

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Διπλωματική Εργασία



Διπλωματική Εργασία

“Προσομοίωση Σταθμού Ανταλλαγής Μπαταριών”

υπό

Μαμάη Σταύρου - Ιάκωβου

Υποβλήθηκε για τη μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για την απόκτηση του
διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού

Βόλος, 2023

© 2023 Μαμάης Σταύρος - Ιάκωβος

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας δεν συνεπάγεται αποδοχή των απόψεων του συγγραφέα. (Νόμος 5343/32, άρθρο 202, παράγραφος 2).

Εγκρίθηκε από τα Μέλη της Τριμελούς Εξεταστικής Επιτροπής:

Πρώτος εξεταστής : Δρ. Λυμπερόπουλος Γεώργιος
(επιβλέπων) Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Δεύτερος εξεταστής: Δρ. Παντελής Δημήτριος
Καθηγητής Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Τρίτος εξεταστής Δρ. Κουκούμιαλος Στυλιανός
Καθηγητής Τμήματος Διοίκησης Επιχειρήσεων
Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Ευχαριστίες

Η εργασία αυτή εκπονήθηκε στο πλαίσιο της μερικής εκπλήρωσης των απαιτήσεων για την απόκτηση διπλώματος Μηχανολόγου Μηχανικού στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας.

Αρχικά θα ήθελα να εκφράσω την ειλικρινή μου εκτίμηση στον επιβλέποντα καθηγητή μου Δρα. Λυμπερόπουλο Γεώργιο.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους Δρα. Παντελή Δημήτριο και Δρα. Κουκούμιαλο Στυλιανό για τη συμμετοχή τους στη τριμελή επιτροπή αξιολόγησης της Διπλωματικής μου Εργασίας.

Προσομοίωση Σταθμού Ανταλλαγής Μπαταριών

Περίληψη

Η ολοκληρωμένη προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων είναι ζωτικής σημασίας για τον πράσινο και χαμηλών εκπομπών άνθρακα ενεργειακό μετασχηματισμό. Ωστόσο η υιοθέτηση τους, φαίνεται σε ορισμένες περιπτώσεις να προκαλεί δυσκολίες στους οδηγούς, καθώς η χρήση σταθμών φόρτισης ως μόνη λύση φόρτισης, είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα. Οι σταθμοί εναλλαγής μπαταριών (BSS) μπορούν να αποδειχθούν αναπόσπαστο μέρος της υποδομής φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων και να προσφέρουν μια εναλλακτική λύση στο πρόβλημα του άγχους για την εμβέλεια και των μεγάλων χρόνων αναμονής για τη φόρτιση της μπαταρίας. Παρά τα πλεονεκτήματα βέβαια της ανταλλαγής μπαταριών, ο κλάδος των υπηρεσιών ανταλλαγής αντιμετωπίζει κι αυτός ορισμένα ζητήματα που καλείται να προσπεράσει, όπως είναι η τυποποίηση των μπαταριών και το πολύ υψηλό κόστος επένδυσης υποδομών λόγω της απαίτησης μεγάλου αριθμού μπαταριών στο απόθεμα. Η ανταλλαγή μπαταριών ως μέθοδος φόρτισης δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη -άλλωστε πρόκειται και για νεαρή ιδέα-, όμως υπάρχουν ορισμένα παραδείγματα εταιρειών, όπως η Gogoro, που ανέπτυξε μια πλατφόρμα ανεφοδιασμού με μπαταρίες για τα οχήματα του δικτύου της, το οποίο δίκτυο αποτελείται από αστικά ηλεκτρικά δίκυκλα, μοτοποδήλατα και μοτοσυκλέτες. Τον Απρίλιο μάλιστα του 2021, το δίκτυο της Gogoro συμπεριέλαβε ένα πρόγραμμα, μέσω του οποίου άλλοι κατασκευαστές ηλεκτρικών σκούτερ μπορούν να κατασκευάσουν σκούτερ που χρησιμοποιούν την υποδομή του δικτύου Gogoro, πραγματοποιώντας έτσι ένα πρώτο βήμα προς τη τυποποίηση μπαταριών ηλεκτρικών οχημάτων. Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης, προσομοιώθηκε ένας σταθμός ανταλλαγής μπαταριών αντίστοιχος εκείνων της Gogoro με στόχο την ελαχιστοποίηση του αποθέματος μπαταριών και του αριθμού των φορτιστών που πρέπει να διαθέτει, ώστε να ανταποκρίνεται πάντα στη ζήτηση των οδηγών. Για τη δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης του ARENA.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Ευχαριστίες	4
Περίληψη	5
Συνοπτομογραφίες.....	9
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	10
1.1 Κίνητρο	10
1.2 Στόχος	10
1.3 Διάρθρωση Εργασίας	10
2 ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ	11
2.1 Περιγραφή Σταθμού Ανταλλαγής Μπαταριών	11
2.1.1 Ιστορική Αναδρομή	12
2.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ανταλλαγής Μπαταριών	13
2.1.3 Σύγκριση Σταθμού Ανταλλαγής-Σταθμού Φόρτισης.....	15
2.1.4 Στόχοι Σταθμού Ανταλλαγής	17
2.2 GOGORO.....	21
2.2.1 Περιγραφή Εταιρείας	21
2.2.2 Περιγραφή Δικτύου.....	22
2.2.3 Gogoro στη Ταιβάν.....	24
3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ.....	24
3.1 Στόχοι Βελτιστοποίησης Σταθμών Ανταλλαγής	24
3.2 Περιγραφή Μοντέλου	26
3.3 Χρήση Λογισμικού Προσομοίωσης ARENA.....	26
3.4 Περιγραφή της εντός του σταθμού διαδρομή μιας μπαταρίας	28
4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	29
4.1 Βέλτιστη λύση Κανονικού Προβλήματος $(\Phi^*, N^*) = (\Phi(N_{min}), N_{min})$	29
4.2 Ελαχιστοποίηση Αριθμού Φορτιστών $(\Phi_{min}, N(\Phi_{min}))$	32
4.3 Ενδιάμεσες Τιμές.....	33
4.4 Βέλτιστη Λύση Σταθερής Κατανομής (N^*c, Ψ^*c).....	34
4.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων.....	37
5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	38
6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	39

ΠΙΝΑΚΕΣ

Πίνακας 4.1 ‘Φορτιστές – ελάχιστα αποθεματικά μπαταριών’	37
Πίνακας 4.2 Οι επί τοις 100 αυξήσεις και μειώσεις αναφέρονται στον αριθμό των απαιτούμενων μπαταριών στο απόθεμα (N).....	38

ΕΙΚΟΝΕΣ

Εικόνα 2.1. Παραπάνω απεικονίζεται ένας τυπικός σταθμός ανταλλαγής μπαταριών της NIO [9].	13
Εικόνα 2.2 Φόρτιση (αριστερά) – Ανταλλαγή (δεξιά) [20].	16
Εικόνα 2.3 Μοντέλο σταθμού ανταλλαγής με χρήση ΑΠΕ.	21
Εικόνα 2.4 GoStation και scooter της Gogoro [28].	22
Εικόνα 2.5 Οχήματα της σειράς scooter “Gogoro 2 Plus” [31].	23
Εικόνα 2.6 Απεικόνιση του ζεύγους μπαταριών του δικτύου της Gogoro [33].	23
Εικόνα 2.7 Ένας τυπικός Super GoStation της Gogoro στη Ταϊβάν [37].	25
Εικόνα 4.1 Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος του μοντέλου κανονικής ζήτησης ύστερα από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Απεικονίζεται η προσομοίωση που ελαχιστοποιεί το απόθεμα των μπαταριών.	30
Εικόνα 4.2 Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος του μοντέλου κανονικής ζήτησης ύστερα από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Απεικονίζεται η προσομοίωση που ελαχιστοποιεί το απόθεμα των φορτιστών.	33
Εικόνα 4.3 Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος του μοντέλου, στο οποίο απεικονίζεται η βέλτιστη λύση για σταθερή ζήτηση, ύστερα από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.	34
Εικόνα 4.4 Το παραπάνω γράφημα απεικονίζει τις ελάχιστες ανάγκες του σταθμού σε μπαταρίες-φορτιστές, ώστε να λειτουργούν τα μοντέλα για διάστημα 100 ημερών, δεχόμενα 100 αφίξεις/ημέρα. Με μπλε χρώμα σημειώνεται η βέλτιστη λύση του μοντέλου κανονικής ζήτησης, ενώ με κίτρινο χρώμα αυτή της σταθερής.	37

Συντομογραφίες

EV	Ηλεκτρικό Όχημα
BSS	Σταθμός Ανταλλαγής Μπαταριών
N	Αριθμός Μπαταριών Στο Απόθεμα Του Σταθμού Ανταλλαγής Μπαταριών
Φ	Αριθμός Φορτιστών Σταθμού Ανταλλαγής Μπαταριών
N*	Βέλτιστος Αριθμός Μπαταριών Για Το Μοντέλο Κανονικού Προφίλ Αφίξεων
Φ*	Βέλτιστος Αριθμός Φορτιστών Για Το Μοντέλο Κανονικού Προφίλ Αφίξεων
Nc	Αριθμός Μπαταριών Για Το Μοντέλο Σταθερού Προφίλ Αφίξεων
Ψc	Αριθμός Φορτιστών Για Το Μοντέλο Σταθερού Προφίλ Αφίξεων
Nc*	Βέλτιστος Αριθμός Μπαταριών Για Το Μοντέλο Σταθερού Προφίλ Αφίξεων
Ψc*	Βέλτιστος Αριθμός Φορτιστών Για Το Μοντέλο Σταθερού Προφίλ Αφίξεων
N'	Αριθμός Των Αναμενόμενων Αντικαταστάσεων Μπαταριών, λαμβάνοντας υπόψη τη διάρκεια ζωής και τον αριθμό των ανταλλαγών που συνέβησαν στο σταθμό κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κίνητρο

Τα EV παράγουν μηδενικές εκπομπές στην εξάτμιση, που σημαίνει ότι δεν απελευθερώνουν ρύπους όπως διοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου και σωματίδια στον αέρα. Με τη μετάβαση από τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ICEV) στα ηλεκτρικά οχήματα, μπορούμε να μειώσουμε σημαντικά την ατμοσφαιρική ρύπανση και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.

Το θέμα της ηλεκτροκίνησης των μεταφορών συζητείται λόγω της πιθανότητας εξάντλησης των συμβατικών πόρων στο εγγύς μέλλον και των περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκαλούνται από τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

Ο τομέας των μεταφορών συμβάλλει σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθώς αντιπροσωπεύει περίπου το ένα τέταρτο των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ και οι οδικές μεταφορές ευθύνονται για τα τρία τέταρτα των εκπομπών των μεταφορών. Συνεπώς, για την επίτευξη των κλιματικών στόχων, ο τομέας των επίγειων μεταφορών σε ολόκληρο τον κόσμο πρέπει οπωσδήποτε να απαλλαγεί από τον άνθρακα. Ο εξηλεκτρισμός θεωρείται σημαντική οδός προς τη βιωσιμότητα. Όσον αφορά την ηλεκτρική κινητικότητα, η μεγαλύτερη προσοχή έχει δοθεί στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Ωστόσο, μεγάλες δυνατότητες μετριασμού των εκπομπών θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν μέσω της ευρείας κλίμακας εισαγωγής ηλεκτρικών δικυκλών - ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές.

Μεταβαίνοντας στην ηλεκτροκίνηση που τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μπορούμε να μειώσουμε τις εκπομπές άνθρακα και να εργαστούμε για την επίτευξη στόχων μετριασμού της κλιματικής αλλαγής.

1.2 Στόχος

Η διάρκεια του χρόνου φόρτισης της μπαταρίας είναι ένα από τα κύρια εμπόδια για την μεγάλης κλίμακας ανάπτυξη της ηλεκτροκίνησης, καθώς και το άγχος για την εμπέλεια. Οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών ίσως αποτελούν λύση στα εν λόγω ζητήματα, αφού οι πελάτες των σταθμών μπορούν να αντικαταστήσουν τις εξαντλημένες μπαταρίες με πλήρως φορτισμένες εντός μερικών λεπτών ή ακόμα και δευτερολέπτων και να συνεχίσουν το ταξίδι τους.

Εκτός από τους πελάτες του σταθμού, ο σταθμός ανταλλαγής μπαταριών μπορεί να φανεί επωφέλης για το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας, διότι θα μπορούσε να αξιοποιηθεί ως αποθήκη ενέργειας στις ώρες που έχει χαμηλή κινητικότητα το δίκτυο ανταλλαγής.

1.3 Διάρθρωση Εργασίας

Η διπλωματική μου εργασία αποτελείται από 5 κεφάλαια.

Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζεται η ιδέα της ανταλλαγής μπαταριών, παρατίθενται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά της ως μέθοδος φόρτισης και έπειτα -στο ίδιο πλαίσιο- συγκρίνεται με τους σταθμούς φόρτισης, οι οποίοι αποτελούν σήμερα την επικρατέστερη μέθοδο φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων. Στη συνέχεια αναπτύσσονται οι στόχοι που πρέπει να επιτύχει ένα δίκτυο σταθμών ώστε να είναι λειτουργικό. Τέλος, γίνεται αναφορά στο δίκτυο σταθμών ανταλλαγής μπαταριών scooter της Gogoro, της οποίας εταιρείας το δίκτυο στη Ταιβάν αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα του κόσμου.

Στο κεφάλαιο 3 εξετάζεται ένα μοντέλο σταθμού ανταλλαγής μπαταριών και ορίζονται τα δεδομένα και οι περιορισμοί της βελτιστοποίησης του αριθμού φορτιστών και

μπαταριών στο απόθεμά του. Για τη δημιουργία του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης του ARENA.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται και συγκρίνονται τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του σταθμού ανταλλαγής μπαταριών.

Τέλος, στο κεφάλαιο 5 αναπτύσσονται τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

2 ΑΝΤΑΛΛΑΓΗ ΜΠΑΤΑΡΙΩΝ

2.1 Περιγραφή Σταθμού Ανταλλαγής Μπαταριών

Οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών είναι εγκαταστάσεις όπου οι ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων (EV) μπορούν να ανταλλάσσουν τις εξαντλημένες μπαταρίες με πλήρως φορτισμένες. Αντί να περιμένουν το όχημά τους να επαναφορτιστεί, οι οδηγοί μπορούν απλώς να ανταλλάξουν την μπαταρία τους με μια φορτισμένη και να συνεχίσουν το ταξίδι τους.

Τεχνικές ανταλλαγής μπαταριών

Η ανταλλαγή μπαταριών μπορεί να γίνει χειροκίνητα, ή αυτόματα, με τη χρήση ρομποτικών συστημάτων, ενώ μπορεί να διαρκέσει από μόλις λίγα δευτερόλεπτα, μέχρι κάποια λεπτά.

Υπάρχουν τέσσερις τυποποιημένες τεχνικές από την άποψη του μηχανικού συστήματος, δηλαδή εναλλαγή από πάνω, εναλλαγή από κάτω, πλευρική εναλλαγή και πίσθια εναλλαγή.

Η εναλλαγή BSS έχει δύο τύπους μεθόδων που είναι αποσυρόμενου τύπου και τύπου πλαισίου. Στον αποσυρόμενο τύπο, η φόρτωση-εκφόρτωση της μπαταρίας επιτυγχάνεται από το πλευρικό ή το πίσω μέρος του οχήματος, ενώ στον τύπο πλαισίου επιτυγχάνεται από το πάνω ή το κάτω μέρος του οχήματος. Η επιλογή της τεχνικής καθορίζεται από την τοποθέτηση της συστοιχίας μπαταριών στο όχημα από τον κατασκευαστή του EV [1].

