



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ &
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΓΙΑ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΝΤΑΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ

Επιβλέπων: Δρ. ΓΑΥΡΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

Δρ. Ηλεκτρολόγος Μηχανικός, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΚΟΖΑΝΗ/02/2023



HELLENIC DEMOCRACY
UNIVERSITY OF WESTERN MACEDONIA

FACULTY OF ENGINEERING
DEPARTMENT OF ELECTRICAL &
COMPUTER ENGINEERING



HYDROGEN AS A FUEL FOR ELECTRIC VEHICLES

THESIS

DIMITRIS MANTAS

SUPERVISOR: Dr, Konstantinos Gavros

Dr. Electrical Engineer, Associate Professor

Kozani/02/2023



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
& ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΔΗΛΩΣΗ ΜΗ ΛΟΓΟΚΛΟΠΗΣ ΚΑΙ ΑΝΑΛΗΨΗΣ ΠΡΟΣΩΠΙΚΗΣ ΕΥΘΥΝΗΣ

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα Διπλωματική Εργασία με τίτλο *“ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΓΙΑ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΟΧΗΜΑΤΑ”* καθώς και τα ηλεκτρονικά αρχεία και πηγαίοι κώδικες που αναπτύχθηκαν ή τροποποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας και αναφέρονται ρητώς μέσα στο κείμενο που συνοδεύουν, και η οποία έχει εκπονηθεί στο Τμήμα Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Πανεπιστημίου Δυτικής Μακεδονίας, υπό την επίβλεψη του μέλους του Τμήματος κ. Δρ. ΓΑΥΡΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον. Τα σημεία όπου έχω χρησιμοποιήσει ιδέες, κείμενο, αρχεία ή / και πηγές άλλων συγγραφέων, αναφέρονται ευδιάκριτα στο κείμενο με την κατάλληλη παραπομπή και η σχετική αναφορά περιλαμβάνεται στο τμήμα των βιβλιογραφικών αναφορών με πλήρη περιγραφή. 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 μόνο.

Copyright (C) ΜΑΝΤΑΣ ΔΗΜΗΤΡΗΣ, ΓΑΥΡΟΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ , 2023 , ΚΟΖΑΝΗ

Υπογραφή Φοιτητή:

Η εργασία αυτή έχει ως θέμα τη μελέτη της χρήση του υδρογόνου στα ηλεκτρικά οχήματα. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της παρούσας εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα εναλλακτικά συστήματα κίνησης. Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια σύντομη ιστορική αναδρομή, γίνεται αναφορά στο περιβάλλον καθώς και στα οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύεται το υδρογόνο ως πηγή ενέργειας, και κυρίως το περιεχόμενό του και η προέλευσή του. Το τέταρτο κεφάλαιο έχει ως θέμα διεθνή πρόοδος των κυψελών καυσίμου και υποδομών. Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται σύγκριση πραγματικών αυτοκινήτων, γίνεται αναφορά στην εξέλιξη των αυτοκινήτων και στις υποδομές.

Το πέμπτο κεφάλαιο έχει ως θέμα τις δραστηριότητες των αυτοκινητοβιομηχανιών. Γίνεται αναφορά στις αυτοκινητοβιομηχανίες εν γένει και έπειτα συγκεκριμένα σε Ευρώπη και Καλιφόρνια. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η τεχνολογία οχημάτων και η σύγκρισή τους με τα BEV τα PHEV και τα ICE.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα μοντέλα θέσης ανεφοδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση θέσης, τα μοντέλα με βάση το σημείο και τη ροή, οι στόχοι του μοντέλου και οι παραδοχές/περιορισμοί.

Το όγδοο κεφάλαιο έχει ως θέμα την εκτίμηση της ζήτησης ανεφοδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η συμπεριφορά ανεφοδιασμού, η ιδιοκτησία οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων και οι προσεγγίσεις εκτίμησης της ζήτησης.

Τέλος, στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάζονται ορισμένα επιλεγμένα μοντέλα. Αυτά είναι το Μοντέλο μέγιστης κάλυψης, το p-median & FRL καθώς και τα Μοντέλα πολλαπλών στόχων.

Λέξεις Κλειδιά: *Υδρογόνο – Ηλεκτρικά οχήματα – Συστήματα κίνησης – Κυψέλες καυσίμων – Τεχνολογία οχημάτων – Μοντέλα θέσης ανεφοδιασμού*

Abstract

This paper is about the study of the use of hydrogen in electric vehicles. The first chapter is the introduction of this work. The second chapter presents the alternative drive systems. In this chapter a brief history is given, the environment is mentioned as well as hydrogen fuel cell vehicles.

In the third chapter, hydrogen as an energy source is discussed, especially its content and origin. The fourth chapter is about international progress of fuel cells and infrastructure. In this chapter, a comparison of real cars is made, the development of cars and infrastructure is discussed.

The fifth chapter is on the topic of activities of automobile companies. Reference is made to the automobile industries in general and then specifically to Europe and California. The sixth chapter presents the vehicle technology and the comparison with BEVs the PHEVs and ICEs.

In chapter seven the refueling location models are presented. More specifically, the approaches for location modeling, point and flow-based models, model objectives and assumptions/limitations are presented.

Chapter eight is devoted to the estimation of supply demand. In particular, refueling behavior, alternative fuel vehicle ownership and demand estimation approaches are presented.

Finally, chapter nine presents some selected models. These are the Maximum Coverage Model, the p-median & FRL as well as the Multiple Target Models.

Keywords: *Hydrogen - Electric vehicles - Drive systems - Fuel cells - Vehicle technology - Refuelling station models*

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους ανθρώπους που γνώρισα στη μέχρι τώρα πορεία της ζωής μου, κάθε ένας από αυτούς έβαλε ή έβγαλε ένα λιθαράκι άλλοτε μεγάλο άλλοτε μικρο στο να είμαι Αυτός που είμαι σήμερα.

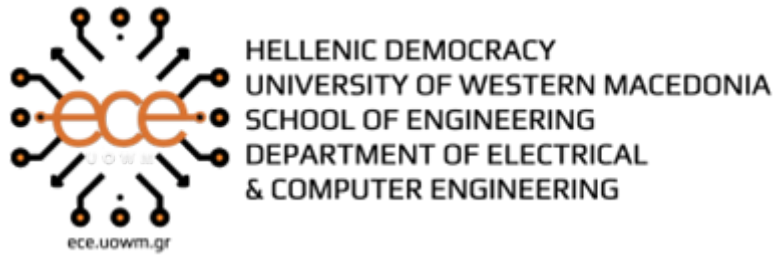
Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	8
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	10
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	12
ΠΡΟΛΟΓΟΣ	14
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΙΝΗΣΗΣ	16
2.1 Ιστορική αναδρομή	16
2.2 Περιβάλλον	18
2.3 Οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΠΗΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	24
3.1 Περιεχόμενο	24
3.2 Προέλευση	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΔΙΕΘΝΗΣ ΠΡΟΟΔΟΣ ΤΩΝ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΚΑΙ ΥΠΟΔΟΜΩΝ	28
4.1 Σύγκριση πραγματικών αυτοκινήτων	28
4.2 Εξέλιξη	29
4.3 Υποδομή	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΒΙΟΜΗΧΑΝΙΩΝ	36
5.1 Αυτοκινητοβιομηχανίες	36
5.2 Ευρώπη	39
5.3 Καλιφόρνια	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΑ BEV ΤΑ PHEV ΚΑΙ ΤΑ ICE	43
6.1 BEV	43
6.2 PHEV	44
6.3 HEV	45
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΜΟΝΤΕΛΑ ΘΕΣΗΣ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ	47
7.1 Προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση θέσης	47
7.2 Μοντέλα με βάση το σημείο και τη ροή	48

7.3 Στόχοι του μοντέλου και παραδοχές/περιορισμοί	50
7.3.1 Στόχοι	50
7.3.2. Παραδοχές / περιορισμοί	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ	54
8.1 Συμπεριφορά ανεφοδιασμού	54
8.2 Ιδιοκτησία οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων	56
8.3 Προσεγγίσεις εκτίμησης της ζήτησης	57
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΕΠΙΛΕΓΜΕΝΑ ΜΟΝΤΕΛΑ	59
9.1 Μοντέλο μέγιστης κάλυψης	60
9.2 p-median & FRLM	63
9.2 Μοντέλα πολλαπλών στόχων	68
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	74

Κατάλογος Εικόνων

ΕΙΚΟΝΑ 1: LOGO ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΚΗ. ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ ΕΣΕ.ΥΟΩΜ.GR	12
ΕΙΚΟΝΑ 2: ΗΛΙΑΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΦΛΟΡΙΝΤΑ (ΠΗΓΗ: DING, PRASAD & LIE, 2017).	17
ΕΙΚΟΝΑ 3: ΕΙΣΡΟΕΣ ΚΑΙ ΕΚΡΟΕΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	19
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΕΝΑ ΟΧΗΜΑ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (ΠΗΓΗ: HORDESKI, 2020).	20
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΣΕ ΜΙΑ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.	21
ΕΙΚΟΝΑ 6: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΟΥ (ΠΗΓΗ: AHMED ET AL., 2016).	22
ΕΙΚΟΝΑ 7: ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ (ΠΗΓΗ: AHMED ET AL., 2016).	23
ΕΙΚΟΝΑ 8: ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΤΕΥΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.	26
ΕΙΚΟΝΑ 9: ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (ΠΗΓΗ: AHMADI & KHOSHNEVISAN, 2022).	27
ΕΙΚΟΝΑ 10: ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΟΛΟ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ (ΠΗΓΗ: STAFFELL ET AL., 2019).	31
ΕΙΚΟΝΑ 11: ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΚΑΙ ΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΑ (ΠΗΓΗ: EHRET & BONHOFF, 2015).	33
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΤΗΣ ΒΙΕΝΝΗΣ - ΜΠΡΟΣΤΙΝΗ ΚΑΙ ΠΙΣΩ ΠΛΕΥΡΑ -, ΧΑΡΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ, ΜΑΙΟΣ 2014 (ΠΗΓΗ: IORDACHE, SCHITEA & IORDACHE, 2017).	33
ΕΙΚΟΝΑ 13: ΧΑΡΤΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ (ΠΗΓΗ: FELGENHAUER ET AL., 2016).	34
ΕΙΚΟΝΑ 14: ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗΝ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑ - ΒΟΡΕΙΑ ΚΑΙ ΝΟΤΙΑ (ΠΗΓΗ: FELGENHAUER ET AL., 2016).	34
ΕΙΚΟΝΑ 15: ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗΝ ΙΑΠΩΝΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΝΟΤΙΑ ΚΟΡΕΑ (ΠΗΓΗ: KHAN, YAMAMOTO & SATO, 2020).	35
ΕΙΚΟΝΑ 16: GM ELECTROVAN ΜΕ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ UNION CARBIDE (ΠΗΓΗ: TANÇ ET AL., 2019).	37



ΕΙΚΟΝΑ 1: LOGO ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΣΤΗΝ ΑΓΓΛΙΚΗ. ΙΣΤΟΣΕΛΙΔΑ ECE.UOWM.GR

Πρόλογος

Αυτή η έρευνα διενεργήθηκε παράλληλα με το εργασιακό πλαίσιο του συγγραφέα. Περιέχει ένα πολύ μικρό θεωρητικό μέρος από τη φάση της εξέλιξης γνωστής αυτοκινητοβιομηχανίας, για την υλοποίηση Ηλεκτρικών Οχημάτων με κυψέλες Υδρογόνου και πολύ σύντομα μέσω μαζικής μεταφοράς με την ίδια μέθοδο και λειτουργία.

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

Η εργασία αυτή έχει ως θέμα τη μελέτη της χρήση του υδρογόνου στα ηλεκτρικά οχήματα. Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicle - FCEV) κινούνται με υδρογόνο. Είναι πιο αποδοτικά από τα συμβατικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης και δεν παράγουν εκπομπές καυσαερίων - εκπέμπουν μόνο υδρατμούς και θερμό αέρα.

Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου και η υποδομή υδρογόνου για την τροφοδοσία τους βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο υλοποίησης. Το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ ηγείται των ερευνητικών προσπαθειών για να καταστήσει τα οχήματα που κινούνται με υδρογόνο μια προσιτή, φιλική προς το περιβάλλον και ασφαλή επιλογή μεταφοράς.

Το υδρογόνο θεωρείται εναλλακτικό καύσιμο σύμφωνα με τον νόμο περί ενεργειακής πολιτικής του 1992 και πληροί τις προϋποθέσεις για φορολογικές πιστώσεις για οχήματα εναλλακτικών καυσίμων. Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιούν ένα σύστημα κίνησης παρόμοιο με αυτό των ηλεκτρικών οχημάτων, όπου η ενέργεια που είναι αποθηκευμένη ως υδρογόνο μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου.

Σε αντίθεση με τα συμβατικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, τα οχήματα αυτά δεν παράγουν επιβλαβείς εκπομπές καυσαερίων. Τα FCEV τροφοδοτούνται με καθαρό αέριο υδρογόνο που αποθηκεύεται σε δεξαμενή του οχήματος. Παρόμοια με τα συμβατικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, μπορούν να ανεφοδιαστούν σε λιγότερο από 4 λεπτά και έχουν αυτονομία άνω των 500 χιλιομέτρων.

Τα FCEV είναι εξοπλισμένα με προηγμένες τεχνολογίες για την αύξηση της αποδοτικότητας, όπως τα συστήματα αναγεννητικής πέδησης που ανακτούν την ενέργεια που χάνεται κατά την πέδηση και την αποθηκεύουν σε μια μπαταρία.

Οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες προσφέρουν περιορισμένο αλλά αυξανόμενο αριθμό οχημάτων FCEV παραγωγής στο κοινό σε ορισμένες αγορές, σε συνδυασμό με τις αναπτυσσόμενες υποδομές που μπορούν να υποστηρίξουν.

Στην εργασία αυτή θα αναλυθούν όλα τα παραπάνω ζητήματα, ενώ θα γίνει και σύγκριση με συμβατικές μηχανές εσωτερικής καύσης και καθαρά ηλεκτρικά οχήματα.

Κεφάλαιο 2: Εναλλακτικά συστήματα κίνησης

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια ιστορική αναδρομή για τα ηλεκτρικά οχήματα. Θα γίνει μια αναφορά στο περιβάλλον και πώς είναι η κατάστασή του στις μέρες μας και, τέλος, θα αναλυθούν τα οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου.

2.1 Ιστορική αναδρομή

Τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα αναπτύχθηκαν για να αποφευχθεί ο θόρυβος και η μόλυνση των βενζινοκίνητων οχημάτων. Από την εμπορική διάθεση του πρώτου ηλεκτρικού αυτοκινήτου στα τέλη του 19ου αιώνα, οι μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν επενδύσει πολλά χρήματα για την ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον οχημάτων (Ahmadi & Khoshnevisan, 2022).

Σε αντίθεση με τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) της εποχής, αυτά τα πρώτα ηλεκτρικά οχήματα ήταν σχετικά αξιόπιστα, "καθαρά" και με άμεση εκκίνηση. Το ηλεκτρικό όχημα ήταν πολλά υποσχόμενο, ωστόσο η ανάπτυξη μιας νέας αυτοεκκίνησης για τον κινητήρα εσωτερικής καύσης και η χαμηλή τιμή του πετρελαίου άλλαξαν αυτή την εικόνα. Επιπλέον, η χαμηλή ειδική ενέργεια μιας μπαταρίας μολύβδου οξέος και ο χρόνος που απαιτείται για τη φόρτιση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων καθιστούν τα οχήματα εσωτερικής καύσης πιο ελκυστικά (Ding, Prasad & Lie, 2017).

Ο αποφασιστικός παράγοντας για την ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων ήταν το περιβαλλοντικό ζήτημα. Ένας κανονισμός της πολιτείας της Καλιφόρνια, με την εισαγωγή του προγράμματος οχημάτων χαμηλών εκπομπών, ενθάρρυνε την παραγωγή ηλεκτρικών οχημάτων. Ήταν με το πρόγραμμα Zero Emission Vehicle (ZEV) όταν ξεκίνησε η ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου, των μπαταριών και των υβριδικών ηλεκτρικών οχημάτων. Όλα αυτά τα νομοθετικά προγράμματα της Καλιφόρνιας έχουν έναν κύριο στόχο και αυτός είναι η ύπαρξη μιας υγιέστερης ατμόσφαιρας και η μείωση των εκπομπών που επηρεάζουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου κατά 80% έως το 2050 (Ahmadi & Khoshnevisan, 2022).

Σήμερα, υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλεκτρικών οχημάτων: ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρίες, υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα, ηλεκτρικά οχήματα με καύσιμα, ηλεκτρικά οχήματα που χρησιμοποιούν γραμμές τροφοδοσίας, ηλιακά οχήματα (Εικόνα 2) και ηλεκτρικά οχήματα που χρησιμοποιούν σφονδύλους ή υπερπυκνωτές (Ding, Prasad & Lie, 2017).



ΕΙΚΟΝΑ 2: ΗΛΙΑΚΑ ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΜΕΝΟ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟ ΑΠΟ ΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΚΕΝΤΡΙΚΗΣ ΦΛΟΡΙΝΤΑ (ΠΗΓΗ: DING, PRASAD & LIE, 2017).

Ιστορία των οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου

Η πρώτη κυψέλη καυσίμου, με την ονομασία "Grove Gas Battery", δημιουργήθηκε από τον Sir William Rober Grove στην Ουαλία, μέχρι το 1843. Το 1959, ο Francis Bacon ανέπτυξε μια κυψέλη καυσίμου με ισχύ εξόδου 5 kW. Αλλά ήταν στη δεκαετία του 1960, όταν η General Electric είχε μεγάλη ανάπτυξη με την κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane - PEM). Η NASA έγινε η πρώτη που τις χρησιμοποίησε, χρησιμοποίησε τις κυψέλες καυσίμου με το πρόγραμμα Gemini και το πρόγραμμα Apollo. Μετά από αυτό, οι αυτοκινητοβιομηχανίες άρχισαν να εργάζονται με κυψέλες καυσίμου σε οχήματα. Το Chevrolet Electrován ήταν το πρώτο οδικό όχημα με κυψέλες καυσίμου, αναπτύχθηκε το 1966 από τη General Motors. Η διακήρυξη του George W. Bush για μια πρωτοβουλία για το καύσιμο υδρογόνου και η ανακοίνωση του Arnold Schwarzenegger για έναν αυτοκινητόδρομο υδρογόνου είχαν καλό αντίκτυπο στον τομέα (Tanç, Arat, Baltacioğlu & Aydın, 2019).

Τα οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου έχουν εξελιχθεί πολύ, σήμερα μπορούν να διανύσουν περίπου 500 έως 800 χιλιόμετρα με πλήρες ρεζερβουάρ. Η ανάπτυξη αυτών των οχημάτων αυξάνεται, αλλά έχουν ακόμη τεράστιο δρόμο για να βελτιωθούν.

Πρέπει να ειπωθεί ότι στην πραγματικότητα τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου (fuel cell electrical vehicles - FCEV) είναι πιο υποσχόμενα σε εφαρμογές αστικών λεωφορείων για δύο λόγους: η προμήθεια υδρογόνου δεν αποτελεί πρόβλημα, επειδή τα λεωφορεία ανεφοδιάζονται σε ένα σημείο, επομένως απαιτείται μόνο ένα σημείο ανεφοδιασμού, και ο δεύτερος λόγος είναι η τιμή των κυψελών καυσίμου. Οι κυψέλες καυσίμου εξακολουθούν να είναι ακριβές, οπότε είναι πιο λογικό να αγοράζονται για

οχήματα που χρησιμοποιούνται για πολλές ώρες κάθε μέρα (Pollet, Kocho & Staffell, 2019).

Μελλοντικά σχέδια για τα οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου

Η τεχνολογία αυτή υπόσχεται πολλά, αλλά πρέπει να ξεπεραστούν τα κύρια προβλήματα όπως: κόστος του εξοπλισμού που απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος- ανταγωνιστική τεχνολογία με χαμηλές εκπομπές ρύπων - διαχείριση νερού - ψύξη - τιμή του καυσίμου υδρογόνου και η προμήθειά του δεν είναι εύκολη λόγω των δυσκολιών στην αποθήκευση και τη μεταφορά- διάρκεια ζωής και αξιοπιστία των κυψελών καυσίμου, η πραγματική διάρκεια ζωής είναι 120.000 χιλιόμετρα, αλλά αναμένεται να είναι 240.000 χιλιόμετρα για να ανταγωνιστεί τα βενζινοκίνητα οχήματα (Wang, 2015).

Οι αυτοκινητοβιομηχανίες σχεδιάζαν την εμπορική διάθεση χιλιάδων ηλεκτρικών οχημάτων με κυψέλες καυσίμου το 2015 - 2017. Στους δρόμους της Καλιφόρνιας εκτιμάται ότι θα υπήρχαν 53.000 από αυτά μέχρι το 2017. Σύμφωνα με αυτή την πρόβλεψη, η Καλιφόρνια σχεδίαζε να διαθέσει σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου. Το όραμα του πρώην κυβερνήτη Arnold Schwarzenegger για έναν αυτοκινητόδρομο υδρογόνου με τουλάχιστον 200 σταθμούς υδρογόνου, με εκτιμώμενο κόστος 90 εκατ. δολάρια - 70 εκατ. ευρώ (Wang, 2015).

Στην Ευρώπη, η γαλλική Air Liquide και η γερμανική Linde AG συνεργάζονται για την αύξηση των σταθμών στη Γερμανία από 15 σε 100 έως το 2017 και 400 έως το 2023. Για την πλήρη κάλυψη χωρών όπως η Γαλλία ή η Γερμανία θα χρειαστούν περίπου 1.000 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου (HRS) με κόστος 1,5 - 2 δισεκατομμύρια ευρώ (Linssen & Hake, 2016).

Οι κυριότερες αυτοκινητοβιομηχανίες που εργάζονται σε αυτά τα οχήματα είναι οι εξής: Ford (ΗΠΑ), General Motors (ΗΠΑ), Honda (Ιαπωνία), Hyundai (Κορέα), Daimler (Γερμανία), Nissan (Ιαπωνία) και Toyota (Ιαπωνία). Τον Σεπτέμβριο του 2009, τα μέρη αυτά συνυπέγραψαν επιστολή με στόχο την εμπορική διάθεση σημαντικού αριθμού οχημάτων κυψελών καυσίμου από το 2015. Συμφώνησαν επίσης να προχωρήσουν τις υποδομές ανεφοδιασμού με υδρογόνο (Linssen & Hake, 2016).

2.2 Περιβάλλον

Στις μέρες μας, η ανθρωπότητα αρχίζει να ανησυχεί περισσότερο για το περιβάλλον και τα ηλεκτρικά οχήματα μπορούν να διαδραματίσουν σημαντικό ρόλο σε αυτό το ζήτημα. Ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των οχημάτων αναλύεται "well to wheels", δηλαδή εξετάζεται η ρύπανση όλων των τμημάτων του ενεργειακού κύκλου και όχι μόνο του ίδιου του οχήματος. Κατ' αρχάς, πρέπει να θυμόμαστε ότι η ενέργεια προέρχεται από

κάπου, δεν εμφανίζεται απλά. Σε αυτό το σημείο, τίθεται το ερώτημα: "θα ήταν δυνατόν να κινηθούν οι άνθρωποι προς πιο περιβαλλοντικούς τρόπους μεταφοράς;". Φυσικά. Ωστόσο, απαιτείται η δύναμη του νόμου και της ρύθμισης υπέρ της λιγότερης ρύπανσης.

