκεντρωμένο φορτίο στον πυκνωτή. Τα ηλεκτρόνια, που είναι συγκεντρωμένα στο ένα ηλεκτρόδιο, έλκουν τα θετικά ιόντα του ηλεκτρολύτη και τα θετικά φορτία στο άλλο ηλεκτρόδιο έλκουν αντίστοιχα τα αρνητικά ιόντα του ηλεκτρολύτη. Με τον τρόπο αυτό δημιουργείται μια χωρητικότητα μεταξύ των ιόντων και της επιφάνειας του οπλισμού. Όμως, σε αντίθεση με τις μπαταρίες, δεν απαιτούνται χημικές αντιδράσεις για την αποθήκευση ενέργειας, αλλά αποθηκεύουν ενέργεια ηλεκτροστατικά (σαν πυκνωτής) και έτσι η ενεργειακή απόδοση είναι πιο υψηλή. Για αρχή να τονίσουμε ότι για την ώρα οι υπερπυκνωτές δεν μπορούν μόνοι τους να καλύψουν το θέμα της ενέργειας στα ηλεκτρικά οχήματα. Όμως η συνεχής ενασχόληση εταιρειών κολοσσών με τους υπερπυκνωτές και η συνεργασία τους με εταιρείες παραγωγής υπερπυκνωτών, μας δείχνει ότι στο μέλλον μπορεί να στηριχθεί ένα αυτοκίνητο αποκλειστικά με υπερπυκνωτές. Και αυτό γιατί οι υπερπυκνωτές έχουν πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής, με πολύ χαμηλότερες απαιτήσεις συντήρησης, βελτιωμένη απόδοση σε χαμηλή θερμοκρασία και φιλικότητα προς το περιβάλλον. Το μοναδικό μειονέκτημα για τους υπερπυκνωτές είναι το αρχικό τους κόστος και η σχετικά χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τις μπαταρίες. Όμως, είναι σε θέση να απελευθερώσουν πολύ πιο γρήγορα την ενέργεια τους καθώς η εκφόρτιση δεν εξαρτάται από μια χημική αντίδραση που λαμβάνει χώρα. Επίσης, οι υπερπυκνωτές μπορούν να φορτιστούν σε μια συγκεκριμένη τιμή και, λόγω της διάρκειας ζωής και του μηχανισμού φόρτισης, μπορούν να κρατήσουν την φόρτιση αυτή ουσιαστικά χωρίς απώλειες. Οι μπαταρίες δεν είναι σε θέση να το επιτύχουν αυτό. Οι επαναλαμβανόμενοι κύκλοι φόρτισης και εκφόρτισης μιας μπαταρίας μόλυβδου ή μιας μπαταρίας ιόντων λιθίου, μπορεί να είναι επιζήμιοι για την διάρκεια ζωής τους. Ωστόσο, αυτό δεν συμβαίνει με έναν υπερπυκνωτή. Οι υπερπυκνωτές παρέχουν μεγαλύτερη ελευθερία στην τάση ζεύξης DC ή οπουδήποτε αλλού χρησιμοποιούνται, επειδή η φόρτιση τους δεν απαιτεί κάποια συγκεκριμένη τιμή τάσης. Όποια και αν είναι η τάση που φορτίζονται, αυτήν θα διατηρήσουν. Ως αποτέλεσμα, μια

υβριδική τοπολογία που αποτελείται από υπερπυκνωτές, είναι επιθυμητή όταν απαιτούνται μεταβλητές τάσεις για την τροφοδοσία κυκλωμάτων. Έτσι μια τροφοδοσία με μπαταρίες και υπερπυκνωτές θα ήταν ιδανική, καθώς σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης ή σε επιταχύνσεις θα χρησιμοποιούνταν οι υπερπυκνωτές, ενώ για την γενική χρήση η μπαταρία. Οι υπερπυκνωτές έχουν πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από τις μπαταρίες. Αυτό τα καθιστά ιδανικά για εφαρμογές υψηλής αποστράγγισης όπως η τροφοδοσία ενός επιταχυνόμενου αυτοκινήτου. Υπάρχουν ήδη στην αγορά τέτοια μοντέλα όπως το Yaris HybridR της Toyota και το PSA Peugeot Citroen. Χρησιμοποιούν έναν υπερπυκνωτή ως μέρος των συστημάτων εξοικονόμησης καυσίμου εκκίνησης. Αυτό επιτρέπει πολύ ταχύτερη αρχική επιτάχυνση. Ένα άλλο μεγάλο πλεονέκτημά τους είναι ότι μπορούν να φορτιστούν πολλές φορές με μικρή ή υποβάθμιση (μπορεί να φτάσει το ένα εκατομμύριο κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης). Αυτό συμβαίνει επειδή δεν εμφανίζονται φυσικές ή χημικές αλλαγές όταν αποθηκεύεται μια φόρτιση μέσα σε αυτές. Σε σύγκριση, οι επαναφορτιζόμενες μπαταρίες διαρκούν 2000-3000 κύκλους εκφόρτισης φόρτισης. Η αποτελεσματική αποθήκευση και ανάκτηση ενέργειας απαιτεί πολύπλοκες ηλεκτρονικές συσκευές, κυκλώματα ελέγχου και εξισορρόπησης με ηλεκτρονικά ισχύος. Η αυτοεκφόρτιση του υπερπυκνωτή είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν μιας ηλεκτροχημικής μπαταρίας και επομένως είναι κατάλληλοι μόνο για βραχυπρόθεσμη αποθήκευση ενέργειας. Μια τεράστια ποσότητα ενέργειας θα μπορούσε να απελευθερωθεί σε ένα κλάσμα του δευτερολέπτου από έναν υπερ-πυκνωτή και αυτό θα μπορούσε να είναι άκρως επικίνδυνο για την ζωή αν δεν έχουν ληφθεί οι απαραίτητες προφυλάξεις. Η εσωτερική αντίσταση των υπερπυκνωτών είναι πολύ χαμηλή, κάτι που οδηγεί σε υψηλή απόδοση φόρτισης εκφόρτισης (95% ή περισσότερο). Οπότε αφού οι εσωτερικές αντιστάσεις είναι χαμηλές καταλαβαίνουμε ότι οι υπερπυκνωτές μπορούν να έχουν μεγαλύτερο εύρος λειτουργίας. Από περιβαλλοντικής απόψεως, οι υπερπυκνωτές είναι ασφαλέστεροι για το περιβάλλον καθώς δεν περιέχουν ηλεκτρολύτες ή άλλα ιδιαίτερα τοξικά υλικά. Σε σύγκριση, οι χημικοί ηλεκτρολύτες των επαναφορτιζόμενων μπαταριών παρουσιάζουν κίνδυνο για την ασφάλεια και κίνδυνο κατά την εκποίηση [2, 3]. Στην Εικόνα 12 βλέπουμε την εσωτερική δομή ενός υπερπυκνωτή.

An Ultracapacitors Construction

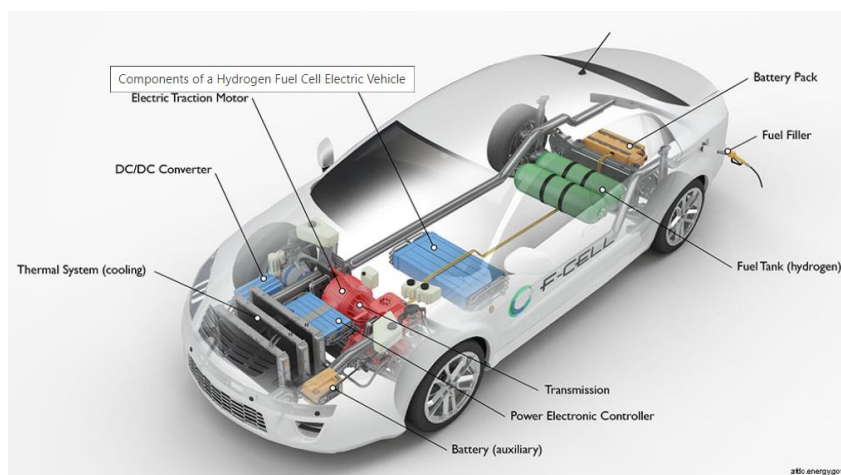


Εικόνα 12: Εσωτερική δομή ενός υπερ-πυκνωτή.

1.8 Κυψέλες καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί ένα μηχανισμό για την ηλεκτροχημική μετατροπή της ενέργειας, μετατρέποντας υδρογόνο και οξυγόνο σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα με τη διαδικασία αυτή, ηλεκτρισμό και θερμότητα. Ο ηλεκτρισμός παράγεται με τη μορφή συνεχούς ρεύματος. Η πρώτη κυψέλη φτιάχτηκε από τον Sir William Grove, το 1839. Ωστόσο η συστηματική έρευνα πάνω σε αυτές άρχισε μόλις τη δεκαετία του '60, όταν η NASA χρησιμοποίησε κυψέλες καυσίμου στα διαστημικά σκάφη των προγραμμάτων Τζέμινι και Απόλλων ως φθηνότερη λύση από την ηλιακή ενέργεια. Τα αυτοκίνητα κυψελών καυσίμου υδρογόνου έχουν μπαταρίες που αποθηκεύουν υδρογόνο και οξυγόνο και τροφοδοτούν το όχημα με χημικές αντιδράσεις, μεταξύ των δύο στοιχείων για τη δημιουργία νερού και ενέργειας. Μερικές φορές είναι γνωστά ως ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (FCEVs), έχουν σωλήνες εξάτμισης, αλλά το μόνο πράγμα που ξεφεύγει από αυτά είναι το νερό. Τα αυτοκίνητα χρειάζονται ανεφοδιασμό, αλλά με υδρογόνο και όχι με βενζίνη ή ντίζελ. Για κάθε γέμιση υδρογόνου, το αυτοκίνητο θα έχει εύρος 320-405km (200-250 μίλια). Η φόρτιση των συγκεκριμένων αυτοκινήτων διαρκεί μόλις λίγα λεπτά (2-3 λεπτά) ένα συγκρίσιμο μέγεθος σε σχέση με τα αυτοκίνητα ντίζελ ή βενζίνης. Οπότε υπάρχει ένα βασικό πλεονέκτημα αυτών των αυτοκινήτων, σε σχέση με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, που χρησιμοποιούν μπαταρία, καθώς τα τελευταία χρειάζονται τουλάχιστον 30 λεπτά φόρτισης για να φτάσουν στο 80%. Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι ότι το εύρος των χιλιομέτρων, είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από αυτό των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Και έτσι δημιουργείται εύλογα η απορία γιατί τα αυτοκίνητα με κυψέλες καυσίμου δεν είναι τόσο διαδεδομένα, όσο τα συμβατικά ηλεκτρικά αυτοκίνητα, καθώς αντιμετωπίζουν ένα βασικό φόβο των καταναλωτών, που είναι το εύρος χιλιομέτρων και ο χρόνος φόρτισης. Η απάντηση σε αυτό είναι ότι τα συμβατικά ηλεκτρικά

αυτοκίνητα είναι καλύτερα σε απόδοση, σε τιμή, στην διαθεσιμότητα σημείων φόρτισης και είναι πιο οικολογικά. Στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται ένα αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου.



Εικόνα 13: Αυτοκίνητο με κυψέλες καυσίμου

Αν και ο ανεφοδιασμός ενός αυτοκινήτου με κυψέλες καυσίμου είναι πολύ παρόμοιος στο χρόνο με ένα όχημα κινητήρα εσωτερικής καύσης, οι επιλογές ανεφοδιασμού είναι πολύ περιορισμένες και η επέκταση της υποδομής ανεφοδιασμού είναι πολύ ακριβή σε σύγκριση με την επέκταση της υποδομής φόρτισης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων, ειδικά την συγκεκριμένη χρονική περίοδο που υπάρχει πληθώρα επιδοτήσεων, τόσο για τα σημεία φόρτισης, όσο και για τα ίδια τα οχήματα. Οι ειδικοί συμφωνούν ότι ένας σημαντικός παράγοντας που αποτρέπει τη λήψη αυτή τη στιγμή, είναι το απαγορευτικό κόστος. Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου είναι πολύ ακριβές και υπάρχουν πολύ λίγα μέρη για αναπλήρωση στα μεγάλα αστικά κέντρα, οπότε η υποδομή δεν είναι εκεί για να υποστηρίξει την τεχνολογία αυτή τη στιγμή. Υπάρχουν επίσης ανησυχίες για την ασφάλεια του κοινού, σχετικά με την παραγωγή υδρογόνου και εγκαταστάσεων αποθήκευσης, καθώς το αέριο υδρογόνο είναι εξαιρετικά εύφλεκτο. Τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν ήδη να αξιοποιηθούν βολικά στο σπίτι των επιβατών, κάτι που δεν είναι δυνατό για τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου λόγω επικινδυνότητας. Θα πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι οι εκπομπές CO₂ από ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του, δεν είναι μόνο σημαντικά χαμηλότερες από ένα όχημα βενζίνης ή ντίζελ, αλλά είναι επίσης χαμηλότερες από το όχημα με κυψέλες καυσίμου, όπου η πλειονότητα του υδρογόνου παράγεται χρησιμοποιώντας ορυκτά καύσιμα, μέσω αναμόρφωσης ατμού μεθανίου. Υπάρχουν βέβαια ακόμη ορισμένες προσδοκίες στην αγορά, ότι η τεχνολογία κυψελών καυσίμου μπορεί να αυξηθεί. Η άνοδος της παραγωγής υδρογόνου, μέσω της ηλεκτρόλυσης θα μπορούσε να αποτελέσει επιχειρηματική υπόθεση για την παραγωγή υδρογόνου. Ωστόσο, η αποδεδειγμένη δυνατότητα κλιμάκωσης και συνεπώς η μείωση του κόστους της τεχνολογίας μπαταριών και

η κακή υποδομή φόρτισης για αυτοκίνητα κυψελών καυσίμου, σημαίνουν ότι τα ηλεκτρικά οχήματα αναμένεται να κυριαρχήσουν στην αγορά επιβατικών οχημάτων τις επόμενες δεκαετίες [11, 12].

Κεφάλαιο 2

Τρόποι Φόρτισης

2 Εισαγωγή

Καθώς τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα αποτελούν μία καινούργια τάση τόσο για το καταναλωτικό κοινό όσο και για τις αυτοκινητοβιομηχανίες θα πρέπει να ασχοληθούμε και με τους τρόπους με τους οποίους μπορούμε να φορτίσουμε ένα τέτοιο όχημα, καθώς για πολλούς χρήστες αυτοκινήτων αυτοί παραμένουν άγνωστοι και ένας λόγος που δεν προτιμούν τα ηλεκτρικά οχήματα. Στην συνέχεια αυτού του κεφαλαίου θα γίνει αναφορά τόσο στα είδη φόρτισης τόσο και στα βύσματα που πρέπει να χρησιμοποιούνται κατά την φόρτιση, καθώς και στα μέρη που αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί.

2.1 Σημεία Φόρτισης

2.1.1 Φόρτιση στο σπίτι

Δεδομένου ότι τα ιδιωτικά αυτοκίνητα είναι συνήθως σταθμευμένα κατά τη διάρκεια της νύχτας, οι περισσότεροι ιδιοκτήτες ηλεκτρικών αυτοκινήτων βασίζονται στην οικιακή φόρτιση για να εξασφαλίσουν ότι το ηλεκτρικό τους αυτοκίνητο είναι έτοιμο για χρήση το πρωί που ο περισσότερος κόσμος εργάζεται. Εκτός από το ότι είναι βολικό, η φόρτιση στο σπίτι για μια νύχτα έχει επίσης το πλεονέκτημα ότι είναι ο φθηνότερος τρόπος για επαναφόρτιση. Για να μπορέσει να γίνει μια φόρτιση στο σπίτι οι αγοραστές ηλεκτρικών αυτοκινήτων θα πρέπει να εγκαταστήσουν ένα σημείο φόρτισης στον χώρο τους. Συνήθως, αυτές οι μονάδες είναι επιτοιχίες και διατίθενται είτε με καλώδιο τύπου 1 ή τύπου 2, το οποίο μπορεί να συνδεθεί απευθείας στο αυτοκίνητο, είτε με υποδοχή τύπου 2 για χρήση με το καλώδιο φόρτισης του οχήματος. Τέτοιες εγκαταστάσεις πολλές φορές ανάλογα την κάθε χώρα χρηματοδοτούνται είτε ολόκληρες, είτε κατά κάποιο μέρος. Υπάρχουν δύο επιλογές ισχύος που προτείνουν οι προμηθευτές για εγκαταστάσεις στο σπίτι και αυτές είναι των 3 kW και των 7 kW. Η δεύτερη επιλογή είναι πιο ακριβή και στην εγκατάσταση και στο κόστος φόρτισης, αλλά μειώνει σημαντικά τον χρόνο φόρτισης εάν το αυτοκίνητο διαθέτει γρήγορο φορτιστή. Για παράδειγμα, το Nissan Leaf σε μονάδα οικιακής φόρτισης 3 kW θα φορτιστεί πλήρως σε περίπου 12-13 ώρες, ενώ η μονάδα 7 kW θα δώσει πλήρη φόρτιση σε περίπου έξι ώρες. Οι τιμές διαφέρουν ανάλογα με τον κατασκευαστή και την ταχύτητα του σημείου χρέωσης. Συνήθως, μια μονάδα 3 kW θα κοστίζει μεταξύ 250 και 500 ευρώ, ενώ ένα σημείο φόρτισης 7 kW θα κοστίζει μεταξύ 450 και 800 ευρώ. Εάν λάβουμε υπόψιν τους παραπάνω

χρόνους φόρτισης για μια εγκατάσταση των 3 kW χρειαζόμαστε 2,1 ευρώ για μία πλήρη φόρτιση, ενώ στην εγκατάσταση των 7 kW χρειαζόμαστε 2,6 ευρώ (οι συγκεκριμένες τιμές μπορεί να διαφέρουν ανάλογα με το κόστος της ενέργειας κατά την νυχτερινή χρέωση). Αυτή η διαφορά στην τιμή είναι ελάχιστη αν υπολογίσουμε το πόσο χρειάζεται ένα βενζινοκίνητο αυτοκίνητο για να καλύψει 270 χιλιόμετρα (καθώς τόση είναι η αυτονομία του Nissan Leaf), αφού χρειάζεται κοντά στα 27 ευρώ [3, 13]. Στην Εικόνα 14 παρουσιάζεται μια αναπαράσταση φόρτισης στο σπίτι.