Συγκρίνοντας τους τύπους εναλλαγής, η αποσυρόμενου τύπου έχει το πλεονέκτημα ότι δεν απαιτείται πολύπλοκος εξοπλισμός για τη τοποθέτηση του οχήματος σε κάποιο μηχανισμό ανύψωσης. Ωστόσο, αυτό το μειονέκτημα του πολύπλοκου μηχανισμού σχεδιασμού για την εισαγωγή της μπαταρίας από την πλευρά του EV. Στον τύπο πλαισίου, η εναλλαγή από πάνω είναι κατάλληλη για λεωφορεία μόνο επειδή τα άλλα οχήματα δεν είναι παραδοσιακά σχεδιασμένα ούτε κατάλληλα για την τοποθέτηση μπαταριών μεγάλου βάρους στην κορυφή. Εναλλαγή από κάτω χρησιμοποιείται συχνότερα στα BSS.[2]

Η ανταλλαγή μπαταριών έχει προταθεί ως λύση για την περιορισμένη εμβέλεια οδήγησης των ηλεκτροκίνητων οχημάτων και τον χρόνο που απαιτείται για την επαναφόρτιση των μπαταριών τους. Με την παροχή ενός γρήγορου και βολικού τρόπου αντικατάστασης των μπαταριών, οι οδηγοί EV μπορούν να συνεχίσουν τις διαδρομές τους χωρίς την ανάγκη μιας μακράς στάσης φόρτισης.

Οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών υπάρχουν εδώ και αρκετά χρόνια και χρησιμοποιούνται κυρίως σε ηλεκτρικούς στόλους, όπως αυτοί που χρησιμοποιούνται για τις δημόσιες μεταφορές ή τις υπηρεσίες κοινής χρήσης.

Ένα πλεονέκτημα της ανταλλαγής μπαταριών είναι ότι μπορεί να συμβάλει στη μείωση του μεγέθους και του κόστους των μπαταριών EV. Δεδομένου ότι οι μπαταρίες EV είναι ακριβές και βαριές, η μείωση του μεγέθους τους μπορεί να μειώσει το κόστος και το βάρος του οχήματος, γεγονός που μπορεί να αυξήσει την αποδοτικότητα και τις επιδόσεις του.

Ωστόσο, δεδομένου ότι οι μπαταρίες των EV είναι ακριβές στην παραγωγή, μπορεί να είναι δύσκολο για τους σταθμούς ανταλλαγής μπαταριών να αποθηκεύουν αρκετές μπαταρίες για να καλύψουν τη ζήτηση όλων των οδηγών EV, ενώ μια άλλη εξίσου σοβαρή πρόκληση που θα καταστήσει τους σταθμούς ανταλλαγής βιώσιμη λύση, είναι η ανάγκη για τυποποίηση των μπαταριών, ώστε κάθε ηλεκτρικό όχημα να μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιονδήποτε σταθμό ανταλλαγής. Αυτό απαιτεί συντονισμό και συνεργασία μεταξύ των κατασκευαστών ηλεκτρικών οχημάτων για να συμφωνήσουν σε ένα κοινό πρότυπο μπαταριών.[2]

2.1.1 Ιστορική Αναδρομή

Η ιδέα μιας υπηρεσίας ανταλλαγής μπαταριών προτάθηκε ήδη από το 1896 και προσφέρθηκε για πρώτη φορά μεταξύ 1910 και 1924, από την Hartford Electric Light Company, μέσω της υπηρεσίας μπαταριών GeVeCo, που εξυπηρετούσε ηλεκτρικά φορτηγά. Οι ιδιοκτήτες αγόραζαν τα οχήματα χωρίς μπαταρία, από την General Vehicle Company (GeVeCo), που ανήκε εν μέρει στην General Electric [3]. Η ενέργεια αγοράστηκε από την Hartford Electric με τη μορφή μιας ανταλλασσόμενης μπαταρίας. Τόσο τα οχήματα όσο και οι μπαταρίες είχαν σχεδιαστεί για να διευκολύνουν τη γρήγορη ανταλλαγή. Οι ιδιοκτήτες πλήρωναν μια μεταβλητή χρέωση ανά μίλι και μια μηνιαία χρέωση υπηρεσιών για την κάλυψη της συντήρησης και της αποθήκευσης του φορτηγού. Τα οχήματα αυτά κάλυψαν περισσότερα από 6 εκατομμύρια μίλια.

Άλλο ένα αξιοσημείωτο πρότυπο παράδειγμα αποτελεί το EV1. Πρόκειται για ένα ηλεκτρικό όχημα που παρήγαγε η General Motors στα τέλη της δεκαετίας του 1990. Το EV1 χρησιμοποίησε ένα σύστημα ανταλλαγής μπαταριών σε περιορισμένα πιλοτικά προγράμματα σε επιλεγμένες περιοχές.

Το 1993, η Suntera ανέπτυξε ένα διαθέσιμο τρίτροχο ηλεκτρικό όχημα με την ονομασία SUNRAY, το οποίο διέθετε μια κασέτα-μπαταρία που άλλαζε μέσα σε λίγα λεπτά σε έναν σταθμό ανταλλαγής μπαταριών [4]. Το 1995, η Suntera πρόσθεσε ένα σκούτερ με κινητήρα[12]. Η εταιρεία μετονομάστηκε αργότερα σε Personal Electric Transports (P.E.T.). Το 2004, το τρίτροχο ηλεκτρικό όχημα της εταιρείας κέρδισε την 1η θέση στον 5ήμερο αμερικανικό αγώνα ηλεκτρικών οχημάτων Tour de Sol [5], πριν κλείσει το 2006.

Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες πρωτοβουλίες που επικεντρώθηκαν στην ανταλλαγή μπαταριών ήταν το Project Better Place, το οποίο δημιουργήθηκε από τον επιχειρηματία Shai Agassi το 2007. Το Project Better Place αποσκοπούσε στη δημιουργία ενός δικτύου σταθμών ανταλλαγής μπαταριών για την υποστήριξη της ευρείας υιοθέτησης των ηλεκτρικών οχημάτων. Η εταιρεία πραγματοποίησε δοκιμές και υλοποίησε υποδομές σε χώρες όπως το Ισραήλ και η Δανία. Ωστόσο, αντιμετώπισε προκλήσεις σχετικά με το υψηλό κόστος των υποδομών, την τυποποίηση και την περιορισμένη συμβατότητα των οχημάτων, με αποτέλεσμα να κλείσει τον Μάιο του 2013 [6] [7].

Το 2013, η Tesla Motors, παρουσίασε μια επίδειξη ανταλλαγής μπαταριών για το σεντάν Model S. Η επίδειξη ανέδειξε τις δυνατότητες της ανταλλαγής μπαταριών ως εναλλακτική λύση γρήγορης φόρτισης για ταξίδια μεγάλων αποστάσεων. Ωστόσο, η

Tesla δεν επιδίωξε την ευρεία εφαρμογή σταθμών ανταλλαγής μπαταριών και αντ' αυτού επικεντρώθηκε στην επέκταση του δικτύου σταθμών ταχείας φόρτισης Supercharger.

Η NIO έχει διαγράψει αξιοσημείωτη πρόοδο στην ανάπτυξη της τεχνολογίας ανταλλαγής μπαταριών, αφού κατάφερε να εισάγει την ιδέα της ανταλλαγής στη Κινεζική αγορά και μέχρι τις αρχές του 2022, είχε κατασκευάσει περισσότερους από 850 σταθμούς ανταλλαγής στην Κίνα [8].



Εικόνα 2.1. Παραπάνω απεικονίζεται ένας τυπικός σταθμός ανταλλαγής μπαταριών της NIO [9].

Η Gogoro έχει καταφέρει άλλη μια σπουδαία εφαρμογή της ανταλλαγής μπαταριών στην Ταϊβάν, καθώς το δίκτυό της αποτελείται πλέον από περισσότερους από 375.000 αναβάτες και 2.000 σταθμούς ανταλλαγής μπαταριών, οι οποίοι διαχειρίζονται 265.000 ανταλλαγές την ημέρα [10],[11].

Ορισμένα μικρότερα συστήματα έχουν προσπαθήσει να διαδώσουν την ανταλλαγή μπαταριών σε μεμονωμένες πόλεις. Η Zotye Auto κατασκεύασε 15 EV για έναν στόλο ταξί στην πόλη Hangzhou της Κίνας. Το 2011, ένα από αυτά τα οχήματα κάηκε, αφού έπιασε φωτιά η μπαταρία του. Μια έρευνα αργότερα διαπίστωσε ότι η εν λόγω μπαταρία, καθώς και τα ηλεκτρονικά στοιχεία σύνδεσης στο φορτηγό, είχαν φθαρεί από την επανειλημμένη φόρτωση και εκφόρτωση των πακέτων μπαταριών. Το ηλεκτρικό πρόγραμμα σταμάτησε μετά το περιστατικό [12].

Άλλοι πάροχοι υπηρεσιών ανταλλαγής μπαταριών περιλαμβάνουν τις Delta Electronics, BattSwap, Voltia και Swap & Go [13],[14].

2.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα Ανταλλαγής Μπαταριών

Πλεονεκτήματα:

Η ανταλλαγή μπαταριών μειώνει κατά πολύ τον χρόνο διακοπής λειτουργίας που συνδέεται με τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Αντί να περιμένουν ώρες για την επαναφόρτιση ενός οχήματος, οι οδηγοί μπορούν απλώς να ανταλλάξουν την

εξαντλημένη μπαταρία τους με μια πλήρως φορτισμένη και να συνεχίσουν το ταξίδι τους, γεγονός που επεκτείνει την αυτονομία των EV. Η ηλεκτροκίνηση λοιπόν, μπορεί να είναι πλέον βολική για τους οδηγούς που διανύουν μεγάλες αποστάσεις ή που κάνουν επαγγελματική χρήση στα οχήματά τους. Κατά συνέπεια, αυξάνεται και το μερίδιο αγοράς των ηλεκτρικών οχημάτων, αφού καθίστανται πιο πρακτικά.

Από την άλλη πλευρά, η ανταλλαγή μπορεί να μειώσει το μέγεθος και το κόστος των μπαταριών των EV. Δεδομένου ότι οι σταθμοί ανταλλαγής μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επέκταση της εμβέλειας οδήγησης των ηλεκτροκίνητων οχημάτων, το μέγεθος της μπαταρίας μπορεί να μειωθεί, γεγονός που μπορεί να μειώσει το κόστος και το βάρος του οχήματος και να αυξήσει την αποδοτικότητα και τις επιδόσεις του.

Οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών μπορούν να προσφέρουν ευελιξία όσον αφορά τα μοντέλα πληρωμών, όπως πληρωμή ανά χρήση, συνδρομή κλπ, τα οποία μπορούν να προσαρμοστούν στις ανάγκες μεμονωμένων οδηγών ή διαχειριστών στόλου.

Ενδεχομένως, οι σταθμοί ανταλλαγής μπορούν να μειώσουν την ανάγκη για μεγάλες και δαπανηρές υποδομές φόρτισης EV, όπως σταθμούς φόρτισης υψηλής χωρητικότητας ή δημόσια δίκτυα φόρτισης.

Επιπλέον, η μέθοδος της ανταλλαγής μπαταριών μπορεί να μειώσει το αποτύπωμα άνθρακα των ηλεκτρικών οχημάτων και να υποστηρίξει την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο δίκτυο. Τέλος, τα BSS μπορούν να λειτουργήσουν ως μονάδες αποθήκευσης ενέργειας, επιτρέποντας στην υπερβολική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές να αποθηκεύεται στις μπαταρίες του αποθέματος τους.

Μειονεκτήματα:

Η δημιουργία σταθμών ανταλλαγής μπαταριών μπορεί να είναι δαπανηρή και απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές, εξοπλισμό και προσωπικό, ενώ άλλος ένας παράγοντας που θα αύξανε πολύ το κόστος και τη δυσκολία καθιέρωσης της ιδέας των σταθμών ανταλλαγής, αποτελεί η ανάγκη τυποποίησης των μπαταριών, η οποία κρίνεται απαραίτητη ώστε να μπορεί οποιοδήποτε EV να χρησιμοποιεί οποιονδήποτε σταθμό ανταλλαγής μπαταριών. Το γεγονός αυτό απαιτεί συντονισμό και συνεργασία μεταξύ των κατασκευαστών EV για να συμφωνήσουν σε ένα κοινό πρότυπο μπαταριών.

Στη περίπτωση που επιτύχει η τυποποίηση των μπαταριών, θα προκύψει μια επιπλέον δυσκολία που αφορά τους ήδη κατόχους EV, των οποίων τα οχήματα -μη όντας συμβατά με τη τυποποιημένη μπαταρία- ή θα αποσυρθούν ή θα μετατραπούν ώστε να ενταχθούν κι αυτά στο δίκτυο.

Οι μπαταρίες των EV είναι ακριβές στην παραγωγή και η λειτουργία των σταθμών ανταλλαγής μπαταριών προϋποθέτει την ύπαρξη αρκετών μπαταριών στο απόθεμα των σταθμών λόγω της αβεβαιότητας της ζήτησης, προκειμένου να εξυπηρετηθούν όλοι οι οδηγοί EV.

Η ανταλλαγή μπαταριών μπορεί να μην είναι πρακτική για όλους τους τύπους EV ή για όλους τους τύπους οδηγών. Μέχρι στιγμής την έχουμε δει να λειτουργεί μόνο σε πολυπληθείς πόλεις και κυρίως από στόλους επιχειρήσεων.

Η κακή διαχείριση του δικτύου μπορεί ενδεχομένως να επιταχύνει την υποβάθμιση των μπαταριών, με συνέπεια τη μείωση της διάρκειας ζωής των μπαταριών και την αύξηση του κόστους αντικατάστασης,

Οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών ίσως αποτελέσουν στόχο κλοπών ή δολιοφθορών λόγω της υψηλής συγκέντρωσης τους σε πολύτιμες μπαταρίες, αλλά και για τον υπόλοιπο εξοπλισμό.

Η ανταλλαγή μπαταριών μπορεί ενδεχομένως να ενέχει κινδύνους για την ασφάλεια λόγω της υψηλής τάσης και της ενέργειας που αποθηκεύεται στις μπαταρίες, οι οποίες απαιτούν καλό σχεδιασμό, προσεκτικό χειρισμό και συχνή συντήρηση.

Οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών μπορεί είναι εξαιρετικά πολύπλοκοι σαν συστήματα και προϋποθέτουν άριστη σχεδίαση, διαχείριση και συντήρηση, ώστε να διασφαλίζεται η ασφαλής και αποτελεσματική λειτουργία τους. Η στρατηγική που ακολουθείται για τη διαχείριση των συστημάτων σταθμών ανταλλαγής πρέπει να είναι ευέλικτη ανάλογα με τις ανάγκες κινητικότητας των χρηστών, τη συμπεριφορά των οδηγών και της χωρητικότητας της μπαταρίας [15],[16], να προβλέπει τη μελλοντική ζήτηση μπαταριών ανά σταθμό του συστήματος και να λαμβάνει αποφάσεις που αφορούν τον αριθμό των μπαταριών του αποθέματος και της συχνότητας της συντήρησης των σταθμών.

Λόγω λοιπόν της πολυπλοκότητας των συστημάτων και του υψηλού κόστους επένδυσης σε BSS (κόστος μπαταριών αποθέματος, κόστος εγκατάστασης σταθμών κ.ό.κ.), μια ανταλλαγή μπαταρίας κοστίζει σήμερα περισσότερο από μια αντίστοιχη φόρτιση σε σταθμό φόρτισης. Η ανταλλαγή μπαταριών βέβαια είναι μια νέα ιδέα, με μικρή εφαρμογή που ακόμα εξελίσσεται, οπότε αναμένεται το κόστος της να μειωθεί σημαντικά με τη πάροδο του χρόνου και τη συνεχή ωρίμανση της ιδέας των εναλλασόμενων μπαταριών.

2.1.3 Σύγκριση Σταθμού Ανταλλαγής-Σταθμού Φόρτισης

Οι σταθμοί φόρτισης χρειάζονται περισσότερο χρόνο για να φορτίσουν μια μπαταρία EV σε σύγκριση με τους σταθμούς ανταλλαγής μπαταριών, οι οποίοι μπορούν να ανταλλάξουν μια εξαντλημένη μπαταρία με μια πλήρως φορτισμένη μέσα σε λίγα λεπτά ή ακόμα και δευτερόλεπτα. Ωστόσο, αναπτύσσονται νεότερες τεχνολογίες ταχείας φόρτισης που μπορούν να μειώσουν σημαντικά τους χρόνους φόρτισης.