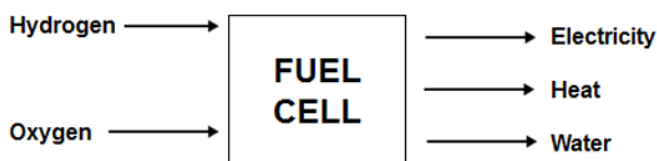
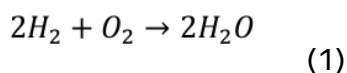
Το καλύτερο παράδειγμα έλαβε χώρα στην Καλιφόρνια με το Συμβούλιο Αεροπορικών Πόρων της Καλιφόρνιας (California with Air Resources Board - CARB). Στόχος του οργανισμού αυτού είναι η διατήρηση της υγιούς ποιότητας του αέρα. Η CARB είχε τεράστιο αντίκτυπο στην ανάπτυξη των ηλεκτρικών οχημάτων. Στη δεκαετία του 1980 η CARB θέσπισε μια οδηγία που απαιτούσε ότι κάθε κατασκευαστής αυτοκινήτων που πωλούσε οχήματα στην Καλιφόρνια θα έπρεπε να διασφαλίζει ένα ελάχιστο ποσοστό πωλούμενων οχημάτων μηδενικών εκπομπών. Κατά συνέπεια, πραγματοποιήθηκαν οι μεγάλες εξελίξεις στις κυψέλες καυσίμου, τα υβριδικά οχήματα (Li & Kimura, 2021).

Το υδρογόνο για τις κυψέλες καυσίμου μπορεί να ληφθεί με αναμόρφωση συμβατικών καυσίμων ή με ηλεκτρόλυση νερού. Εάν η παραγωγή υδρογόνου συνδυάζεται με εναλλακτικές μορφές ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια, οι ανανεώσιμες βιολογικές μέθοδοι, ... οι εκπομπές μπορούν να είναι μηδενικές, ωστόσο αυτό εξαρτάται από τη φύση της ενέργειας (Li & Kimura, 2021).

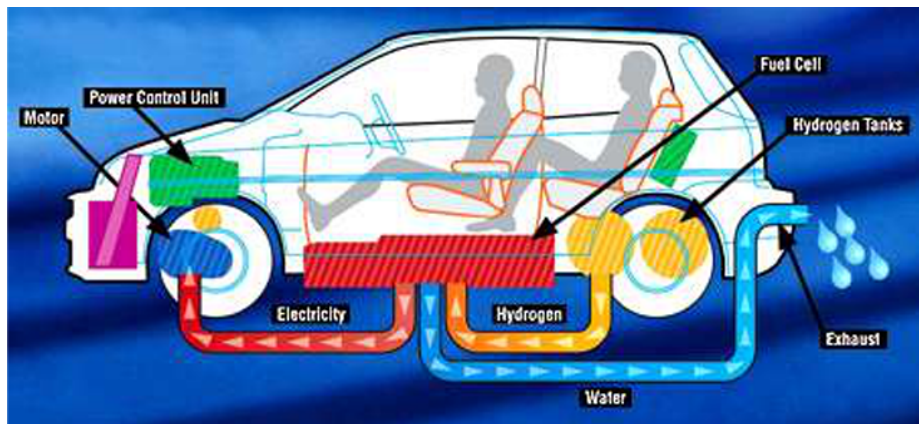
2.3 Οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου

Βασική αρχή

Η αρχή για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε μια χημική αντίδραση (εξίσωση 1) μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου για την παραγωγή νερού και ενέργειας. Αυτή η ενέργεια απελευθερώνεται ως ηλεκτρικό ρεύμα (Εικόνα 3 και Εικόνα 4) (Hordeski, 2020).



ΕΙΚΟΝΑ 3: ΕΙΣΡΟΕΣ ΚΑΙ ΕΚΡΟΕΣ ΚΥΨΕΛΩΝ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.

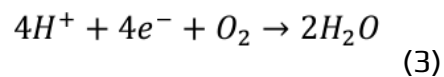
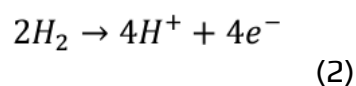


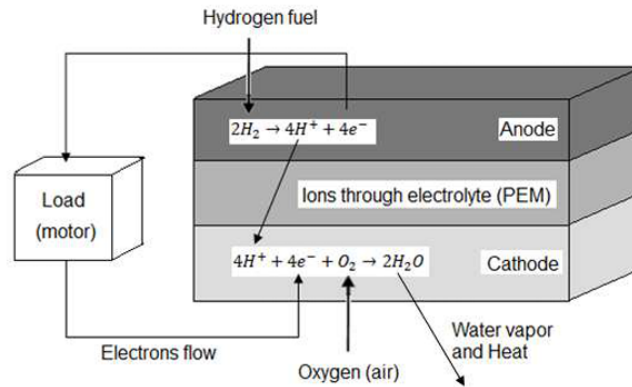
ΕΙΚΟΝΑ 4: ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΕΝΑ ΟΧΗΜΑ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (ΠΗΓΗ: HORDESKI, 2020).

Αντιδράσεις

Οι αντιδράσεις των ηλεκτροδίων που λαμβάνουν χώρα ποικίλλουν ανάλογα με τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου, εδώ θα εξηγηθούν οι πιο συνηθισμένοι τύποι, οι κυψέλες που βασίζονται σε όξινο ηλεκτρολύτη και σε πολυμερή ηλεκτρολύτη. Κάθε κυψέλη καυσίμου περιέχει δύο ηλεκτρόδια, την κάθοδο και την άνοδο, με μια ουσία ανάμεσά τους που άγει τον ηλεκτρισμό, τον ηλεκτρολύτη (Walters et al., 2018).

Στην άνοδο το αέριο υδρογόνο ιονίζεται απελευθερώνοντας ενέργεια (εξίσωση 2) και στην κάθοδο το οξυγόνο αντιδρά με αυτά τα ιόντα H^+ και τα ηλεκτρόνια σχηματίζοντας νερό (εξίσωση 3). Όλη η διαδικασία περιγράφεται στην Εικόνα 5.





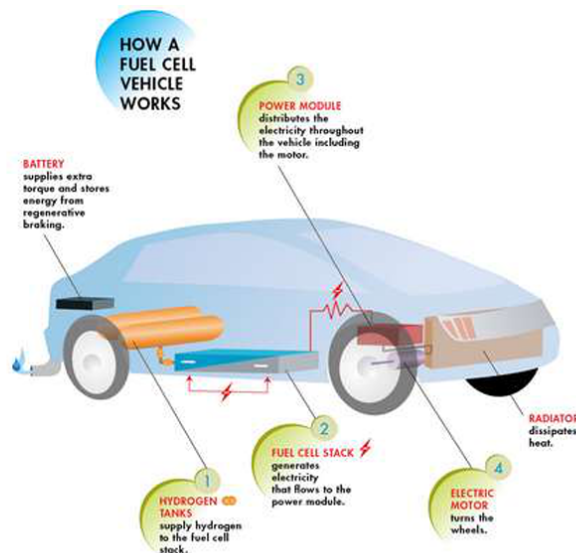
ΕΙΚΟΝΑ 5: ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΟ ΣΕ ΜΙΑ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.

Η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane - PEM) επιτρέπει τη διέλευση ιόντων H^+ . Η PEM χρησιμοποιεί ένα στερεό πολυμερές ως ηλεκτρολύτη. Οι κύριες εφαρμογές είναι για οχήματα και κινητά. Μπορεί να λειτουργήσει σε θερμοκρασία $30^{\circ}C$ και $100^{\circ}C$. Η λειτουργία τους σε χαμηλές θερμοκρασίες προκαλεί μια αργή αντίδραση, γι' αυτό χρειάζονται καταλύτες στο ηλεκτρόδιο όπως η πλατίνα. Η αύξηση της θερμοκρασίας και η αύξηση της επιφάνειας του ηλεκτροδίου βοηθούν στην αντιμετώπιση των αργών ρυθμών αντίδρασης. Είναι δυνατόν να αυξηθεί η επιφάνεια του ηλεκτροδίου καθιστώντας το πιο πορώδες (Samsun, 2016).

Η τάση μιας λειτουργούσας κυψέλης καυσίμου είναι περίπου $0,7V$, επομένως, είναι απαραίτητο να συνδεθούν σε σειρά, γνωστή και ως "στοίβα". Για τη σύνδεσή τους χρησιμοποιείται ένα σύστημα "εσωτερικής διακλάδωσης", μια πολύπλοκη διπολική πλάκα (Samsun, 2016).

Σύστημα οχήματος

Αν και το κύριο συστατικό του συστήματος είναι η στοίβα κυψελών καυσίμου. Πρέπει να εξηγηθούν ορισμένα άλλα σημαντικά μέρη, και τα βασικά - περισσότερο χρησιμοποιούμενα - χαρακτηριστικά είναι αυτά που αποτυπώνονται στην Εικόνα 6 (Ahmed et al., 2016).



ΕΙΚΟΝΑ 6: ΣΥΣΤΗΜΑ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΟΥ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΟΥ (ΠΗΓΗ: AHMED ET AL., 2016).

Σύστημα δεξαμενής καυσίμου: ειδικές φιάλες που περιέχουν συμπιεσμένο υδρογόνο σε πίεση 300 ή 700 bar για την αύξηση της αυτονομίας.

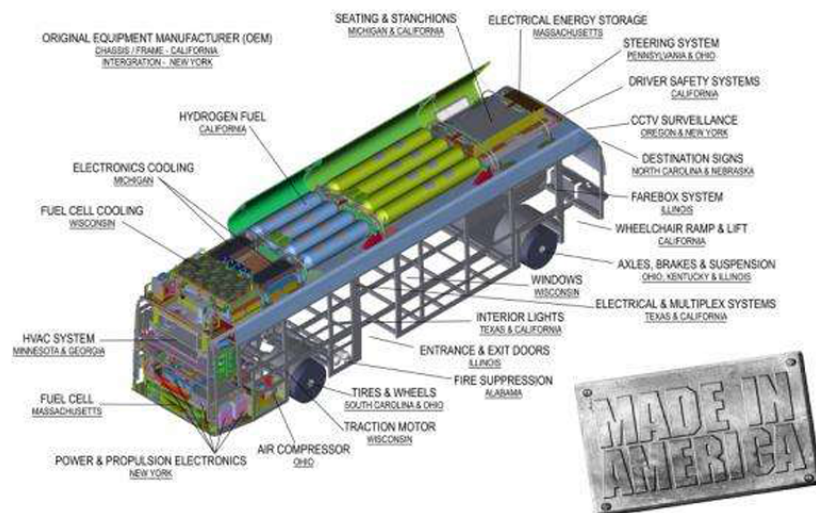
Μπαταρία: η μπαταρία ιόντων λιθίου αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια και υποστηρίζει το όχημα όταν επιταχύνει. Η ισχύς τους προέρχεται από την ανάκτηση κινητικής ενέργειας - ανάκτηση ενέργειας.

Ηλεκτροκινητήρας: ο ηλεκτροκινητήρας υψηλής ροπής κινεί το όχημα και βρίσκεται στον μπροστινό άξονα. Λαμβάνει την ενέργειά του από τη συστοιχία κυψελών καυσίμου και την μπαταρία. Αυτοί οι κινητήρες δίνουν ώθηση στο όχημα αθόρυβα, ομαλά και αποτελεσματικά. Απαιτεί λιγότερη συντήρηση από τους κινητήρες εσωτερικής καύσης (Ahmed et al., 2016).

Μονάδα ελέγχου ισχύος ή μονάδα ισχύος: ρυθμίζει τη ροή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στην περίπτωση των λεωφορείων με κυψέλες καυσίμου, αυτές μπορούν να αποθηκεύουν τις δεξαμενές υδρογόνου, τις μπαταρίες και το σύστημα κλιματισμού στην οροφή (Εικόνα 6). Η μεγάλη επιφάνεια της οροφής αυτών των λεωφορείων τους επέτρεψε να αποθηκεύσουν τόσες δεξαμενές όσες για να λειτουργούν για 16-18 ώρες. Οι μπαταρίες τους δεσμεύουν την ενέργεια από την πέδηση για την τροφοδοσία του συστήματος ψύξης/θέρμανσης (Ahmed et al., 2016).

FUEL CELL BUS MANUFACTURING = JOBS ACROSS AMERICA



ΕΙΚΟΝΑ 7: ΣΥΣΤΗΜΑ ΛΕΩΦΟΡΕΙΟΥ ΜΕ ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΑ ΕΞΑΡΤΗΜΑΤΑ ΤΟΥ (ΠΗΓΗ: AHMED ET AL., 2016).