Εικόνα 14: Φόρτιση στο σπίτι

2.1.2 Φόρτιση σε σημεία με δημόσια πρόσβαση

Ένα βασικό πρόβλημα των ηλεκτρικών αυτοκινήτων είναι η δυσκολία πραγματοποίησης ταξιδιού μεγάλης απόστασης, καθώς λόγω της αυτονομίας τους για μία μεγάλη διαδρομή θα χρειαστούν εκ νέου φόρτιση. Και τα συμβατικά οχήματα προφανώς χρειάζονται ανατροφοδότηση, αλλά ο χρόνος αυτού είναι ελάχιστος, ενώ η φόρτιση των ηλεκτρικών χρειάζεται στην καλύτερη περίπτωση μισή ώρα για να φτάσει η μπαταρία σε επιθυμητά σημεία. Την λύση σε αυτό το πρόβλημα μπορούν να δώσουν τα δημόσια σημεία φόρτισης, που μπορούν να βρίσκονται είτε σε δρόμους, είτε σε μεγάλους αυτοκινητοδρόμους σε χώρους στάθμευσης πχ. ΣΕΑ , είτε σε εμπορικά κέντρα, είτε στον εργασιακό χώρο, είτε σε χώρους τύπου πάρκινγκ ή ένα πάρκο φορτιστών. Όταν οι σταθμοί αυτοί βρίσκονται στους δρόμους, μπορούν να λύσουν και ένα άλλο πρόβλημα, που κυρίως συναντάται στα αστικά

κέντρα, καθώς δεν έχουν όλοι πρόσβαση σε ιδιωτικό πάρκινγκ. Από την άλλη, ανάλογα το σημείο που θα επιλέξουμε και το είδος της φόρτισης, ο χρόνος και το κόστος της φόρτισης διαφέρει. Συναντάμε τρία είδη φορτίσεων στα σημεία με δημόσια πρόσβαση αυτά των 3 kW, των 7-22kW και των 43-50kW. Τώρα βέβαια υπάρχει και η δυνατότητα των 150kW σε περιορισμένα σημεία η οποία θεωρείται και ταχυφόρτιση. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε μία αργή φόρτιση, που όπως προ είπαμε συναντάται κυρίως στα σπίτια και μπορεί να πάρει πάνω από οχτώ ώρες για να είναι πλήρης. Η επόμενη φόρτιση είναι πιο γρήγορη και διαρκεί περίπου τέσσερις με πέντε ώρες για να είναι πλήρης, ενώ η φόρτιση των 43-50kW είναι η πιο γρήγορη που μπορεί να συναντήσει κανείς σε δημόσιους χώρους. Στις περιπτώσεις των αυτοκινήτων που φορτίζουν με συσκευή DC σε υψηλή τάση ανήκει και το Audi e-tron, το οποίο με ένα ταχυφορτιστή των 150 kW, μέσα σε 30' από μπαταρία σχεδόν άδεια αποκτά ενέργεια που αντιστοιχεί στο 80% της χωρητικότητάς της – κάτι που μεταφράζεται σε αυτονομία περίπου 350 χιλιομέτρων. Ωστόσο η πλήρης φόρτιση του μοντέλου επιτυγχάνεται σε περίπου 45 λεπτά. Βλέπουμε δηλαδή ότι χρειάζονται 15 λεπτά για το υπολειπόμενο 20% της ενέργειας, όταν για το αρχικό 80% χρειάζονται 30. Έτσι με ένα μισάωρο διάλλειμα ο οδηγός μπορεί να φορτίσει το αυτοκίνητο του και να συνεχίσει το ταξίδι του. Όσον αφορά το κόστος τώρα σε τέτοιους σταθμούς υπάρχει συνήθως συγκεκριμένη τιμή για την παροχή της φόρτισης που κυμαίνεται στα 23 ευρώ, ενώ ανάλογα το είδος φόρτισης και τον χρόνο φόρτισης προσαρμόζεται και το τελικό κόστος. Για παράδειγμα στους σταθμούς εξυπηρέτησης αυτοκινήτων με την χρήση της πιο γρήγορης φόρτισης για μισή ώρα το κόστος είναι 2,5 ευρώ για την χρήση της εγκατάστασης και επιπλέον 0.25 ευρώ για κάθε λεπτό κάτι που σημαίνει ότι θα κοστίσει 11,5 ευρώ με το αυτοκίνητο να έχει φορτιστεί πάνω από το 80% [3, 13]. Στην Εικόνα 15 έχουμε μία φόρτιση για δύο ταυτόχρονα αυτοκίνητα σε έναν δημόσιο σταθμό φόρτισης.



Εικόνα 15: Φόρτιση σε δημόσια σημεία φόρτισης.

2.1.3 Φόρτιση στον χώρο εργασίας

Ειδική αναφορά πρέπει να κάνουμε στην φόρτιση του ηλεκτρικού οχήματος όσο ο οδηγός εργάζεται. Όπως είπαμε και προηγουμένως η φόρτιση στον χώρο εργασίας έγκειται στην ευρύτερη κατηγορία της φόρτισης σε δημόσιο χώρο, αλλά είναι μία πολύ σημαντική κατηγορία, καθώς ο οδηγός φορτίζει το αυτοκίνητο του χωρίς να περιμένει. Στην Ελλάδα υπάρχουν εταιρείες που σιγά σιγά εγκαθιστούν φορτιστές για ηλεκτρικά οχήματα τόσο για το προσωπικό του όσο και για τους πελάτες του, στον υπόλοιπο πλανήτη όμως είναι μια σύνηθες επιλογή καθώς είναι ένας πολύ βολικός τρόπος για να επαναφορτίζεται το ηλεκτρικό αυτοκίνητο, τόσο από υπαλλήλους όσο και από επισκέπτες. Οι εταιρίες στο εξωτερικό επιλέγουν εγκαταστάσεις που είναι συμβατές με την μεγαλύτερη γκάμα αυτοκινήτων. Έτσι, η πιο κοινή εγκατάσταση και αυτή που επιλέγουν είναι η επιτοίχια με φορτιστή τύπου 3kW, που απευθύνεται στα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα. Επίσης μια επιχείρηση μπορεί να επιλέξει μια ταχύτερη μονάδα των 22kW ακόμα και εγκατάσταση με υπερφορτιστές. Όπως

έχουμε αναλύσει αυτές οι εγκαταστάσεις διαφέρουν στον χρόνο φόρτισης του εκάστοτε αυτοκινήτου, καθώς και στο κόστος της εγκατάστασης. Βέβαια το κόστος μίας εγκατάστασης ανάλογα την χώρα διαφέρει, καθώς η κυβέρνηση κάθε χώρας παρέχει επιδοτήσεις. Για παράδειγμα στην Αγγλία μία πλήρης εγκατάσταση διπλής κεφαλής τύπου 3kW κοστίζει περίπου 1500 λίρες, ενώ όσο αυξάνεται η ισχύς της εγκατάστασης αυξάνεται και το κόστος. Δηλαδή μια μονάδα διπλής κεφαλής 22kW κοστίζει από 2.500 έως 5.000 λίρες και μια πλήρως εγκατεστημένη μονάδα ταχείας φόρτισης μπορεί να κοστίσει έως και 35.000 λίρες [3, 13]. Στην Εικόνα 16 παρατηρούμε τους χώρους φόρτισης εγκατεστημένους σε χώρο εργασίας.



Εικόνα 16: Φόρτιση στον χώρο εργασίας.

2.1.4 Φόρτιση σε πάρκινγκ φορτιστών

Σε αυτή την κατηγορία φόρτισης εστιάζει και η παρούσα διπλωματική. Κυρίως στο εξωτερικό υπάρχουν κάποιοι χώροι με εγκαταστημένους φορτιστές για την εξυπηρέτηση των χρηστών. Σε τέτοιου είδους πάρκα-πάρκινγκ φορτιστών υπάρχουν όλων των ειδών φορτιστές καθώς εξυπηρετεί από το απλό το μικρό αυτοκίνητο μέχρι και την κατηγορία των τζιπ ακόμα και ηλεκτρικό φορτηγό. Σε αυτά τα πάρκινγκ πάει ο πελάτης-χρήστης ηλεκτρικού οχήματος, συνδέει το όχημά του με τον αντίστοιχο φορτιστή και όταν έχει ολοκληρωθεί η φόρτισή του πληρώνει το αντίστοιχο χρηματικό ποσό.

2.2 Είδη φόρτισης

Αρχικά θα πρέπει να τονίσουμε πως τα ηλεκτρικά οχήματα διαφέρουν μεταξύ τους, καθώς κάθε εταιρεία χρησιμοποιεί διαφορετικές μπαταρίες σε χωρητικότητα, κάτι που επηρεάζει την αυτονομία του οχήματος και τον χρόνο φόρτισης. Βέβαια, μία άλλη παράμετρος, που επηρεάζει τον χρόνο φόρτισης, είναι το είδος φόρτισης που επιλέγουμε να φορτίσουμε το όχημα μας. Υπάρχουν τρία είδη φόρτισης που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε, τα δύο εκ

των οποίων έχουν εφαρμογή και για οικιακή χρήση, ενώ φόρτιση μπορεί να συμβεί και σε δημόσιους σταθμούς και ιδιωτικούς. Αναλυτικά αυτά παρουσιάζονται παρακάτω:

- Level One Charging: Η φόρτιση επιπέδου 1 χρησιμοποιεί το ίδιο ρεύμα 120Volt που υπάρχει στις τυπικές οικιακές πρίζες αρκεί να υπάρχει ηλεκτρική γραμμή με καλή γείωση μέσω κλασσικού ρευματοδότη κατάλληλων προδιαγραφών ασφαλείας και προστασίας. Μπορεί να εκτελεστεί χρησιμοποιώντας το καλώδιο τροφοδοσίας και τον εξοπλισμό που συνοδεύουν τα περισσότερα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.
- Level Two Charging: Η φόρτιση επιπέδου 2 χρησιμοποιεί ισχύ 240Volt για να επιτρέψει την ταχύτερη φόρτιση της μπαταρίας ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Η παροχή αυτού του τύπου φόρτισης απαιτεί κατάλληλο εξοπλισμό EVSE(Electric Vehicle Supply Equipment) και απαραίτητη καλωδίωση ικανή να χειριστεί υψηλότερη ισχύ τάσης.
- DC Fast Charging: Η γρήγορη φόρτιση DC επιτρέπει την φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων στο 80% σε 30-60 λεπτά, μετατρέποντας την τροφοδοσία υψηλής τάσης σε ισχύ DC για άμεση αποθήκευση σε μπαταρίες ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Οι αυτοκινητοβιομηχανίες χρησιμοποιούν επί του παρόντος το ίδιο βύσμα (SAE) J1772 για φόρτιση επιπέδου 1 και 2, με εξαίρεση την Tesla που διαθέτει προσαρμογέα. Για γρήγορη φόρτιση DC υπάρχουν τρεις τύποι βυσμάτων που χρησιμοποιούνται από διαφορετικές αυτοκινητοβιομηχανίες: τα CHAdeMO, SAE Combined Charging System (Combo / CCS) και Tesla Supercharger. Τα οχήματα ιαπωνικών εταιρειών χρησιμοποιούν CHAdeMO, ενώ τα τρέχοντα και τα επερχόμενα οχήματα από αμερικανικούς και ευρωπαϊούς κατασκευαστές διαθέτουν θύρες SAE CCS. Ο εξοπλισμός υπερσυμπιεστή της Tesla είναι συμβατός μόνο με οχήματα Tesla, παρόλο που προσφέρουν έναν προσαρμογέα που επιτρέπει στους ιδιοκτήτες της Tesla να χρησιμοποιούν τον εξοπλισμό CHAdeMO.

Στην Εικόνα 17 που ακολουθεί έχουμε συνοπτικά τα χαρακτηριστικά για τα είδη φόρτισης που αναφέραμε παραπάνω.









AC Level 1	AC Level 2	DC Fast Charge
		
Voltage 120V 1-Phase AC	Voltage 208V or 240V 1-Phase AC	Voltage 208V or 480V 3-Phase AC
Amps 12 – 16 Amps	Amps 12 – 80 Amps (Typ. 32 Amps)	Amps <125 Amps (Typ. 60 Amps)
Charging Loads 1.4 to 1.9 kW	Charging Loads 2.5 to 19.2 kW (Typ. 7kW)	Charging Loads <90 kW (Typ. 50kW)
Charge time for vehicle 3 – 5 miles of range per hour	Charge time for vehicle 10 – 20 miles of Range per hour	Charge time for vehicle 80% Charge in 20 – 30 minutes

Εικόνα 17: Είδη φόρτισης και χαρακτηριστικά.

Όπως είναι λογικό ο κάθε τρόπος φόρτισης έχει τα θετικά και τα αρνητικά του, καθώς διαφέρουν στην προσφερόμενη τάση και στις μέγιστες τιμές ρεύματος που μπορούν να φτάσουν. Η φόρτιση επιπέδου 1 έχει σχεδόν μηδαμινό κόστος εγκατάστασης, εάν η πρίζα είναι κοντά στο χώρο στάθμευσης του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, αλλά είναι πολύ χρονοβόρα καθώς φορτίζει 5 με 8 χιλιόμετρα την ώρα. Αυτό για ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο μέσης κατηγορίας ισοδυναμεί σε μία μέρα για να ικανοποιηθεί μία πλήρης φόρτισης. Από την άλλη η φόρτιση επιπέδου 2 μας εξασφαλίζει πιο γρήγορη φόρτιση καθώς το εύρος φόρτισης αυξάνεται σε 16 με 32 χιλιόμετρα την ώρα που ισοδυναμεί κοντά στις 6 ώρες πλήρους φόρτισης. Βέβαια αυτό το επίπεδο φόρτισης μπορεί να μας εξοικονομεί χρόνο και να είναι πιο αποδοτικό, αλλά είναι πιο ακριβό από το επίπεδο φόρτισης 1. Όσον αφορά την DC φόρτιση ο χρόνος φόρτισης μειώνεται κατά πολύ καθώς μπορεί ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο να φορτιστεί στο 80% της μπαταρίας του μέσα σε μόλις 20 με 30 λεπτά. Όπως καταλαβαίνουμε η μείωση στον χρόνο φόρτισης επιφέρει σημαντική αύξηση στην τιμή, τόσο κατά την φόρτιση τόσο και κατά την εγκατάσταση. Επίσης όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι ταχυφορτίσεις μπορεί να επιφέρουν φθορές στις μπαταρίες λιθίου [3, 13, 14].

2.3 Είδη βυσμάτων για την φόρτιση

Στην παρακάτω Εικόνα 18 βλέπουμε τα διάφορα είδη βυσμάτων που χρησιμοποιούνται στην Ευρώπη, Αμερική και στις ανατολικές χώρες όπως Ιαπωνία και Κίνα

Current type and plug name	Region			
	Japon	China	America	Europe
AC				
Plug name	Type 1 - J1772	GB/T	Type 1 - J1772	Type 2
DC				
Plug name	CHAdeMO	GB/T	CCS - Type 1	CCS - Type 2

Εικόνα 18: Είδη βυσμάτων ανά τον κόσμο.

2.3.1 Υποδοχές τύπου 1

Το βύσμα τύπου 1 είναι ένα μονοφασικό βύσμα που επιτρέπει τη φόρτιση επιπέδων ισχύος έως 7,4 kW (230 V, 32 A). Αυτός ο τύπος βύσματος εντοπίζεται κυρίως στη Βόρεια Αμερική και στην Ευρώπη και χρησιμοποιείται για την οικιακή φόρτιση σε τροφοδοτικά AC. Το επίσημο πρότυπο είναι SAE J1772 και διαθέτει βύσμα 5 ακίδων. Τα πιο γνωστά μοντέλα που υποστηρίζουν τις υποδοχές τύπου 1 είναι πιο παλιά μοντέλα όπως τα πρώτα Nissan Leafs και Kia Soul EVs, καθώς και τα Peugeot iOn και Citroen C-Zero. Ωστόσο, το νέο Mitsubishi Outlander, ένα δημοφιλές υβριδικό plug-in (PHEV) εξακολουθεί να διαθέτει υποδοχή τύπου 1 για φόρτιση AC. Είναι πλέον δύσκολο να βρεθούν σημεία φόρτισης τύπου 1 καθώς όλα τα νέα σημεία όπως σουπερμάρκετ, ξενοδοχεία και τα λοιπά έχουν υποδοχές τύπου 2. Βέβαια

αν ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο έχει υποδοχή τύπου 1 δεν υπάρχει κάποιο πρόβλημα καθώς το βύσμα τύπου 1 θα μπει στην θύρα φόρτισης του αυτοκινήτου και το βύσμα τύπου 2 στο σημείο φόρτισης-φορτιστή [3, 15]. Στην Εικόνα 19 παρατηρούμε το βύσμα καθώς και την υποδοχή τύπου 1.

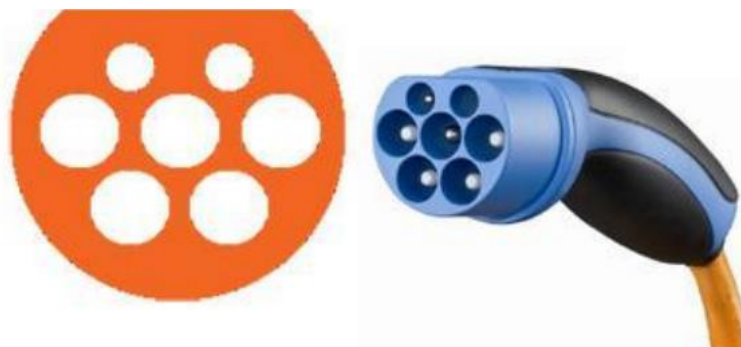


Εικόνα 19: Υποδοχή και βύσμα τύπου 1.

2.3.2 Υποδοχείς τύπου 2

Το βύσμα τύπου 2 είναι το πιο διαδεδομένο, καθώς συναντάται σε όλο τον κόσμο και όλα τα καλώδια τύπου 3 μπορούν να χρησιμοποιηθούν με αυτούς τους υποδοχείς, καθώς και τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα μπορούν να φορτιστούν με βύσματα τύπου 1 και 2. Σε ιδιωτικούς χώρους, τα επίπεδα ισχύος φόρτισης έως και 22 kW είναι κοινά, ενώ επίπεδα ισχύος φόρτισης έως 43 kW (400 V, 63 A, AC) μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δημόσιους σταθμούς φόρτισης. Οι περισσότεροι δημόσιοι σταθμοί φόρτισης είναι εξοπλισμένοι με υποδοχή τύπου 2. Η Ευρωπαϊκή Ένωση συνιστά βύσματα τύπου 2 και μερικές φορές αναφέρονται από το επίσημο πρότυπο 621962. Οι υποδοχές τύπου 2 ονομάζονται συχνά συνδέσεις «Mennekes», από τον γερμανικό κατασκευαστή που εφηύρε το σχέδιο. Έχουν βύσμα 7 ακίδων. Προσφέρει κανονική φόρτιση AC στο σπίτι έως 7,36 kW, αλλά και γρήγορη φόρτιση AC στα 43 kW σε ορισμένους δημόσιους φορτιστές. Η Tesla έχει αναπτύξει μια τροποποιημένη υποδοχή τύπου 2, που επιτρέπει επίσης γρήγορη φόρτιση DC. Η προσαρμοσμένη υποδοχή τύπου 2 της Tesla, η οποία μπορεί να βρεθεί στα μοντέλα S και Model X στην Ευρώπη, επιτρέπει τόσο τη φόρτιση στο σπίτι με μία κανονική τροφοδοσία εναλλασσόμενου ρεύματος, όσο και την ταχεία φόρτιση έως και 120 kW χρησιμοποιώντας ηλεκτρικό ρεύμα DC. Όπως είπαμε τα βύσματα τύπου 2 είναι τα πιο διαδεδομένα και είναι τα βύσματα που θα τοποθετηθούν σε δημόσια σημεία φόρτισης. Έτσι το καλώδιο που βγαίνει από το ηλεκτρικό αυτοκίνητο πρέπει να έχει βύσμα τύπου 2 στο ένα άκρο για να πάει στο σημείο καθολικής φόρτισης στον τοίχο. Σε μια τριφασική παροχή ηλεκτρικού ρεύματος τα

σημεία φόρτισης τύπου 2 μπορούν να φορτίσουν στα 22 kW. Ωστόσο, τα ενσωματωμένα κυκλώματα του αυτοκινήτου ενδέχεται να μην επιτρέπουν φόρτιση με τόσο γρήγορη ταχύτητα [3, 15]. Στην Εικόνα 20 που ακολουθεί παρατηρούμε το βύσμα καθώς και την υποδοχή τύπου 2.