Οι σταθμοί φόρτισης χρειάζονται λιγότερες υποδομές από τους σταθμούς ανταλλαγής μπαταριών. Οι σταθμοί φόρτισης απαιτούν συνήθως μια πηγή ενέργειας, εξοπλισμό και θέσεις φόρτισης, ενώ οι σταθμοί ανταλλαγής απαιτούν πρόσθετο εξοπλισμό για τις μπαταρίες του αποθέματος, τη μεταφορά και τη συντήρηση τους. Αναλόγως κινούνται και τα κόστη, αφού σε σύγκριση με τους σταθμούς φόρτισης, το κόστος επένδυσης και κατασκευής των BSS είναι πολύ υψηλότερο λόγω του μεγάλου αριθμού μπαταριών αποθέματος ή του ογκώδους χώρου κατασκευής (κυρίως για τη περίπτωση μπαταριών μεγάλων οχημάτων) [17]. Είναι λογικό λοιπόν, το κόστος ενοικίασης των μπαταριών από τα BSS να είναι ακριβότερο από το κόστος φόρτισης στους σταθμούς φόρτισης [18],[19]. Επιπλέον, οι σταθμοί ανταλλαγής απαιτούν περισσότερη συντήρηση από τους σταθμούς φόρτισης, καθώς οι μπαταρίες πρέπει να επιθεωρούνται, να ελέγχονται και να αντικαθίστανται περιοδικά. Από την άλλη, οι σταθμοί φόρτισης μπορεί να χρειάζονται περιστασιακές επισκευές ή αναβαθμίσεις.

Οι σταθμοί φόρτισης είναι ευρύτερα διαθέσιμοι από τους σταθμούς ανταλλαγής μπαταριών, οι οποίοι απαιτούν μεγαλύτερη επένδυση σε υποδομές και εξοπλισμό.

Ωστόσο, οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών μπορεί να είναι πιο επεκτάσιμοι και ευέλικτοι όσον αφορά τη θέση και τη διαθεσιμότητά τους.



Εικόνα 2.2 Φόρτιση (αριστερά) – Ανταλλαγή (δεξιά) [20].

Οι σταθμοί φόρτισης είναι ευρύτερα διαδεδομένοι στις μέρες μας, καθώς είναι συμβατοί με τους περισσότερους τύπους και μάρκες ηλεκτροκίνητων οχημάτων. Από την άλλη, οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών λειτουργούν για συγκεκριμένους τύπους, γεγονός που τους καθιστά πιο δύσχρηστους. Μια από τις μεγαλύτερες προκλήσεις λοιπόν για την υιοθέτηση του συστήματος ανταλλαγής, αποτελεί η τυποποίηση όλων των μπαταριών EV, ώστε κάθε ηλεκτρικό όχημα να μπορεί να χρησιμοποιήσει οποιονδήποτε σταθμό ανταλλαγής μπαταριών. Αυτό προϋποθέτει συντονισμό και συνεργασία μεταξύ των κατασκευαστών ηλεκτρικών οχημάτων και τη συμφωνία τους σε κάποιο κοινό πρότυπο μπαταριών. Κάτι τέτοιο βέβαια φαντάζει απίθανο να συμβεί ή τουλάχιστον είναι αρκετά μακρινό.

Από την άλλη πλευρά βέβαια, η ανταλλαγή μπαταριών μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερη ευκολία στους οδηγούς, καθώς εξαλείφει την ανάγκη αναμονής για τη φόρτιση μιας μπαταρίας. Επιπλέον η ανταλλαγή φαίνεται να δίνει τη λύση στα μακρινά ταξίδια με EV, καθώς η διακοπή του ταξιδιού για τη φόρτιση του οχήματος καθιστά τα EV ασύμφορα για μεγάλες μετακινήσεις.

Επιπλέον, η πιο αργή φόρτιση στους σταθμούς ανταλλαγής μπορεί να συμβάλει στη μείωση της υποβάθμισης της μπαταρίας η οποία δείχνει να αυξάνεται με τη χρήση ταχυφορτιστών στους σταθμούς φόρτισης.

Τέλος, όσον αφορά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, η ανταλλαγή μπαταριών μπορεί να έχει μικρότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τη φόρτιση, καθώς μπορεί να μειώσει τον χρόνο που τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ξοδεύουν για φόρτιση και να αποφύγει την ανάγκη για υποδομές φόρτισης υψηλής ταχύτητας. Από την άλλη πλευρά βέβαια, οι σταθμοί ανταλλαγής απαιτούν πρόσθετο εξοπλισμό και υποδομές, γεγονός που μπορεί να αυξήσει το περιβαλλοντικό μας αποτύπωμα.

Συνολικά, η επιλογή μεταξύ σταθμών ανταλλαγής μπαταριών και σταθμών φόρτισης θα εξαρτηθεί από διάφορους παράγοντες, συμπεριλαμβανομένων των ειδικών

αναγκών των οδηγών και της διαθέσιμης υποδομής. Η ανταλλαγή μπαταριών φαίνεται να προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι της φόρτισης, όπως ταχύτερους χρόνους φόρτισης και μεγαλύτερη ευκολία για τον χρήστη, όμως δεν έχει δοκιμαστεί ακόμα αρκετά ώστε να φανεί αν μπορεί να σταθεί με επιτυχία στην ηλεκτροκίνηση του αύριο. Το πιο πιθανό σενάριο είναι ότι οι σταθμοί ανταλλαγής και οι σταθμοί φόρτισης θα συνυπάρχουν στο μέλλον.

2.1.4 Στόχοι Σταθμού Ανταλλαγής

Ο πρωταρχικός στόχος ενός σταθμού ανταλλαγής μπαταριών είναι να παρέχει μια βολική και αποτελεσματική υπηρεσία ανταλλαγής μπαταριών. Η διαδικασία ανταλλαγής θα πρέπει να είναι γρήγορη, να ελαχιστοποιούνται οι χρόνοι αναμονής και να διασφαλίζεται η ομαλή εμπειρία των πελατών, όπως και η ασφάλειά τους.

Ένας επιτυχημένος σταθμός ανταλλαγής μπαταριών πρέπει να διατηρεί υψηλό επίπεδο αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας. Ο σταθμός θα πρέπει να διαθέτει ανά πάσα στιγμή επαρκή αριθμό πλήρως φορτισμένων μπαταριών για να καλύπτει τη ζήτηση των ιδιοκτητών ηλεκτρικών οχημάτων.

Ο σταθμός οφείλει να διαθέτει συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης της υγείας και της απόδοσης των μπαταριών. Αυτό περιλαμβάνει τακτικές επιθεωρήσεις, διαγνωστικές εξετάσεις και συντήρηση, ώστε να διασφαλίζεται ότι οι μπαταρίες που ανταλλάσσονται βρίσκονται σε καλή κατάσταση και πληρούν τα πρότυπα απόδοσης. Επιπλέον, θα πρέπει να εφαρμόζονται επαρκή μέτρα ασφαλείας για την προστασία του προσωπικού και των ιδιοκτητών EV. Αυτό περιλαμβάνει κατάλληλα πρωτόκολλα χειρισμού και αποθήκευσης, συστήματα πρόληψης πυρκαγιάς και μέτρα ασφαλείας για την αποτροπή μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης ή παραποίησης.

Η οικονομική βιωσιμότητα ενός σταθμού ανταλλαγής είναι απαραίτητη για τη μακροπρόθεσμη επιτυχία. Θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι οικονομικά αποδοτικός, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως η επένδυση σε υποδομές, τα λειτουργικά έξοδα και η παραγωγή εσόδων. Ο σταθμός πρέπει να στοχεύει στην παροχή ανταγωνιστικών τιμών για τις υπηρεσίες του, διατηρώντας παράλληλα τη κερδοφορία. Επιπλέον, θα πρέπει να έχει τη δυνατότητα να επεκτείνει τις δραστηριότητές του καθώς αυξάνεται η ζήτηση, προβλέποντας την προσθήκη περισσότερων θέσεων ανταλλαγής, υποδομών φόρτισης και χώρου αποθήκευσης μπαταριών. Αυτή η ευελιξία διασφαλίζει ότι ο σταθμός μπορεί να προσαρμοστεί στην αναπτυσσόμενη αγορά και να φιλοξενήσει μεγαλύτερη πελατειακή βάση.

Τέλος, για να χαρακτηριστεί επιτυχής ένας σταθμός ανταλλαγής μπαταριών, θα πρέπει να δίνει προτεραιότητα στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, ενσωματώνοντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας στις δραστηριότητές του με σκοπό τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με τη φόρτιση και την παραγωγή μπαταριών. Επιπλέον, ο σταθμός θα πρέπει να διαθέτει διαδικασίες ανακύκλωσης και διάθεσης για τις μπαταρίες στο τέλος του κύκλου ζωής τους, εξασφαλίζοντας υπεύθυνο χειρισμό και ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

2.1.4.1 Θέση BSS

Η τοποθεσία του BSS, λαμβάνοντας υπόψη την επιχειρηματική πτυχή είναι ένας κρίσιμος παράγοντας για τη μεγιστοποίηση του κέρδους των BSS, αλλά και για τη καλύτερη εξυπηρέτηση των οδηγών.

Οι περιορισμοί της θέσης BSS μπορούν να συνοψιστούν σε δύο κατηγορίες: σε αυτούς που αφορούν το δίκτυο οχημάτων και σ' εκείνους του δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας.

Το δίκτυο οχημάτων περιλαμβάνει την απόσταση ταξιδιού, τον προϋπολογισμό, τον αριθμό των BSS και την κυκλοφορία, ενώ το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας περιλαμβάνει τη ροή ισχύος, τη ζήτηση φορτίσεων, το όριο τάσης και το θερμικό όριο [2].

Η ανησυχία για την εμβέλεια είναι κρίσιμο μειονέκτημα των EV που μπορεί να επιλυθεί εάν τα BSS του συστήματος τοποθετηθούν με κατάλληλη απόσταση μεταξύ τους. Το κόστος λειτουργίας οποιουδήποτε συστήματος που περιλαμβάνει BSS μπορεί να μεγαλώσει σημαντικά όταν δεν επιλεγούν οι καταλληλότερες θέσεις για τους σταθμούς.

Η τοποθεσία αποτελεί μια καθοριστική παράμετρος κατά το σχεδιασμό των BSS για βέλτιστο έλεγχο των διαδικασιών φόρτισης και εκφόρτισης που εξισορροπεί την προσφορά και τη ζήτηση του δικτύου [21].

Ο βέλτιστος σχεδιασμός των θέσεων των σταθμών του δικτύου, βασίζεται στη συλλογή δεδομένων κυκλοφορίας του δικτύου και αιτημάτων ηλεκτρικής ενέργειας.

Τα προβλήματα βελτιστοποίησης για τα συστήματα ανταλλαγής με βάση τη τοποθεσία, μπορούν να αντιμετωπίσουν την ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης, του κόστους εγκατάστασης, του κόστους ταξιδιού, του κόστους φόρτισης, του κόστους μεταφοράς, της εμβέλειας οδήγησης και του κόστους συντήρησης.

Άλλος ένας παράγοντας στον οποίο βασίζεται η βελτιστοποιημένη θέση των σταθμών αποτελεί η πρόσβαση σε ενέργεια που προέρχεται από ΑΠΕ [22].

Η σωστή τοποθέτηση των σταθμών ενός δικτύου ανταλλαγής μπαταριών πρέπει να εξυπηρετεί τους χρήστες, αφού η κύρια συνεισφορά του BSS προέρχεται από τις ανταλλαγές.

2.1.4.2 Βέλτιστη Πολιτική Φόρτισης

Τα EV απαιτείται να ικανοποιούν τις επιδόσεις τους ως εμπορικά οχήματα. Ορισμένες από τις απαιτήσεις επιδόσεων είναι η υψηλή ισχύς, η υψηλή ενεργειακή απόδοση και η μεγαλύτερη δυνατή διάρκεια ζωής της μπαταρίας. Ως εκ τούτου, η βέλτιστη στρατηγική φόρτισης της μπαταρίας είναι απαραίτητη και οφείλει μάλιστα να είναι ευέλικτη στις ανάγκες κινητικότητας των χρηστών, τη συμπεριφορά των οδηγών και τη χωρητικότητα της μπαταρίας [15],[16].

Μια τέτοια μη ελεγχόμενη στρατηγική φόρτισης αυξάνει την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού των τιμολογίων. Για το σχεδιασμό και τη διαχείριση της στρατηγικής φόρτισης, είναι σημαντική η ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ των EV και των σταθμών φόρτισης. Στη συνέχεια, η δυναμική μεταβολή των τιμών μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη πρόβλεψη του προφίλ αφίξεων πελατών και τον προσδιορισμό του οικονομικότερου τρόπου ώστε να φορτιστούν οι μπαταρίες των σταθμών.

Η ελεγχόμενη φόρτιση αποτρέπει τον κίνδυνο αύξησης του φορτίου αιχμής, δεδομένου ότι η φόρτιση προγραμματίζεται σε ώρες χαμηλής ζήτησης σε σύγκριση με την ανεξέλεγκτη φόρτιση [23]. Η ελεγχόμενη φόρτιση των EVs προκαλεί επίσης σημαντική μείωση της αντικατάστασης των υπερφορτωμένων στοιχείων του δικτύου λόγω των μειωμένων απωλειών ενέργειας. Ωστόσο η εξοικονόμηση κόστους από τη χαμηλότερη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας δεν είναι αρκετή για να αντισταθμίσει το κόστος των συνολικών επενδύσεων, συνεπώς η ιδέα της φόρτισης κοιλάδας ίσως είναι καλή, αλλά από μόνη της δεν αρκεί προκειμένου να καταστήσει τους σταθμούς ανταλλαγής βιώσιμη λύση για το μέλλον [2].

Οι στρατηγικές φόρτισης αποσκοπούν στη μέγιστη αξιοποίηση των μπαταριών με στόχο βέβαια το κέρδος των σταθμών ανταλλαγής, όμως μέσω αυτής της πολιτικής, τα EV κερδίζουν έδαφος, αφού μειώνεται περισσότερο το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα.

2.1.4.3 BSS και Ζωή Μπαταρίας

Το σημαντικότερο μέρος κάθε ηλεκτρικού οχήματος είναι η μπαταρία του, η οποία καθορίζει την απόδοση του οχήματος από κάθε άποψη.

Τα περισσότερα ηλεκτρικά οχήματα διαθέτουν κάποιο είδος μπαταρίας ιόντων λιθίου (Li-Ion), οι οποίες χαρακτηρίζονται από εξαιρετική ενεργειακή πυκνότητα, δηλαδή αποθηκεύουν υψηλή ποσότητα ενέργειας ανά φυσικό βάρος. Έχουν επίσης εξαιρετική μακροζωία που σημαίνει ότι μπορούν να εκφορτιστούν και να επαναφορτιστούν ή να "ανακυκλωθούν" πολλές φορές και να διατηρήσουν την αποθηκευτική τους ικανότητα.

Ο όρος Li-ιον αναφέρεται στην πραγματικότητα σε πολλές χημικές μορφές μπαταριών που περιλαμβάνουν το ιόν λιθίου. Μερικές από τις πιο διαδεδομένες μορφές είναι οι:

(LiMn₂O₄)- ή αλλιώς: IMR, LMO, Li-μαγγανίου.

Νικελίου λιθίου μαγγανίου (LiNiMnCoO₂)- γνωστός και ως INR, NMC

Οξειδίο νικελίου-κοβαλτίου-αλουμινίου λιθίου (LiNiCoAlO₂)- γνωστός και ως NCA, Li-αλουμινίου

Οξειδίο του κοβαλτίου του λιθίου (LiCoO₂)- γνωστός και ως ICR, LCO, Li-κοβαλτίου (LiFePO₄) - γνωστός και ως IFR, LFP, Li-φωσφόρου.

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου αποτελούν κοινή επιλογή μπαταρίας στα περισσότερα οχήματα, δεδομένου ότι έχουν τα χαρακτηριστικά της υψηλής διάρκειας ζωής, της υψηλής τάσης, της ικανότητας ταχείας φόρτισης και της υψηλής πυκνότητας ενέργεια [24],[25].

Οι παράμετροι που επηρεάζουν την ηλικία μιας μπαταρίας περιλαμβάνουν το SOC, τη θερμοκρασία και το ρεύμα. Οι υψηλής ισχύος μπαταρίες ιόντων λιθίου είναι εμπορικά διαθέσιμες κυψέλες με καθορισμένη ισχύ, απόδοση και διάρκεια ζωής.