Κεφάλαιο 3: Υδρογόνο ως πηγή ενέργειας

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται παρουσίαση του υδρογόνου ως πηγή ενέργειας, όπου αναλύται το περιεχόμενο και η προέλευσή του.

3.1 Περιεχόμενο

Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο στοιχείο στο σύμπαν. Θεωρείται το παντοτινό καύσιμο και μπορεί να παραχθεί από οποιοδήποτε καύσιμο πρωτογενούς ενέργειας: πετρέλαιο, άνθρακα, πυρηνικά, φυσικό αέριο, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και ηλεκτρική ενέργεια δικτύου. Το υδρογόνο είναι βιώσιμο οικονομικά, κλιματικά και περιβαλλοντικά, καθώς και κοινωνικά (Filippon & Yaroslavtsev, 2021).

3.2 Προέλευση

Η αλυσίδα υδρογόνου, όπως και κάθε άλλη αλυσίδα μετατροπής ενέργειας, αποτελείται από πέντε κρίκους: παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά, διάδοση και χρήση (Filippon & Yaroslavtsev, 2021).

Το υδρογόνο προέρχεται βασικά από: ορυκτά καύσιμα ή ανανεώσιμες πηγές, και είναι επίσης δυνατό με πυρηνική σχάση (Ratnakar et al., 2021).

- Ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας και το φυσικό αέριο, μέσω αναμόρφωσης ή μερικής οξειδωσης ή αεριοποίησης. Τα ορυκτά καύσιμα περιέχουν υδρογονάνθρακες και με έναν αναμορφωτή είναι δυνατόν να αποσπαστεί το υδρογόνο από τον άνθρακα. Ωστόσο, οι αναμορφωτές απορρίπτουν αυτόν τον άνθρακα που απομένει στην ατμόσφαιρα ως διοξείδιο του άνθρακα.
- Ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια από την ηλιακή ακτινοβολία και τον άνεμο, η οποία χρησιμοποιείται για τη διάσπαση απομεταλλωμένου νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο- ηλεκτρόλυση.
- Ανανεώσιμα καύσιμα, όπως η βιομάζα, που μετατρέπεται σε βιοαέριο στον αναερόβιο χωνευτή και στη συνέχεια σε μια κυψέλη καυσίμου διαχωρίζεται σε υδρογόνο και CO₂, ή μέσω πυρόλυσης.

Σήμερα, το περισσότερο υδρογόνο παράγεται από το φυσικό αέριο. Είναι ένας ασφαλής, αποδοτικός και οικονομικός τρόπος (Ratnakar et al., 2021).

Για την αποθήκευση και τη μεταφορά του υδρογόνου το κύριο ζήτημα που πρέπει να εξεταστεί είναι η ασφάλεια. Το υδρογόνο είναι αέριο με υψηλή θερμική αγωγιμότητα, μοριακή ταχύτητα και χαμηλό ιξώδες και πυκνότητα. Είναι εξαιρετικά πτητικό και εύφλεκτο αέριο. Το υδρογόνο πρέπει να αντιμετωπίζεται με προσοχή και τα συστήματα πρέπει να σχεδιάζονται με τη μικρότερη δυνατή πιθανότητα τυχόν διαρροών (Li & Taghizadeh-Hesary, 2022).

Η επιλογή της παραγωγής υδρογόνου επηρεάζει το κόστος και τη μέθοδο παράδοσής του. Οι τεχνολογίες για την παροχή υδρογόνου θα μπορούσαν να προσπαθήσουν να μειώσουν το κόστος παράδοσης, να αυξήσουν την ενεργειακή απόδοση, να διατηρήσουν την καθαρότητα του υδρογόνου και να ελαχιστοποιήσουν τις διαρροές υδρογόνου. Για την επίτευξη αυτών των προκλήσεων είναι απαραίτητο να σκεφτούμε τις επιλογές παραγωγής και παράδοσης ως σύστημα, και τα δύο μαζί (Ratnakar et al., 2021).

Σήμερα, η μεταφορά του υδρογόνου από το σημείο παραγωγής στο σημείο χρήσης μπορεί να γίνει μέσω αγωγού, σιδηροδρομικώς, με φορτηγίδες ή με ρυμουλκούμενα.

Εάν η μεταφορά γίνεται μέσω αγωγών, είναι δυνατή η προσαρμογή μέρους της υποδομής παράδοσης φυσικού αερίου. Αυτή είναι η επιλογή με το χαμηλότερο κόστος για την παράδοση μεγάλων ποσοτήτων αερίου υδρογόνου. Από την άλλη πλευρά, είναι δυνατές και άλλες επιλογές: φορτηγά, σιδηροδρομικά βαγόνια, φορτηγίδες και πλοία παραδίδουν κρυογενικό υγρό υδρογόνο, συμπιεσμένο αέριο υδρογόνο ή νέους υγρούς ή στερεούς φορείς υδρογόνου (Li & Taghizadeh-Hesary, 2022).

Εντοπίζονται δύο διακριτές ομάδες μεθόδων για την αποθήκευση του υδρογόνου: αποθήκευση υδρογόνου συμπιεσμένου, υγροποιημένου ή κρατούμενου- και υδρογόνο αποθηκευμένο ως τεχνητό καύσιμο - μεθανόλη, αμμωνία, υδροξείδιο του νατρίου - φορείς υδρογόνου.

Τα κύρια πλεονεκτήματα για το υδρογόνο που αποθηκεύεται ως συμπιεσμένο αέριο, σε υψηλή πίεση, είναι: απλότητα, απεριόριστος χρόνος αποθήκευσης και δεν υπάρχουν όρια καθαρότητας του υδρογόνου. Αυτός είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος. Διαφορετικά, όταν αποθηκεύεται ως υγρό στους -226 C° περίπου, είναι δυνατή η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου (Li & Taghizadeh-Hesary, 2022).

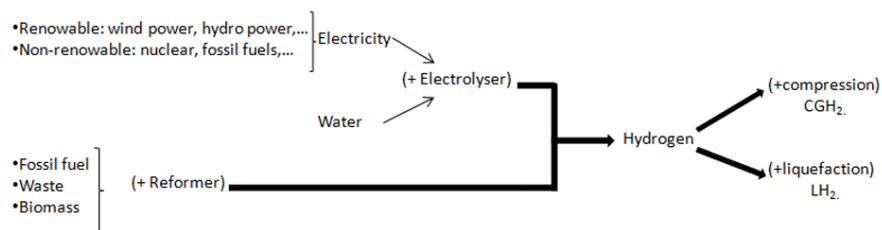
Υπάρχουν πολλές ενώσεις που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου, αυτές είναι οι ψυχροί φορείς υδρογόνου. Οι ενώσεις αυτές πρέπει να έχουν τρία χαρακτηριστικά: πρέπει να αποδίδουν εύκολα το υδρογόνο τους, το ενεργειακό και οικονομικό κόστος τοποθέτησης του υδρογόνου στην ένωση πρέπει να είναι χαμηλό, πρέπει να είναι ασφαλής ο χειρισμός τους.

Για το ερώτημα: πώς αποθηκεύεται στην πραγματικότητα το υδρογόνο; Οι δύο επιλογές που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι: δεξαμενές αερίου υδρογόνου υψηλής πίεσης (CGH_2) ή δοχεία υγροποιημένου υδρογόνου (LH_2) (Oldenbroek, et al., 2021).

Οι βασικές προκλήσεις των CGH₂ είναι η ογκομετρική χωρητικότητα, το βάρος, η υψηλή πίεση και το κόστος. Η ογκομετρική χωρητικότητα είναι πραγματικά σημαντική, επομένως έχει άμεσο αντίκτυπο στον αριθμό των επανατροφοδοτήσεων. Όταν αυξάνεται η πίεση και η ποσότητα του υδρογόνου, αυξάνεται και η εμβέλεια οδήγησης που επιτυγχάνεται. Ωστόσο, το κόστος και ο χώρος του οχήματος επηρεάζονται αρνητικά. Οι δεξαμενές συμπιεσμένου αερίου υψηλής πίεσης κατασκευάζονται από ανθρακονήματα για να παρέχουν ελαφριά δομική ενίσχυση. Το κόστος των δεξαμενών από ανθρακονήματα υπαγορεύει και το κόστος του CGH₂. Συνεπώς, είναι σημαντικό να επιτευχθεί χαμηλό κόστος χωρίς να επηρεαστούν το βάρος και ο όγκος αυτών των δεξαμενών (Oldenbroek, et al., 2021).

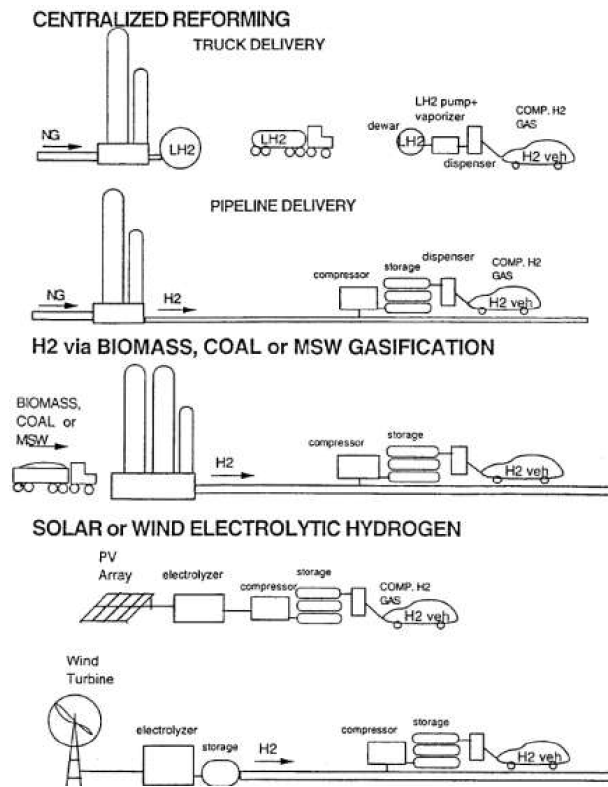
Από την άλλη πλευρά, τα ζητήματα των δεξαμενών LH₂ είναι η εξάτμιση του υδρογόνου, το βάρος, ο όγκος, η απαιτούμενη ενέργεια για την υγροποίηση του υδρογόνου και το κόστος της δεξαμενής. Το 30% της θερμογόνου αξίας του υδρογόνου είναι η ενέργεια που απαιτείται για την υγροποίηση του υδρογόνου. Το θετικό σημείο αυτής της μεθόδου είναι ότι οι δεξαμενές LH₂ μπορούν να αποθηκεύσουν περισσότερο υδρογόνο από την CGH₂ στον ίδιο όγκο, 0,07 kg/l έναντι 0,03 kg/l στα 70MPa (Ahmadi & Khoshnevisan, 2022).

Στην Εικόνα 8 συνοψίζονται οι διάφοροι τρόποι λήψης υδρογόνου.



ΕΙΚΟΝΑ 8: ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΟΙ ΤΡΟΠΟΙ ΕΠΙΤΕΥΞΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.

Στην Εικόνα 9 υπάρχει μια καλή αναπαράσταση του τρόπου με τον οποίο γίνεται η αλυσίδα υδρογόνου και παρουσιάζονται ορισμένες διαδρομές της διαδικασίας.



ΕΙΚΟΝΑ 9: ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΡΟΜΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΚΑΙ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ (ΠΗΓΗ: ΑΗΜΑΔΙ & ΚΗΟΣΗΝΕΒΙΣΑΝ, 2022).

Κεφάλαιο 4: Διεθνής πρόοδος των κυψελών καυσίμου και υποδομών

Το κεφάλαιο αυτό έχει ως θέμα την διεθνή πρόοδο των κυψελών καυσίμου και των υποδομών, όπου γίνεται σύγκριση των πραγματικών αυτοκινήτων, παρουσιάζεται η εξέλιξη και η υποδομές σε παγκόσμιο επίπεδο.