Εικόνα 20: Υποδοχή και βύσμα τύπου 2.

2.3.3 Υποδοχείς CCS

Το CCS σημαίνει συνδυασμένο σύστημα φόρτισης. Αυτές οι πρίζες επιτρέπουν γρήγορη φόρτιση DC και έχουν σχεδιαστεί για να φορτίζουν το ηλεκτρικό αυτοκίνητο πολύ γρήγορα. Το βύσμα CCS είναι μια βελτιωμένη έκδοση του βύσματος τύπου 2, με δύο επιπλέον επαφές ισχύος για σκοπούς γρήγορης φόρτισης και υποστηρίζει επίπεδα ισχύος φόρτισης AC και DC έως 170 kW. Στην πράξη, η τιμή είναι συνήθως περίπου 50 kW. Στα περισσότερα γρήγορα σημεία φόρτισης CCS στην Ευρώπη συναντάται ισχύς 50 kW DC, αν και οι πρόσφατες εγκαταστάσεις CCS είναι συνήθως 150 kW. Υπάρχουν ακόμη και σταθμοί φόρτισης CCS που έχουν εγκατασταθεί και προσφέρουν εκπληκτικά γρήγορη φόρτιση 350 kW. Το CCS είναι μία δημοφιλής επιλογή για τους κατασκευαστές αυτοκινήτων, καθώς χρησιμοποιείται στα καινούργια μοντέλα των Hyundai, Kia, BMW, Audi, Mercedes, MG, Jaguar, Mini, Peugeot, Opel, Citroen, Nissan και VW. Η Tesla αρχίζει επίσης να προσφέρει μια υποδοχή CCS στην Ευρώπη, ξεκινώντας από το μοντέλο 3. Για να μπορέσει να γίνει η φόρτιση με βύσμα CCS σε ένα πρατήριο καυσίμων, θα πρέπει να τοποθετηθεί στο σημείο υποδοχής του αυτοκινήτου. Σε αυτή την περίπτωση, οι κάτω επαφές του DC θα προσφέρουν την ταχεία φόρτιση. Αντίθετα εάν κάποιος έχει υποδοχή CCS στο αυτοκίνητο του και θέλει να το φορτίσει στο σπίτι θα συνδέσει το κανονικό βύσμα τύπου 2 στις πάνω υποδοχές. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι κάτω υποδοχές να μείνουν κενές και προφανώς ο χρόνος φόρτισης να είναι παρόμοιος με αυτόν που θα έκανε με ένα βύσμα τύπου 2 [3, 15]. Στην Εικόνα 21 που ακολουθεί παρατηρούμε το βύσμα καθώς και την υποδοχή τύπου CCS.



Εικόνα 21: Υποδοχή τύπου CCS.

2.3.4 Υποδοχείς CHAdeMO

Αυτές οι υποδοχές-βύσματα επιτρέπουν γρήγορη φόρτιση DC και έχουν σχεδιαστεί για να φορτίζουν το ηλεκτρικό αυτοκίνητο πολύ γρήγορα, τα οποία κυρίως τα συναντάμε σε κάποιο σταθμό φόρτισης, κάποιο πάρκινγκ εταιρείας ή πολυκαταστήματος, κυρίως σε μεγάλους αυτοκινητοδρόμους αλλά και σε κάποιες περιπτώσεις μπορούμε να τα βρούμε και για οικιακή χρήση. Η Tesla διαθέτει προσαρμογέα CHAdeMO, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιούν γρήγορους φορτιστές CHAdeMO εάν δεν υπάρχουν υπερφορτιστές. Αυτό το σύστημα γρήγορης φόρτισης αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία και επιτρέπει χωρητικότητα φόρτισης έως και 50 kW στους κατάλληλους δημόσιους σταθμούς φόρτισης. Οι υποδοχές CHAdeMO βρίσκονται στα ακόλουθα νέα αυτοκίνητα: Nissan Leaf και το Mitsubishi Outlander, καθώς και σε παλιότερα ηλεκτρικά μοντέλα όπως το Peugeot iOn, το Citroen C-Zero, το Kia Soul EV και το Hyundai Ioniq προφανώς και στα επόμενα μοντέλα των εταιρειών που ασχολούνται με την ηλεκτροκίνηση. Τα περισσότερα καινούργια ηλεκτρικά αυτοκίνητα χρησιμοποιούν συστήματα CCS και όχι τόσο το CHAdeMO. Όμως το CHAdeMO έχει ένα σημαντικό πλεονέκτημα που μπορεί να λύσει αρκετά προβλήματα στο θέμα της ηλεκτροδότησης καθώς είναι αμφίδρομος φορτιστής. Αυτό σημαίνει ότι το αυτοκίνητο μπορεί να φορτίζεται στον συγκεκριμένο φορτιστή αλλά και να φορτίζει είτε το σπίτι, είτε το δίκτυο που βρίσκεται ο φορτιστής. Αυτή η ροή ενέργειας είναι γνωστή και ως "Vehicle to Grid" ή V2G. Με την κατάλληλη υποδομή ο χρήστης μπορεί να χρησιμοποιεί στο σπίτι του ηλεκτρικό ρεύμα που είναι αποθηκευμένο στην μπαταρία του αυτοκινήτου. Επίσης έπειτα από κατάλληλη συμφωνία το συγκεκριμένο ρεύμα μπορεί να στέλνεται στο δίκτυο και ο

χρήστης να πληρώνεται για αυτό [3, 15]. Στην Εικόνα 22 παρατηρούμε το βύσμα καθώς και την υποδοχή τύπου CHAdeMO.



Εικόνα 22: Υποδοχή και βύσμα τύπου CHAdeMO.

2.3.5 Υπερφορτιστής Tesla

Οι σταθμοί φόρτισης DC μόνο για Tesla βρίσκονται σε πρατήρια καυσίμων αυτοκινητοδρόμων. Είναι γνωστοί ως υπερφορτιστές και για την ώρα είναι συμβατοί μόνο με ηλεκτρικά αυτοκίνητα της Tesla. Για τον υπερφορτιστή της, η Tesla χρησιμοποιεί μια τροποποιημένη έκδοση του βύσματος τύπου 2 κάτι που επιτρέπει στο μοντέλο S να επαναφορτιστεί στο 80% εντός 30 λεπτών. Ορισμένες νεότερες εκδόσεις των μοντέλων S και Model X μπορούν να φορτιστούν έως και 150 kW σε υπερσυμπιεστές. Η επερχόμενη έκδοση τριών από τους υπερφορτιστές Tesla, θα προσφέρει ακόμη πιο γρήγορη φόρτιση έως 250 kW [3, 15]. Στην Εικόνα 23 παρατηρούμε τα βύσματα που χρησιμοποιεί η Tesla για την φόρτιση των οχημάτων της. Έναν τέτοιο παρόμοιο φορτιστή εμφάνισε στην αγορά και η εταιρεία ABB ο οποίος εξυπηρετεί και άλλα μοντέλα εκτός Tesla. Ο συγκεκριμένος ονομάζεται Terra 360 και παρέχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Μπορεί να προσφέρει 100 χιλιόμετρα αυτονομίας σε λιγότερο από τρία λεπτά
- Ο μοναδικός φορτιστής σχεδιασμένος για ταυτόχρονη φόρτιση έως και τεσσάρων οχημάτων
- Ιδανικό για πρατήρια καυσίμων, σταθμούς φόρτισης, χώρους στάθμευσης καταστημάτων λιανικής και εταιρικούς στόλους

Ο Terra 360 φαίνεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 23: Βύσματα που χρησιμοποιεί η Tesla.

Κεφάλαιο 3

Ανασκόπηση της βιβλιογραφίας

3 Ανασκόπηση της Βιβλιογραφίας

Η ανάπτυξη εγκαταστάσεων γενικά είναι ένα κρίσιμο ζήτημα σημασίας για ένα ευρύ φάσμα ιδιωτικών και δημόσιων δράσεων. Από ακαδημαϊκής άποψης η συζήτηση για θέματα ανάπτυξης EVCS προσελκύει όλο και μεγαλύτερη προσοχή σε παγκόσμιο επίπεδο [16]. Κατά την τελευταία δεκαετία, προβλήματα εγκατάστασης EVCS έχουν εξεταστεί επαρκώς και εξακολουθούν να προσελκύουν το ενδιαφέρον τόσο των επαγγελματιών όσο και των ερευνητών [17,18]. Επιπλέον, συνεχείς αλλαγές στο μέγεθος του πληθυσμού, οι τάσεις της αγοράς, οι περιβαλλοντικοί παράγοντες και άλλα στοιχεία δημιουργούν την ανάγκη για

μετεγκατάσταση, επέκταση και προσαρμογή των εγκαταστάσεων προκειμένου να διασφαλιστεί ότι ικανοποιούν τις ανάγκες ανά πάσα στιγμή. Αυτές οι μελέτες υιοθετούν διάφορες τεχνικές και μεθόδους χωροθέτησης των σταθμών, συνθέτοντας έτσι ένα πολυφασματικό σώμα στην βιβλιογραφία. Παρά τις διαφορές τους, όλες οι προσεγγίσεις χωροθέτησης-εγκατάστασης EVCS έχουν ένα κοινό ότι προτείνουν ένα σύστημα δικτύων φόρτισης EV αφού ληφθούν υπόψη τεχνικών και γεωγραφικών πόρων, με στόχο τη διευκόλυνση των χρηστών EV με όσο το δυνατόν τη χαμηλότερη κατανάλωση ενέργειας [60]. Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται για τη διευκόλυνση επίλυσης του προβλήματος όσων αναφορά την θέσης υποδομών των φορτιστών EV συνήθως βασίζονται σχετικά με τη μεγιστοποίηση της καλυπτόμενης ζήτησης ή την ελαχιστοποίηση όσων αναφορά τα έξοδα μετακίνησης.

Για παράδειγμα, ο Huang [17] πρότεινε δύο μοντέλα βελτιστοποίησης για δύο διαφορετικές λειτουργίες φόρτισης (γρήγορη και αργή φόρτιση) που στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ενώ ικανοποιούν ορισμένους στόχους κάλυψης. Συγκεκριμένα, στόχος της έρευνάς τους ήταν να μεγιστοποιήσουν την κάλυψη της ροής κυκλοφορίας-κίνησης με έναν δεδομένο αριθμό σταθμών φόρτισης. Ο Frade [19] ανέπτυξε ένα μοντέλο μέγιστης κάλυψης για τη βέλτιστη κατανομή φορτιστών EV στη Λισαβόνα. Η ζήτηση φόρτισης μέσα στην ημέρα προέκυψε από τον αριθμό των θέσεων εργασίας και η ζήτηση νυχτερινής φόρτισης κατά τον αριθμό των νοικοκυριών ανά γεωγραφική ενότητα, για την προσέγγισή μας χρησιμοποιήθηκαν OD δεδομένα. Ο Sweda και ο Klabjan [20] ανέπτυξαν ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων (DSS) βασισμένο σε πράκτορες για την τοποθέτηση υποδομών EVCS. Οι Sadeghi-Barzani [21] έδειξε μια τεχνική γενετικού αλγορίθμου (GA), η οποία βρήκε μια διάταξη που ελαχιστοποιούσε το συνολικό κόστος εγκατάστασης σταθμών φόρτισης. Οι Hanabusa και Horiguchi [22] ανέπτυξαν ένα μοντέλο δύο βημάτων που βασίζεται σε ανάθεση κυκλοφορίας με στοχαστική ισορροπία του χρήστη και μεγιστοποίηση της εντροπίας. Μια άλλη μελέτη του Wang [23] εξετάζει το πρόβλημα της χωροθέτησης και του μεγέθους των σταθμών γρήγορης φόρτισης σε ένα δίκτυο αυτοκινητοδρόμων, λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς του προϋπολογισμού και τις δυνατότητες εξυπηρέτησης. Ο Wang [24] πρότεινε ένα μοντέλο σχεδιασμού με βάση τη ζήτηση των πρατηρίων. Ο Arkin [25] ασχολείται με το πρόβλημα τοποθεσίας εγκατάστασης μέσω της χρήσης της θεωρίας γραφημάτων, συγκεκριμένα «t-spanning routes». Το σκεπτικό της έρευνάς τους έγκειται στην κατανομή ενός επαρκούς αριθμού σταθμών φόρτισης κατά μήκος των αυτοκινητοδρόμων που πραγματοποιούν ταξίδια οι χρήστες. Sathaye και Kelley [26] διερεύνησαν έναν τρόπο χωροθέτησης σταθμών σε διαδρόμους αυτοκινητοδρόμων. Η προτεινόμενη προσέγγιση δεν

καλύπτει απαραίτητα τη σχεδόν μέγιστη ζήτηση, αλλά βασίζεται σε ανοιχτό μοντέλο βαθμολόγησης. Ο Feng [27] πρότεινε ένα μοντέλο για την κατανομή σταθμών στον κορμό του δρόμου. Οι Bouguerra και Layeb [28] χρησιμοποίησαν πέντε ακέραια γραμμικά προγράμματα με βάση ένα σταθμισμένο σύνολο μοντέλων κάλυψης, με αποτέλεσμα να υπάρξουν βέλτιστα σχήματα υποδομής που θα μπορούσαν να υιοθετηθούν από ενδιαφερόμενους και φορείς χάραξης πολιτικής. Σύμφωνα με αυτό, ο Zhang [29] διαμόρφωσε ένα κλασικό πρόβλημα κάλυψης για τη διερεύνηση και τη βελτιστοποίηση της αξιοποίησης των σταθμών φόρτισης EV. Worley [30] ανέπτυξε ένα μοντέλο ακέραιου προγραμματισμού για την ταυτόχρονη λύση του προβλήματος της δρομολόγησης οχημάτων και της φόρτισης τους, με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους (ταξίδια, επαναφόρτιση και υλοποίηση). Το μοντέλο μέγιστης κάλυψης χρησιμοποιήθηκε επίσης σε μια μελέτη που διεξήχθη από τους Frade [31], με στόχο τον καθορισμό τόσο του αριθμού όσο και της χωρητικότητας των νέων σταθμών. Ο Chen [32] ανέπτυξε έναν αλγόριθμο μικτού ακέραιου προγραμματισμού με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους των ταξιδιών. Επιπλέον, συνδυαστικές μέθοδοι προέκυψαν για την επίτευξη καλύτερης αποτελεσματικότητας. Ο Awasthi [33] ολοκλήρωσε δύο δημοφιλείς αλγόριθμους βιονικής βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης πλήθους σωματιδίων (PSO) χρησιμοποιήθηκε για την εκ νέου βελτιστοποίηση του υποβέλτιστου συνόλου λύσεων που ελήφθη από το GA. Ο He [34] χρησιμοποίησε έναν αλγόριθμο ενεργού συνόλου για τη βέλτιστη ανάπτυξη σταθμών φόρτισης για plug-in υβριδικά οχήματα, με στόχο τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας. Αυτοί θεωρούν ότι πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη τις δημόσιες τοποθεσίες φόρτισης και τιμές-κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη φάση του σχεδιασμού ενός δικτύου φορτιστών ηλ.οχημάτων. Bian [35] πρότεινε ένα μοντέλο Μικτού Ακέραιου Γραμμικού Προγραμματισμού (MILP) με βάση το Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (GIS) για τον καθορισμό της ιδανικής τοποθεσίας των σταθμών φόρτισης σε αστικά περιβάλλοντα. Xu [36] χρησιμοποίησε τη βελτιστοποίηση των σωματιδίων (Αλγόριθμος PSO) για την ανάπτυξη ενός πλαισίου για βέλτιστη διαμόρφωση σταθμών φόρτισης, με στόχο την ελαχιστοποίηση του συνόλου απόστασης μεταφοράς.

Ωστόσο, το ζήτημα της ανάπτυξης σταθμών φόρτισης EV είναι επίσης ένα χωρικό πρόβλημα, το οποίο επηρεάζεται από διάφορα αντικρουόμενα κριτήρια [37]. Επομένως, σε αντίθεση με τον μεγάλο αριθμό των μελετών που εφαρμόζουν μαθηματικό προγραμματισμό και βελτιστοποιήσεις, υπάρχουν ελάχιστες εργασίες στο πλαίσιο της ανάλυσης τοποθεσίας που στηρίζονται σε πολυκριτηριακή ανάλυση και μεθόδους που βασίζονται σε GIS [38]. Μεταξύ

αυτών, ορισμένα έγγραφα αναπτύσσουν ένα πλαίσιο για την αξιολόγηση ολόκληρων περιοχών αντί επιμέρους σημείων, διαμορφώνοντας έτσι χωρικά μοντέλα [39].