Η έννοια της Worthiness of Replacement (WOR) μπορεί να εφαρμοστεί στη συστοιχία μπαταριών μετά την εξισορρόπηση της μπαταρίας και την ολοκλήρωση του ταξιδιού. Για οποιοδήποτε κύκλο οδήγησης, η WOR μιας συγκεκριμένης συστοιχίας μπαταριών ορίζεται ως ο λόγος της μεταβολής του SOC της τρέχουσας συστοιχίας μπαταριών προς εκείνη μετά την αντικατάσταση ορισμένων μονάδων με μια υγιή μονάδα ονομαστικών προδιαγραφών. Η WOR προσδιορίζει την ακριβή απώλεια ενέργειας στο ταξίδι. Αυτή η έννοια είναι χρήσιμη στο BSS, ιδίως για τη στρατηγική μίσθωσης μπαταριών, ώστε να γνωρίζει πότε πρέπει να αλλάξει η μπαταρία.

Σ' αυτό το σημείο, αξίζει να σημειωθεί ότι η Tesla συναρμολογεί μικρές μπαταρίες σε ένα μεγαλύτερο σύνολο και τις χρησιμοποιεί ως πηγή ενέργειας για τα οχήματά της. Αυτό αυξάνει τη διάρκεια ζωής των μπαταριών, καθώς μπορεί να αντικαταστήσει οποιαδήποτε ελαττωματική μικρή μπαταρία από την ομάδα, χωρίς να χάσει τα υπόλοιπα μέρη που είναι πλήρως λειτουργικά [2].

Για την αποδοτική λειτουργία της μπαταρίας, είναι σημαντική και η εξισορρόπηση της φόρτισης. Πολλές φορές η υπερφόρτιση/εκφόρτιση προκαλεί ανισορροπία στα

κτύτταρα των μπαταριών και μειώνει την ικανότητα της μπαταρίας, ενώ και η συχνή φόρτιση/αποφόρτιση μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας δραστικά.

Η διάρκεια ζωής της μπαταρίας εξαρτάται επίσης σε μεγάλο βαθμό από τον τρόπο οδήγησης των οδηγών, οπότε η πρόβλεψη της συμπεριφοράς τους σε συνδυασμό με τη πρόβλεψη της υπολειπόμενης ενέργειας στην μπαταρία, μπορεί να βοηθήσει στην επιλογή των καταλληλότερων μεταβλητών ελέγχου [26].

Οι σταθμοί ανταλλαγής παρακολουθούν και διαχειρίζονται την υγεία των μπαταριών των μονάδων που ανταλλάσσονται. Αυτό τους επιτρέπει να βελτιστοποιούν τα πρότυπα φόρτισης και εκφόρτισης, εξασφαλίζοντας τη μακροζωία των μπαταριών. Με τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών, μειώνεται το κόστος και ο συνολικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς χρειάζεται να κατασκευαστούν και να απορριφθούν λιγότερες μπαταρίες.

2.1.4.4 BSS και ΑΠΕ

Ο τομέας των μεταφορών συμβάλλει σημαντικά στις παγκόσμιες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, καθώς αντιπροσωπεύει περίπου το ένα τέταρτο των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ και οι οδικές μεταφορές ευθύνονται για τα τρία τέταρτα των εκπομπών των μεταφορών. Κρίνεται λοιπόν επιτακτική η ανάγκη απαλλαγής από τη χρήση άνθρακα και στροφής σε νέες εναλλακτικές προκειμένου να δοθεί λύση στο ζήτημα των μετακινήσεων.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών μπορούν να συνεργαστούν για να υποστηρίξουν την υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων (EV) και να ενισχύσουν τη συνολική βιωσιμότητα των μεταφορών.

Οι ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια, μπορούν να αξιοποιηθούν για την παραγωγή καθαρής ηλεκτρικής ενέργειας για τη φόρτιση των EVs. Με την προμήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ, η διαδικασία φόρτισης γίνεται φιλικότερη προς το περιβάλλον, μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου σε σύγκριση με την παραγωγή ενέργειας από ορυκτά καύσιμα.

Αυτό που καθιστά τους σταθμούς ανταλλαγής μπαταριών τόσο ενδιαφέροντες προς μελέτη, είναι το ότι παρέχουν μια εναλλακτική μέθοδο για τη φόρτιση των ηλεκτρικών οχημάτων, η οποία ελαχιστοποιεί το χρόνο διακοπής τους προκειμένου να εφοδιαστούν ενέργεια. Με το τρόπο αυτό, οι σταθμοί ανταλλαγής συμβάλουν στη πράσινη ανάπτυξη και στον οραματισμό ενός αύριο ανεξαρτημένου από κινητήρες εσωτερικής καύσης, αφού δίνουν απάντηση στα ζητήματα της εμβέλειας και του μεγάλου χρόνου διακοπής λειτουργίας των ηλεκτροκίνητων οχημάτων προκειμένου να πραγματοποιηθεί η φόρτισή τους.

Έτσι λοιπόν, οι σταθμοί ανταλλαγής ενισχύουν την υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων και κατ'επέκταση και τη χρήση ΑΠΕ.

Οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών προσφέρονται και στο να ενσωματώσουν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας απευθείας στις λειτουργίες τους, αφού μπορούν να εγκατασταθούν ηλιακοί συλλέκτες ή ανεμογεννήτριες επί τόπου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για τη φόρτιση των μπαταριών που ανταλλάσσονται. Αυτό επιτρέπει την άμεση σύνδεση μεταξύ της παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και της υποδομής φόρτισης, μειώνοντας περαιτέρω το αποτύπωμα άνθρακα του τομέα των μεταφορών.



Εικόνα 2.3 Μοντέλο σταθμού ανταλλαγής με χρήση ΑΠΕ.

Οι σταθμοί ανταλλαγής παρακολουθούν και διαχειρίζονται την υγεία των μπαταριών των μονάδων που ανταλλάσσονται. Αυτό τους επιτρέπει να βελτιστοποιούν τα πρότυπα φόρτισης και εκφόρτισης, εξασφαλίζοντας τη μακροζωία των μπαταριών. Με τη μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής των μπαταριών, μειώνεται ο συνολικός περιβαλλοντικός αντίκτυπος των ηλεκτρικών οχημάτων, καθώς χρειάζεται να κατασκευαστούν και να απορριφθούν λιγότερες μπαταρίες.

Τέλος, οι σταθμοί ανταλλαγής μπορούν να ενισχύσουν τη σταθερότητα και κατ' επέκταση τη λειτουργία του ηλεκτρικού δικτύου, καθώς οι σταθμοί με μεγάλο αριθμό μπαταριών μπορούν να λειτουργήσουν ως καταναεμημένα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας. Αποθηκεύοντας την περίσσεια ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές σε περιόδους υψηλής παραγωγής και εκφορτίζοντάς τη όταν είναι υψηλή η ζήτηση ή είναι χαμηλή η παραγωγή ενέργειας από τις ΑΠΕ. Αυτό συμβάλλει στην εξισορρόπηση του δικτύου, στη σταθεροποίηση των διακυμάνσεων και στη βελτιστοποίηση της χρήσης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Ο συνδυασμός ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και σταθμών ανταλλαγής μπαταριών προσφέρει μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για βιώσιμες μεταφορές. Αξιοποιεί την παραγωγή καθαρής ενέργειας και τις αποτελεσματικές μεθόδους φόρτισης για να υποστηρίξει την ευρεία υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων, μειώνοντας παράλληλα τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και προωθώντας ένα πιο πράσινο μέλλον, το οποίο θα έρθει συντομότερα με τη λήψη μέτρων με σκοπό την ενθάρρυνση της ηλεκτροκίνησης και τη ταυτόχρονη ενίσχυση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλές εκπομπές άνθρακα [27].

2.2 GOGORO

2.2.1 Περιγραφή Εταιρείας

Η Gogoro είναι μια ταϊβανέζικη εταιρεία που ειδικεύεται στα ηλεκτρικά σκούτερ και στην έξυπνη υποδομή ανταλλαγής μπαταριών. Ιδρύθηκε το 2011 από τους Horace Luke και Matt Taylor. Η αποστολή της Gogoro είναι να φέρει επανάσταση στις αστικές μεταφορές παρέχοντας καθαρές και αποτελεσματικές λύσεις ηλεκτρικής κινητικότητας.

Το κορυφαίο προϊόν της εταιρείας είναι το Gogoro Smartscooter, ένα ηλεκτρικό σκούτερ που τροφοδοτείται από μπαταρία ιόντων λιθίου. Αυτά τα σκούτερ είναι γνωστά για τον κομψό σχεδιασμό τους, τις υψηλές επιδόσεις τους και τα προηγμένα χαρακτηριστικά συνδεσιμότητας. Το σύστημα μπαταριών που χρησιμοποιείται στα σκούτερ της Gogoro βασίζεται σε ένα μοντέλο ανταλλαγής, το οποίο επιτρέπει στους

χρήστες να ανταλλάσσουν εύκολα τις εξαντλημένες μπαταρίες με πλήρως φορτισμένες στους σταθμούς ανταλλαγής μπαταριών της Gogoro που ονομάζονται "GoStations".



Εικόνα 2.4 GoStation και scooter της Gogoro [28].

Η Gogoro έχει αναπτύξει ένα εκτεταμένο δίκτυο ανταλλαγής μπαταριών σε μεγάλες πόλεις, κυρίως στην Ταϊβάν, όπου οι χρήστες μπορούν εύκολα να ανταλλάσσουν μπαταρίες σε λίγα δευτερόλεπτα. Αυτό αντιμετωπίζει έναν από τους βασικούς περιορισμούς των ηλεκτρικών οχημάτων, ο οποίος είναι ο χρόνος που απαιτείται για την επαναφόρτιση.

Εκτός από τα ηλεκτρικά σκούτερ και το δίκτυο ανταλλαγής μπαταριών, η Gogoro έχει επίσης επιχειρήσει να δραστηριοποιηθεί και σε άλλους τομείς βιώσιμων μεταφορών. Έχουν συνεργαστεί με διάφορους εταιρούς για την ανάπτυξη ηλεκτρικών ποδηλάτων, μοτοσυκλετών, ακόμη και ηλεκτρικών οχημάτων φορτίου. Επιπλέον, η Gogoro έχει επεκτείνει την πλατφόρμα ανταλλαγής μπαταριών πέρα από τη δική της μάρκα, επιτρέποντας σε άλλους κατασκευαστές ηλεκτρικών οχημάτων να χρησιμοποιούν το δίκτυο Gogoro για τα προϊόντα τους.

Η Gogoro έχει επιτύχει να εδραιώσει την παρουσία της στην Ταϊβάν και έχει επεκταθεί και σε άλλες αγορές. Τα ηλεκτρικά σκούτερ και το δίκτυο ανταλλαγής μπαταριών της Gogoro υιοθετήθηκαν μέχρι σήμερα σε χώρες όπως η Κίνα, η Ινδία, η Ινδονησία, η Σιγκαπούρη, οι Φιλιππίνες, η Ιαπωνία, η Κορέα και το Ισραήλ, ενώ η εταιρεία συνεχίζει να διερευνά συνεργασίες και ευκαιρίες για επέκταση σε παγκόσμιο επίπεδο.

Συνολικά, η Gogoro αναγνωρίζεται ως κορυφαίος παίκτης στον κλάδο των ηλεκτρικών σκούτερ, εστιάζοντας στον καινοτόμο σχεδιασμό, την έξυπνη συνδεσιμότητα και την αποτελεσματική υποδομή ανταλλαγής μπαταριών για να προωθήσει την υιοθέτηση των ηλεκτρικών οχημάτων και να συμβάλει σε ένα πιο βιώσιμο μέλλον των αστικών μεταφορών.

Τον Δεκέμβριο του 2020, η εταιρεία αναλύσεων Frost & Sullivan αναγνώρισε στην Gogoro το βραβείο "Παγκόσμια Εταιρεία της Χρονιάς 2020" για την αγορά ηλεκτρικών σκούτερ με εναλλάξιμες μπαταρίες [29],[30].

2.2.2 Περιγραφή Δικτύου

Το Δίκτυο Gogoro υποστηρίζει περισσότερους από 524.000 αναβάτες και έχει περισσότερες από 1,1 εκατομμύρια έξυπνες μπαταρίες σε κυκλοφορία μέσω του δικτύου 12.200 σταθμών ανταλλαγής μπαταριών (GoStations) σε περισσότερες από 2.504 τοποθεσίες. Με περισσότερες από 390.000 καθημερινές ανταλλαγές μπαταριών και περισσότερες από 370 εκατομμύρια συνολικές ανταλλαγές μπαταριών

μέχρι σήμερα, η ανταλλαγή μπαταριών στο δίκτυο Gogoro έχει εξοικονομήσει περισσότερους από 250.000 τόνους CO₂ από την έναρξη λειτουργίας του [10],[11].

Το Gogoro Smartscooter ήταν το πρώτο όχημα που ενσωματώθηκε στο δίκτυο Gogoro το 2015.



Εικόνα 2.5 Οχήματα της σειράς scooter “Gogoro 2 Plus” [31].

Το Gogoro 2 διαθέτει ένα ζεύγος μπαταριών Gogoro περίπου 1,7 kWh, των οποίων η συνδυασμένη χωρητικότητα 3,4 kWh προσφέρει μια εκτιμώμενη εμβέλεια πόλης έως και 100 km (60 μίλια). Η εταιρεία αναφέρει ότι έξι δευτερόλεπτα αρκούν για την αλλαγή των μπαταριών για άλλα 100 χιλιόμετρα εμβέλειας [32].



Εικόνα 2.6 Απεικόνιση του ζεύγους μπαταριών του δικτύου της Gogoro [33].

Οι μπαταρίες και οι σταθμοί φόρτισης της Gogoro συνδέονται με την υπηρεσία cloud Gogoro Network, η οποία παρακολουθεί την κατάσταση των μπαταριών και διαχειρίζεται το πόσο γρήγορα φορτίζονται.

Το δίκτυο περιλαμβάνει επίσης το πρόγραμμα Powered by Gogoro Network, μέσω του οποίου άλλοι κατασκευαστές ηλεκτρικών σκούτερ μπορούν να κατασκευάσουν σκούτερ που χρησιμοποιούν την υποδομή του δικτύου Gogoro. Από τον Απρίλιο του 2021, το Gogoro έχει επτά συνεργάτες κατασκευαστές οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των Hero, Yamaha, Aeonmotor, PGO, eReady, eMOVING και Gogoro [34].

Τον Φεβρουάριο του 2021, το δίκτυο της Gogoro αποτελούνταν από 1.959 GoStations και περισσότερες από 764.000 μπαταρίες. Οι 66 από τους GoStations το 2021 ήταν Super GoStations, οι οποίοι ήταν μεγαλύτεροι από τους κανονικούς GoStations με δυνατότητα εξυπηρέτησης έως και 1.000 αναβατών την ημέρα [35]. Ορισμένοι μάλιστα σταθμοί διαθέτουν αρκετό απόθεμα σε μπαταρίες, ικανό να υποστηρίξει τη φόρτιση των σκούτερ κατά τη διάρκεια βλαβών του δικτύου [36],[30].

2.2.3 Gogoro στη Ταϊβάν

Τον Ιούλιο του 2015, το Gogoro Smartscooter ξεκίνησε στην Ταϊβάν, μια χώρα με την υψηλότερη πυκνότητα σκούτερ στον κόσμο [38]. Μέχρι το τέλος του ίδιου έτους, είχαν πωληθεί περισσότερα από 4.000 Smartscooters και το μερίδιο αγοράς του στην αγορά ηλεκτρικών σκούτερ της Ταϊβάν έφτασε το 33,94% [39],[40]. Σύμφωνα με την Gogoro, το 2016 η εταιρεία είχε ένα GoStation λιγότερο από κάθε 1,3 χιλιόμετρα στην Ταϊπέι [41].

Στην Ταϊβάν, η Gogoro έχει πλέον περισσότερους από 375.000 αναβάτες και 2.000 σταθμούς ανταλλαγής/φόρτισης μπαταριών, οι οποίοι διαχειρίζονται 265.000 ανταλλαγές την ημέρα. Αυτή η πυκνότητα αποτελεί βασικό σημείο πώλησης, επειδή οι αναβάτες μπορούν να βρουν γρήγορα έναν κοντινό σταθμό ανταλλαγής μέσω της εφαρμογής της Gogoro [10],[11].