4.1 Σύγκριση πραγματικών αυτοκινήτων

Τα τρία οχήματα που θα συγκριθούν σε αυτή την ενότητα είναι: οχήματα εσωτερικής καύσης, ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία και ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου. Οι διάφοροι τύποι οχημάτων έχουν διαφορετική τεχνολογία ισχύος. Τα οχήματα εσωτερικής καύσης καίνε καύσιμα, τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία τροφοδοτούνται από επαναφορτιζόμενες μπαταρίες και η ισχύς των ηλεκτρικών οχημάτων με κυψέλες καυσίμου βασίζεται στο υδρογόνο και στις κυψέλες καυσίμου (Gong & Verstraete, 2017).

Επαναφορτιζόμενες μπαταρίες έναντι κυψελών καυσίμου

Η κυψέλη καυσίμου και η επαναφορτιζόμενη μπαταρία λειτουργούν με παρόμοιο τρόπο, και οι δύο μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε ηλεκτρική. Αυτές οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις είναι ελεγχόμενες και δεν παράγουν ρύπους. Ωστόσο, η αποθήκευση του καυσίμου είναι διαφορετική. Μια μπαταρία αποθηκεύει εσωτερικά τη χημική ένωση και τη μετατρέπει σε ηλεκτρική ενέργεια. Από την άλλη πλευρά, η χημική ένωση της κυψέλης καυσίμου, το υδρογόνο, αποθηκεύεται εξωτερικά σε μια δεξαμενή επί του οχήματος (Cano et al., 2018).

Κινητήρες καύσης έναντι κυψελών καυσίμου

Οι κινητήρες καύσης και οι κυψέλες καυσίμου αποθηκεύουν το καύσιμο σε μια δεξαμενή επί του πλαισίου. Στην περίπτωση αυτή διαφέρουν ως προς τον έλεγχο των χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα. Η καύση της βενζίνης έχει κάποιες αλυσιδωτές χημικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα την παραγωγή πολλών ανεπιθύμητων ενώσεων όπως NOx, SOx. Οι ενώσεις αυτές δεν είναι φιλικές προς το περιβάλλον. Μια άλλη διαφορά είναι η απόδοση του καυσίμου, μια κυψέλη καυσίμου είναι τρεις φορές πιο αποδοτική από μια παραδοσιακή καύση. Ένας συμβατικός κινητήρας καύσης έχει απόδοση 20%, από την άλλη πλευρά, μια κυψέλη καυσίμου μετατρέπει το 68% της χημικής ενέργειας. Το υδρογόνο που χρησιμοποιείται στα αυτοκίνητα με κυψέλες

καυσίμου μειώνει τα αέρια του θερμοκηπίου κατά 55%-65% σε σύγκριση με τη βενζίνη, ακόμη και όταν παράγεται από φυσικό αέριο (Gong & Verstraete, 2017).

4.2 Εξέλιξη

Οι ιδιοκτήτες των οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου πρέπει να γνωρίζουν ότι μπορούν να ανεφοδιάζονται με καύσιμα όπου κι αν βρίσκονται. Είναι γεγονός ότι όσο περισσότερα αυτοκίνητα κυκλοφορούν στους δρόμους, τόσο θα αυξάνεται και ο αριθμός των σταθμών. Επί του παρόντος, οι περισσότερες χώρες της Ευρώπης διαθέτουν σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου (Hydrogen Refuelling Stations – HRS), όπως η Ισπανία, η Γαλλία, η Γερμανία, η Αυστρία, η Αγγλία, η Ιταλία, η Ελβετία,...- επίσης υπάρχουν και στην Ιαπωνία, τη Νότια Κορέα, τις Ηνωμένες Πολιτείες,... (Tanç et al., 2019).

Στη Γερμανία προβλέπεται να επενδυθούν τριακόσια εκατομμύρια ευρώ για την κατασκευή 400 σταθμών HRS έως το 2030. Αυτή η πρωτοβουλία της *H₂Mobility* έγινε από έξι εταιρείες - Air Liquide, Daimler, Linde, OMV, Shell και Total. Αναμένεται ότι το κόστος των HRS θα είναι πέντε φορές χαμηλότερο από το δίκτυο που απαιτείται για τα υβριδικά οχήματα. Σχετικά με το κόστος των συστημάτων κυψελών καυσίμου για οχήματα, υπολογίζεται ότι θα είχε μειωθεί κατά 90% μέχρι το 2020 (Proost, 2015).

Η ικανότητα παραγωγής επαρκούς ποσότητας υδρογόνου δεν θα αποτελεί πρόβλημα. Στην πραγματικότητα, η βιομηχανία υδρογόνου παράγει ποσότητα υδρογόνου που ισοδυναμεί με 130 εκατομμύρια οχήματα (Tanç et al., 2019).

Όσον αφορά την παροχή κινήτρων στον πληθυσμό για την αγορά αυτών των οχημάτων, ορισμένες χώρες έχουν ξεκινήσει εκστρατείες για την υποστήριξή τους. Για παράδειγμα, η Δανία. Υποστηρίζουν την εισαγωγή του καυσίμου υδρογόνου απαλλάσσοντας τα υδρογονοκίνητα αυτοκίνητα από όλους τους φόρους. Η κυβέρνηση της Δανίας έχει επίσης διπλασιάσει τη δημόσια υποστήριξή της για την ενεργειακή E&A (Greene, Ogden & Lin, 2020).

Πρόοδος και επιτεύγματα

Βελτιώσεις των κυψελών καυσίμου (Wang et al., 2015):

- Το κόστος των κυψελών καυσίμου των αυτοκινήτων έχει μειωθεί περισσότερο από 80% από το 2002.

- Αποδεδειγμένη ανθεκτικότητα. Τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου μπορούν να λειτουργήσουν περισσότερες από 2.500 ώρες με υποβάθμιση μικρότερη από 10%. Διπλάσιος χρόνος από το 2006. Η αυτονομία οδήγησης υπερβαίνει τα 120.000 χλμ.
- Αύξηση της πυκνότητας ισχύος του συστήματος κατά 25%.
- 30% μείωση του όγκου της στοίβας και 15% του βάρους της στοίβας.

Εξελίξις στον τομέα του υδρογόνου (Wang et al., 2015):

- Το κόστος παραγωγής υδρογόνου από φυσικό αέριο έχει μειωθεί, καθιστώντας το ανταγωνιστικό σε σχέση με τη βενζίνη.
- Το κόστος παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές έχει μειωθεί, κατά περισσότερο από 80% από το 2002 με την ηλεκτρόλυση νερού ως μονοπάτι.
- Το κόστος παράδοσης υδρογόνου έχει μειωθεί κατά 40% για σωλήνες-ρυμουλκούμενα, κατά 20% για αγωγούς και κατά 15% για βυτιοφόρα.
- Η χωρητικότητα αποθήκευσης υδρογόνου έχει αυξηθεί κατά 50% από το 2007 με την ανάπτυξη δεξαμενών κρυσσυμπιέσεως.

4.3 Υποδομή

Για την εισαγωγή στην αγορά των οχημάτων κυψελών καυσίμου απαιτούνται δύο πράγματα: τα αυτοκίνητα και το σύστημα HRS για την υποστήριξή τους. Απαιτείται ένας ελάχιστος αριθμός του καθενός για να υποστηριχθεί η ζήτηση του άλλου. Όλη η ανάπτυξη είναι άχρηστη χωρίς καλή υποδομή σε αυτοκινητόδρομους, δρόμους,... Είναι απαραίτητο να κατασκευαστούν HRS (Siyal, Mentis & Howells, 2015).

Τα HRS μπορούν να λαμβάνουν υδρογόνο από φορτηγά ή να το παράγουν επιτόπου. Οι σταθμοί αυτοί διαθέτουν εξοπλισμό συμπίεσης, αποθήκευσης και διανομής του υδρογόνου. Ο εξοπλισμός συμπίεσης -350bar ή 700bar - μειώνει τον όγκο του υδρογόνου. Αυτό το συμπιεσμένο υδρογόνο αποθηκεύεται επιτόπου σε δεξαμενές κρυσγονικής, υψηλής πίεσης ή, σε λίγες εγκαταστάσεις, σε υγρή μορφή (Society of Automotive Engineers, 2016).

Η διαδικασία ανεφοδιασμού πρέπει να γίνεται γρήγορα, εύκολα και με ασφάλεια. Η παραγωγή, η μεταφορά και η αποθήκευση του υδρογόνου είναι τα πρώτα βήματα. Για την πλήρη εισαγωγή στην αγορά των οχημάτων που κινούνται με κυψέλες καυσίμου, πρέπει να υπάρχει ολοκληρωμένη υποδομή. Έτσι, οι κατασκευαστές αυτοκινήτων, οι εταιρείες της πετρελαϊκής και ενεργειακής βιομηχανίας, καθώς και η παγκόσμια πολιτική, πρέπει να συνεργαστούν χέρι με χέρι.

Ως συνέπεια του ότι το δίκτυο δεν ήταν αρκετό, το 2009, οι επτά μεγαλύτερες αυτοκινητοβιομηχανίες του κόσμου - Ford, Daimler, General Motors, Hyundai, Honda, Toyota και Nissan - ενώθηκαν για να υπογράψουν μια επιστολή κατανόησης, ήταν ένα κάλεσμα για υποδομές. Ο στόχος αυτής της επιστολής, που απευθυνόταν σε βιομηχανίες πετρελαίου και ενέργειας και σε κυβερνητικούς οργανισμούς, ήταν να ενημερώσουν για την πρόθεσή τους να εμπορευματοποιήσουν οχήματα κυψέλων καυσίμου από το 2015. Με τον τρόπο αυτό, προτρίπονταν να αναπτυχθούν τα HRS στην Ευρώπη και ειδικά στη Γερμανία.

Συμφώνησαν ότι όλα τα HRS πρέπει να πληρούν τις απαιτήσεις του *SAEJ2601 - Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles*, όπου καθορίζονται τα όρια ασφαλείας, οι επιδόσεις και οι απαιτήσεις για τους διανομείς υδρογόνου, καθώς και τα όρια θερμοκρασίας και πίεσης (Reddi et al., 2017).

Πραγματικό δίκτυο υδρογόνου

Τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου δεν είναι ένα μελλοντικό σχέδιο, αλλά ένα σημερινό γεγονός. Οι κυβερνήσεις ισχυρών χωρών επενδύουν πολλά χρήματα σε αυτές τις υποδομές. Στην πραγματικότητα, τον Μάρτιο του 2014, υπήρχαν 186 HRS (Εικόνα 10).



ΕΙΚΟΝΑ 10: ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΕ ΟΛΟ ΤΟΝ ΚΟΣΜΟ (ΠΗΓΗ: STAFFELL ET AL., 2019).

Ευρώπη

Μερικά προγράμματα σε χώρες της Ευρώπης:

- **Ηνωμένο Βασίλειο**

UK H₂Mobility έχει ως στόχο να αναλύσει και να προσδιορίσει τις ευκαιρίες τους στην υποδομή ανεφοδιασμού. Το έργο αυτό προσδιόριζε τρεις φάσεις: έως το 2015, θα αναπτυχθούν 65 σταθμοί HRS για την κάλυψη των μεγάλων πόλεων, πριν από το 2025, ο αριθμός των σταθμών HRS θα αυξηθεί σε 330, παρέχοντας ανεφοδιασμό για το 50% του Ηνωμένου Βασιλείου, η πλήρης κάλυψη θα επιτευχθεί έως το 2030, με 1.500 σταθμούς HRS.

- **Γαλλία**

Mobilité Hydrogène France είναι το πρόγραμμα υποδομών υδρογόνου της. Πρόκειται για μια σύμπραξη είκοσι μελών - παραγωγή φυσικού αερίου, αποθήκευση, επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας ενέργειας και κυβερνητικές υπηρεσίες. Η πρότασή τους είναι να διαμορφώσουν ένα οικονομικά ανταγωνιστικό σχέδιο για δημόσιες και ιδιωτικές HRS στη Γαλλία μεταξύ 2015 και 2030 (Mobilite, 2014).