Ο Ευθυμίου [40] χρησιμοποίησε βελτιστοποίηση πολλαπλών κριτηρίων λαμβάνοντας υπόψη τις χωρικές ιδιότητες. Ο Csiszár [41] χρησιμοποίησε σταθμισμένες πολυκριτηριακές μεθόδους για την αξιολόγηση των περιοχών και την κατανομή σταθμών φόρτισης εντός μιας περιοχής εφαρμόζοντας μια προσέγγιση με εξαγωνική βάση και χρησιμοποιώντας έναν άπληστο αλγόριθμο. Ο Ghamami [42] μοντελοποίησε τον βέλτιστο αριθμό φορτιστών και τις θέσεις στις οποίες θα πρέπει να εγκατασταθούν σε υφιστάμενους χώρους στάθμευσης. Ο Namdeo [43] ανέπτυξε ένα μεθοδολογικό πλαίσιο για πολυδιάστατη χωρική ανάλυση που συνδυάζει κοινωνικοοικονομικά χαρακτηριστικά και χαρακτηριστικά ταξιδιού για την ιεράρχηση των δημοσίων σταθμών φόρτισης βάσει της ζήτησης. Μια άλλη ενδιαφέρων έρευνα των Victor-Gallardo [44] χρησιμοποίησε μια μέθοδο που εξετάζει την προμήθεια σταθμούς φόρτισης σε μητροπολιτικές περιοχές και παροχή της διαθεσιμότητάς τους σε διαδρομές που συνδέουν απομακρυσμένα μέρη, διασφαλίζοντας παράλληλα την τεχνική σκοπιμότητα αυτών των τοποθεσιών. Heyman [45] εισάγει την θεωρία διάχυσης μαζί με εργαλεία ανάλυσης GIS για την ανάλυση χωροχρονικής ομαδοποίησης της ζήτησης φόρτισης EV. Ο Costa [46] πρότεινε τη χαρτογράφηση κατάλληλων τοποθεσιών για EVCS χρησιμοποιώντας ανάλυση GIS σε συνδυασμό με γνώσεις από έρευνα που διεξήχθη με τοπικούς εμπειρογνώμονες EV. Ο Erbas [37] διατύπωσε μια ολοκληρωμένη μέθοδο για τον προσδιορισμό των πιθανών τοποθεσιών του EVCS. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποίησαν μια προσέγγιση MCDMA που βασίζεται σε GIS συμπεριλαμβανομένου του Fuzzy την μέθοδο AHP και TOPSIS για την παραγωγή των αποτελεσμάτων τους. Μια άλλη σχετική μελέτη που πραγματοποιήθηκε από τους Huang [47] πρότεινε μια νέα βέλτιστη μέθοδο σχεδιασμού με τη βοήθεια GIS για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε συνδυασμό με σταθμούς φόρτισης EV σε πόλεις υψηλής πυκνότητας. Στην ίδια πλευρά, ο Ευθυμίου [48] πραγματοποίησε μια χωρική εξερεύνηση χρησιμοποιώντας επίσης μια τεχνική πολυκριτηριακής ανάλυσης, και ως εκ τούτου παρήγαγε έναν συνεκτικό χάρτη που απευθύνεται στα ενδιαφερόμενα μέλη. Τέλος, μέθοδοι διαφορετικών πολλαπλών κριτηρίων ανάλυσης απόφασης (MCDA) συνδυάζονται για την αξιολόγηση της επιλογής τοποθεσίας EVCS από τους Wu [49], Zhao και Li [50]. Οι Jarmillo et al. [51] δημοσίευσε μια εξαντλητική έρευνα για εφαρμογές γενετικού αλγορίθμου για την επίλυση προβλημάτων εντοπισμού εγκαταστάσεων. Εξέτασαν όλα τα χωρητικοποιημένα/μη-χωρητικοποιημένα σταθερά προβλήματα φόρτισης, μέγιστης κάλυψης, p-median (το p-median είναι ένα μοντέλο κατανομής τοποθεσίας που εντοπίζει έναν δεδομένο αριθμό p εγκαταστάσεων και εκχωρεί τους κόμβους ζήτησης i στις

εγκαταστάσεις j για να ελαχιστοποιήσει τη συνολική απόσταση που διανύουν οι καταναλωτές από τις εγκαταστάσεις) και κεντροειδές.

Ο Chen et al. [52] διερεύνησε τον αντίκτυπο των τοποθεσιών φόρτισης σχετικά με την απόδοση του δικτύου. Ο Lee et al. [53] ανέπτυξε ένα πλαίσιο βελτιστοποίησης δύο επιπέδων με στόχο την ελαχιστοποίηση του μέσου όρου απόστασης ταξιδιού και του συνολικού χρόνου ταξιδιού στο δίκτυο. Το μοντέλο χρησιμοποιεί μια πιθανολογική συνάρτηση κατανομής του υπολειπόμενου καυσίμου. Ο Jung et al. [54] χρησιμοποίησε ένα δι-επίπεδο στοχαστικό μοντέλο ουράς για την εγκατάσταση σταθμών φόρτισης για ηλεκτρικό ταξί. Ο Long et al. [55] πρότεινε ένα θεωρητικό μοντέλο γραφημάτων με βάση τη ζήτηση και την προσφορά, που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος (επένδυση και λειτουργία).

Μέσα από έρευνες βρήκαν ότι τα GA απαιτούν περισσότερο χρόνο για να δημιουργήσουν μια λύση από άλλους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, χωρίς αυτό να αποτελεί περιορισμό για στρατηγικές αποφάσεις όπως τα προβλήματα σχετικά με την τοποθεσία της εγκατάστασης φορτιστών ωστόσο, τα αποτελέσματα είναι σε πολλές περιπτώσεις ανώτερα (εκτός από το πρόβλημα σταθερής θέσης φόρτισης). Οι Ge et al. [56] πρότεινε μια μεθοδολογία για την χωροθέτηση φορτιστών ηλεκτρικών οχημάτων, με βάση τον διαχωρισμό του δικτύου και τον γενετικό αλγόριθμο. Οι Li et al. [57] χρησιμοποίησε γενετικό αλγόριθμο για τη θέση της εγκατάστασης με σκοπό την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους. Οι Dong et al. [58] πρότεινε ένα γενετικό αλγοριθμικό πλαίσιο για την ελαχιστοποίηση του άγχους εύρους, το οποίο ορίστηκε ως ο συνολικός αριθμός των χαμένων ταξιδιών στο δίκτυο, που απασχολεί Δεδομένα από GPS από συμβατικά οχήματα και οικιακά ταξίδια.

Υπάρχουν ορισμένες αξιοσημείωτες προσεγγίσεις που δίνουν μεγάλη προσοχή στις συμμετοχικές μεθόδους, ενισχύοντας έτσι τη δέσμευση των ενδιαφερομένων και των δημόσιων φορέων [59]. Επιπλέον, οι τεχνικές ανάλυσης των ενδιαφερομένων προσφέρουν την ευκαιρία για καλύτερη κατανόηση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων σε ορισμένα πλαίσια [60]. Για παράδειγμα, οι Kougiaris et al. [61] και επίσης Ο Wolbertus [62] χρησιμοποίησε τη μεθοδολογία Q για να αναγνωρίσει διαφορετικές προοπτικές για το μέλλον σε ότι αφορά την δημιουργία υποδομής φόρτισης EV. Στο ίδιο πλαίσιο, οι Costa et al. [63] απασχολούνται με μια Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων (MCDM), μέθοδο σταθμισμένου γραμμικού συνδυασμού (WLC) και την τεχνική της αναλυτικής ιεραρχίας (AHP) που βασίζεται στις εισροές από ένα ομάδα ειδικών στην ηλεκτρική κινητικότητα, σε συνδυασμό με ένα εργαλείο μοντελοποίησης GIS. Τελευταίοι, οι Costa et al. [79-64]

ενσωμάτωσε επίσης τη μέθοδο MCDA σε συνδυασμό με GIS για τον εντοπισμό της γνώμης των ενδιαφερομένων σε συνδυασμό με χωρική ανάλυση.

Κεφάλαιο 4

Μελέτη εγκατάστασης πάρκου φορτιστών

4.1 Εισαγωγή

Όπως αναφέραμε και στο 2.2.2 υπάρχουν τα δημόσια σημεία στα οποία οι χρήστες ηλεκτρικών οχημάτων μπορούν να φορτίσουν τα οχήματά τους. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναπτύξουμε μια μελέτη μέσω αλγόριθμου βελτιστοποίησης για την εγκατάσταση τέτοιων φορτιστών σε ένα χώρο τύπου πάρκο ή πάρκινγκ δηλαδή ένα Charge Station (CS).

Θα εξετάσουμε το πρόβλημα του μεγέθους του CS (δηλ. αποφάσεις για τον αριθμό και τους τύπους εγκατεστημένων φορτιστών) μέσω ενός πλαισίου βελτιστοποίησης που ελαχιστοποιεί το επενδυτικό κόστος των χειριστών CS, λαμβάνοντας υπόψη τρία διαφορετικά μοντέλα φόρτισης με την απαίτηση της επίτευξης ενός συγκεκριμένου QoS για τους πελάτες τους (ιδιοκτήτες EV) . Συγκεκριμένα, επεκτείνουμε τα υπάρχοντα μοντέλα μεγέθους CS λαμβάνοντας υπόψη τα μοντέλα φόρτισης και το επίπεδο Qos κατά την λειτουργία, εξετάζοντας την διαφοροποίηση του βέλτιστου κόστους με μεταβλητά δεδομένα των αφιχθέντων EVS που θα εξυπηρετηθούν. Για το επίπεδο QoS του CS χρησιμοποιούμε περιορισμούς πιθανότητας καθυστέρησης .

Για τα αφιχθέντα EVs χρησιμοποιούμε δεδομένα με μεταβλητές το τύπο των EVs , την ώρα άφιξης, την ζητούμενη ενέργεια που χρειάζεται και την ισχύ φόρτισης.

Στις επόμενες τρεις ενότητες, περιγράφουμε τα τρία διαφορετικά μοντέλα Ελέγχου Φόρτισης «Έξυπνος Προγραμματισμός», «Έξυπνη Φόρτιση» και «Πολιτική Πρώτης Εξυπηρέτησης», τις εξισώσεις που χρησιμοποιούν και τους περιορισμούς, τα οποία στη συνέχεια συγκρίνουμε ως προς τις επιπτώσεις τους στο πρόβλημα μεγεθών του CS

Η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι σε θέση να προσφέρει πολύτιμες υπηρεσίες στους χειριστές CS σε ανταγωνιστικά περιβάλλοντα δίνοντας απαντήσεις σε πολλαπλά ερωτήματα.

Στο υπόλοιπο της εργασίας παρουσιάζεται το μοντέλο και τα αποτελέσματα της προσομοίωσης καθώς επίσης και τα συμπεράσματα.

4.2 Μαθηματική Μοντελοποίηση

Εξετάζουμε το πρόβλημα μεγέθους ενός CS, το οποίο μπορεί να εγκαταστήσει φορτιστές διαφορετικών τύπων.

Έστω J το σύνολο των υποψηφίων φορτιστών που πρόκειται να εγκατασταθούν.

Κάθε υποψήφιος φορτιστής $j \in J$ χαρακτηρίζεται από μέγιστη ισχύ φόρτισης P_j που μπορεί να υποστηρίξει και με κόστος u_j .

Ένας υποψήφιος φορτιστής $j \in J$ μπορεί να επιλεγεί για εγκατάσταση ή όχι, ανάλογα με τη (δυναμική) μεταβλητή απόφασης

$$q_j \in \{0,1\}. \quad (1)$$

Σε έναν χρονικό ορίζοντα T , το CS αποδέχεται ένα σύνολο N αφιχθέντων EV.

Εντός του ορίζοντα, ο συνεχής χρόνος χωρίζεται σε ένα σύνολο T χρονικών θυρίδων ίσης διάρκειας.

Ένα EV $i \in N$, φτάνει στο CS την ώρα άφιξης $a_i \in T$, και διαθέτει μια συγκεκριμένη εργασία φόρτισης που πρέπει να ικανοποιήσει, η οποία χαρακτηρίζεται από μια ώρα αναχώρησης $d_i \in T$, όπου $a_i < d_i$, και μια ορισμένη απαίτηση ενέργειας φόρτισης E_i . Η μπαταρία του EV i φέρει μέγιστο ρυθμό φόρτισης η_i .

Παρακάτω παραθέτουμε τον Πίνακα 1 με την ονοματολογία και τις μεταβλητές απόφασης που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική για ευκολότερη κατανόηση όσων θα ακολουθήσουν.

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ		ΜΕΤΑΒΛΗΤΕΣ ΑΠΟΦΑΣΗΣ			
CS	Charging Station: σταθμός φόρτισης	a_i	Η ώρα άφιξης ενός i EV	p_j	Η ισχύς φόρτισης του φορτιστή j
EV	Electric Vehicle: ηλεκτρικό όχημα	d_i	Η ώρα αναχώρησης ενός i EV	c_i	Η χρονοθυρίδα c_i όπου το EV i ολοκληρώνει την εργασία φόρτισής του
QoS	Quality of Service: ποιότητα υπηρεσίας	q_j	Ένας υποψήφιος φορτιστής $j \in J$ μπορεί να επιλεγεί για εγκατάσταση ή όχι, ανάλογα με τη (δυναμική) μεταβλητή απόφασης	ζ_i	Το EV i θα υποστεί καθυστέρηση ζ_i χρονοθυρίδες για την ολοκλήρωση του έργου του

kW	Kilowatt	$x_{i,j,t}$	Δηλώνει αν EV $i \in N$ ξεκινά τη φόρτιση στο φορτιστή $j \in J$ στη χρονική στιγμή $t \in T$ $x_{i,j,t} \leq q_j, \forall i \in N, j \in J, t \in T. (2)$	$y_{i,j}$	Είναι binary μεταβλητή δηλώνει αν το i EV εκχωρείται στον φορτιστή j το οποίο i μπορεί να εκχωρηθεί μόνο σε φορτιστή που έχει εγκατασταθεί
kWh	Kilowatt hours	$s_{i,j}$	Οι χρονοθυρίδες για να ολοκληρώσει την εργασία φόρτισής του	$p_{i,j,t}$	Δηλώνει τον ρυθμό ισχύς που φορτίζει το i EV στον j charger το t timeslot
FCFS	First-come and first-service	E_i	Απαίτηση ενέργειας φόρτισης του i EV	u_j	Κόστος εγκατάστασης του j φορτιστή
		η_i	Ο ρυθμός φόρτισης της μπαταρίας του EV i		

Πίνακας 1: Ονοματολογία και μεταβλητές απόφασης.

Στην συνέχεια παραθέτουμε τον Πίνακα 2 με τις παραμέτρους από το Paper αλλά και οι παράμετροι που χρησιμοποιήθηκαν στον κώδικα οι οποίοι χρειάστηκαν για να λυθεί το πρόβλημα και να βγάλουμε τα αποτελέσματά μας.

Παράμετροι του κώδικα	
arrival_times	Η ώρα άφιξης των EVs στο CS
departure_times	Η ώρα αναχώρησης των EVs από το CS
distance	Απόσταση που διανύει το EV για να φτάσει στο CS
demand	Η ζήτηση ενέργειας που χρειάζεται το κάθε EV
charge_power	Η ισχύς φόρτισης των EVs
candidate_chargers	Οι υποψήφιοι φορτιστές
investment_cost	Κόστος επένδυσης
Παράμετροι επιλογής EV	
u_arrival,	Μέση ώρα άφιξης
std_arrival,	Τυπική απόκλιση των ωρών άφιξης,
u_depart,	Μέση ώρα αναχώρησης,

std_depart,	Τυπική απόκλιση των ωρών αναχώρησης
Probability of EV	Πιθανότητα επιλογής κάθε είδους EV
Τύποι EV	4 είδη EV =[Small,Sedan,SUV,Truck]

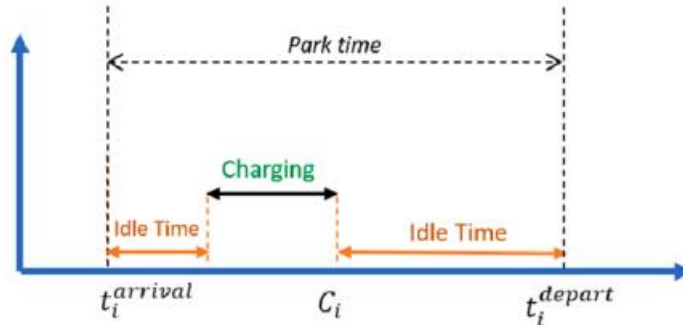
Πίνακας 2: Παράμετροι.

4.2.1 Μοντέλα Εξυπηρέτησης Χρηστών

Για τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήσαμε έχουμε τρία μοντέλα εξυπηρέτησης των χρηστών (Model_Selection).

4.2.1.1 Smart_Scheduling

Για το μοντέλο έξυπνου προγραμματισμού (Smart_Scheduling) το EV μπορεί να ξεκινήσει τη φόρτιση σε κάποιο χρονικό slot=t. Ο charger σε αυτό το μοντέλο αποφασίζει την ώρα που θα αρχίσει να φορτίζει το EV, ωστόσο μόλις ξεκινήσει η φόρτιση δεν μπορεί να διακοπεί (Εικόνα 24). Το πολύ ένα EV φορτίζει σε κάθε φορτιστή σε οποιαδήποτε χρονικό slot. Για αυτό το μοντέλο έχουμε:



Εικόνα 24: Smart_Scheduling.

Μοντελοποιείται το πρόβλημα της διαστασιολόγησης των φορτιστών ως ένα πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού η αντικειμενική συνάρτηση του οποίου είναι η

$$\min_w \sum_{k \in K} (\sum_{j \in J} q_j^{(k)} u_j) \quad (31)$$

Οι μεταβλητές απόφασης και οι περιορισμοί που χρειάστηκαν για να λειτουργήσει το παρών μοντέλο παρουσιάζονται και περιγράφονται ακριβώς από κάτω:

- $x_{i,j,t} \leq q_j \quad (2)$

Είναι binary μεταβλητή που δηλώνει αν το i EV ξεκινά την φόρτιση στον j φορτιστή στο t timeslot. Το i EV μπορεί αντιστοιχιστεί μόνο σε φορτιστή που έχει επιλεγεί για εγκατάσταση.

- $s_{i,j} = \left\lceil \frac{E_i}{\min(n_i, P_j)} \right\rceil$

Δηλώνει τις χρονοθυρίδες που θα χρειαστεί το i EV για να ολοκληρώσει την εργασία φόρτισής του όταν το i EV εκχωρείται στον j φορτιστή ανάλογα με την ισχύ P_j φόρτισης του j φορτιστή και τον ρυθμό η_i φόρτισης της μπαταρίας του EV.

- $\sum_{j \in J} \sum_{t=\alpha_i}^{|T|-s_{i,j}+1} x_{i,j,t} = 1, \forall i \in N$ (3)

Ο παραπάνω περιορισμός εξασφαλίζει ότι το EV δεν έχει εκχωρηθεί σε φορτιστή που δεν μπορεί να ξεκινήσει την φόρτιση του EV κατά χρονοθυρίδα $|T| - s_{i,j}$, ώστε να μπορέσει να ολοκληρώσει την εργασία φόρτισης εντός του χρονικού ορίζοντα T

- $c_i = \sum_{j \in J} \sum_{t=0}^{|T|} x_{i,j,t} * (t + s_{i,j}), \forall i \in N$ (4)

Δηλώνει την χρονοθυρίδα όπου το i EV ολοκληρώνει την εργασία φόρτισής του. Υπολογίζεται προσθέτοντας τη διάρκεια αδιάλειπτης φόρτισης $s_{i,j}$ του EV στη χρονοθυρίδα στην οποία ξεκινάει η φόρτιση του EV.