Προσφέροντας μια γρήγορη και απρόσκοπτη διαδικασία αντικατάστασης μπαταριών, η Gogoro στοχεύει να ξεπεράσει τους περιορισμούς των παραδοσιακών υποδομών φόρτισης και να ενθαρρύνει την ευρεία υιοθέτηση των ηλεκτρικών σκούτερ.

3 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

3.1 Στόχοι Βελτιστοποίησης Σταθμών Ανταλλαγής

Ο βέλτιστος προγραμματισμός των BSS είναι ουσιαστικά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων. Η βασική αρχή για την επίλυση του προβλήματος είναι ο καθορισμός των στόχων βελτιστοποίησης, η εξαγωγή των παραγόντων επιρροής, ο καθορισμός των περιορισμών και η επιλογή ενός κατάλληλου αλγορίθμου για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης.

Οι στόχοι των σταθμών είναι η ελαχιστοποίηση του αποθέματος, του κόστους φόρτισης και της υποβάθμισης των μπαταριών, ενώ παράλληλα μεγιστοποιούνται τα καθαρά έσοδα. Ο στόχος του δικτύου είναι η ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων του φορτίου και η -χωρίς καθυστέρηση- ικανοποίηση της ζήτησης των πελατών σε μπαταρίες.

Για τη βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης BSS, οι κύριες μεταβλητές βελτιστοποίησης είναι ο αριθμός των μπαταριών και των φορτιστών.

Ο αριθμός των εναλλασσόμενων μπαταριών πρέπει να βελτιστοποιηθεί, καθώς το κόστος αγοράς και συντήρησης αυξάνεται όταν χρησιμοποιούνται υπερβολικές μπαταρίες, ενώ η ανεπαρκής προμήθεια αποθεμάτων μπαταριών θα έθετε σε κίνδυνο την ομαλή λειτουργία των BSS. Το απόθεμα μπαταριών εξαρτάται κυρίως από την αβεβαιότητα της ζήτησης ανταλλαγής μπαταριών. Αυτό επηρεάζεται από τη δομή του δικτύου των σταθμών, την ημερήσια κατανομή των χιλιομέτρων των EV και τις συνήθειες χρήσης των χρηστών EV [28]. Η αβεβαιότητα της ζήτησης ανταλλαγής μπαταριών αντικατοπτρίζεται στις αβεβαιότητες του αριθμού των οχημάτων που φθάνουν κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης περιόδου και της εναπομένουσας κατάστασης φόρτισης (SOC). Οι περισσότερες μελέτες χρησιμοποιούν τη μέθοδο

Monte Carlo για την πρόβλεψη του αριθμού των αφίξεων οχημάτων σε μια συγκεκριμένη περίοδο με βάση στατιστικά δεδομένα, χιλιόμετρα οδήγησης και συμπεριφορές οχημάτων [19],[42].



Εικόνα 2.1 Ένας τυπικός Super GoStation της Gogoro στη Ταϊβάν [37].

Η βελτιστοποίηση του αριθμού των φορτιστών αποσκοπεί στη μεγιστοποίηση των καθαρών εσόδων των BSS. Η βέλτιστη τιμή ωστόσο του αριθμού των φορτιστών, δεν είναι απαραίτητα η ελάχιστη δυνατή τιμή του ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση, καθώς ο βέλτιστος προγραμματισμός φόρτισης μπορεί να προβλέπει πλεονάζοντα αριθμό φορτιστών, ώστε να πραγματοποιούνται οι φορτίσεις των εξαντλημένων μπαταριών σε ώρες χαμηλής κινητικότητας, όπου η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα.

Εάν υπάρχουν φορτιστές πολλαπλής ισχύος, το βασικό κόστος λειτουργίας του σταθμού αυξάνεται, καθώς προστίθεται σε αυτό, το κόστος που προκαλείται από υψηλότερους ρυθμούς φόρτισης. Αυτό συμβαίνει διότι η γρήγορη φόρτιση μειώνει τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας και κατ' επέκταση τον αριθμό των επιτρεπόμενων ανταλλαγών.

Άλλος ένας σημαντικός παράγοντας που πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη κατά το σχεδιασμό των σταθμών, αποτελεί η συνεχής υποβάθμιση των μπαταριών και του υπόλοιπου εξοπλισμού. Φαίνεται λοιπόν να έχει πολύ μεγάλη σημασία ο σχεδιασμός σταθμών με πλεονάζοντες αριθμούς μπαταριών και θέσεων φόρτισης. Οι αποφάσεις διαχείρισης για τη βελτιστοποίηση του αποθέματος μπαταριών λοιπόν, πρέπει να λαμβάνουν σοβαρά υπόψη την υποβάθμιση των μπαταριών ή άλλες μακροπρόθεσμες φθορές στο εξοπλισμό φόρτισης [19].

3.2 Περιγραφή Μοντέλου

Στα πλαίσια της μελέτης αυτής, προσομοιώθηκε ένας σταθμός ανταλλαγής μπαταριών scooter παρεμφερής με εκείνους της Gogoro. Η προσομοίωση κινήθηκε γύρω από την εύρεση του βέλτιστου αριθμού φορτιστών και μπαταριών στο απόθεμα υπό δεδομένη ζήτηση, προκειμένου αυτή να ικανοποιείται πάντα και ο χρόνος αναμονής των οδηγών, προκειμένου να ανταλλάξουν τις αποφορτισμένες μπαταρίες τους, να είναι μηδενικός. Η εν λόγω βελτιστοποίηση οφείλει να εξυπηρετεί τόσο τους οδηγούς των ηλεκτρικών οχημάτων, όσο και την οικονομία του σταθμού. Στο πλαίσιο αυτό, πρώτα προσεγγίστηκε ο ελάχιστος αριθμός μπαταριών στο απόθεμα προκειμένου να ικανοποιείται η ζήτηση τους, η οποία θεωρήθηκε γνωστή. Βάσει αυτού του αριθμού μπαταριών, προσεγγίστηκε ο ελάχιστος δυνατός αριθμός φορτιστών. Όλα αυτά δεδομένου ότι θα υπάρχει πάντα έστω και μια μπαταρία στο απόθεμα του σταθμού, ώστε να διατηρείται μηδενικός ο χρόνος αναμονής για τους πελάτες του σταθμού.

ΔΕΔΟΜΕΝΑ – ΠΑΡΑΔΟΧΕΣ

Κατά τη προσομοίωση του σταθμού ανταλλαγής, θεωρήθηκε ότι οι φορτιστές ξεκινούν τη φόρτιση των εξαντλημένων μπαταριών αμέσως μετά την ανταλλαγή (αν υπάρχει διαθέσιμος φορτιστής), αγνοώντας τα οφέλη του βέλτιστου προγραμματισμού φόρτισης και την εφαρμογή της φόρτισης σε κοιλάδες για τη περαιτέρω μείωση του κόστους λειτουργίας του σταθμού.

Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε μόνο ενός τύπου ισχύος φορτιστής, ενώ μπορούν να εξεταστούν περαιτέρω οι βέλτιστες διαμορφώσεις φορτιστών πολλαπλής ισχύος.

Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών αφίξεων πελατών στο σύστημα ακολουθεί κανονική κατανομή με (μέση τιμή) $\mu=13$ λεπτά και (τυπική απόκλιση) $\sigma=3.6$ λεπτά ($\sigma^2=13$). Έτσι προκύπτουν 100-103 αφίξεις την ημέρα, οπότε η τιμή της ημερήσιας ζήτησης των πελατών σε μπαταρίες θεωρείται σταθερή και ίση με 100 μπαταρίες/ημέρα.

Οι μπαταρίες -όπως κι εκείνες της Gogoro- θεωρήθηκε ότι όταν είναι αποφορτισμένες, χρειάζονται 2.5 ώρες για τη πλήρη φόρτισή τους. Στα πλαίσια λοιπόν αυτής της προσομοίωσης, ο χρόνος φόρτισης των εξαντλημένων μπαταριών προσεγγίστηκε ως μία τριγωνική κατανομή με ελάχιστη τιμή το 2, πιο συχνή το 2.4 και υψηλότερη τιμή το 2.5.

Επιπλέον για τις μπαταρίες, θεωρήθηκε ότι έχουν διάρκεια ζωής 1.000 φορτίσεων, πάλι βάσει αυτών της Gogoro.

Τέλος, για τη προσομοίωση θεωρήθηκε ότι ο αριθμός των φορτιστών δε μπορεί να υπερβαίνει τον αριθμό μπαταριών του αποθέματος. Αυτό συμβαίνει διότι αν οι απαιτούμενες φορτίσεις (Φ) είναι περισσότερες από τις μπαταρίες του αποθέματος (N), τότε το μοντέλο θα έχει αστοχήσει, αφού θα υπάρχει έστω κι ένας πελάτης που έχει παραδώσει την αφόρτιστη μπαταρία του και ο σταθμός δε διαθέτει άλλη μπαταρία στο απόθεμά του για να τον προμηθεύσει.

3.3 Χρήση Λογισμικού Προσομοίωσης ARENA

Για τη πραγματοποίηση της προσομοίωσης του σταθμού ανταλλαγής μπαταριών χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό προσομοίωσης ARENA [43].

Τα δομικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και οι λειτουργίες τους, αναλύονται παρακάτω.

Create: Το "Create" ως δομικό στοιχείο περιγράφει μία είσοδο οντοτήτων στο σύστημα. Κατά τη προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν δύο είσοδοι. Η μία (ENTRY) δημιουργεί τις αφόρτιστες μπαταρίες που καταφθάνουν στο σύστημα, ενώ η δεύτερη (RESERVE) δημιουργεί τις φορτισμένες μπαταρίες του αποθέματος του σταθμού.

Hold: Το "Hold" είναι ένα δομικό στοιχείο του ARENA, όπου υπάρχει η δυνατότητα να δημιουργηθούν ουρές αναμονής για τις οντότητες του συστήματος. Στη προσομοίωση του σταθμού ανταλλαγής χρησιμοποιήθηκαν δύο "Hold", το πρώτο ("Hold 2") καλείται "FREE OF CHARGE BATTERIES", βρίσκεται πριν τους φορτιστές και συγκεντρώνει τις αφόρτιστες μπαταρίες μέχρι να ελευθερωθεί κάποιος φορτιστής. Στη περίπτωση που υπάρχει κενή θέση φόρτισης κατά την είσοδο μιας αφόρτιστης μπαταρίας στο σταθμό, αυτή θα σταλεί απευθείας στο φορτιστή, χωρίς να περάσει από το "Hold 2". Στο "Hold 1" ("CH_BAT") διατηρούνται οι φορτισμένες μπαταρίες που διατίθενται προς ανταλλαγή.

Signal: Το "Signal" είναι μια εντολή που αφορά απόφαση. Κάθε φορά που μια αφόρτιστη μπαταρία δημιουργείται από το "ENTRY", "το Signal 1" δίνει εντολή στο "Hold 1" να απελευθερώσει μια φορτισμένη μπαταρία κι έτσι ολοκληρώνεται μια πετυχημένη ανταλλαγή.

Decide: Το "Decide" είναι κι αυτό δομικό στοιχείο που έχει να κάνει με απόφαση. Μετά την αποστολή του σήματος, οι αφόρτιστες μπαταρίες οδηγούνται στο "Decide 1", το οποίο ελέγχει αν υπάρχουν κενές θέσεις φόρτισης. Αν υπάρχει θέση, τότε η μπαταρία θα σταλεί απευθείας σε φορτιστή, ώστε να ξεκινήσει η διαδικασία της επαναφόρτισής της. Αλλιώς, θα οδηγηθεί στο "Hold 2" μέχρι να ελευθερωθεί κάποια θέση.

Process: Το "Process" του ARENA δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σαν μια καθυστέρηση. Χρησιμοποιήθηκε λοιπόν για να προσομοιώσει τους φορτιστές του σταθμού ("CHARGER 1,2,...,n"), οι οποίοι καθυστερούν τις αφόρτιστες μπαταρίες του δικτύου τόσο όσο είναι και η εκάστοτε τιμή του χρόνου φόρτισης ("MY_BLEV_EXPR"). Μετά τη φόρτιση, οι οντότητες του συστήματος (οι φορτισμένες πλέον μπαταρίες), στέλνονται στο "Hold 1" ("CH_BAT"), όπου και παραμένουν έως ότου δεχθούν σήμα εξόδου.

Dispose: Τέλος, το "Dispose" αποτελεί δομικό στοιχείο εξόδου και χρησιμοποιήθηκε για να προσομοιώσει την έξοδο των φορτισμένων μπαταριών από το σταθμό.

Μετρητές του μοντέλου:

BATTERIES IN: Αφορά το σύνολο των αφόρτιστων μπαταριών που κατέφτασαν στο σταθμό κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης.

BATTERIES OUT: Είναι ο αριθμός των φορτισμένων μπαταριών που διέθεσε ο σταθμός στους πελάτες κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης. Ο έλεγχος που επαληθεύει ότι ο σταθμός δεν αντιμετώπισε κάποιο πρόβλημα με το απόθεμά μπαταριών και ανταπεξήλθε στη ζήτηση των οδηγών, είναι ο "BATTERIES IN = BATTERIES OUT". Αυτό εξετάζεται ύστερα από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

AVAILABLE CHARGED BATTERIES (CH_BAT): Αποτελεί τον αριθμό των φορτισμένων μπαταριών που βρίσκονται στο "Hold 1" φορτισμένες και έτοιμες προς ανταλλαγή σε μια δεδομένη στιγμή της προσομοίωσης.

FREE OF CHARGE BATTERIES: Είναι ο αριθμός των αφόρτιστων μπαταριών που συγκεντρώνονται στο "Hold 2" όταν δεν υπάρχουν ελεύθερες θέσεις φόρτισης. Και αυτός ο αριθμός αναφέρεται σε μια δεδομένη χρονική στιγμή του συστήματος.

CHARGING BATTERIES: Περιγράφει τον αριθμό των μπαταριών του σταθμού που βρίσκονται σε κατάσταση φόρτισης, ή αλλιώς, τον αριθμό των φορτιστών (Processes) του συστήματος που είναι κατειλημμένοι.

Άλλη μια συνθήκη που πρέπει να ικανοποιείται κατά τη διάρκεια και στο τέλος της προσομοίωσης είναι η:

$$\text{AVAILABLE CHARGED BATTERIES} + \text{CHARGING BATTERIES} + \text{FREE OF CHARGE BATTERIES} = N,$$

όπου N ο αριθμός μπαταριών αποθέματος.

Επιπλέον χρησιμοποιήθηκαν:

Entity: Σαν οντότητες της προσομοίωσης καταχωρήθηκαν οι μπαταρίες ("BATTERY").

Variable: Οι καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται η οντότητα ("BATTERY") όταν βρίσκεται εντός του σταθμού θεωρήθηκαν ως μεταβλητές. Η πρώτη μεταβλητή αφορά τη κατάσταση φόρτισης ("CHARGING BATTERY") και η δεύτερη τη κατάσταση αναμονής των φορτισμένων και έτοιμων προς ανταλλαγή μπαταριών του σταθμού ("CHARGED BATTERY"). Όλες οι αφόρτιστες μπαταρίες που θα εισέλθουν στο σταθμό θα περάσουν από τις δύο προαναφερθείσες καταστάσεις. Υπάρχει βέβαια και μία τρίτη κατάσταση και είναι αυτή των αφόρτιστων μπαταριών που βρίσκονται στο σταθμό και περιμένουν να αδειάσει κάποια θέση φόρτισης. Ωστόσο δεν υπάρχει ως μεταβλητή του μοντέλου.

Expression : Η μεταβλητή που περιγράφει το χρόνο φόρτισης των μπαταριών ("MY_BLEV_EXPR") προσομοιώθηκε ως μια τριγωνική κατανομή με ελάχιστη τιμή το 2, πιο συχνή τιμή το 2.4 και υψηλότερη το 2.5 (ακριβής έκφρασή της στο ARENA: Expression Values TRIA(2,2.4,2.5)).