- **Σκανδιναβία**

Οι σκανδιναβικές χώρες, οι οποίες ενδιαφέρονται πραγματικά για το περιβάλλον, είναι υπέρ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και, φυσικά, υπέρ των τεχνολογιών κυψελών καυσίμου. Η Σκανδιναβική Σύμπραξη Υδρογονανθράκων δημιουργήθηκε το 2006 για να καταβάλει κοινή προσπάθεια για την κατασκευή HRS. Το *H₂ moves Scandinavia* διοργάνωσε έναν ευρωπαϊκό οδοιπορικό υδρογόνου και κατέληξε με την υπογραφή μνημονίου κατανόησης (Memorandum of Understanding - MoU) από τις Hyundai, Honda, Toyota και Nissan με στόχο την ανάπτυξη δικτύου ανεφοδιασμού σε αυτές τις χώρες. Η Νορβηγία θέλει να χρησιμοποιήσει τα αποθέματα φυσικού αερίου και την υδροηλεκτρική της ενέργεια για την παραγωγή υδρογόνου, από την άλλη πλευρά, η Δανία σχεδιάζει να χρησιμοποιήσει την αιολική της ενέργεια για την παραγωγή υδρογόνου (Siyal, Mentis & Howells, 2015).

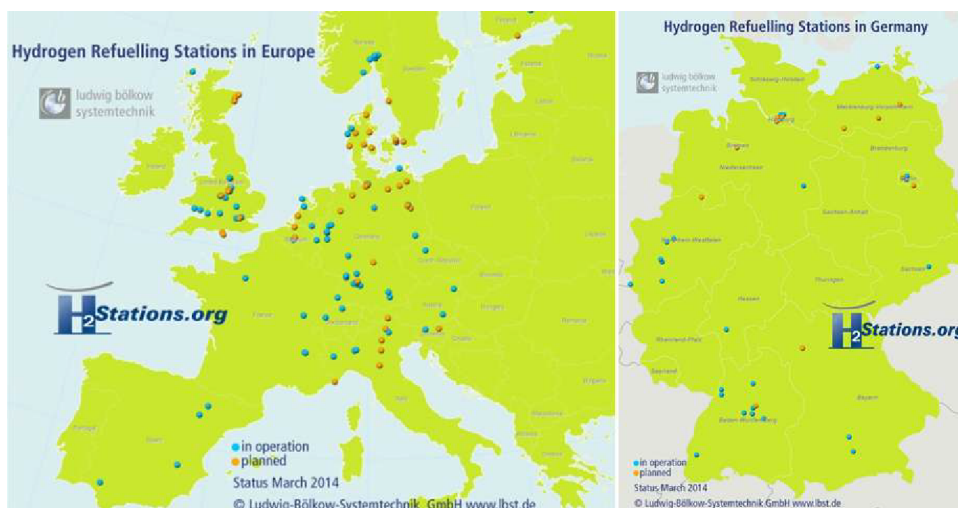
- **Γερμανία**

Μετά την πρόσκληση των μεγάλων αυτοκινητοβιομηχανιών για υποδομές, υπογράφηκε μνημόνιο συνεργασίας με στόχο την αξιολόγηση της γερμανικής υποδομής υδρογόνου. Η εισαγωγή του προγράμματος *H₂Mobility* καθιστά δυνατή τη συνεργασία της αυτοκινητοβιομηχανίας Daimler και των ενεργειακών εταιρειών Linde, Shell, Total, Vattenfall, OMV, EnBW και NOW GmbH - Εθνικός Οργανισμός για το Υδρογόνο της Τεχνολογίας Κυψελών Καυσίμου.

Έχουν γίνει ορισμένες συμφωνίες για την κατασκευή του HRS: Ο Ομοσπονδιακός Υπουργός Μεταφορών της γερμανικής κυβέρνησης και οι Daimler, Linde, Air Liquid, Air

Products και Total με επενδύσεις ύψους 20 εκατομμυρίων ευρώ θα αυξήσουν τον αριθμό των HRS σε 50, μέχρι το 2015 (Ehret & Bonhoff, 2015).

Στην πραγματικότητα, στην Ευρώπη λειτουργούν περισσότερα από 72 HRS, 26 από αυτά στη Γερμανία, αλλά σχεδιάζονται δεκάδες ακόμη, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11.



ΕΙΚΟΝΑ 11: ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗΝ ΕΥΡΩΠΗ ΚΑΙ ΤΗ ΓΕΡΜΑΝΙΑ (ΠΗΓΗ: EHRET & BONHOFF, 2015).

Στην Αυστρία, ο πρώτος δημόσιος σταθμός ανεφοδιασμού καυσίμου HRS τέθηκε σε λειτουργία τον Οκτώβριο του 2012, στη Βιέννη, από την εταιρεία πετρελαίου και φυσικού αερίου OMV σε συνεργασία με την Linde AG. Άνοιξε ως επίδειξη της μελλοντικής εμπορικής κυκλοφορίας οχημάτων κυψελών καυσίμου. Αυτός ο σταθμός παρέχει γρήγορη πλήρωση CGH2 700 bar σύμφωνα με το SAE J2601. Στην Εικόνα 12 απεικονίζεται ο σταθμός αυτός (Iordache, Schitea & Iordache, 2017).



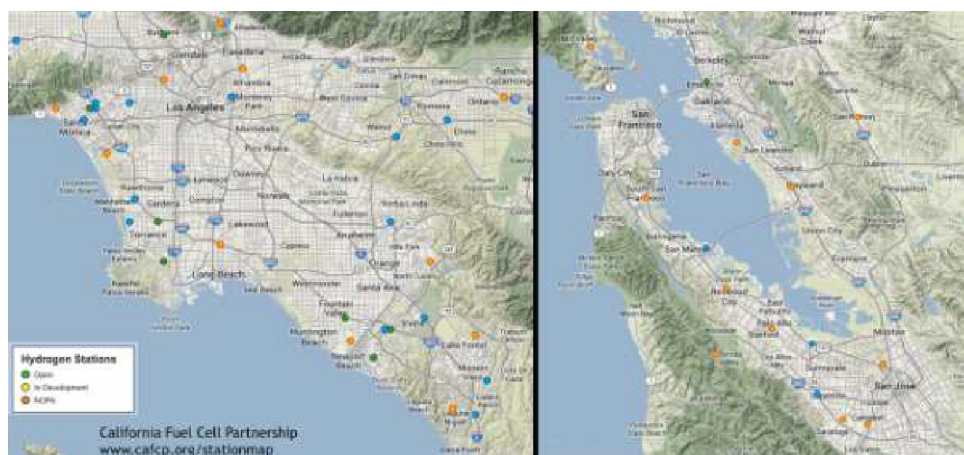
ΕΙΚΟΝΑ 12: ΣΤΑΘΜΟΣ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΤΗΣ ΒΙΕΝΝΗΣ - ΜΠΡΟΣΤΙΝΗ ΚΑΙ ΠΙΣΩ ΠΛΕΥΡΑ -, ΧΑΡΤΗΣ ΣΥΝΔΕΣΕΩΝ ΚΑΙ Η ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΤΙΜΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΚΑΥΣΙΜΩΝ, ΜΑΙΟΣ 2014 (ΠΗΓΗ: IORDACHE, SCHITEA & IORDACHE, 2017).

Βόρεια Αμερική

Οι ΗΠΑ ξεκίνησαν το έργο υποδομής υδρογόνου *H₂USA*. Ωστόσο, η Καλιφόρνια ήταν πάντα αυτή που οδήγησε τις ΗΠΑ στην ανάπτυξη στον τομέα αυτό, με τη νομοθεσία της για την αυτοκινητοβιομηχανία. Η Καλιφόρνια, ως ένας από τους κύριους υποστηρικτές της τεχνολογίας, έχει ήδη κατασκευάσει κάποιες υποδομές, όπως φαίνεται στην Εικόνα 13 (Felgenhauer et al., 2016).



ΕΙΚΟΝΑ 13: ΧΑΡΤΗΣ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗ ΒΟΡΕΙΑ ΑΜΕΡΙΚΗ (ΠΗΓΗ: FELGENHAUER ET AL., 2016).



ΕΙΚΟΝΑ 14: ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗΝ ΚΑΛΙΦΟΡΝΙΑ - ΒΟΡΕΙΑ ΚΑΙ ΝΟΤΙΑ (ΠΗΓΗ: FELGENHAUER ET AL., 2016).

Ασία - Ιαπωνία

Η κυβέρνηση της Ιαπωνίας επιδοτεί με 50 εκατ. δολάρια - 37 εκατ. ευρώ - την κατασκευή νέων HRS, που αντιστοιχούν σε 20 σταθμούς. Οι δεσμεύσεις της JX Nippon Oil & Energy

Cur και της Iwatani για την κατασκευή σταθμών HRS - 40 και 20 ο καθένας - φέρνουν την Ιαπωνία κοντά στο στόχο των 100 σταθμών HRS μέχρι το τέλος του 2015. Η Ερευνητική Ένωση Τεχνολογίας Προμήθειας-Χρήσης Υδρογόνου (Hydrogen Supply-Utilization Technology - HySUT) συντονίζει τις προσπάθειες υποδομής τους (Khan, Yamamoto & Sato, 2020).

Η Nissan, η Toyota και η Honda μαζί με τις ιαπωνικές εταιρείες πετρελαίου και ενέργειας συμφώνησαν σε τρία βασικά σημεία υπογράφοντας μνημόνιο συνεργασίας (Khan, Yamamoto & Sato, 2020):

- Στόχος των αυτοκινητοβιομηχανιών είναι η μείωση του κόστους κατασκευής και η διάδοση των FCEV.
- Οι προμηθευτές καυσίμων και οι αυτοκινητοβιομηχανίες θα συνεργαστούν για την εισαγωγή του δικτύου FCEV.
- Σχέδιο κατασκευής 100 HRS μέχρι το 2015 - στο Τόκιο, τη Ναγκόγια, την Οσάκα και τη Φουκουόκα.

Στην πραγματικότητα στην Ασία υπάρχουν 46 HRS, κυρίως στην Ιαπωνία (Εικόνα 15).



ΕΙΚΟΝΑ 15: ΧΑΡΤΗΣ ΤΩΝ ΣΤΑΘΜΩΝ ΑΝΕΦΟΔΙΑΣΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΗΝ ΙΑΠΩΝΙΑ ΚΑΙ ΤΗ ΝΟΤΙΑ ΚΟΡΕΑ (ΠΗΓΗ: KHAN, YAMAMOTO & SATO, 2020).

Κεφάλαιο 5: Δραστηριότητες των αυτοκινητοβιομηχανιών

Το κεφάλαιο αυτό έχει ως θέμα τις δραστηριότητες των αυτοκινητοβιομηχανιών. Γίνεται αναφορά στις αυτοκινητοβιομηχανίες εν γένει και έπειτα συγκεκριμένα σε Ευρώπη και Καλιφόρνια.

5.1 Αυτοκινητοβιομηχανίες

Daimler (Γερμανία)

Από το 1994, όταν κυκλοφόρησε το πρώτο αυτοκίνητο που χρησιμοποίησε κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell - PEMFC), το Necar, η Daimler παρέμεινε ενεργή στην παραγωγή παραλλαγών της. Εξελίσσεται στο πρώτης γενιάς όχημά της με κυψέλες καυσίμου το 2002, την A-Class F-CELL. Η δεύτερη γενιά έφτασε το 2010, η B-Class F-CELL. Στην πραγματικότητα έχουν 200 οχήματα σε λειτουργία σε όλο τον κόσμο. Το επόμενο βήμα είναι η εμπορική διάθεση της τρίτης γενιάς, από το 2014, με στόχο τις αγορές με υποστηρικτικές υποδομές. Μέχρι το 2017, σχεδιάζουν να έχουν την τέταρτη γενιά (Budde, Alkemade & Hekkert, 2015).

Εκτός από την ανάπτυξη της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου, η Daimler συμμετέχει επίσης στις πρωτοβουλίες για την κατασκευή γερμανικών υποδομών.

Honda (Ιαπωνία)

Η Honda είχε το πρώτο της πρωτότυπο κυψέλης καυσίμου το 1999 και το 2008 είχε στην αγορά το πρώτο εμπορικό FCEV στον κόσμο. Το περιορισμένο λανσάρισμα έγινε στην Καλιφόρνια λόγω της διαθέσιμης υποδομής. Οι καταναλωτές πλήρωναν 600 δολάρια το μήνα για τρία χρόνια. Μέχρι το 2015 σχεδιάζουν να λανσάρουν ένα νέο FCEV - FCX Clarity - στην Ιαπωνία και στις ΗΠΑ.