- $c_i \leq |T| \forall i \in N$ (5)

Δηλώνει ότι η εργασία κάθε EV πρέπει να ολοκληρωθεί εντός του χρονικού ορίζοντα T .

- $\sum_{i \in N} \sum_{\tau=\max\{\alpha_{i,t}-s_{i,j}+1\}}^t x_{i,j,\tau} \leq 1 \quad \forall j \in J, t \in T$ (6)

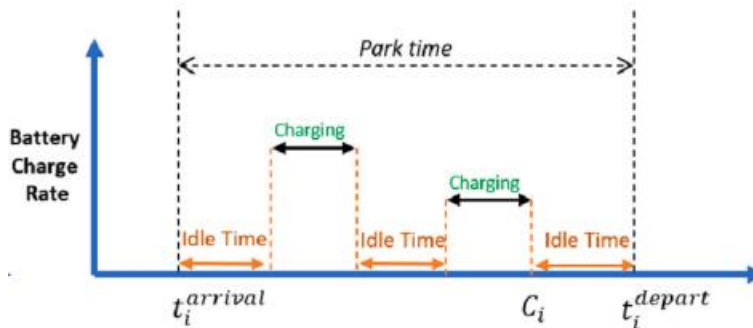
Δηλώνει ότι το πολύ ένα EV μπορεί να φορτίζει σε κάθε φορτιστή j σε οποιαδήποτε δεδομένη χρονοθυρίδα.

- $\zeta_i = \max\{c_i - d_i, 0\} \quad \forall i \in N$ (7)

Δηλώνει την καθυστέρηση σε χρονοθυρίδες που θα υποστεί το i EV για την ολοκλήρωση του έργου του, ανάλογα με την απόφαση ανάθεσης του CS.

4.2.1.2 Smart_Charging

Για το μοντέλο της έξυπνης φόρτισης (Smart_Charging) το EV ξεκινάει την φόρτισή του σε κάποιον charger ωστόσο σε αυτό το μοντέλο ο charger μπορεί να διακόψει την φόρτισή του EV και να την ξανά ξεκινήσει μετά από κάποιο χρόνο (Εικόνα 25). Αυτή είναι η διαφορά με τον προηγούμενο μοντέλο. Για το μοντέλο αυτό έχουμε:



Εικόνα 25: Smart_Charging.

Οι μεταβλητές απόφασης και οι περιορισμοί που χρειάστηκαν για να λειτουργήσει το παρών μοντέλο παρουσιάζονται και περιγράφονται ακριβώς από κάτω:

- $\sum_{j \in J} y_{i,j} = 1 \quad \forall i \in N \quad (8)$

Όπου $y_{i,j}$ binary μεταβλητή όπου όταν παίρνει την τιμή 1 δηλώνει ότι το i EV εκχωρείται στον φορτιστή j αλλιώς με την τιμή 0 δεν εκχωρείται.

- $y_{i,j} \leq q_j \quad \forall i \in N, j \in J \quad (9)$

Ο παραπάνω περιορισμός δηλώνει ότι το i EV μπορεί να εκχωρηθεί μόνο σε φορτιστή που έχει εγκατασταθεί.

- $p_{i,j,t} \leq y_{i,j} * \min \{P_j, \eta_i\} \quad \forall i \in N, j \in J, t \in T \quad (10)$

Ένα EV μπορεί να φορτίσει στο φορτιστή j και στην χρονοθυρίδα t με ρυθμό ισχύος $p_{i,j,t} \geq 0$ όπου είναι μια συνεχής μεταβλητή που επιλέγεται από το σταθμό φόρτισης που αντιπροσωπεύει την έξυπνη φόρτιση. Το EV μπορεί να λάβει φόρτιση μόνο από τον φορτιστή στον οποίο εκχωρήθηκε. Όπου η_i είναι ο μέγιστος ρυθμός φόρτισης του EV.

- $p_{i,j,t} = 0 \quad \forall t < T, i \in N, j \in J \quad (11)$

Ο παραπάνω περιορισμός δηλώνει ότι το EV δεν μπορεί να φορτίσει πριν από την ώρα άφιξής του στον φορτιστή.

- $\sum_{i \in N} p_{i,j,t} \leq q_j * P_j \quad \forall j \in J, t \in T \quad (12)$

Ο παραπάνω περιορισμός δηλώνει ότι πολλά EV μπορούν να αντιστοιχιστούν στον ίδιο φορτιστή ωστόσο θα πρέπει να μοιραστούν την ισχύ εξόδου του.

- $\sum_{j \in J} \sum_{\tau=1}^t p_{i,j,\tau} \geq c_{i,t} * E_i \quad \forall i \in N, t \in T \quad (13)$

Ορίζουμε μια δυαδική μεταβλητή $c_{i,t}$ για να δηλώσουμε αν το i EV ολοκληρώνει την εργασία φόρτισής του σε χρονοθυρίδα. Για να συμβεί αυτό πρέπει να χει λάβει χρέωση ίση ή μεγαλύτερη από την απαιτούμενη χρέωση E_i μέχρι την χρονοθυρίδα t .

- $\sum_{t \in T} c_{i,t} = 1 \quad (14)$

Αυτό που δηλώνει ο παραπάνω περιορισμός είναι ότι το i EV λαμβάνει τη ζήτηση χρέωσης εντός του χρονικού ορίζοντα T .

- $\zeta_i = \max \{ 0, \sum_{t \in T} t * c_{i,t} - d_i \} \quad (15)$

Ανάλογα με την χρονοθυρίδα $t * c_{i,t}$ στην οποία το i EV ολοκληρώνει την εργασία φόρτισης, το EV υφίσταται καθυστέρηση ζ_i .

4.2.1.3 FCFS (First Come First Service)

Για το μοντέλο FCFS (first come first service) το οποίο αναφέρεται σε μια πολιτική εξυπηρέτησης ανάλογα με το ποιος φτάνει πρώτος δηλαδή όποιος φτάνει πρώτος εξυπηρετείται πρώτος. Αυτό υλοποιείται εξετάζοντας το μοντέλο έξυπνου προγραμματισμού όπως είδαμε πιο πάνω γιαυτό τον λόγο έχουμε από μεταβλητές και περιορισμούς τα ίδια με τον έξυπνο προγραμματισμό ωστόσο η διαφορά είναι ότι εδώ έχουμε έξτρα τον παρακάτω περιορισμό:

- $\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} x_{m,j,t} \leq x_{n,j,t} \quad \forall m, n \in \{N_k: a_m < a_n\} \quad (16)$

Όπου m ο χρόνος του αμαξιού που έρχεται πιο νωρίς από το αμάξι με χρόνο n .

4.2.2 Περιορισμοί για το QoS (Quality of Service)

Θεωρητικά οι παράμετροι α_i, d_i, E_i των αμαξιών δεν είναι γνωστά για τις μελλοντικές μέρες λειτουργίας, ωστόσο μπορούν να προσεγγιστούν με γνωστές κατανομές πιθανοτήτων. Το QoS του Charger Station (CS) ορίζεται από τρεις παραμέτρους (Γ, ϵ, D) όπου σαν Γ ορίζουμε το άνω όριο στην πιθανότητα το κάθε EV να υποστεί οποιαδήποτε καθυστέρηση (Delay), στην συνέχεια σαν ϵ ορίζουμε το ανώτερο όριο στην πιθανότητα το κάθε EV να υφίσταται καθυστέρηση μεγαλύτερη από το D . Προκειμένου να εξασφαλιστεί ένα ορισμένο επίπεδο (Γ, ϵ, D) QoS, το CS πρέπει να εγκαταστήσει αρκετούς φορτιστές έτσι ώστε:

- $P_r \{ \zeta_i > 0 \} \leq \Gamma$ (17)

- $P_r \{ \zeta_i > D \} \geq \epsilon$ (18)

Στην ουσία το πρόβλημα μεγεθών του CS είναι να βρεθεί η βέλτιστη διαμόρφωση των φορτιστών έτσι ώστε να διασφαλίζεται το επιλεγμένο QoS με το ελάχιστο κόστος. Λαμβάνοντας υπόψιν ένα χρηματικό κόστος u_i για κάθε φορτιστή $j \in J$, το κόστος του CS αποτελείται από το επενδυτικό κόστος των φορτιστών $\sum_{j \in J} q_j u_j$. Οπότε το πρόβλημα βελτιστοποίησης μεγέθους του CS με περιορισμούς πιθανότητας για QoS διατυπώνεται ως

$$\min_{q_j, v} \sum_{j \in J} q_j u_j \quad (19)$$

Οι περιορισμοί πιθανότητας (17),(18) του προβλήματος (19) δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν αναλυτικά γι' αυτό το λόγο αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα (19) με μια μέθοδο προσομοίωσης Monte Carlo όπου δειγματίζουμε διαφορετικά στιγμιότυπα προβλημάτων από τις κατανομές πιθανοτήτων των παραμέτρων α_i, d_i, E_i και λαμβάνουμε μια εκτίμηση του $P_r \{ \zeta_i > 0 \}$ και του $P_r \{ \zeta_i > D \}$. Συγκεκριμένα δημιουργούμε ένα σύνολο K στιγμιότυπων προβλημάτων όπου σε κάθε περίπτωση $k \in K$ δημιουργείται ένα διαφορετικό σύνολο N_k των EVs. Επεκτείνουμε το σύνολο της μεταβλητής V σε $W = \{ \{ q_j, V^{(k)}, \xi_i^{(k)}, \mu_i^{(k)} \} \}$ όπου $k \in K$.

Η δυαδική μεταβλητή $\xi_i^{(k)}$ δηλώνει αν το i EV της περίπτωσης k υφίσταται οποιαδήποτε καθυστέρηση και η δυαδική μεταβλητή $\mu_i^{(k)}$ δηλώνει αν υφίσταται καθυστέρηση μεγαλύτερη από D , δηλαδή ισχύουν οι εξισώσεις:

$$\xi^{(k)} = \begin{cases} 1, & \zeta_i^{(k)} \geq 0 \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (20)$$

$$\mu^{(k)} = \begin{cases} 1, & \zeta_i^{(k)} \geq D \\ 0, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (21)$$

Χρησιμοποιώντας αυτές τις βοηθητικές μεταβλητές, ο περιορισμός πιθανότητας (17) αντικαθίσταται από

$$\frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_k} \xi_i^{(k)}}{|N_k| |K|} \leq \Gamma \quad (22)$$

και ο περιορισμός πιθανότητας (18) αντικαθίσταται από

$$\frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_k} \mu_i^{(k)}}{|N_k| |K|} \leq \varepsilon, \quad (23)$$

Όπου $\frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_k} \xi_i^{(k)}}{|N_k| |K|}$ είναι μια εκτίμηση του $P_r\{\zeta_l > 0\}$ και $\frac{\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_k} \mu_i^{(k)}}{|N_k| |K|}$ είναι μια εκτίμηση του $P_r\{\zeta_l > D\}$. Τέλος, οι περιορισμοί του μοντέλου επιλογής Charging Control πρέπει να ισχύουν για όλες τις περιπτώσεις στο K . Επομένως, με μια μικρή κατάχρηση της σημειογραφίας, επαναδιατυπώνουμε το πρόβλημα (19), όπως

$$\min_w \sum_{k \in K} \left(\sum_{j \in J} q_j^{(k)} u_j \right) \quad (24)$$

. περιορισμοί μοντέλου ενός μοντέλου ελέγχου φόρτισης, $\forall k \in K, (1), (20)-(23)$.

Το πρόβλημα (24) μπορεί τώρα να έλθει σε επιλύσιμη μορφή, χαλαρώνοντας τους περιορισμούς (20) και (21), χρησιμοποιώντας τη μέθοδο big-M, π.χ.

$$(1 - \zeta_i^{(k)})M + \zeta_i^{(k)} > 0, \quad (25)$$

$$\zeta_i^{(k)}M - \zeta_i^{(k)} \geq 0, \quad (26)$$

$$(1 - \mu_i^{(k)})M + \zeta_i^{(k)} - D > 0, \quad (27)$$

$$\mu_i^{(k)}M - \zeta_i^{(k)} + D \geq 0, \quad (28)$$

όπου M είναι ένας σταθερός μεγάλος αριθμός.

Το τελευταίο ζήτημα που απομένει είναι ότι για να έχουμε μια αξιοπρεπή εκτίμηση των πιθανοτήτων περιορισμού πιθανότητας, ένας μεγάλος αριθμός περιπτώσεων δείγματος $|K|$ πρέπει να εξεταστεί. Ωστόσο, ο υπολογιστικός χρόνος του προβλήματος (24) γίνεται βάρος για μεγάλες τιμές του $|K|$, λόγω της αύξησης του αριθμού των μεταβλητών απόφασης. Για να αντιμετωπίσουμε αυτό το ζήτημα, σχεδιάζουμε έναν αλγόριθμο, στον οποίο αντί των περιορισμών (22), (23) λαμβάνουμε υπόψη τους ακόλουθους περιορισμούς:

$$\frac{\sum_{i \in N_k} \xi_i^{(k)}}{|N_k|} \leq \Gamma, \quad \forall k \in K \quad (29)$$

και

$$\frac{\sum_{i \in N_k} \mu_i^{(k)}}{|N_k|} \leq \varepsilon, \quad \forall k \in K \quad (30)$$

Παρατηρήστε ότι, σε αντίθεση με τα (22), (23), οι περιορισμοί (29), (30) απαιτείται να ισχύουν για κάθε περίπτωση $k \in K$. Επομένως, τα (29) και (30) μπορούν να θεωρηθούν ως

τα πιο συντηρητικά του (22) και (23) αντίστοιχα. Πράγματι, παρατηρήστε ότι αν ισχύει (29) , (30) , τότε ισχύει και για (22) , (23) . Επομένως, το CS θα παρέχει ένα QoS που είναι τουλάχιστον εξίσου καλό με το επιλεγμένο. Χρησιμοποιώντας (29) , (30) , ωστόσο, κάθε στιγμιότυπο αποσυνδέεται από τις υπόλοιπες περιπτώσεις, γεγονός που μας επιτρέπει να διατυπώσουμε το πρόβλημα ως

$$\min_w \sum_{k \in K} \left(\sum_{j \in J} q_j^{(k)} u_j \right) \quad (31)$$

Οι περιορισμοί ενός μοντέλου ελέγχου φόρτισης, (31)

(20)–(21) ,

(29)–(30) , όπου $\mathcal{W}^* = \{ q_j(k) , \mathcal{V}(k) , \xi_i(k) , \mu_i(k) \}$. Το κίνητρο για την παραπάνω

αναδιατύπωση είναι ότι το πρόβλημα (31) μπορεί να διαχωριστεί άμεσα από το $|K|$

υποπροβλήματα, όπου είναι ένα ξεχωριστό πρόβλημα για κάθε περίπτωση $k \in K$, αφού δεν

υπάρχουν περιορισμοί σύζευξης μεταξύ διαφορετικών σεναρίων k . Αξιοποιώντας αυτή τη

διατύπωση, μπορούμε να λύσουμε $|K|$ περιπτώσεις του προβλήματος (31) (πιθανώς

παράλληλα), όπου σε κάθε υποπρόβλημα η σειρά του αριθμού των μεταβλητών είναι $\sigma(|N|$

$|J| |T| + |N| |J| + |N| |T| + |J|)$, αντί για ένα πρόβλημα (δηλαδή το (24)) με έναν αριθμό

μεταβλητών της τάξης του $\sigma(|N| |J| |T| |K| + |N| |J| |K| + |N| |T| |K| + |J|)$. Μετά

την επίλυση (31) με καταναμημένο τρόπο, οι αποφάσεις για τις μεταβλητές q_j λαμβάνονται

ως

$$q_j = \max_{k \in K} \{ q_j^{(k)} \}, \forall j \in J. \quad (32)$$

Στην επόμενη ενότητα παρουσιάζουμε μια μελέτη περίπτωσης και αντίστοιχα αποτελέσματα προσομοίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας.

Τα παραπάνω είναι προβλήματα μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού MILP και λύνονται με ήδη υπάρχοντες solvers λογισμικό τα συγκεκριμένα μοντελοποιήθηκαν σε περιβάλλον Pyomo και επιλύθηκαν χρησιμοποιώντας Gurobi solver.

Κεφάλαιο 5

Δεδομένα τιμές παραμέτρων και αποτελέσματα

5 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε και θα αναπτύξουμε τις διάφορες ρυθμίσεις που χρειάζεται ο αλγόριθμος για να βγάλουμε αποτελέσματα. Θα συγκρίνουμε και θα αξιολογήσουμε τα αποτελέσματα. Κλείνοντας θα βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα για τις διάφορες ρυθμίσεις, για τα μοντέλα, για το είδος και την ποσότητα φορτιστών, για τον αριθμό EVs κ.α.

5.1 Δεδομένα και ρυθμίσεις

Όπως είπαμε και πριν θεωρούμε έναν χρονικό ορίζοντα T που αποτελείται από 24 timeslots $t \in T = \text{Timeslots} = 24$ ($t=0,1,2,3,\dots,23$). Ο αριθμός αυτοκινήτων EVs διαφέρει κάθε φορά που τρέχουμε τον αλγόριθμο για κάθε μοντέλο και για κάθε ρύθμιση-παραμέτρους. Σύμφωνα με το προαναφερθέν paper στο οποίο βασιζόμαστε γιαυτόν τον αλγόριθμο (A. Khaksari et al Sustainable Cities and Society 70 (2021) 102872) προκειμένου να αξιολογηθεί η προτεινόμενη μεθοδολογία χρησιμοποιήσαμε μια ρύθμιση αξιολόγησης όπου οι παράμετροι των απαιτήσεων χρέωσης (EVs) δημιουργήθηκαν τυχαία, χρησιμοποιώντας ρεαλιστικές κατανομές πιθανοτήτων, όπως αυτά που παρουσιάζονται στα Ma and Mohammed (2014) και Sachan, Deb και Singh (2020β).

Ο χρόνος άφιξης a_i ενός EV δημιουργείται τυχαία από μια περικομμένη κατανομή Gauss με μέσο όρο $\mu=2$ και τυπική απόκλιση $\sigma=3$ στρογγυλοποιημένο στον πλησιέστερο ακέραιο παρακάτω. Κάθε EV πριν φτάσει στο CS θεωρείται ότι έχει διανύσει μια απόσταση ρ_i όπου ακολουθεί μια άλλη περικομμένη κατανομή Gauss με μέσο όρο $\mu=40$ μίλια και τυπική απόκλιση $\sigma=18$

Ο χρόνος αναχώρησης d_i ενός EV δειγματοληπτείται επίσης από μια κατανομή Gauss με μέσο όρο $\mu=5$ και τυπική απόκλιση $\sigma=2.5$ στρογγυλοποιημένο στον πλησιέστερο ακέραιο παραπάνω.