Queue: Χρησιμοποιούνται δύο ουρές αναμονής για τις οντότητες του μοντέλου. Η πρώτη αποτελείται από αυτές που βρίσκονται στη κατάσταση "CHARGED BATTERY" και καλείται "CH_BAT", ενώ στη δεύτερη ουρά τοποθετούνται οι αφόρτιστες μπαταρίες που βρίσκονται στο σταθμό και περιμένουν να αδειάσει κάποια θέση φόρτισης (Συνθήκη στο ARENA: Hold 2, Type: Scan for Condition, Condition: (CHARGER 1.WIP == 0) || (CHARGER 2.WIP == 0) || ... (CHARGER N.WIP == 0), Queue Type: Queue). Η ουρά αυτή ονομάζεται "FREE OF CHARGE BATTERIES".

Entity Picture: Οι οντότητες του μοντέλου ("BATTERY") αναπαραστάθηκαν ως κόκκινες ή πράσινες μπάλες για τις περιπτώσεις που ήταν αφόρτιστες ή φορτισμένες αντιστοίχως. (χρησιμοποιήθηκαν από τη βιβλιοθήκη του ARENA: Picture.Green Ball, Picture.Red Ball).

3.4 Περιγραφή της εντός του σταθμού διαδρομή μιας μπαταρίας

Ύστερα από την είσοδο ("ENTRY") της αποφορτισμένης μπαταρίας στο σταθμό, περνά από το δομικό στοιχείο "Signal 1", το οποίο στέλνει σήμα στο "Hold 1", όπου και βρίσκονται οι φορτισμένες μπαταρίες. Το σήμα αφορά την απελευθέρωση μιας φορτισμένης μπαταρίας από το "Hold 1". Αυτό συμβαίνει ακαριαία κι έτσι εξυπηρετείται ο πελάτης που παρέδωσε την αφόρτιστη μπαταρία του. Η αφόρτιστη μπαταρία φτάνει στη συνέχεια στο "Decide 1", από όπου και στέλνεται σε κάποια κενή θέση φόρτισης (CHARGERS). Αν όλες οι θέσεις φόρτισης είναι κατειλημμένες, οδηγείται στο "Hold 2", όπου και παραμένει αφόρτιστη μέχρι να ελευθερωθεί κάποιος φορτιστής. Αφού λοιπόν ολοκληρωθεί η διαδικασία φόρτισής της, η μπαταρία

στέλνεται στο “Hold 1”, όπου και τοποθετείται στο τέλος μιας ουράς φορτισμένων μπαταριών που αποτελεί το απόθεμα του σταθμού σε φορτισμένες μπαταρίες(. Η πρώτη μπαταρία της ουράς απελευθερώνεται και διατίθεται στον εκάστοτε πελάτη κάθε φορά που δέχεται σήμα από το “Signal 1” ότι εισήχθη στο δίκτυο νέα αφόρτιστη μπαταρία. Η μπαταρία λοιπόν που μας αφορά, παραμένει στο “Hold 1” μέχρι να έρθει η σειρά της να διατεθεί σε κάποιον οδηγό του δικτύου για χρήση.

4 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

4.1 Βέλτιστη λύση Κανονικού Προβλήματος $(\Phi^*, N^*) = (\Phi(N_{\min}), N_{\min})$

Η πρώτη περίπτωση αφορά την ελαχιστοποίηση των μπαταριών του αποθέματος και έπειτα την εύρεση της αντίστοιχης ελάχιστης τιμής που μπορεί να λάβει ο αριθμός των φορτιστών ώστε να λειτουργεί κανονικά ο σταθμός. Για τον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού μπαταριών στο απόθεμα του σταθμού (N^*) κατασκευάσα ένα μοντέλο με πολύ μεγάλο απόθεμα σε φορτιστές και μπαταρίες και έτρεξα τη προσομοίωση.

Στο Reports του Arena φαίνεται ότι στο διάστημα των 100 ημερών έχουν χρησιμοποιηθεί οι 25 πρώτοι φορτιστές, ενώ από τον “CHARGER 26” και μετά κανείς (CHARGER 26 Number In = 0.0000, CHARGER 27 Number In = 0.0000,...).

Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι ο ελάχιστον αριθμών μπαταριών ώστε να ικανοποιείται η δοσμένη ζήτηση είναι:

$N^* = 25$ Μπαταρίες στο απόθεμα.

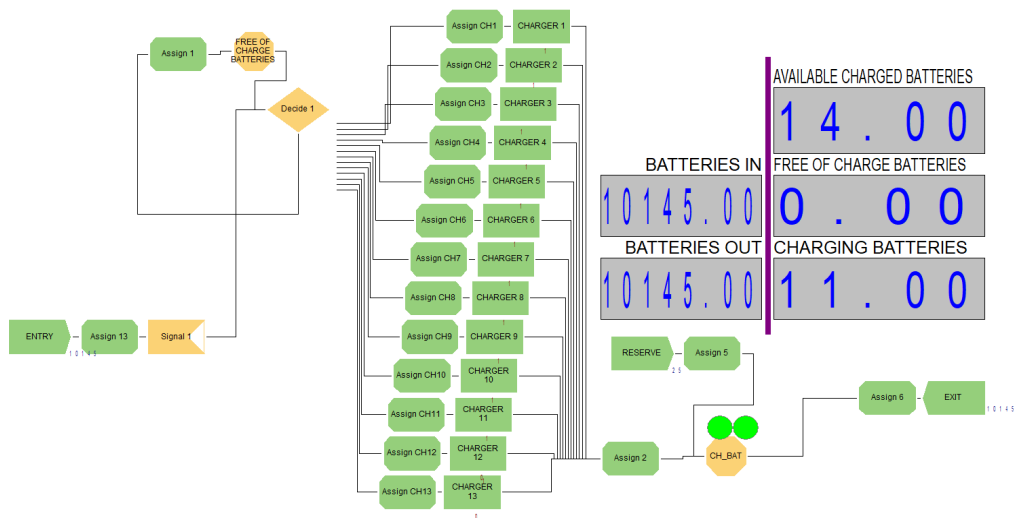
Επόμενο βήμα για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού φορτιστών/μπαταριών αποθέματος (Φ^*, N^*) , είναι να βρούμε τον ελάχιστο αριθμό φορτιστών που ικανοποιούν τις αφίξεις του μοντέλου για $N^* = 25$ Μπαταρίες.

Γνωρίζουμε ότι $\Phi^* \leq 25$, οπότε τα μοντέλα που δοκιμάστηκαν ήταν αρχικά για $\Phi=24, \Phi=23, \Phi=22$ κοκ. Οι δοκιμές τερματίστηκαν όταν αστόχησε πρώτη φορά το μοντέλο κι αυτό συνέβη στη περίπτωση $(\Phi, N)=(12, 25)$. Η ελάχιστη λοιπόν τιμή φορτιστών που τρέχει τη προσομοίωση είναι η:

$\Phi^* = 13$ Φορτιστές.

Ο βέλτιστος λοιπόν συνδυασμός φορτιστών/μπαταριών αποθέματος είναι:

$(\Phi^*, N^*) = (13, 25)$.



Εικόνα 4.1 Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος του μοντέλου κανονικής ζήτησης ύστερα από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Απεικονίζεται η προσομοίωση που ελαχιστοποιεί το απόθεμα των μπαταριών.

ARENA Simulation Results:

Identifier Value

CHARGER 1 Number In	976.00
CHARGER 2 Number In	965.00
CHARGER 3 Number In	955.00
CHARGER 4 Number In	944.00
CHARGER 5 Number In	924.00
CHARGER 6 Number In	893.00
CHARGER 7 Number In	865.00
CHARGER 8 Number In	806.00
CHARGER 9 Number In	748.00
CHARGER 10 Number In	677.00
CHARGER 11 Number In	576.00
CHARGER 12 Number In	464.00
CHARGER 13 Number In	352.00
CHARGER 1 Number Out	975.00
CHARGER 2 Number Out	964.00
CHARGER 3 Number Out	954.00
CHARGER 4 Number Out	943.00
CHARGER 5 Number Out	923.00
CHARGER 6 Number Out	892.00

CHARGER 7 Number Out 864.00
 CHARGER 8 Number Out 805.00
 CHARGER 9 Number Out 747.00
 CHARGER 10 Number Out 676.00
 CHARGER 11 Number Out 575.00
 CHARGER 12 Number Out 464.00
 CHARGER 13 Number Out 352.00

CHARGER 1 Accum VA Time 2239.5
 CHARGER 2 Accum VA Time 2211.7
 CHARGER 3 Accum VA Time 2193.8
 CHARGER 4 Accum VA Time 2172.8
 CHARGER 5 Accum VA Time 2120.2
 CHARGER 6 Accum VA Time 2053.7
 CHARGER 7 Accum VA Time 1989.3
 CHARGER 8 Accum VA Time 1853.7
 CHARGER 9 Accum VA Time 1717.9
 CHARGER 10 Accum VA Time 1550.5
 CHARGER 11 Accum VA Time 1323.5
 CHARGER 12 Accum VA Time 1072.8
 CHARGER 13 Accum VA Time 811.31

BATTERY.NumberIn 10170.
 BATTERY.NumberOut 10145.
 System.NumberOut 10145.

Identifier	Average	H/W	Mini	Max	Final Value
CHARGED BATTERY Value	15.055	.20283	.00000	25.000	14.000
BATTERY.WIP	25.000	(Insuf)	.00000	26.000	25.000
FREE OF CHARGE BATTERIES.Queue.NumberInQue	.22596	.06297	.00000	10.000	.00000
BATTERIES AVAILABLE.NumberInQueue	15.055	.20283	.00000	25.000	14.000

Identifier	Average	HW	Min	Max	Observations
CHARGER 1.VATimePerEntity	2.2970	(Corr)	2.0264	2.4869	975
CHARGER 2.VATimePerEntity	2.2943	.00556	2.0239	2.4970	964
CHARGER 3.VATimePerEntity	2.2996	.00811	2.0061	2.4915	954

CHARGER 4.VATimePerEntity	2.3041	.00690	2.0207	2.4958	943
CHARGER 5.VATimePerEntity	2.2971	.00923	2.0092	2.4956	923
CHARGER 6.VATimePerEntity	2.3023	.00695	2.0017	2.4890	892
CHARGER 7.VATimePerEntity	2.3025	.00813	2.0119	2.4944	864
CHARGER 8.VATimePerEntity	2.3028	.00816	2.0062	2.4897	805
CHARGER 9.VATimePerEntity	2.2998	.00736	2.0225	2.4926	747
CHARGER 10.VATimePerEntity	2.2936	.00866	2.0131	2.4957	676
CHARGER 11.VATimePerEntity	2.3018 (Corr)		2.0188	2.4974	575
CHARGER 12.VATimePerEntity	2.3121	.00828	2.0499	2.4917	464
CHARGER 13.VATimePerEntity	2.3048	.01020	2.0119	2.4898	352
CHARGER 1.TotalTimePerEntity	2.2970 (Corr)		2.0264	2.4869	975
CHARGER 2.TotalTimePerEntity	2.2943	.00556	2.0239	2.4970	964
CHARGER 3.TotalTimePerEntity	2.2996	.00811	2.0061	2.4915	954
CHARGER 4.TotalTimePerEntity	2.3041	.00690	2.0207	2.4958	943
CHARGER 5.TotalTimePerEntity	2.2971	.00923	2.0092	2.4956	923
CHARGER 6.TotalTimePerEntity	2.3023	.00695	2.0017	2.4890	892
CHARGER 7.TotalTimePerEntity	2.3025	.00813	2.0119	2.4944	864
CHARGER 8.TotalTimePerEntity	2.3028	.00816	2.0062	2.4897	805
CHARGER 9.TotalTimePerEntity	2.2998	.00736	2.0225	2.4926	747
CHARGER 10.TotalTimePerEntity	2.2936	.00866	2.0131	2.4957	676
CHARGER 11.TotalTimePerEntity	2.3018 (Corr)		2.0188	2.4974	575
CHARGER 12.TotalTimePerEntity	2.3121	.00828	2.0499	2.4917	464
CHARGER 13.TotalTimePerEntity	2.3048	.01020	2.0119	2.4898	352
BATTERY.VATime	2.2946 (Corr)	.00000	2.4974	10145	
BATTERY.NVATime	.00000	.00000	.00000	.00000	10145
BATTERY.WaitTime	3.6127	.09675	.00167	7.7284	10145
BATTERY.TranTime	.00000	.00000	.00000	.00000	10145
BATTERY.OtherTime	.00000	.00000	.00000	.00000	10145
BATTERY.TotalTime	5.9073	.09806	.00167	10.129	10145
FREE OF CHARGE BATTERIES.Queue.WaitingTime	.35561	.03950	3.4523E-4	1.6547	1525
BATTERIES AVAILABLE.WaitingTime	3.5593	.10284	.00167	7.7284	10145

4.2 Ελαχιστοποίηση Αριθμού Φορτιστών ($\Phi_{min}, N(\Phi_{min})$)

Η δεύτερη περίπτωση αφορά την ελαχιστοποίηση του αριθμού των φορτιστών του σταθμού και έπειτα την εύρεση της αντίστοιχης ελάχιστης τιμής μπαταριών στο απόθεμα ώστε να λειτουργεί κανονικά ο σταθμός.

Βάσει των δεδομένων της προσομοίωσης (ARENA: Expression Values TRIA(2,2.4,2.5)), η κάθε φόρτιση διαρκεί περίπου 2.4 ώρες, οπότε σε διάστημα 24 ωρών, ένας φορτιστής που λειτουργεί διαρκώς μπορεί να φορτίσει το πολύ περίπου:

$$24 \text{ (ώρες)} / 2.4 \text{ (ώρες/μπαταρία)} = 10 \text{ μπαταρίες.}$$

Εξετάστηκε πρώτα η περίπτωση των 9 φορτιστών, όμως όσο μεγάλο κι αν ήταν το απόθεμα των μπαταριών, το μοντέλο αστοχούσε.

Οι πρώτες προσομοιώσεις του σταθμού που αποτελείται από 10 φορτιστές ($\Phi=10$) δοκιμάστηκαν για περισσότερες από 100 μπαταρίες στο απόθεμα και τα μοντέλα αποκρίθηκαν καλά. Άρα για τα δεδομένα της προσομοίωσης, οι 10 φορτιστές είναι ο ελάχιστος αριθμός φορτιστών που μπορεί να έχει ο σταθμός ($\Phi_{\min}=10$).

Έπειτα από δοκιμές σε μοντέλα με 10 φορτιστές (Φ_{\min}) βρέθηκε ότι ο ελάχιστος μπαταριών στο απόθεμα ώστε να λειτουργεί η προσομοίωση, είναι $N(\Phi_{\min})= 64$ μπαταρίες στο απόθεμα. Προκύπτει λοιπόν ότι:

4.3 Ενδιάμεσες Τιμές

Η μελέτη της σχέσης φορτιστές/μπαταρίες αποθέματος μας έχει δώσει τις εξής λύσεις: $(\Phi, N) = (10, 64)$, $(\Phi, N) = (13, 25)$.

Αξίζει λοιπόν να υπολογίσουμε το ελάχιστο απόθεμα μπαταριών για σταθμούς που είναι εξοπλισμένοι με 11 και 12 φορτιστές ($(11, N(11))$ και $(12, N(12))$ αντίστοιχα).

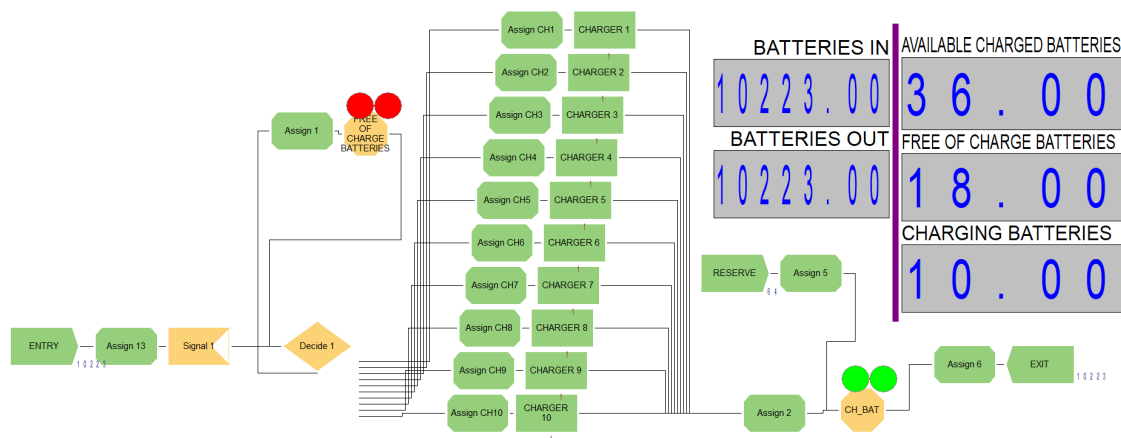
Για τη πρώτη περίπτωση βρέθηκε ότι χρειάζονται 32 μπαταρίες στο απόθεμα, ενώ για τη δεύτερη 28 μπαταρίες. Προκύπτουν δηλαδή οι εξής λύσεις:

$$(\Phi, N) = (11, 32)$$

και

$$(\Phi, N) = (12, 28).$$

$$(\Phi_{\min}, N(\Phi_{\min})) = (10, 64).$$



Εικόνα 4.2 Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος του μοντέλου κανονικής ζήτησης ύστερα από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης. Απεικονίζεται η προσομοίωση που ελαχιστοποιεί το απόθεμα των φορτιστών.