Για την ανάπτυξη του δικτύου υδρογόνου στην Ιαπωνία, η Honda έχει αναλάβει ενεργό δράση. Ακόμα και ο δικός τους ηλιακός σταθμός υδρογόνου λειτουργεί από το 2012 (Tanaka et al., 2020).

General Motors (ΗΠΑ)

Η General Motors είναι η αυτοκινητοβιομηχανία με τη μεγαλύτερη ιστορία στις τεχνολογίες κυψελών καυσίμου. Από το ElectroVan πριν από 50 χρόνια (Εικόνα 15) έχουν

πετύχει στον τομέα αυτό. Το 2007 λανσάρει το όχημά της 4ης γενιάς HydroGen4. Το πρόγραμμα Driveway, έθεσε αυτά τα οχήματα στα χέρια των καταναλωτών και αυτά συγκέντρωσαν περισσότερα από 2 εκατομμύρια χιλιόμετρα στο δρόμο. Η πέμπτη γενιά αναμένεται το 2015, με το μισό μέγεθος και μεγαλύτερη αξιοπιστία (Tanç et al., 2019).



ΕΙΚΟΝΑ 16: GM ELECTROVAN ΜΕ ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ UNION CARBIDE (ΠΗΓΗ: ΤΑΝÇ ET AL., 2019).

Hyundai (Κορέα)

Η Hyundai παρουσίασε το πρώτο της όχημα κυψελών καυσίμου το 2000. Έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις σκανδιναβικές χώρες, όπου έχουν κάνει κάποια προγράμματα επίδειξης. Η Hyundai βλέπει στη Σκανδιναβία μια τέλεια αγορά για το FCEV, ωστόσο δεν ξεχνά τη σημαντική αγορά της Γερμανίας, του Ηνωμένου Βασιλείου και των ΗΠΑ (Hong & Kim, 2018).

Nissan (Ιαπωνία)

Η Nissan είναι μία από τις πιο πρόσφατες αυτοκινητοβιομηχανίες που εισήλθαν στο παιχνίδι των FCEV. Η πρώτη τους επίδειξη πραγματοποιήθηκε το 2003, με το SUV X-Trail. Η εταιρεία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη της στοίβας κυψελών καυσίμου και κάνει μεγάλες εξελίξεις με το μέγεθός της. Σχεδιάζουν να ενσωματώσουν αυτή την έκδοση της στοίβας για το εμπορικό τους λανσάρισμα το 2016 (Samsun, 2016).

Toyota (Ιαπωνία)

Το πρώτο πρωτότυπο της Toyota ήταν το 1996, το RAV4. Και το πιο κοντινό μελλοντικό σχέδιο είναι η εμπορική διάθεση της νεότερης έκδοσης από το 2014 στην Ιαπωνία, τις ΗΠΑ και την Ευρώπη (Samsun, 2016).

Ford (ΗΠΑ)

Τα πρώτα μοντέλα της Ford ήταν το 2000 και το 2001 και ανέπτυξαν 30 αυτοκίνητα κυψελών καυσίμου μέχρι το 2007 για να δοκιμαστούν στις ΗΠΑ, τον Καναδά και τη Γερμανία. Η οριακή πτώχευσή τους το 2009 ήταν το κύριο γεγονός για να αποφασίσουν να περιμένουν μέχρι το 2020 για την εμπορική διάθεση των αυτοκινήτων τους, όταν η τεχνολογία θα έχει καλύτερη ανταγωνιστική τιμή (Samsun, 2016).

Συνεργασίες αυτοκινητοβιομηχανιών

Ορισμένες συμφωνίες έχουν συναφθεί μεταξύ των κυριότερων αυτοκινητοβιομηχανιών του κόσμου για την ανάπτυξη οχημάτων κυψελών καυσίμου για τα επόμενα χρόνια. Οι συμφωνίες αυτές κάνουν τους κατασκευαστές αυτοκινήτων να συντονίζουν τις δραστηριότητές τους μεταξύ των διαφόρων χωρών τους. Στην παρούσα ενότητα θα εξηγηθούν ορισμένες από τις συνεργασίες (Greene, Ogden & Lin, 2020).

Η Daimler και η Ford ξεκίνησαν την κοινή τους επιχείρηση για την ανάπτυξη της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου από το 2007 - Automotive Fuel Cell Corporation (AFCC). Τον Ιανουάριο του 2013 προσχώρησε σε αυτήν και η Nissan. Η συνεργασία *Nissan-Ford-Daimler* (Ιαπωνία-ΗΠΑ-Γερμανία) θέλει να επιταχύνει την εμπορευματοποίηση των FCEV μειώνοντας το σχετικό κόστος επένδυσης. Επιδιώκουν επίσης τη συμμόρφωση με τα παγκόσμια πρότυπα και προδιαγραφές. Στον τομέα των υποδομών H₂, θέλουν να στείλουν ένα μήνυμα στους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής και στη βιομηχανία προμηθευτών για να εργαστούν για την περαιτέρω ανάπτυξη. Στόχος είναι η παραγωγή περισσότερων από 100.000 οχημάτων κυψελών καυσίμου το 2017, όταν οι υποδομές θα είναι πιο ανεπτυγμένες και με καλύτερη οικονομία κλίμακας (Greene, Ogden & Lin, 2020).

Η General Motors και η Honda συνεργάζονται από το 2013 στην ανάπτυξη τεχνολογιών κυψελών καυσίμου. Σχεδιάζουν να μοιραστούν τεχνογνωσία και οικονομίες κλίμακας στη φάση της παραγωγής.

Η Volkswagen υπέγραψε τετραετή συμφωνία με την Ballard Power Systems για να προχωρήσει στην ανάπτυξη κυψελών καυσίμου

Η Hyundai (Κορέα) αποφάσισε να προχωρήσει μόνη της στην ανάπτυξη κυψελών καυσίμου. Πρόθεσή τους είναι να θέσουν σε παραγωγή 1.000 οχήματα μέχρι το 2015, ώστε να ενθαρρύνουν τους κατασκευαστές υποδομών να κατασκευάσουν συστήματα HRS. Και ένα χρόνο μετά, η πλήρης εμπορική παραγωγή 10.000 οχημάτων.

Η Toyota και η BMW θα μοιραστούν τις τεχνολογίες τους και θα αναπτύξουν θεμελιώδη πλατφόρμα οχημάτων κυψελών καυσίμου έως το 2020. Η συνεργασία αυτή θα περιλαμβάνει την ανάπτυξη δεξαμενής υδρογόνου, υποστηρικτικού συστήματος μπαταρίας και ηλεκτροκινητήρα. Η BMW είχε αποφύγει τις κυψέλες καυσίμου για πολλά χρόνια. Η Toyota θα δανείσει στην BMW την πολυετή εμπειρία της στην ανάπτυξη

κυψελών καυσίμου, επειδή γνωρίζει ότι η Γερμανία είναι σημαντική αγορά για τα οχήματα κυψελών καυσίμου. Ακόμα κι έτσι, η Toyota δεν θα περιμένει μέχρι το 2020 για να κυκλοφορήσει ένα αυτοκίνητο κυψελών καυσίμου, τα σχέδιά της είναι να εισέλθει στην αγορά της Ιαπωνίας το 2014 και στην Ευρώπη και τις ΗΠΑ από το 2015 (Greene, Ogden & Lin, 2020).

Η παγκόσμια λειτουργία του στόλου έχει γίνει με στόχο την προετοιμασία της αγοράς. Οι επιδείξεις στόλου των οχημάτων κυψελών καυσίμου έγιναν βασικά στη Γερμανία και την Καλιφόρνια, αυτές έγιναν από το 2005. Ο στόλος των 100 οχημάτων κυψελών καυσίμου του Clean Energy Partnership συμπλήρωσε 5 εκατομμύρια χιλιόμετρα με τη συμμετοχή οχημάτων από τις κυριότερες αυτοκινητοβιομηχανίες. Διανεμήθηκαν περισσότερα από 152.000 kg υδρογόνου με περισσότερες από 33.000 ανεφοδιασμούς (Greene, Ogden & Lin, 2020).

Αρκετές αγορές πιέζουν για την εμπορική αξιοποίηση της υποδομής H₂. Η Γερμανία θα δημιουργήσει 85, ενώ και άλλες χώρες της ΕΕ ξεκινούν δραστηριότητες. Η Καλιφόρνια σχεδιάζει προμηθευτές φυσικού αερίου για το 2015. Η Ιαπωνία έχει επίσης μεγάλη σημασία σε αυτό το θέμα, έχει επαρκή υποδομή H₂ που καλύπτει τις τέσσερις σημαντικές μητροπολιτικές περιοχές και σχεδιάζει περισσότερες (Greene, Ogden & Lin, 2020).

5.2 Ευρώπη

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημοσίευσε μια πρόταση με στόχο τη στήριξη της ανάπτυξης εναλλακτικών καυσίμων. Αυτή περιλαμβάνει στόχους όπως υποδομές υδρογόνου, κανονισμούς για τα ελαφρά οχήματα, νέους ορισμούς για τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου.

Οι κυριότερες επενδύσεις στην Ευρώπη γίνονται στη γερμανική γλώσσα. Η γερμανική αγορά για τα FCEV αναμένεται να είναι η μεγαλύτερη στην Ευρώπη. Ωστόσο, πρέπει να υπενθυμιστεί ότι οι σκανδιναβικές χώρες βρίσκονται επίσης σε καλή θέση για την περιβαλλοντική τους ευαισθητοποίηση και για τις πρόσφατες δραστηριότητες και τα προγράμματά τους με ορισμένες σημαντικές αυτοκινητοβιομηχανίες (Iordache, Schitea & Iordache, 2017).

Το πρόγραμμα Horizon 2020 είναι η όγδοη επανάληψη του προγράμματος-πλασίου της ΕΕ για την έρευνα και την καινοτομία, η πρότασή του είναι να αναγεννηθεί η σύμπραξη δημόσιου και ιδιωτικού τομέα με επίκεντρο τις βιώσιμες μεταφορές και την ενεργειακή ασφάλεια. Η συνολική επένδυση μεταξύ 2014 και 2020 εκτιμάται σε 1,4 δισ. Ευρώ (Yartys et al., 2021).

Το 2013 ιδρύθηκε το έργο Hydrogen Infrastructure Transport (HIT), το οποίο κόστισε 3,5 εκατομμύρια ευρώ. Χρήματα που η ΕΕ αποφάσισε να διαθέσει από το πρόγραμμα

υποδομών μεταφορών TEN-T. Στόχος του HIT είναι να διαμορφώσει ένα διασυνδεδεμένο δίκτυο υδρογόνου μεταξύ πολλών ευρωπαϊκών χωρών - Ολλανδία, Δανία, Σουηδία και Γαλλία (Yartys et al., 2021).

5.3 Καλιφόρνια

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, το Υπουργείο Ενέργειας των ΗΠΑ επένδυσε 31 εκατομμύρια ευρώ για να επιταχύνει την εμπορική αξιοποίηση των κυψελών καυσίμου. Η επένδυση αυτή αποτέλεσε το κλειδί για την ανάπτυξη 1.200 κυψελών καυσίμου (Trencher, 2020).

Η ισχυρή υποστήριξη των κυψελών καυσίμου και των τεχνολογιών υδρογόνου από την κυβέρνηση των ΗΠΑ και οι δραστηριότητες του DOE και των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας αποτέλεσαν τον βασικό πυλώνα για την ανάπτυξη αυτής της τεχνολογίας.

Η California Fuel Cell Partnership (CaFCP) προωθεί την εμπορική αξιοποίηση των FCEV και συντονίζει την ανάπτυξη της υποδομής τους. Η CaFCP δημοσίευσε το έγγραφο "A California Road Map: The Commercialization of Hydrogen Fuel Cell Vehicles", όπου εξηγείται η στρατηγική για την οικοδόμηση των HRS για τα επόμενα χρόνια (California Fuel Cell Partnership, 2012).

Ελπίζεται ότι μέχρι το 2050 το 87% των αυτοκινήτων που κυκλοφορούν στους δρόμους θα είναι ZEV, περισσότερο από το 50% αυτών θα είναι οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου.