Εξετάσαμε τέσσερις τύπους οχημάτων EV ("Small", "Sedan", "SUV", "Truck") με διαφορετικές προδιαγραφές ρυθμού κατανάλωσης ενέργειας κατά της οδήγηση θ_i , χωρητικότητα μπαταρίας b_i και ρυθμό φόρτισης μπαταρίας η_i . Η κατανομή τύπου EV και τα χαρακτηριστικά τους συνοψίζονται στον παρακάτω Πίνακα 3.

Χαρακτηριστικά Τύπων Evs	Small	Sedan	SUV	Truck
Ποσοστό κατανάλωσης θ_i	0.3790	0.4288	0.5740	0.8180
Χωρητικότητα μπαταρίας b_i	16	24	54	70
Μέγιστος ρυθμός φόρτισης η_i	8/slot	19/slot	50/slot	50/slot
μέγιστη απόσταση ταξιδιού	422.163	559.701	940.766	855.745

Πίνακας 3: Χαρακτηριστικά των EVs.

Η ενεργειακή ζήτηση κάθε EV i εξαρτάται από την απόστασή του ρ_i που διανύθηκε πριν φτάσει στο CS, και τον ρυθμό κατανάλωσης ενέργειας θ_i δηλ. $E_i = \min \{b_i, \rho_i \theta_i\}$

Για το CS για την εγκατάσταση φορτιστών έχουμε 3 τύπους φορτιστών. Κάθε τύπος φορτιστή διαθέτει διαφορετικό επίπεδο φόρτισης.

- Η φόρτιση επιπέδου 1 χρησιμοποιεί έναν τυπικό οικιακό φορτιστή (σαν αυτόν που μπαίνει σε γκαράζ) AC 120 ή 130 V.
- Η φόρτιση επιπέδου 2 χρησιμοποιεί πρίζα 240/400 V. Αυτό το επίπεδο και το επίπεδο 1 χρησιμοποιούνται κυρίως μονοφασικά.
- Η φόρτιση επιπέδου 3 είναι η γνωστή και ως γρήγορη φόρτιση.

Η ισχύς εξόδου και η τιμή κάθε φορτιστή παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 4.

Τύπος φορτιστή και κόστος		
Τύπος φορτιστή	Ρυθμός φόρτισης	Το κόστος του φορτιστή
Επίπεδο 1	22KW	1000€
Επίπεδο 2	50KW	1500€
Επίπεδο 3	120KW	2200€

Πίνακας 4: Χαρακτηριστικά φορτιστών.

Όσον αφορά το επίπεδο QoS που επιλέχθηκε από το CS, εξετάσαμε τρεις περιπτώσεις

1. Χωρίς Καθυστέρηση (NoDelay). Σε αυτή την περίπτωση έχουμε QoS(0,0,0) δηλαδή $\Gamma=0$, $\epsilon=0$, $D=0$. Αυτό σημαίνει ότι κάθε ένα από τα ηλεκτρικά οχήματα που φτάνουν θα πρέπει να λάβει ολόκληρη την ενεργειακή του ζήτηση E_i μέχρι τον χρόνο αναχώρησης του d_i και δεν επιτρέπεται καμία καθυστέρηση. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι το έχουμε ένα τέλειο διαμορφωμένο CS όπου οι πελάτες του θα εξυπηρετούνται χωρίς καμία καθυστέρηση
2. One-Slot-Delay. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε QoS(0.2,0,1) δηλαδή $\Gamma=0.2$, $\epsilon=0$, $D=1$. Αυτό σημαίνει ότι το EV που θα φτάσει έχει μέγιστη πιθανότητα 20% να καθυστερήσει για 1 slot του χρόνου αλλά δεν επιτρέπεται να καθυστερήσει για παραπάνω slots. Στην πράξη αυτό αντιστοιχεί με ένα μέσο CS
3. FreeDelay. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε QoS(1,0,|T|- d_i) δηλαδή $\Gamma=1$, $\epsilon=0$, $D=|T|-d_i$. Σε αυτό το QoS τα EV δεν έχουν καμία εγγύηση για το πότε θα ολοκληρωθεί η φόρτισή τους. Το μόνο σίγουρο είναι ότι θα πάρουν την ενέργεια που θέλουν εντός των 24 ωρών.

Για κάθε μια από τις παραπάνω περιπτώσεις το πρόβλημα μεγέθους επιλύθηκε για διαφορετικά σενάρια. Αυτά τα σενάρια μοντελοποιούνται με ρυθμό χρησιμοποιώντας το Pyomo και επιλύονται από τον Gurobi.

5.2 Αποτελέσματα

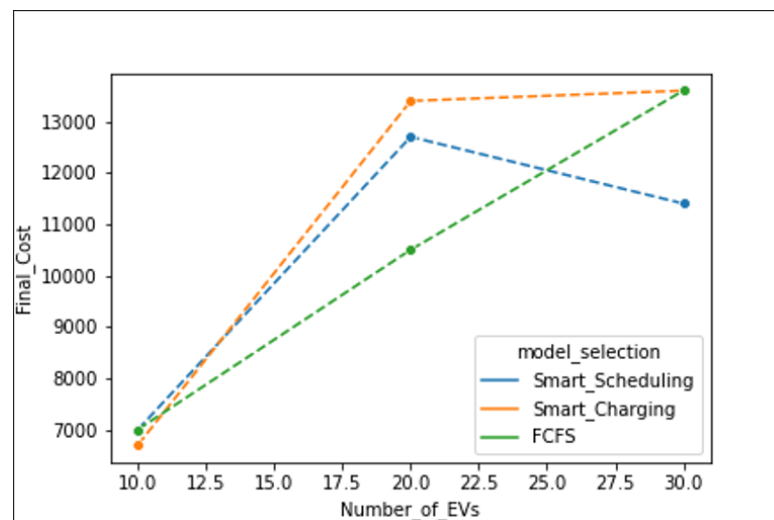
5.2.1 Εξέταση κόστους CS για Model_Selection σε σχέση με Number_of_EVs

Σε αυτή την περίπτωση εξετάσαμε το CS, τι είδους φορτιστές θα εγκατασταθούν και το κόστος εγκατάστασης ανάλογα με τον αριθμό των οχημάτων που θα δεχτεί (10,20,30) στα διάφορα μοντέλα εξυπηρέτησης χρηστών (Smart_Scheduling, Smart_Charging, FCFS) στην περίπτωση **One-Slot-Delay** για 20 σενάρια. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και στην εικόνα 26.

Στον παρακάτω Πίνακα 5 φαίνεται σε κάθε μοντέλο πόσο είναι το κόστος εγκατάστασης ανάλογα με τον αριθμό οχημάτων.

Model selection	Number of Evs	Cost
Smart_Scheduling	10	7000

Smart_Scheduling	20	12700
Smart_Scheduling	30	11400
Smart_Charging	10	6700
Smart_Charging	20	13400
Smart_Charging	30	13600
FCFS	10	7000
FCFS	20	10500
FCFS	30	13600



Εικόνα 26: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών σε συνάρτηση με τον αριθμό οχημάτων EV για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης.

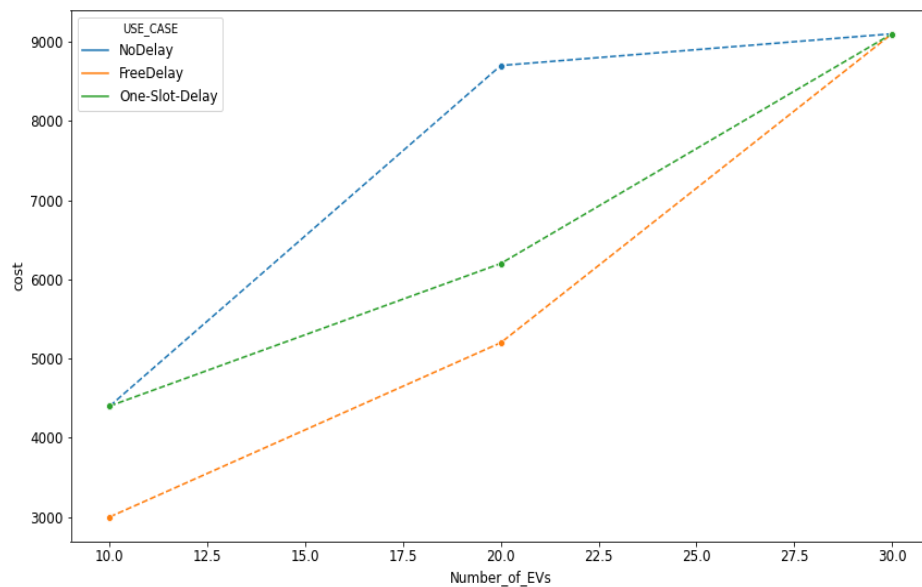
Όπως βλέπουμε και στην παραπάνω εικόνα σε χαμηλό αριθμό οχημάτων και τα τρία μοντέλα έχουν πολύ χαμηλό κόστος και ελάχιστα ξεχωρίζει η επιλογή του Smart_Charging. Όσο ανεβαίνει ο αριθμός των οχημάτων διακρίνουμε να υπάρχει κάποια διαφορά ανάμεσα στο κόστος στα τρία μοντέλα και συγκεκριμένα το μοντέλο FCFS δείχνει να έχει το μικρότερο κόστος εγκατάστασης στα 20 οχήματα. Τέλος στα 30 EVs το μοντέλο FCFS δείχνει να έχει ίδιο κόστος με το Smart_Charging ενώ αυτό που έχει το πιο χαμηλό είναι το Smart_Scheduling. Όσο μεγαλώνει ο αριθμός των EVs φαίνεται να διαχειρίζεται καλύτερα το κόστος το μοντέλο Smart_Scheduling σε σχέση με τα άλλα δύο αυτό συμβαίνει γιατί στο μοντέλο αυτό όπως εξηγήσαμε και νωρίτερα διαλέγει πότε θα ξεκινήσει η φόρτιση του κάθε EV.

5.2.2 Εξέταση κόστους CS για USE_CASE σε σχέση με Number_of_EVs

Σε αυτή την περίπτωση εξετάσαμε το CS για 10,20,30 οχήματα EV τι κόστος θα έχει, πόσοι και τι είδους φορτιστές θα μπουν στις διάφορες περιπτώσεις καθυστέρησης QoS στο μοντέλο **Smart_Charging** για 20 σενάρια. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 6 και στην Εικόνα 27.

USE_CASE	Number_of_EVs	cost
NoDelay	10	4400.0
NoDelay	20	8700.0
NoDelay	30	9100.0
FreeDelay	10	3000.0
FreeDelay	20	5200.0
FreeDelay	30	9100.0
One-Slot-Delay	10	4400.0
One-Slot-Delay	20	6200.0
One-Slot-Delay	30	9100.0

Πίνακας 5: Κόστος σε σχέση με το QoS.



Εικόνα 27: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών σε συνάρτηση με τον αριθμό οχημάτων EV για τις τρεις περιπτώσεις του QoS.

Όπως βλέπουμε από το γράφημα για χαμηλό αριθμό οχημάτων το χαμηλότερο κόστος το έχει η περίπτωση FreeDelay το οποίο είναι στα 3000€. Το ίδιο συνεχίζει να ισχύει μέχρι τα 30 EVs όπου εκεί βλέπουμε ότι και οι τρεις περιπτώσεις έχουν το ίδιο κόστος το οποίο είναι στα 9100€.

5.2.3 Εξέταση κόστους CS για Model_Selection σε σχέση με std_arrival

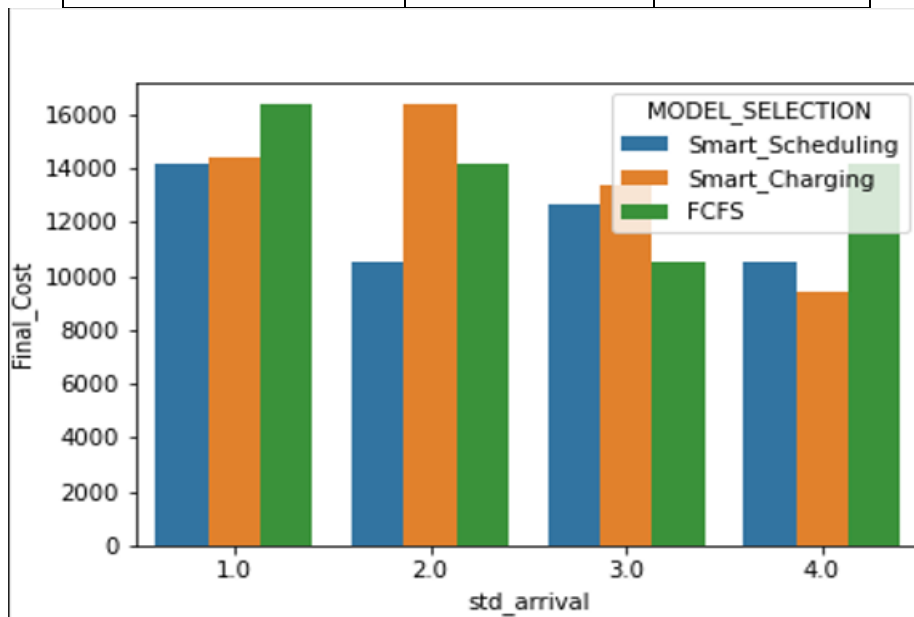
Στην συνέχεια εξετάσαμε την συμπεριφορά του CS τι κόστος θα έχουμε σε σχέση με την εναλλαγή της τυπικής απόκλισης άφιξης των οχημάτων (std_arrival) $\sigma=1,2,3,4$. Βάλαμε 20 αμάξια για την περίπτωση του One-slot-delay για τα τρία μοντέλα φόρτισης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω πίνακα και στην Εικόνα 28. Στον παρακάτω Πίνακα 7 βλέπουμε πόσο είναι το κόστος σε κάθε μοντέλο σε κάθε τυπική απόκλιση άφιξης.

MODEL_SELECTION	std_arrival	cost
Smart_Scheduling	1.0	14200.0
Smart_Scheduling	2.0	10500.0
Smart_Scheduling	3.0	12700.0
Smart_Scheduling	4.0	10500.0
Smart_Charging	1.0	14400.0
Smart_Charging	2.0	16400.0
Smart_Charging	3.0	13400.0
Smart_Charging	4.0	9400.0
FCFS	1.0	16400.0
FCFS	2.0	14200.0
FCFS	3.0	10500.0
FCFS	4.0	14200.0

Πίνακας 6: Κόστος ανάλογα με τα μοντέλα φόρτισης και την τυπική απόκλιση άφιξης.

Charger_Selection	Final_Cost	Final_Q
1000	14200	1
1000		1
1000		1
1000		1

1000		1
1000		1
1500		1
1500		1
1500		1
1500		1
0		0
2200		1



Εικόνα 28: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης ανάλογα με την τυπική απόκλιση άφιξης των EVs.

Από την εικόνα καταλαβαίνουμε ότι δεν υπάρχει σπάνταρ διακύμανση ανάλογα με το πως αλλάζει η τυπική απόκλιση ωστόσο βγάζουμε διάφορα συμπεράσματα. Όπως βλέπουμε στην εικόνα για χαμηλά νούμερα απόκλισης παρατηρείται υψηλό κόστος εγκατάστασης και ιδιαίτερα στο μοντέλο FCFS. Η βέλτιστη λύση για το Smart_Scheduling είναι στα 10500€ με τυπική απόκλιση $\sigma=2$ ή $\sigma=4$. Η βέλτιστη λύση για Smart_Charging είναι στα 9400€ με τυπική απόκλιση $\sigma=4$ ενώ η βέλτιστη λύση για το μοντέλο FCFS είναι στα 10500€ με τυπική απόκλιση $\sigma=3$. Ωστόσο αν θέλουμε να κρατήσουμε την πιο οικονομική είναι στα 9400€ στο μοντέλο Smart_Charging με τυπική απόκλιση $\sigma=4$ η οποία είναι και η πιο οικονομική επιλογή για $\sigma=4$.

5.2.4 Εξέταση κόστους CS για Use_Case σε σχέση με std_arrival

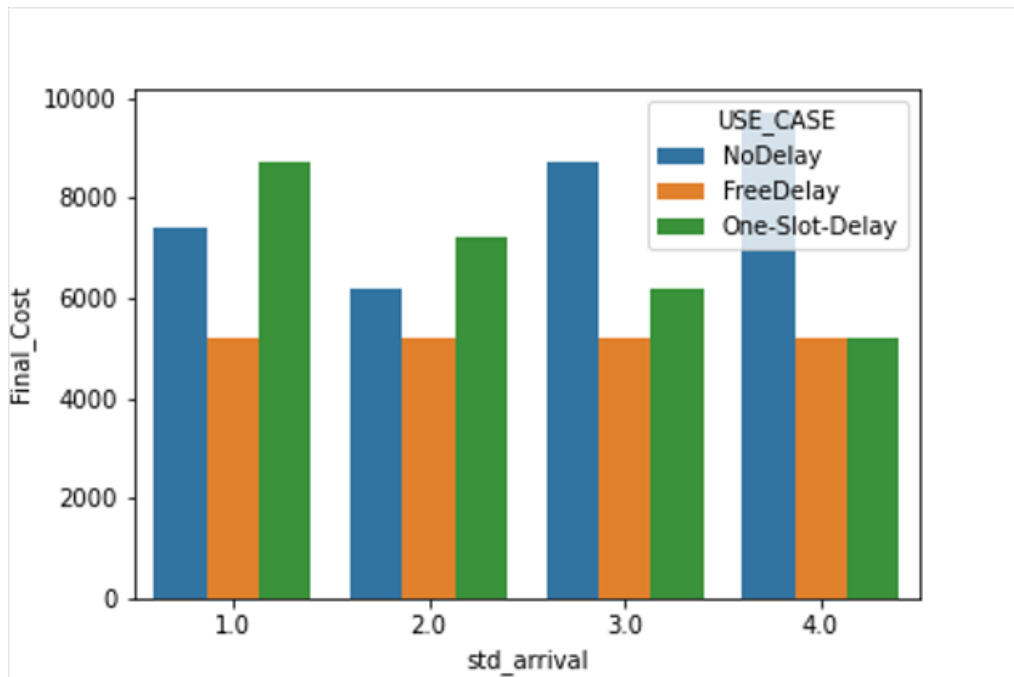
Στο ίδιο μοτίβο δηλαδή βλέπουμε το κόστος σε σχέση με την τυπική απόκλιση άφιξης με την διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση εξετάζουμε όλες τις περιπτώσεις καθυστέρησης για τον μοντέλο Smart_Charging. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα στον Πίνακα 8 και στην Εικόνα 29.