4.4 Βέλτιστη Λύση Σταθερής Κατανομής (N^*c, Ψ^*c)

Στα πλαίσια της μελέτης, εξετάστηκε και η περίπτωση μια σταθερής ζήτησης 100 μπαταριών την ημέρα και δοκιμάστηκε επίσης για 100 ημέρες ώστε να συγκριθούν τα αποτελέσματά της με αυτά της προηγούμενης προσομοίωσης όπου η ζήτηση ακολουθούσε κανονική κατανομή με μέση τιμή 13 λεπτά και τυπική απόκλιση 3.6 λεπτά. Και στις δύο περιπτώσεις οι αφίξεις είναι 100 μπαταρίες/ημέρα.

Βάσει των δεδομένων της προσομοίωσης (ARENA: Expression Values $TRIA(2,2.4,2.5)$), η κάθε φόρτιση διαρκεί περίπου 2.4 ώρες, οπότε σε διάστημα 24 ωρών, ένας φορτιστής που λειτουργεί διαρκώς μπορεί να φορτίσει το πολύ περίπου:

$$24 \text{ (ώρες)} / 2.4 \text{ (ώρες/μπαταρία)} = 10 \text{ μπαταρίες.}$$

Επίσης από τα δεδομένα έχουμε τον περιορισμό που αναφέρει ότι ο αριθμός των φορτιστών δε μπορεί να υπερβαίνει τον αριθμό μπαταριών του αποθέματος ($\Phi \leq N$). Αυτό συμβαίνει διότι αν οι απαιτούμενες φορτίσεις (Φ) είναι περισσότερες από τις μπαταρίες του αποθέματος (N), τότε το μοντέλο θα έχει αστοχήσει, αφού θα υπάρχει έστω κι ένας πελάτης που έχει παραδώσει την αφόρτιστη μπαταρία του και ο σταθμός δε διαθέτει άλλη μπαταρία στο απόθεμά του για να τον προμηθεύσει.

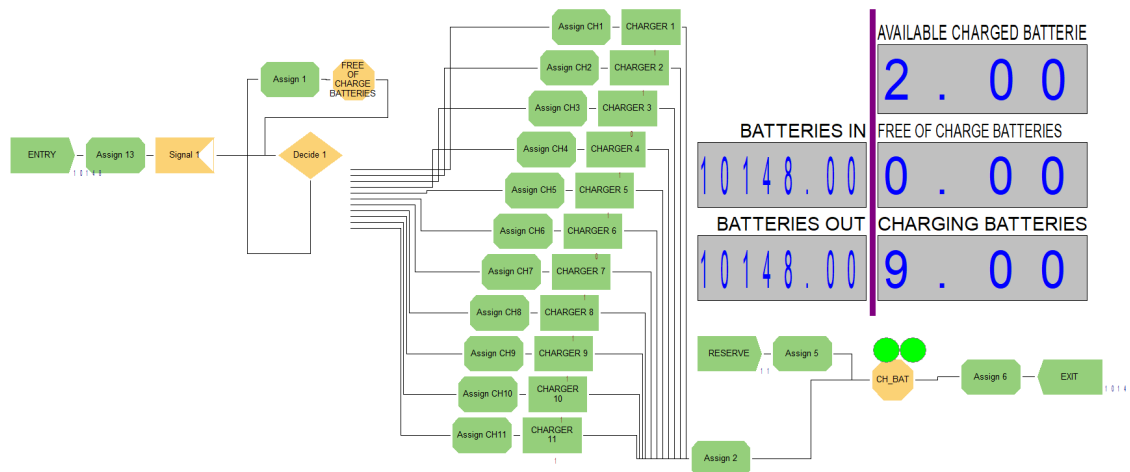
Εξετάζεται λοιπόν πρώτα η πιο οριακή περίπτωση, δηλαδή η:

$$(\Phi, N) = (10, 10).$$

Το μοντέλο που δοκιμάστηκε αν και λειτούργησε οριακά, δε θεωρείται ασφαλές.

Στη συνέχεια προσομοιώθηκε ένας σταθμός με 11 φορτιστές και 11 μπαταρίες στο απόθεμά του ($(\Phi, N) = (11, 11)$), ο οποίος αποκρίθηκε καλύτερα και στα πλαίσια της μελέτης, θεωρείται η βέλτιστη λύση του μοντέλου με τη σταθερή ζήτηση, δηλαδή:

$$(N^*c, \Psi^*c) = (11, 11).$$



Εικόνα 4.3 Στιγμιότυπο του περιβάλλοντος του μοντέλου, στο οποίο απεικονίζεται η βέλτιστη λύση για σταθερή ζήτηση, ύστερα από την ολοκλήρωση της προσομοίωσης.

ARENA Simulation Results:

Identifier	Value
CHARGER 1 Number In	988.00
CHARGER 2 Number In	983.00

CHARGER 3 Number In	977.00
CHARGER 4 Number In	967.00
CHARGER 5 Number In	958.00
CHARGER 6 Number In	948.00
CHARGER 7 Number In	930.00
CHARGER 8 Number In	916.00
CHARGER 9 Number In	883.00
CHARGER 10 Number In	840.00
CHARGER 11 Number In	758.00
CHARGER 1 Number Out	987.00
CHARGER 2 Number Out	982.00
CHARGER 3 Number Out	977.00
CHARGER 4 Number Out	966.00
CHARGER 5 Number Out	957.00
CHARGER 6 Number Out	948.00
CHARGER 7 Number Out	929.00
CHARGER 8 Number Out	915.00
CHARGER 9 Number Out	882.00
CHARGER 10 Number Out	839.00
CHARGER 11 Number Out	757.00

CHARGER 1 Accum VA Time	2273.6
CHARGER 2 Accum VA Time	2255.9
CHARGER 3 Accum VA Time	2252.2
CHARGER 4 Accum VA Time	2223.6
CHARGER 5 Accum VA Time	2196.1
CHARGER 6 Accum VA Time	2176.2
CHARGER 7 Accum VA Time	2140.6
CHARGER 8 Accum VA Time	2098.8
CHARGER 9 Accum VA Time	2026.8
CHARGER 10 Accum VA Time	1929.2
CHARGER 11 Accum VA Time	1741.2
BATTERY.NumberIn	10159.
BATTERY.NumberOut	10148.
System.NumberOut	10148.

Identifier	Average	H/W	Min	Max	Final Value
------------	---------	-----	-----	-----	-------------

CHARGED BATTERY Value	1.2811	.01282	.00000	11.000	2.0000
-----------------------	--------	--------	--------	--------	--------

BATTERY.WIP 11.000 (Insuf) .00000 12.000 11.000
 FREE OF CHARGE BATTERIES.Queue.NumberInQue .00000 (Insuf) .00000 .00000 .00000
 BATTERIES AVAILABLE.NumberInQueue 1.2811 .01282 .00000 11.000 2.0000

Identifier	Average	HW	Min	Max	Observations
CHARGER 1.VATimePerEntity	2.3036	.00794	2.0205	2.4898	987
CHARGER 2.VATimePerEntity	2.2972	.00696	2.0017	2.4890	982
CHARGER 3.VATimePerEntity	2.3052	.00707	2.0115	2.4926	977
CHARGER 4.VATimePerEntity	2.3019	.00665	2.0138	2.4930	966
CHARGER 5.VATimePerEntity	2.2947	.00699	2.0203	2.4956	957
CHARGER 6.VATimePerEntity	2.2955	.00754	2.0168	2.4897	948
CHARGER 7.VATimePerEntity	2.3042	.00567	2.0138	2.4939	929
CHARGER 8.VATimePerEntity	2.2937	.00843	2.0061	2.4898	915
CHARGER 9.VATimePerEntity	2.2980	.00778	2.0186	2.4957	882
CHARGER 10.VATimePerEntity	2.2994	.00663	2.0179	2.4941	839
CHARGER 11.VATimePerEntity	2.3001	.00874	2.0188	2.4916	757
CHARGER 1.TotalTimePerEntity	2.3036	.00794	2.0205	2.4898	987
CHARGER 2.TotalTimePerEntity	2.2972	.00696	2.0017	2.4890	982
CHARGER 3.TotalTimePerEntity	2.3052	.00707	2.0115	2.4926	977
CHARGER 4.TotalTimePerEntity	2.3019	.00665	2.0138	2.4930	966
CHARGER 5.TotalTimePerEntity	2.2947	.00699	2.0203	2.4956	957
CHARGER 6.TotalTimePerEntity	2.2955	.00754	2.0168	2.4897	948
CHARGER 7.TotalTimePerEntity	2.3042	.00567	2.0138	2.4939	929
CHARGER 8.TotalTimePerEntity	2.2937	.00843	2.0061	2.4898	915
CHARGER 9.TotalTimePerEntity	2.2980	.00778	2.0186	2.4957	882
CHARGER 10.TotalTimePerEntity	2.2994	.00663	2.0179	2.4941	839
CHARGER 11.TotalTimePerEntity	2.3001	.00874	2.0188	2.4916	757
BATTERY.VATime	2.2970 (Corr)	.00000	2.4957	10148	
BATTERY.NVATime	.00000	.00000	.00000	.00000	10148
BATTERY.WaitTime	.30295	.00284	.00167	2.3666	10148
BATTERY.TranTime	.00000	.00000	.00000	.00000	10148
BATTERY.OtherTime	.00000	.00000	.00000	.00000	10148
BATTERY.TotalTime	2.5999 (Corr)	.00167	2.8380	10148	
BATTERIES AVAILABLE.WaitingTime	.30295	.00284	.00167	2.3666	10148

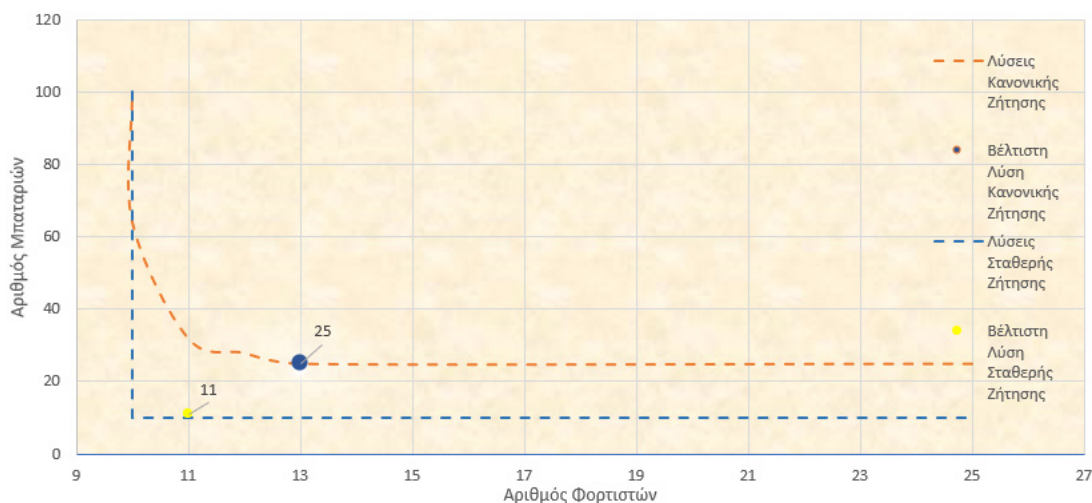
4.1 Σύγκριση Αποτελεσμάτων

Σύγκριση Αποτελεσμάτων Κανονικής – Σταθερής Κατανομής

Η σύγκριση αφορά τις βέλτιστες λύσεις των δύο προβλημάτων, δηλαδή των:

$$(\Phi^*, N^*) = (13, 25) \text{ και } (\Phi_c^*, N_c^*) = (11, 11).$$

Το μοντέλο της σταθερής ζήτησης χρειάζεται 15.38% λιγότερους φορτιστές ώστε να λειτουργήσει σε σχέση με αυτό της κανονικής. Επιπλέον το απόθεμά του σε μπαταρίες είναι κατά 56% μικρότερο.



Εικόνα 4.4 Το παραπάνω γράφημα απεικονίζει τις ελάχιστες ανάγκες του σταθμού σε μπαταρίες-φορτιστές, ώστε να λειτουργούν τα μοντέλα για διάστημα 100 ημερών, δεχόμενα 100 αφίξεις/ημέρα. Με μπλε χρώμα σημειώνεται η βέλτιστη λύση του μοντέλου κανονικής ζήτησης, ενώ με κίτρινο χρώμα αυτή της σταθερής.

Σύγκριση Βέλτιστης Λύσης Κανονικού Προβλήματος Με Τις Υπόλοιπες Εφικτές Λύσεις

Αριθμός Φορτιστών (Φ)	Φ<10	10	11	12	Φ>12
Αριθμός Μπαταριών (N)	-	64	32	28	25

Πίνακας 4.1 'Φορτιστές – ελάχιστα αποθεματικά μπαταριών'

Στον παραπάνω πίνακα φαίνεται η αντιστοιχία 'φορτιστών – ελάχιστων αποθεματικών μπαταριών' ώστε να λειτουργεί χωρίς πρόβλημα ο σταθμός.

Εξετάζοντας τα αποτελέσματα της προσομοίωσης διαπιστώνουμε ότι αν αφαιρέσουμε έναν φορτιστή από το μοντέλο της βέλτιστης λύσης του κανονικού προβλήματος, θα χρειαστεί να προσθέσουμε τρεις επιπλέον μπαταρίες προκειμένου να λειτουργεί κανονικά ο σταθμός, ενώ αν αφαιρέσουμε και δεύτερο φορτιστή, απαιτούνται σύνολο 32 μπαταρίες, δηλαδή 7 επιπλέον. Τέλος, ο σταθμός χρειάζεται 64 μπαταρίες για τη περίπτωση που λειτουργούν 10 φορτιστές, δηλαδή 39 περισσότερες από το βέλτιστο μοντέλο (13,25).

Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα εκφρασμένα ως ποσοστιαίες μεταβολές του αριθμού των μπαταριών κι έχουν ως εξής:

Αριθμός Φορτιστών	13	12	11	10
13	0	+12%	+28%	+156%
12	-10.7%	0	+10.29%	+128.6%
11	-21.88%	-12.5%	0	+100%
10	-60.94%	-56.25%	-50%	0

Πίνακας 4.2 Οι επί τοις 100 αυξήσεις και μειώσεις αναφέρονται στον αριθμό των απαιτούμενων μπαταριών στο απόθεμα (N).

Επίδραση διάρκειας ζωής μπαταρίας:

Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφερθεί ότι αν λάβουμε υπόψη τη διάρκεια ζωής των μπαταριών -που στη περίπτωση μας ισούται με 1.000 φορτίσεις, αφού τα μοντέλα που στήθηκαν βασίστηκαν σε δεδομένα της Gogoro- το απόθεμα σε μπαταρίες που χρειάζονται οι σταθμοί αλλάζει σημαντικά.