MODEL_SELECTION	std_arrival	cost
Smart_Scheduling	1.0	14200.0
Smart_Scheduling	2.0	10500.0
Smart_Scheduling	3.0	12700.0
Smart_Scheduling	4.0	10500.0
Smart_Charging	1.0	14400.0
Smart_Charging	2.0	16400.0
Smart_Charging	3.0	13400.0
Smart_Charging	4.0	9400.0
FCFS	1.0	16400.0
FCFS	2.0	14200.0
FCFS	3.0	10500.0
FCFS	4.0	14200.0

USE_CASE	std_arrival	cost
NoDelay	1.0	7400.0
NoDelay	2.0	6200.0
NoDelay	3.0	8700.0
NoDelay	4.0	9700.0
FreeDelay	1.0	5200.0
FreeDelay	2.0	5200.0
FreeDelay	3.0	5200.0
FreeDelay	4.0	5200.0
One-Slot-Delay	1.0	8700.0
One-Slot-Delay	2.0	7200.0

One-Slot-Delay	3.0	6200.0
One-Slot-Delay	4.0	5200.0

Πίνακας 7: Κόστος ανάλογα με τις περιπτώσεις QoS και την τυπική απόκλιση άφιξης.



Εικόνα 29: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών για τις τρεις περιπτώσεις καθυστέρησης ανάλογα με την τυπική απόκλιση άφιξης των EVs.

Βλέπουμε ότι υπάρχει μια σταδιακή μείωση για την περίπτωση του One-Slot-Delay. Αυτό που μας κάνει εντύπωση είναι το σταθερό κόστος στην περίπτωση του FreeDelay ανεξαρτήτως της αλλαγής της τυπικής απόκλισης. Η περίπτωση του NoDelay πάλι δεν ακολουθεί κάποια συγκεκριμένη κυματομορφή ωστόσο βγάζουμε διάφορα συμπεράσματα. Όπως βλέπουμε στην εικόνα για χαμηλά νούμερα απόκλισης παρατηρείται ιδιαίτερα ψηλό κόστος στο μοντέλο FCFS ενώ στα υψηλά νούμερα της τυπικής απόκλισης παρατηρούμε το πιο υψηλό κόστος το οποίο είναι στην περίπτωση του NoDelay όπου δεν προβλέπεται καμία καθυστέρηση στην φόρτιση των χρηστών. Η βέλτιστη λύση η πιο οικονομική δηλαδή για το NoDelay είναι στα 6200€ με τυπική απόκλιση $\sigma=2$. Η βέλτιστη λύση για FreeDelay είναι στα 5200€ για όλες τις τυπικές αποκλίσεις ενώ η βέλτιστη λύση για το μοντέλο One-Slot-Delay είναι στα 5200€ με τυπική απόκλιση $\sigma=4$. Ωστόσο αν θέλουμε να κρατήσουμε

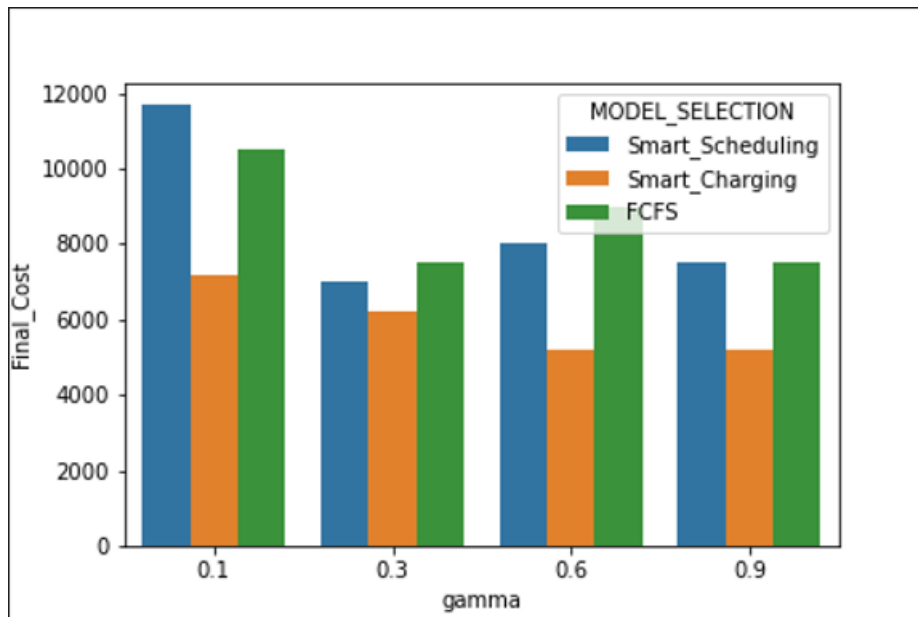
την πιο οικονομική είναι στα 5200€ το οποίο το συναντάμε και στο FreeDelay και στο One-Slot-Delay με τυπική απόκλιση $\sigma=4$.

5.2.5 Εξέταση κόστους CS για Model_Selection σε σχέση με το Γ

Στην συνέχεια εξετάσαμε το CS με τι κόστος εγκαθιστά φορτιστές κρατώντας σταθερά 20 EVs, κρατώντας την περίπτωση One-Slot-Delay, εναλλάσσοντας τα μοντέλα ελέγχου φόρτισης, κρατώντας σταθερή την μεταβλητή ϵ και εναλλάσσοντας την μεταβλητή $\Gamma=0.1,0.3,0.6,0.9$ που σημαίνει ότι έχει μέγιστη πιθανότητα 10,30,60,90% να καθυστερήσει για 1 timeslot. Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα στους Πίνακα 9 και στην Εικόνα 30.

MODEL_SELECTION	gamma	cost
Smart_Scheduling	0.1	11700.0
Smart_Scheduling	0.3	7000.0
Smart_Scheduling	0.6	8000.0
Smart_Scheduling	0.9	7500.0
Smart_Charging	0.1	7200.0
Smart_Charging	0.3	6200.0
Smart_Charging	0.6	5200.0
Smart_Charging	0.9	5200.0
FCFS	0.1	10500.0
FCFS	0.3	7500.0
FCFS	0.6	9000.0
FCFS	0.9	7500.0

Πίνακας 8: Κόστος ανάλογα με τα μοντέλα φόρτισης και την παράμετρο Γ .



Εικόνα 30: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης με σταθερό ϵ ανάλογα με την μεταβλητή Γ .

Σύμφωνα με το διάγραμμα καταλαβαίνουμε ότι το υψηλότερο κόστος (11700€ για Smart_Scheduling και 10500€ για FCFS) το έχουμε όταν έχουμε 10% πιθανότητα να καθυστερήσει την φόρτισή του το κάθε EV στην αντίθετη μεριά δηλαδή για 90% πιθανότητα έχουμε το ελάχιστο κόστος(5200€ για Smart_Charging). Κάτι τέτοιο περιμέναμε να συμβεί διότι όσο πιο πολύ καθυστερεί την φόρτιση τόσο πιο ευέλικτο γίνεται το CS σε σχέση με τους φορτιστές που θα εγκαταστήσει. Παρατηρούμε επίσης το χαμηλό κόστος στο μοντέλο Smart_Charging και πόσο δεν επηρεάζετε σε μεγάλο βαθμό από τις εναλλαγές της μεταβλητής Γ κάτι το οποίο είναι λογικό μιας και στην ουσία αυτό το μοντέλο κάνει ακριβώς αυτή την δουλειά να εκμεταλλεύεται την καθυστέρηση και να μοιράζει τον χρόνο φόρτισης σε τέτοιο βαθμό έτσι ώστε να μην επιβαρύνεται το CS.

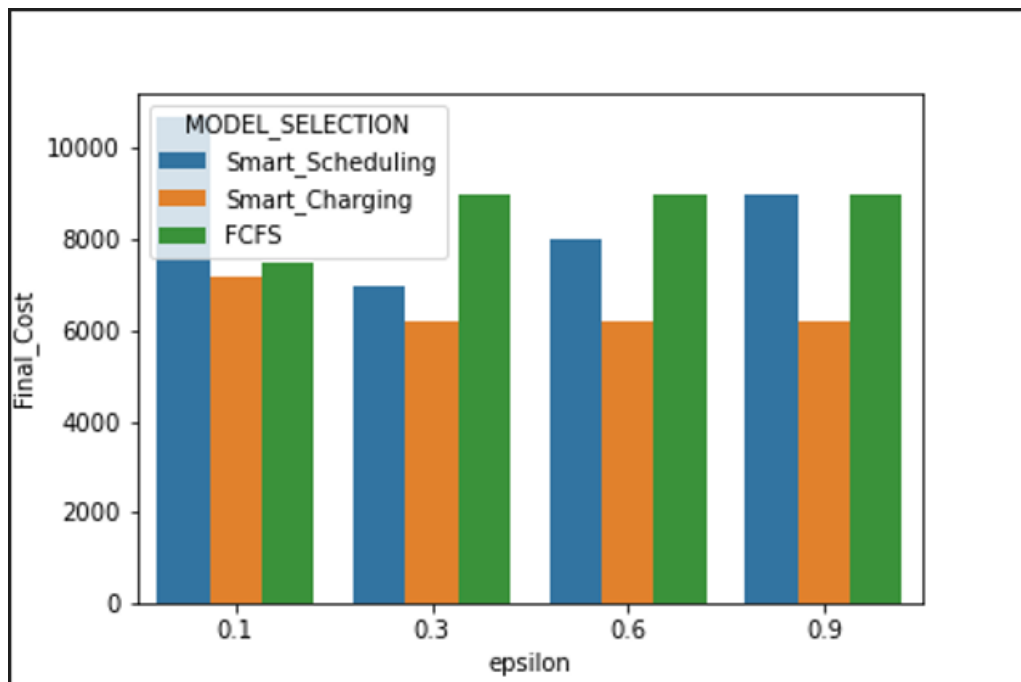
5.2.6 Εξέταση κόστους CS για Model_Selection σε σχέση με το ϵ

Εδώ εξετάζουμε το ίδιο με την προηγούμενη περίπτωση με την μόνη διαφορά εδώ κρατάμε σταθερή την μεταβλητή Γ και αλλάζουμε την μεταβλητή $\epsilon=0.1,0.3,0.6,0.9$ που σημαίνει ότι EV έχει 10,30,60,90% πιθανότητα να δεχτεί καθυστέρηση πάνω από 1 timeslot. Έχουμε τα εξής αποτελέσματα στον παρακάτω Πίνακα 10 και Εικόνα 31.

MODEL_SELECTION	epsilon	cost
-----------------	---------	------

Smart_Scheduling	0.1	10700.0
Smart_Scheduling	0.3	7000.0
Smart_Scheduling	0.6	8000.0
Smart_Scheduling	0.9	9000.0
Smart_Charging	0.1	7200.0
Smart_Charging	0.3	6200.0
Smart_Charging	0.6	6200.0
Smart_Charging	0.9	6200.0
FCFS	0.1	7500.0
FCFS	0.3	9000.0
FCFS	0.6	9000.0
FCFS	0.9	9000.0

Πίνακας 9: Κόστος ανάλογα με τα μοντέλα φόρτισης και την παράμετρο ϵ .



Εικόνα 31: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης με σταθερό Γ ανάλογα με την μεταβλητή ϵ .

Σύμφωνα με την γραφική πάλι βλέπουμε ότι το υψηλότερο κόστος είναι για $\epsilon=0.1$ δηλαδή έχει 10% πιθανότητα και συγκεκριμένα το πιο ακριβό μοντέλο είναι στο Smart_Scheduling. Παρατηρούμε ότι για $\epsilon=0.9$ το πιο φθηνό κόστος και γενικά το πιο

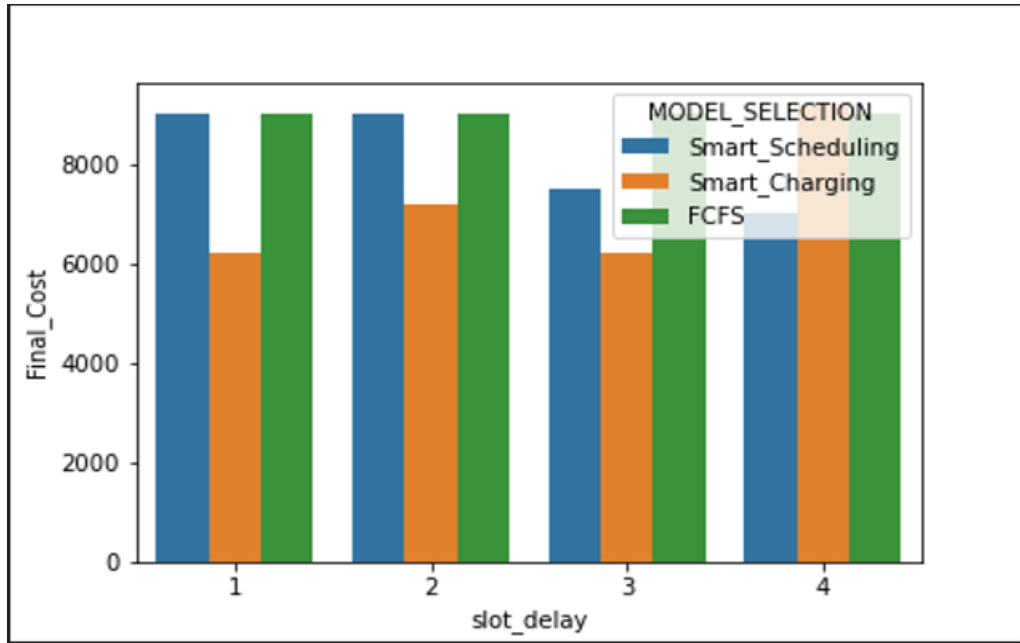
φθηνό κόστος το έχει το μοντέλο Smart_Charging (στα 6200) ενώ τα άλλα δύο έχουν ίσα κόστη. Και δω ισχύει ότι και από πάνω όσο μεγαλύτερη η καθυστέρηση τόσο καλύτερη διαχείριση κάνει το μοντέλο Smart_Charging.

5.2.7 Εξέταση κόστους CS για Model_Selection σε σχέση με το πόσα slot delay έχουμε

Σε αυτή την περίπτωση αξιολογούμε το CS τι κόστος εγκατάστασης θα έχει ανάλογα με τον αριθμό slot καθυστέρησης δηλαδή παίρνουμε μετρήσεις για 1,2,3,4 ώρες καθυστέρησης για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης στην περίπτωση του One-Slot-Delay. Στον παρακάτω Πίνακα 11 έχουμε τα εξής συμπεράσματα:

MODEL_SELECTION	slot	cost
Smart_Scheduling	1	9000.0
Smart_Scheduling	2	9000.0
Smart_Scheduling	3	7500.0
Smart_Scheduling	4	7000.0
Smart_Charging	1	6200.0
Smart_Charging	2	7200.0
Smart_Charging	3	6200.0
Smart_Charging	4	9200.0
FCFS	1	9000.0
FCFS	2	9000.0
FCFS	3	9000.0
FCFS	4	9000.0

Πίνακας 10: Κόστος ανάλογα με τα μοντέλα φόρτισης και την καθυστέρηση των οχημάτων.



Εικόνα 32: Κόστος εγκαταστημένων φορτιστών για τα τρία μοντέλα ελέγχου φόρτισης ανάλογα με τον χρόνο καθυστέρησης slots.

Από το γράφημα βλέπουμε ότι το πιο ψηλό κόστος κατά μέσο όρο ανεξαρτήτως χρόνου καθυστέρησης το έχει το μοντέλο FCFS. Ωστόσο το πιο ψηλό κόστος συνολικά το έχει το μοντέλο Smart_Charging το οποίο σε σύγκριση με τα προηγούμενα γραφήματα εδώ φαίνεται να επηρεάζεται από τον πόσο χρόνο θα έχει καθυστέρηση το EV ενώ δεν επηρεάζεται αν θα έχει πιθανότητα ή όχι να έχει καθυστέρηση για μόνο 1 slot. Κάτι άλλο που παρατηρούμε είναι ότι όσο ανεβαίνει ο χρόνος καθυστέρησης τόσο καλύτερο κόστος παρουσιάζει το μοντέλο Smart_Scheduling. Καταλαβαίνουμε δηλαδή όσο πιο λίγο χρόνο καθυστέρησης έχει το EV τόσο πιο πολύ προτιμάται το μοντέλο του Smart_Charging ενώ όσο αυξάνεται ο χρόνος καθυστέρησης προτιμάται το μοντέλο Smart_Scheduling.

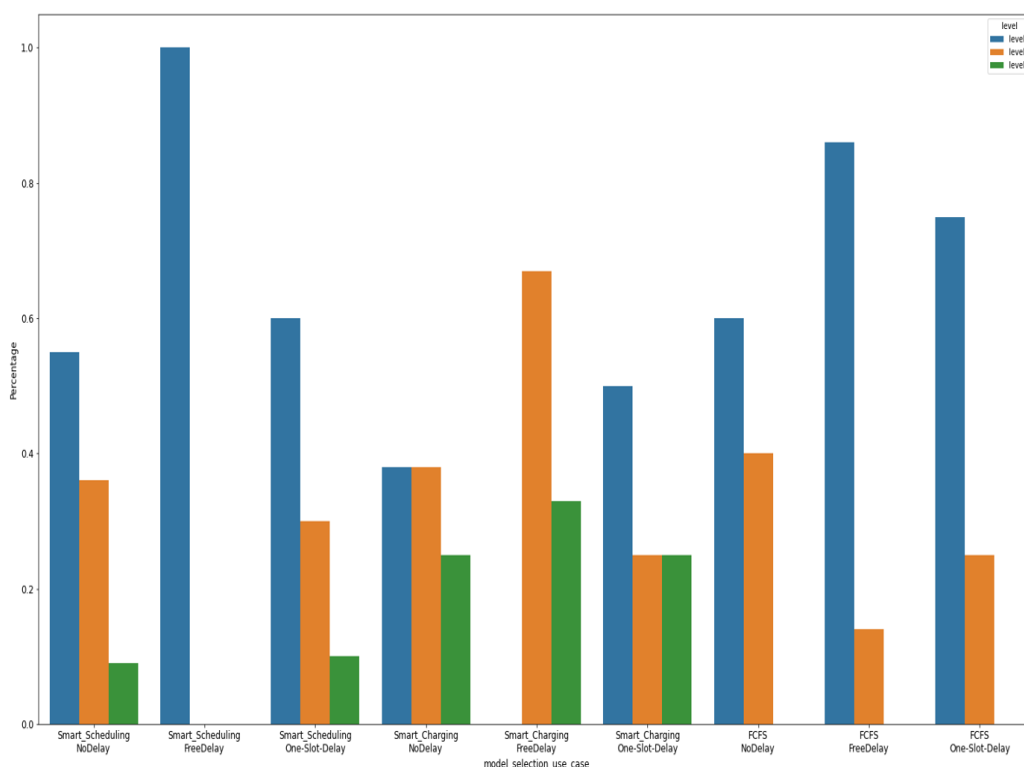
5.2.8 Εξέταση του CS ποσοστό κάθε τύπου φορτιστών για Model_Selection και Use_case.