Πιο συγκεκριμένα, στη προσομοίωση που δέχεται 100 μπαταρίες την ημέρα και εξετάζεται για 100 ημέρες, γνωρίζουμε ότι έχουν συμβεί 10.000 φορτίσεις. Αυτό σημαίνει, ότι κατά τη διάρκεια των 100 αυτών ημερών, θα έχουν χρειαστεί περίπου:

$$N' = 10.000 \text{ (φορτίσεις)} / 1.000 \text{ (φορτίσεις/αντικατάσταση)}$$

$$N' = 10 \text{ επιπλέον μπαταρίες στο απόθεμα.}$$

Προκειμένου να λειτουργούν λοιπόν τα μοντέλα για 100 ημέρες, το απόθεμά τους σε μπαταρίες έχοντας λάβει υπόψη τη διάρκεια ζωής των μπαταριών τους, θα είναι:

για το μοντέλο με τη κανονική ζήτηση

$$(\Phi^{**}, N^{**}) = (\Phi^*, N^* + N') = (13, 25 + 10)$$

$$(\Phi^{**}, N^{**}) = (13, 35),$$

ενώ για το μοντέλο με τη σταθερή ζήτηση.

$$(\Phi c^{**}, N c^{**}) = (\Phi c^*, N c^* + N') = (11, 11 + 10)$$

$$(\Phi c^{**}, N c^{**}) = (11, 21).$$

5 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια της παρούσας μελέτης προσομοιώθηκαν και συγκρίθηκαν δύο μοντέλα σταθμών ανταλλαγής με ίδια ημερήσια ζήτηση, αλλά διαφορετική κατανομή ζήτησης μέσα στην ημέρα. Ο χρόνος μεταξύ δυο διαδοχικών αφίξεων του πρώτου μοντέλου ακολουθεί κανονική κατανομή και στήθηκε για να περιγράψει ένα αρκετά ρεαλιστικό προφίλ ζήτησης, ενώ του δεύτερου ακολουθεί σταθερή κατανομή και αναπαριστά τη περίπτωση της ιδανικής ζήτησης (αυτής δηλαδή με το χαμηλότερο κόστος). Συγκρίνοντας τις απαιτήσεις των δύο μοντέλων σε απόθεμα μπαταριών, παρατηρούμε ότι η κανονική κατανομή καθιστά το μοντέλο πολύ πιο ακριβό από εκείνο της σταθερής, αφού το μεγαλύτερο κόστος εγκατάστασης των σταθμών οφείλεται στο μεγάλο αριθμό αποθεματικών μπαταριών. Πιο συγκεκριμένα, για να ικανοποιηθεί η ζήτηση των 100 αφίξεων την ημέρα για διάστημα 100 ημερών, το μοντέλο με το σταθερό ρυθμό αφίξεων χρειάζεται 56% λιγότερες μπαταρίες και 15.4% λιγότερους φορτιστές από εκείνο που ανταποκρίνεται στη πραγματική ζήτηση. Βάσει αυτού του αποτελέσματος, αξίζει να διερευνηθεί η ιδέα της χαμηλότερης χρέωσης των πελατών

σε ώρες που η ζήτηση δεν είναι υψηλή. Αυτό θεωρητικά θα εξομαλύνει το προφίλ αφίξεων πελατών στο σύστημα και κατ' επέκταση, η μορφή της πραγματικής ζήτησης από κανονική, θα προσεγγίσει έστω και λίγο τη σταθερή κατανομή.

Οι σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών συνεχίζουν να αποτελούν τομέα έρευνας και ανάπτυξης στη βιομηχανία ηλεκτρικών οχημάτων. Εταιρείες και οργανισμοί διερευνούν διαφορετικά επιχειρηματικά μοντέλα, τεχνικά πρότυπα και επιχειρησιακές στρατηγικές για να καταστήσουν την ανταλλαγή μπαταριών πιο βιώσιμη και διαδεδομένη. Οι εξελίξεις στην τεχνολογία των μπαταριών, οι προσπάθειες τυποποίησης και η αυξανόμενη ζήτηση για ηλεκτρικά οχήματα, σε συνδυασμό με τη βέλτιστη χάραξη πολιτικής από πλευράς του δικτύου, ενδέχεται να συμβάλουν στην ευρεία μελλοντική υιοθέτηση των σταθμών ανταλλαγής μπαταριών ως σύστημα φόρτισης.

6 ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Q. Kang, J. Wang, M. Zhou, και A. C. Ammari, 'Centralized Charging Strategy and Scheduling Algorithm for Electric Vehicles Under a Battery Swapping Scenario', *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, τ. 17, τχ. 3, σσ. 659–669, Μαρτίου 2016, doi: 10.1109/TITS.2015.2487323.
- [2] 'A 1-s2.0-S2352152X2100654X-main.pdf'.
- [3] 'GeVeCo', *The Lost Annals of Transport*.
<https://lostannalsoftransport.wordpress.com/tag/geveco/> (ημερομηνία πρόσβασης 13 Ιούνιος 2023).
- [4] S. Essoyan, 'TECHNOLOGY : Something New Under the Hawaiian Sun: a Solar Car : Japan will import up to 2,000 SunRay zero-emission vehicles. Assembly will take place at a former sugar plantation town.', *Los Angeles Times*, 5 Απρίλιος 1995.
<https://www.latimes.com/archives/la-xpm-1995-04-05-mn-51138-story.html> (ημερομηνία πρόσβασης 13 Ιούνιος 2023).
- [5] 'The Tour de Sol Reports, 2004'. https://www.autoauditorium.com/TdS_Reports_2004/ (ημερομηνία πρόσβασης 13 Ιούνιος 2023).
- [6] 'Business & Innovation | The Jerusalem Post'. <https://www.jpost.com/Business-and-Innovation> (ημερομηνία πρόσβασης 13 Ιούνιος 2023).
- [7] I. Kershner, 'Israeli Venture Meant to Serve Electric Cars Is Ending Its Run', *The New York Times*, 26 Μάιος 2013. Ημερομηνία πρόσβασης: 13 Ιούνιος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο:
<https://www.nytimes.com/2013/05/27/business/global/israeli-electric-car-company-files-for-liquidation.html>
- [8] 'Could battery swapping replace EV charging?', *Autocar*.
<https://www.autocar.co.uk/car-news/business-tech%2C-development-and-manufacturing/could-battery-swapping-replace-ev-charging> (ημερομηνία πρόσβασης 13 Ιούνιος 2023).
- [9] 'NIO Power | NIO'. <https://www.nio.com/nio-power> (ημερομηνία πρόσβασης 15 Ιούνιος 2023).
- [10] Gogoro, 'Gogoro Led Taiwan in Electric Scooter Sales in 2022 For the Seventh Straight Year and Gogoro Network Battery Swapping Powered 90-percent of Taiwan's Electric Scooters'. <https://www.prnewswire.com/news-releases/gogoro-led-taiwan-in-electric-scooter-sales-in-2022-for-the-seventh-straight-year-and-gogoro-network-battery-swapping-powered-90-percent-of-taiwans-electric-scooters-301714461.html> (ημερομηνία πρόσβασης 13 Ιούνιος 2023).
- [11] C. Shu, 'Gogoro partners with India's Hero MotoCorp, one of the world's largest two-wheel vehicle makers', *TechCrunch*, 21 Απρίλιος 2021.

- <https://techcrunch.com/2021/04/21/gogoro-partners-with-indias-hero-motocorp-one-of-the-worlds-largest-two-wheel-vehicle-makers/> (ημερομηνία πρόσβασης 13 Ιούνιος 2023).
- [12] ‘Battery swapping’, *Wikipedia*. 27 Φεβρουάριος 2023. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Ιούνιος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Battery_swapping&oldid=1141991470
- [13] ‘Electric-Car Battery Swapping, Slovakian Style (Well, Vans, Anyway)’. https://www.greencarreports.com/news/1083945_electric-car-battery-swapping-slovakian-style-well-vans-anyway (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [14] B. P. P. C. Limited, ‘PTT’s head discusses future tactics’, *Bangkok Post*. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Ιούνιος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://www.bangkokpost.com/business/1980283/ptts-head-discusses-future-tactics>
- [15] M. Chen και G. A. Rincon-Mora, ‘Accurate, Compact, and Power-Efficient Li-Ion Battery Charger Circuit’, *IEEE Trans. Circuits Syst. II Express Briefs*, τ. 53, τχ. 11, σσ. 1180–1184, Νοεμβρίου 2006, doi: 10.1109/TCSII.2006.883220.
- [16] Jiann-Jong Chen, Fong-Cheng Yang, Chien-Chih Lai, Yuh-Shyan Hwang, και Ren-Guey Lee, ‘A High-Efficiency Multimode Li-Ion Battery Charger With Variable Current Source and Controlling Previous-Stage Supply Voltage’, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, τ. 56, τχ. 7, σσ. 2469–2478, Ιουλίου 2009, doi: 10.1109/TIE.2009.2018435.
- [17] Z.-J. M. Shen, B. Feng, C. Mao, και L. Ran, ‘Optimization models for electric vehicle service operations: A literature review’, *Transp. Res. Part B Methodol.*, τ. 128, σσ. 462–477, Οκτωβρίου 2019, doi: 10.1016/j.trb.2019.08.006.
- [18] C. Wu, X. Lin, Q. Sui, Z. Wang, Z. Feng, και Z. Li, ‘Two-stage self-scheduling of battery swapping station in day-ahead energy and frequency regulation markets’, *Appl. Energy*, τ. 283, σ. 116285, Φεβρουαρίου 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116285.
- [19] W. Zhan, Z. Wang, L. Zhang, P. Liu, D. Cui, και D. G. Dorrell, ‘A review of siting, sizing, optimal scheduling, and cost-benefit analysis for battery swapping stations’, *Energy*, τ. 258, σ. 124723, Νοεμβρίου 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124723.
- [20] E. V. Info, ‘Battery Swapping Vs EV Charging Stations- Cost Effective?’, *E-Vehicleinfo*, 10 Μάιος 2022. <https://e-vehicleinfo.com/battery-swapping-vs-ev-charging-stations/> (ημερομηνία πρόσβασης 15 Ιούνιος 2023).
- [21] P. You κ.ά., ‘Scheduling of EV Battery Swapping–Part II: Distributed Solutions’, *IEEE Trans. Control Netw. Syst.*, τ. 5, τχ. 4, σσ. 1920–1930, Δεκεμβρίου 2018, doi: 10.1109/TCNS.2017.2774012.
- [22] M. Zeng, Y. Pan, D. Zhang, Z. Lu, και Y. Li, ‘Data-Driven Location Selection for Battery Swapping Stations’, *IEEE Access*, τ. 7, σσ. 133760–133771, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2941901.
- [23] G. J. Osório, M. Shafie-khah, P. D. L. Coimbra, M. Lotfi, και J. P. S. Catalão, ‘Distribution System Operation with Electric Vehicle Charging Schedules and Renewable Energy Resources’, *Energies*, τ. 11, τχ. 11, Art. τχ. 11, Νοεμβρίου 2018, doi: 10.3390/en11113117.
- [24] I. Baghdadi, O. Briat, J.-Y. Delétage, P. Gyan, και J.-M. Vinassa, ‘Lithium battery aging model based on Dakin’s degradation approach’, *J. Power Sources*, τ. 325, σσ. 273–285, Σεπτεμβρίου 2016, doi: 10.1016/j.jpowsour.2016.06.036.
- [25] M. Souaihia, B. Belmadani, και R. Taleb, ‘State of charge estimation based on adaptive algorithm for Lead-Acid battery’, *Indones. J. Electr. Eng. Inform. IJEEI*, τ. 7, τχ. 2, σσ. 229–240, Μαΐου 2019, doi: 10.11591/ijeei.v7i2.1002.
- [26] R. Ugle, Y. Li, και A. Dhingra, ‘Equalization integrated online monitoring of health map and worthiness of replacement for battery pack of electric vehicles’, *J. Power Sources*, τ. 223, σσ. 293–305, Φεβρουαρίου 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.09.083.

- [27] Y.-H. Chien, I.-Y. L. Hsieh, και T.-H. Chang, 'Beyond personal vehicles: How electrifying scooters will help achieve climate mitigation goals in Taiwan', *Energy Strategy Rev.*, τ. 45, σ. 101056, Ιανουαρίου 2023, doi: 10.1016/j.esr.2023.101056.
- [28] 'How Gogoro in Taiwan Built an EV Battery Swap Network | Meet Global'. <https://meet-global.bnext.com.tw/articles/view/47488> (ημερομηνία πρόσβασης 15 Ιούνιος 2023).
- [29] L. Whitaker, 'Frost & Sullivan Recognizes Gogoro with the 2020 Global Company of the Year Award for the Swappable Battery Electric Scooter Market', *Frost & Sullivan*, 16 Δεκέμβριος 2020. <https://www.frost.com/news/press-releases/frost-sullivan-recognizes-gogoro-with-the-2020-global-company-of-the-year-award-for-the-swappable-battery-electric-scooter-market/> (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [30] 'Gogoro', *Wikipedia*. 18 Απρίλιος 2023. Ημερομηνία πρόσβασης: 14 Ιούνιος 2023. [Έκδοση σε ψηφιακή μορφή]. Διαθέσιμο στο: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Gogoro&oldid=1150580298>
- [31] 'Gogoro 2 Series Plus'. <https://ca.e-scooter.co/gogoro-2-series-plus/> (ημερομηνία πρόσβασης 15 Ιούνιος 2023).
- [32] M. Toll, 'Gogoro's battery-swapping electric scooters begin operations in Singapore', *Electrek*, 23 Μάρτιος 2023. <https://electrek.co/2023/03/23/gogoro-battery-swapping-electric-scooters-singapore/> (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [33] C. Mircea, 'Gogoro Plans to Launch 80 Battery Swapping Stations in China by the End of This Year', *autoevolution*, 11 Οκτώβριος 2021. <https://www.autoevolution.com/news/gogoro-plans-to-launch-80-battery-swapping-stations-in-china-by-the-end-of-this-year-171414.html> (ημερομηνία πρόσβασης 15 Ιούνιος 2023).
- [34] M. Toll, 'Gogoro expands electric scooter dominance with yet another vehicle partnership', *Electrek*, 29 Νοέμβριος 2020. <https://electrek.co/2020/11/29/gogoro-expands-electric-scooter-dominance-with-yet-another-vehicle-partnership/> (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [35] T. News, 'Taiwan's Gogoro Network powered through innovative solutions | Taiwan News | 2021-02-12 15:30:00', *Taiwan News*, 12 Φεβρουάριος 2021. <https://www.taiwannews.com.tw/en/news/4126170> (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [36] M. Toll, 'Massive power outage in Taiwan sends gas stations offline, but Gogoro's electric scooter battery stations powered themselves', *Electrek*, 4 Μάρτιος 2022. <https://electrek.co/2022/03/04/massive-power-outage-in-taiwan-sends-gas-stations-offline-but-gogoros-electric-scooter-battery-stations-powered-themselves/> (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [37] 'Super GoStation Coverage Expansion', *Gogoro*, 15 Ιανουάριος 2020. <https://www.gogoro.com/news/gogoro-network-to-expand-super-gostation-coverage/> (ημερομηνία πρόσβασης 15 Ιούνιος 2023).
- [38] 'Why Aren't Electric Scooters Taking Off in Taiwan?', *VR World*, 22 Φεβρουάριος 2015. <http://vrworld.com/2015/02/22/arent-electric-scooters-taking-off-taiwan/> (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [39] 經濟部工業局電動機車產業推動計畫委辦, '電動車輛產業網網站--中文首頁', 經濟部工業局電動機車產業推動計畫委辦, 15 Απρίλιος 2021. <https://www.lev.org.tw/subsidy/carSell.aspx> (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [40] 'Gogoro Smartscooter sales hit a new high this month - Taipei Times', 29 Δεκέμβριος 2015. <https://www.taipeitimes.com/News/biz/archives/2015/12/29/2003635897> (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).

- [41] 'Taiwan's Gogoro Network powered through innovative solutions | Taiwan News | 2021-02-12 15:30:00'. <https://www.taiwannews.com.tw/en/news/4126170> (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [42] J. Yan, M. Menghwar, E. Asghar, M. Kumar Panjwani, και Y. Liu, 'Real-time energy management for a smart-community microgrid with battery swapping and renewables', *Appl. Energy*, τ. 238, σσ. 180–194, Μαρτίου 2019, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.12.078.
- [43] 'Arena Simulation Newsletter and Blog'. <https://info.arenasimulation.com/blog> (ημερομηνία πρόσβασης 14 Ιούνιος 2023).
- [44] K. Sepetanc και H. Pandzic, 'A Cluster-Based Operation Model of Aggregated Battery Swapping Stations', *IEEE Trans. Power Syst.*, τ. 35, τχ. 1, σσ. 249–260, Ιανουαρίου 2020, doi: 10.1109/TPWRS.2019.2934017.