Σε αυτή την περίπτωση εξετάζουμε τι ποσοστό από κάθε τύπο φορτιστή εγκαθίστανται ανάλογα με τα μοντέλα ελέγχου φόρτισης για κάθε περίπτωση καθυστέρησης. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω Πίνακα 12.

model_selection_use_case	percentage	level
Smart_Scheduling_NoDelay	0.55	level1

Smart_Scheduling_NoDelay	0.36	level2
Smart_Scheduling_NoDelay	0.09	level3
Smart_Scheduling_FreeDelay	1.0	level1
Smart_Scheduling_FreeDelay	0.0	level2
Smart_Scheduling_FreeDelay	0.0	level3
Smart_Scheduling_One-Slot-Delay	0.6	level1
Smart_Scheduling_One-Slot-Delay	0.3	level2
Smart_Scheduling_One-Slot-Delay	0.1	level3
Smart_Charging_NoDelay	0.38	level1
Smart_Charging_NoDelay	0.38	level2
Smart_Charging_NoDelay	0.25	level3
Smart_Charging_FreeDelay	0.0	level1
Smart_Charging_FreeDelay	0.67	level2
Smart_Charging_FreeDelay	0.33	level3
Smart_Charging_One-Slot-Delay	0.5	level1
Smart_Charging_One-Slot-Delay	0.25	level2
Smart_Charging_One-Slot-Delay	0.25	level3
FCFS_NoDelay	0.6	level1
FCFS_NoDelay	0.4	level2
FCFS_NoDelay	0.0	level3
FCFS_FreeDelay	0.86	level1
FCFS_FreeDelay	0.14	level2
FCFS_FreeDelay	0.0	level3
FCFS_One-Slot-Delay	0.75	level1
FCFS_One-Slot-Delay	0.25	level2
FCFS_One-Slot-Delay	0.0	level3

Πίνακας 11: Ποσοστό φορτιστών σε όλα τα μοντέλα φόρτισης.



Εικόνα 33: Ποσοστό εγκαταστημένων φορτιστών κάθε τύπου για κάθε μοντέλο ελέγχου φόρτισης και κάθε περίπτωση καθυστέρησης.

Από το γράφημα παρατηρούμε το ποσοστό κάθε τύπου φορτιστή που εγκαταστάθηκε για κάθε μοντέλο και κάθε περίπτωση. Τα σημεία που μας κάνουν εντύπωση είναι στο μοντέλο Smart_Scheduling και περίπτωση FreeDelay έχουν εγκατασταθεί εξολοκλήρου φορτιστές τύπου 1. Σε αντίθετη περίπτωση στο μοντέλο Smart_Charging και περίπτωση One-Slot-Delay δεν έχουμε καθόλου φορτιστές τύπου 1 αλλά μόνο τύπου 2 και 3. Μία μέση κατάσταση επικρατεί στον μοντέλο Smart_Charging και περίπτωση NoDelay όπου βλέπουμε να έχουμε και τους τρεις τύπους φορτιστών. Μια ακόμα παρατήρηση είναι ότι στο μοντέλο FCFS δεν έχουμε καθόλου φορτιστές τύπου 3 για όλες τις περιπτώσεις.

Κεφάλαιο 6

Συμπεράσματα και προτάσεις

6 Συμπεράσματα και προτάσεις

Σε αυτή την διπλωματική εξετάστηκε η μελέτη εγκατάσταση ενός σταθμού φορτιστών CS ηλεκτρικών οχημάτων. Για αυτή την μελέτη χρειάστηκε να λάβουμε

υπόψιν τα τρία μοντέλα φόρτισης όπως παρουσιάστηκαν στις παραπάνω ενότητες. Από την εξέταση των παραπάνω περιπτώσεων καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι μπορεί να υπάρξει μια επένδυση για ένα CS αξιοποιώντας το μοντέλο Smart_Charging το οποίο είναι ικανό να καλύψει σε χαμηλό κόστος ένα αρκετά σημαντικό αριθμό οχημάτων EVs εξυπηρετώντας τους χρήστες ανεξαρτήτως της καθυστέρησης που μπορεί να υφίστανται εγκαθιστώντας όλους τους τύπους των φορτιστών. Ωστόσο όπως είδαμε και στην πρώτη περίπτωση όσο αυξάνεται ο αριθμός οχημάτων το μοντέλο Smart_Scheduling έχει χαμηλότερο κόστος σε σχέση με τα άλλα δύο μοντέλα. Θα μπορούσαμε να επενδύσουμε σε ένα CS που θα είναι ευέλικτο σε ότι αφορά την επιλογή μοντέλου. Σίγουρα δεν μπορούμε να επενδύσουμε τόσο εύκολα στο μοντέλο First Come First Service (FCFS) μιας και δεν είναι και το πιο χρήσιμο και έξυπνο μοντέλο, παρ' όλ' αυτά ένας συνδυασμός των Smart_Charging και Smart_Scheduling θα άξιζε να εξεταστεί.

Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Η προσέγγιση αυτή δεν είναι η μοναδική που μπορεί να υιοθετηθεί για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος. Είναι δυνατόν να ληφθούν υπόψιν και άλλες παράμετροι – μεταβλητές, αλλά και δεδομένα, που με τον δικό τους τρόπο θα επηρεάσουν το πως θα χωροθετηθούν βέλτιστα οι φορτιστές για την εξυπηρέτηση ενός CS.

Μία πρώτη διαφορετική προσέγγιση είναι να εξετασθεί το πρόβλημα με νέους τύπους φορτιστών, με νέους τύπους μπαταριών EVS και με ζητούμενη φόρτιση στα όρια του 80% του capacity EVs.

Βιβλιογραφία

- [1] M. Dijk, R. Orsato και R. Kemp. “The emergence of an electric mobility trajectory”, Energy Policy, 2013.
- [2] Βουγιουκλάκης Παναγιώτης, Κοντογιώργης Μιχαήλ. “Ηλεκτρικό Αυτοκίνητο”. Πτυχιακή εργασία, Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Πειραιά Τμήμα Τεχνολογίας, 2012.
- [3] Μέτσιου Ν. Άννα. “ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΑ, ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ-ΥΙΟΘΕΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ”. Διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο Τμήμα Διαχείρισης Τεχνικών Έργων, 2018.
- [4] International Energy Agency. “Global EV Outlook”, 2020.
- [5] Aurélie Glerum, Lidija Stankovikj, Michaël Thémans, Michel Bierlaire. “Forecasting the Demand for Electric Vehicles: Accounting for Attitudes and Perceptions”, Transportation Science, 48: 4: 483-499, 2014.
- [6] Alexandros Parellis, Costis Stambolis. “Prospects for the Electric Vehicle Market in Greece and Business Opportunities”, IENE, 2018.
- [7] Y. Li, H. Guo, F. Qi, Z. Guo and M. Li, “Comparative Study of the Influence of Open Circuit Voltages Tests on State of Charge Online Estimation for Lithium-Ion Batteries”, IEEE Access, 8: 17525-17547, 2020.
- [8] Kwo-Hsiung Young, “Research in Nickel/Metal Hydride Batteries 2017”, Batteries, 4, 9, 2018.
- [9] Nitta Naoki, Wu Feixiang, Lee Jung Tae, Yushin Gleb. “Li-ion battery materials: present and future”, Materials Today, 18: 5: 252-264, 2015.
- [10] Dominic Notter, Marcel Gauch, Rolf Widmer, Patrick Wäger, Anna Stamp, Rainer Zah, HansJörg Althaus. “Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles”, Environmental Science & Technology, 44: 19: 7744-7744, 2010.
- [11] Σιγάλας Νικόλαος και Μιγγίρης Παναγιώτης. “Ηλεκτροκίνητα οχήματα και έξυπνο δίκτυο(Plug-in electric vehicles and the smart grid)”. Πτυχιακή εργασία, Πανεπιστήμιο Δυτικής Αττικής Σχολή Μηχανικών Τμήμα Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών, 2018. 100
- [12] Appleby A. “Fuel cells and hydrogen fuel”, International Journal of Hydrogen Energy, 19: 2: 175-180, 1994.

- [13] Henry Lee, Alex Clark. "Charging the Future: Challenges and Opportunities for Electric Vehicle Adoption", SSRN Electronic Journal, 2018.
- [14] IRENA, "INNOVATION OUTLOOK: SMART CHARGING FOR ELECTRIC VEHICLES", IRENA, 2019.
- [15] Morris Brenna, Federica Foidelli, Carola Leone, Michela Longo. "Electric Vehicles Charging Technology Review and Optimal Size Estimation", Journal of Electrical Engineering & Technology, 15: 6: 2539-2552, 2020
- [16] Mashhoodi, B.; van Timmeren, A.; van der Blij, N. The two and half minute walk: Fast charging of electric vehicles and the economic value of walkability. Environ. Plan. B Urban Anal. City Sci. 2019, 1–17.
- [17] Huang, K.; Kanaroglou, P.; Zhang, X. The design of electric vehicle charging network. Transp. Res. Part D Transp. Environ. 2016, 49, 1–17.
- [18] Harrison, G.; Thiel, C. An exploratory policy analysis of electric vehicle sales competition and sensitivity to infrastructure in Europe. Technol. Forecast. Soc. Chang. 2017, 114, 165-178.
- [19] Frade I, Ribeiro A, Gonçalves GA Antunes AP (2011) An optimization model for locating electric vehicle charging stations in central urban areas. Proceedings of the 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2011, Washington, DC
- [20] Sweda T, Klabjan D (2011) An agent-based decision support system for electric vehicle charging infrastructure deployment. 7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2011, Chicago
- [21] Sadeghi-Barzani, P.; Rajabi-Ghahnavieh, A.; Kazemi-Karegar, H. Optimal fast charging station placing and sizing. Appl. Energy 2014, 125, 289–299.
- [22] Hanabusa H, Horiguchi R (2011) A study of the analytical method for the location planning of charging stations for electric vehicles. LNAI 6883:596–605
- [23] Wang, Y.; Shi, J.; Wang, R.; Liu, Z.; Wang, L. Siting and sizing of fast charging stations in highway network with budget constraint. Appl. Energy 2018, 228, 1255–1271.
- [24] Wang H, Huang Q, Zhang C, Xia A (2011) A novel approach for the layout of electric vehicle charging station. IEEE
- [25] Arkin, E.M.; Carmi, P.; Katz, M.J.; Mitchell, J.S.; Segal, M. Locating battery charging stations to facilitate almost shortest paths. Discret. Appl. Math. 2019, 254, 10–16.

- [26] Sathaye N, Kelley S (2013) An approach for the optimal planning of electric vehicle infrastructure for highway corridors. *Transp Res E* 59:15–33
- [27] Feng L, Ge S, Liu H, Wang L, Feng Y (2012) The planning of charging stations of the urban trunk road. *Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT Asia), 2012 IEEE, Tianjin, 21–24 May 2012*
- [28] Bouguerra, S.; Bhar Layeb, S. Determining optimal deployment of electric vehicles charging stations: Case of Tunis City, Tunisia. *Case Stud. Transp. Policy* 2019, 7, 628–642.
- [29] Zhang, L.; Shaffer, B.; Brown, T.; Scott Samuelsen, G. The optimization of DC fast charging deployment in California. *Appl. Energy* 2015, 157, 111–122.
- [30] Worley O, Klabjan D, Sweda ATM (2012) Simultaneous vehicle routing and charging station siting for commercial electric vehicles. *IEVC 2012*
- [31] Frade, I.; Ribeiro, A.; Gonçalves, G.; Antunes, A. Optimal location of charging stations for electric vehicles in a neighborhood in Lisbon, Portugal. *Transp. Res. Rec.* 2011, 2252, 91–98.
- [32] Chen TD, Kockelmand KM, Khan M (2013) The electric vehicle charging station location problem: a parking –based assignment method for Seattle. *Proceedings of the 92nd Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2013, Washington, DC*
- [33] Awasthi, A.; Venkitusamy, K.; Padmanaban, S.; Selvamuthukumar, R.; Blaabjerg, F.; Singh, A.K. Optimal planning of electric vehicle charging station at the distribution system using hybrid optimization algorithm. *Energy* 2017, 133, 70–78.
- [34] He F, Wu D, Yin Y, Guan Y (2013) Optimal deployment of public charging stations for plug-in hybrid electric vehicles. *Transp Res B Methodol* 47:87–101
- [35] Bian, C.; Li, H.; Wallin, F.; Avelin, A.; Lin, L.; Yu, Z. Finding the optimal location for public charging stations—A GIS-based MILP approach. *Energy Procedia* 2019, 158, 6582–6588.
- [36] Xu H, Miao S, Zhang C, Shi D (2013) Optimal placement of charging infrastructures for large-scale integration of pure electric vehicles into grid. *Electr Power Energy Syst* 53:159–165
- [37] Erba,s, M.; Kabak, M.; Özceylan, E.; Çetinkaya, C. Optimal siting of electric vehicle charging stations: A GIS-based fuzzy Multi-Criteria Decision Analysis. *Energy* 2018, 163, 1017–1031.

- [38] Straka, M.; De Falco, P.; Ferruzzi, G.; Proto, D.; Van Der Poel, G.; Khormali, S.; Buzna, L. Predicting Popularity of Electric Vehicle Charging Infrastructure in Urban Context. *IEEE Access* 2020, 8, 11315–11327.
- [39] Zhang, Y.; Zhang, Q.; Farnoosh, A.; Chen, S.; Li, Y. GIS-Based Multi-Objective Particle Swarm Optimization of charging stations for electric vehicles. *Energy* 2019, 169, 844–853.
- [40] Efthymiou D, Antoniou C, Tyrinopoulos I Mitsakis E (2012) Spatial exploration of effective electric vehicle infrastructure location. In *Procedia – Social and Behavioral Sciences, Proceedings of the Transportation Research Arena, Athens* 48:765–774
- [41] Csiszár, C.; Csonka, B.; Földes, D.; Wirth, E.; Lovas, T. Urban public charging station locating method for electric vehicles based on land use approach. *J. Transp. Geogr.* 2019, 74, 173–180.
- [42] Ghamami M, Nie Y, Zockaie A (2014) Planning Plug-in electrical vehicles charging infrastructure in city centers. *Proceedings of the 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, January 2014, Washington, DC*
- [43] Namdeo, A.; Tiwary, A.; Dziurla, R. Spatial planning of public charging points using multi-dimensional analysis of early adopters of electric vehicles for a city region. *Technol. Forecast. Soc. Chang.* 2014, 89, 188–200.
- [44] Víctor-Gallardo, L.; Angulo-Paniagua, J.; Bejarano-Viachica, R.; Fuentes-Soto, D.; Ruiz, L.; Martínez-Barboza, J.; Quirós-Tortós, J. Strategic Location of EV Fast Charging Stations: The Real Case of Costa Rica. In *Proceedings of the IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Latin America, Gramado, Brazil, 15–18 September 2019.*
- [45] Heyman, F.; Pereira, C.; Miranda, V.; Soares, F.J. Spatial load forecasting of electric vehicle charging using GIS and diffusion theory. In *Proceedings of the IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Torino, Italy, 26–29 September 2017; pp. 1–6.*
- [46] Costa, E.; Vanhaverbeke, L.; Coosemans, T.; Seixas, J.; Messagie, M.; Costa, G. Optimizing The Location Of Charging Infrastructure For Future Expansion Of Electric Vehicle In Sao Paulo, Brazil. In *Proceedings of the IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Casablanca, Morocco, 14–17 October 2019; pp. 632–637.*

- [47] Huang, P.; Ma, Z.; Xiao, L.; Sun, Y. Geographic Information System-assisted optimal design of renewable powered electric vehicle charging stations in high-density cities. *Appl. Energy* 2019, 255, 113855.
- [48] Efthymiou, D.; Antoniou, C.; Tyrinopoylos, Y.; Mitsakis, E. Spatial Exploration of Effective Electric Vehicle Infrastructure Location. *Procedia Soc. Behav. Sci.* 2012, 48, 765–774.
- [49] Wu, Y.; Yang, M.; Zhang, H.; Chen, K.; Wang, Y. Optimal site selection of electric vehicle charging stations based on a cloud model and the PROMETHEE method. *Energies* 2016, 9, 157.
- [50] Zhao, H.; Li, N. Optimal siting of charging stations for electric vehicles based on fuzzy Delphi and hybrid multi-criteria decision making approaches from an extended sustainability perspective. *Energies* 2016, 9, 270.
- [51] Jarmillo JH, Bhadury J, Batta R (2002) On the use of genetic algorithms to solve location problems. *Comput Oper Res* 29:761–779
- [52] Chen N, Gardner LM, Duell M, Waller ST (2014) Evaluating location alternatives for electric vehicle re-charging infrastructure using a distance constrained equilibrium assignment model. *Proceedings of the 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board* January 2014, Washington, DC
- [53] Lee Y-G, Kim H-S, Kho S-Y, Lee C (2014) UE-based location model of rapid charging stations for EVs with batteries that have different states-of-charge. *Proceedings of the 93rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, January 2014, Washington, DC
- [54] Jung J, Chow JYJ, Jayakrishnan R, Park JY (2014) Stochastic dynamic itinerary interception refueling location problem with queue delay for electric taxi charging stations. *Transp Res C* 40:123–142
- [55] Long JIA, Zechun H, Yinghua S, Zhuowei L (2014) Optimal siting and sizing of electric vehicle charging stations. *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 I.E. international*, 4–8 March 2012, Greenville, SC
- [56] Ge S, Feng L, Liu H (2011) The planning of electric vehicle charging station based on grid partition method. *IEEE*
- [57] Li Y, Li L, Yong J, Yao Y, Li Z (2011) Layout planning of electric vehicle charging stations based on genetic algorithm. *LNEE* 99: 661–668

- [58] Dong J, Liu C, Lin Z (2014) Charging infrastructure planning for promoting battery electric vehicles: an activity-based approach using multiday travel data. *Transp Res C* 38:44-55
- [59] Motoaki, Y. Location-allocation of electric vehicle fast chargers-research and practice. *World Electr. Veh. J.* 2019, 10, 10–16.
- [60] Brugha, R.; Varvasovszky, Z. Review article Stakeholder analysis : A review. *Health Policy Plan.* 2000, 15, 239–246.
- [61] Kougias, I.; Nikitas, A.; Thiel, C.; Szabó, S. Clean energy and transport pathways for islands: A stakeholder analysis using Q method. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 2020, 78, 102180.
- [62] Wolbertus, R.; Jansen, S.; Kroesen, M. Stakeholders' perspectives on future electric vehicle charging infrastructure developments. *Futures* 2020, 123, 102610.
- [63] Costa, E.; Paiva, A.; Seixas, J.; Costa, G.; Baptista, P.; Gallachóir, B. Spatial Planning of Electric Vehicle Infrastructure for Belo Horizonte, Brazil. *J. Adv. Transp.* 2018, 2018, 8923245.
- [64] Costa, E.; Paiva, A.; Seixas, J.; Baptista, P.; Costa, G.; O Gallachoir, B. Suitable locations for electric vehicles charging infrastructure in Rio de Janeiro, Brazil. In *Proceedings of the IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Belfort, France, 11–14 December 2017.