Λεωφορεία κυψελών καυσίμου

Δύο κέντρα αριστείας πρόκειται να δημιουργηθούν στην Καλιφόρνια - AC Transit και SunLine Transit. Αυτά θα ενσωματώνουν: τα Κέντρα Μεταφοράς Μεταφορών και Επικοινωνιών (Trencher, 2020):

- Εισαγωγή λεωφορείων κυψελών καυσίμου το 2015-2016
- Παραγωγή 80 λεωφορείων κυψελών καυσίμου - 1 εκατ. δολάρια ανά λεωφορείο
- 40 από αυτά σε κάθε τοποθεσία
- 12 χρόνια λειτουργίας
- Κατάρτιση και εκπαίδευση του προσωπικού των μέσων μεταφοράς
- Ένα HRS σε κάθε τόπο που παρέχει επαρκές υδρογόνο

Κάθε κέντρο θα κοστίζει 50,2 εκατ. δολάρια - συμπεριλαμβανομένων των 40 λεωφορείων, της υποδομής ανεφοδιασμού, της συντήρησης και της λειτουργίας. Το HRS θα είναι επίσης διαθέσιμο για επιβατικά οχήματα κυψελών καυσίμου. Κάθε λεωφορείο

με κυψέλες καυσίμου σε λειτουργία μπορεί να μειώσει την ποσότητα άνθρακα κατά 100 τόνους ετησίως και να εξαλείψει την ανάγκη για 9.000 γαλόνια καυσίμου ετησίως (Trencher, 2020).

Φορτηγά και βαρέα οχήματα

Στην Καλιφόρνια, τα 600.000 πετρελαιοκίνητα φορτηγά διπλασιάζουν την ποσότητα σωματιδίων (Particulate Matter - PM) και NOx από όλα τα 20 εκατομμύρια επιβατικά αυτοκίνητα - τα οποία προκαλούν μεγαλύτερο κίνδυνο καρκίνου. Έτσι, η αντικατάσταση αυτών των φορτηγών έγινε μια από τις κύριες προτεραιότητες για την Καλιφόρνια. Οι πρώτες ενέργειες έχουν ξεκινήσει, η TTSI, μια εταιρεία μεταφορών σε εθνικό επίπεδο, δοκιμάζει ήδη φορτηγά με κυψέλες καυσίμου.

Έχουν συνταχθεί ορισμένοι ειδικοί κανονισμοί για τη βελτιστοποίηση της μείωσης των εκπομπών, πρόκειται για την περίπτωση των βαρέων οχημάτων.

Τα ρυμουλκούμενα τύπου κιβωτίου που έχουν μήκος τουλάχιστον 53 πόδια και οι βαρέως τύπου τράκτορες που έλκουν αυτά τα ρυμουλκούμενα πρέπει να είναι εξοπλισμένα με ελαστικά που εξοικονομούν καύσιμα και αεροδυναμικές διατάξεις ρυμουλκούμενων που βελτιώνουν την οικονομία καυσίμου και μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Τα τρακτέρ και τα ρυμουλκούμενα που υπόκεινται στον κανονισμό πρέπει είτε να χρησιμοποιούν τρακτέρ και ρυμουλκούμενα πιστοποιημένα από την Υπηρεσία Προστασίας του Περιβάλλοντος των ΗΠΑ SmartWay είτε να μετασκευάζουν τον υπάρχοντα εξοπλισμό με τεχνολογίες που έχουν επαληθευτεί με SmartWay. Οι ιδιοκτήτες οχημάτων πρέπει να συμμορφώνονται με τους εν λόγω κανονισμούς όταν κυκλοφορούν σε αυτοκινητόδρομους της Καλιφόρνιας, ανεξάρτητα από τον τόπο ταξινόμησης των οχημάτων. Εξαιρέσεις ισχύουν για ορισμένους ελκυστήρες και ρυμουλκούμενα τοπικής και μικρής διάρκειας μεταφοράς. Το χρονοδιάγραμμα συμμόρφωσης εξαρτάται από τον τύπο και την ηλικία του ελκυστήρα ή του ρυμουλκούμενου (Trencher, 2020).

Κανονισμοί της Καλιφόρνια

Η μεγάλη ανάπτυξη των συστημάτων κυψελών καυσίμου ξεκίνησε κυρίως με τους κανονισμούς της Καλιφόρνιας από την CARB (Forrest et al., 2020):

- Κανονισμοί και μηχανισμοί της αγοράς ως προς τη μείωση έως το 2020 των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της Καλιφόρνιας κατά 29%.
- Πρόγραμμα ZEV που απαιτεί από τις αυτοκινητοβιομηχανίες να εμπορευματοποιήσουν οχήματα μηδενικών εκπομπών.

- Εφαρμογή ορίων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για οχήματα προσωπικής χρήσης.
- Σχέδιο για την αύξηση της χρήσης εναλλακτικών καυσίμων.
- Ενθάρρυνση της λειτουργίας λεωφορείων μηδενικών εκπομπών.
- Μείωση της έντασης άνθρακα κατά 10% των καυσίμων των επιβατικών οχημάτων, έως το 2020.
- Δημιουργία προγραμμάτων παροχής κινήτρων για τον μετριασμό της ποιότητας του αέρα και την καθαρή τεχνολογία.

Στόχοι για την πολιτειακή κυβέρνηση

- Ολοκλήρωση των απαιτούμενων υποδομών και του σχεδιασμού: εξασφάλιση ενός ελάχιστου δικτύου 68 HRS για την υποστήριξη της εμπορικής εκκίνησης των οχημάτων κυψελών καυσίμου μεταξύ 2015-2017 και επέκταση σε 100. Μέχρι το 2020 να είναι σε θέση να υποστηρίξει έως και 1 εκατομμύριο οχήματα.
- Επέκταση της ευαισθητοποίησης και της ζήτησης των καταναλωτών: υποστήριξη και προώθηση προγραμμάτων χρηματοδότησης- συμμετοχή και προγραμματισμένες εκστρατείες καταναλωτών για την ευαισθητοποίηση και την αναφορά των πλεονεκτημάτων των οχημάτων κυψελών καυσίμου.
- Μετασχηματισμός των στόλων: διασφάλιση ότι έως το 2015 τουλάχιστον το 10% των ελαφρών επαγγελματικών οχημάτων θα είναι ZEV και το 25% έως το 2020- επέκταση των φόρουμ για την υποστήριξη των προσπαθειών των εταιρειών να ενσωματώσουν ZEV. Ανάπτυξη στρατηγικής για την επιτάχυνση της εμπορευματοποίησης των μεσαίων και βαρέων οχημάτων ZEV.
- Αύξηση των θέσεων εργασίας και των επενδύσεων στον ιδιωτικό τομέα: παροχή κονδυλίων για την κατάρτιση του εργατικού δυναμικού σε εμπορικές ενώσεις, εργοδότες, εμπορικά επιμελητήρια, κλπ. (Forrest et al., 2020).

Κεφάλαιο 6: Τεχνολογία οχημάτων και σύγκριση με τα BEV τα PHEV και τα ICE

Σκοπός του κεφαλαίου αυτού είναι να παρουσιαστεί η τεχνολογία οχημάτων και η σύγκρισή τους με τα BEV τα PHEV και τα ICE.

6.1 BEV

Το BEV είναι ένα ηλεκτρικό όχημα με μπαταρία.

Ακολουθεί η λογική:

Μπαταρία = B

Ηλεκτρικό όχημα = EV

Ηλεκτρικό όχημα με μπαταρία = BEV

Επομένως, ένα BEV είναι ένα ηλεκτρικό όχημα που τροφοδοτείται από μπαταρία. Αν τροφοδοτούνταν από γάλα, θα ήταν ένα MEV (Zakaria et al., 2019).

Ένα σημαντικό πρόσθετο σημείο:

Τα BEV τροφοδοτούνται μόνο από μια μπαταρία. Δεν υπάρχουν άλλοι τρόποι για να κινηθούν.

Για παράδειγμα, δεν διαθέτουν έναν μικρό κινητήρα ντίζελ ή βενζίνης στον οποίο μπορείτε να βασιστείτε αν η μπαταρία σας αδειάσει.

Ένα BEV είναι ουσιαστικά ένα 100% αμιγώς ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Για τους πραγματικά πιστούς (Zakaria et al., 2019).

Παραδείγματα BEV περιλαμβάνουν:

- Hyundai Ioniq 5
- Tesla Model 3
- Polestar 2
- Volkswagen ID.4
- Kia EV6

- Mini Electric
- MG ZS EV
- Tesla Model Y
- Renault Zoe
- Hyundai Kona Electric
- Kia e-Niro

6.2 PHEV

Το PHEV είναι ένα υβριδικό ηλεκτρικό όχημα Plug-in

Αυτό χρειάζεται λίγη εξήγηση:

- σημαίνει απλώς ότι πρέπει να συνδεθεί το αυτοκίνητο σε ένα σημείο φόρτισης για να φορτιστεί η μπαταρία του.

Το "Plug in" ισχύει και για τα BEV, αλλά ευτυχώς δεν χρειάζεται να αντιμετωπίσει κάποιος το "PBEV". Υποθέτουν ότι με ένα BEV ο οδηγός ξέρει ότι πρέπει να το συνδέσει στην πρίζα για να φορτίσει (Jones, Genovese & Tob-Ogu, 2020).

«Υβριδικό» σημαίνει ότι το αυτοκίνητο διαθέτει μπαταρία και κανονικό κινητήρα βενζίνης ή ντίζελ.

Όλα μαζί:

- Plug-in = P
- Υβριδικό = H
- Ηλεκτρικό όχημα = EV
- Υβριδικό ηλεκτρικό όχημα Plug-in = PHEV

Ένα PHEV συνήθως διανύει περίπου 30 μίλια μόνο με μπαταρία και στη συνέχεια αναλαμβάνει ο κινητήρας βενζίνης/ντίζελ (Jones, Genovese & Tob-Ogu, 2020).

Τα PHEV απευθύνονται σε ανθρώπους που θέλουν να απομακρυνθούν από τα βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα αυτοκίνητα, αλλά δεν μπορούν να πείσουν τον εαυτό τους να μεταβούν πλήρως στα BEV.

Για σύντομες διαδρομές, οι οδηγοί μπορούν να είναι 100% ηλεκτρικοί σε ένα PHEV.

Για μεγαλύτερα ταξίδια, είναι ηλεκτρικοί στην αρχή σε ένα PHEV, αλλά στη συνέχεια έχουν την άνεση να ξέρουν ότι μπορούν να ανεφοδιάσουν γρήγορα σε ένα βενζινάδικο και να συνεχίσουν το ταξίδι τους.

Ωστόσο, αυτό σημαίνει ότι αν οδηγούν τακτικά περισσότερα από περίπου 30 μίλια την ημέρα, το PHEV θα συμπεριφέρεται σαν ένα κανονικό αυτοκίνητο βενζίνης/ντίζελ για όλα αυτά τα μίλια μετά τα 30 μίλια και θα ρυπαίνει το περιβάλλον (Jones, Genovese & Tob-Ogu, 2020).

Παραδείγματα PHEV περιλαμβάνουν:

- Mitsubishi Outlander
- Volvo XC60 Twin Engine
- BMW 225xe
- Volkswagen Golf GTE
- Toyota Prius Plug-in
- Mercedes-Benz E350 e SE

6.3 HEV

Το HEV είναι ένα υβριδικό ηλεκτρικό όχημα. Δεν υπάρχει το 'plug-in', διότι δεν υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης στην πρίζα.

Όντας υβριδικό, διαθέτει κινητήρα βενζίνης/ντίζελ και μπαταρία, αλλά δεν υπάρχει η δυνατότητα σύνδεσης του αυτοκινήτου στην πρίζα για να φορτιστεί η μπαταρία (Zakaria et al., 2019).

Τα HEV είναι κατά κύριο λόγο κανονικά αυτοκίνητα βενζίνης/ντίζελ. Η πολύ μικρή μπαταρία τους συνήθως είτε βοηθάει το αυτοκίνητο να πάει πιο μακριά και/ή βελτιώνει τις επιδόσεις του (όπως η επιτάχυνση).

Το αυτοκίνητο συχνά λειτουργεί μόνο με την μπαταρία σε χαμηλές ταχύτητες. Μόλις το αυτοκίνητο χρειαστεί να πάει πιο γρήγορα, ο κινητήρας βενζίνης/ντίζελ μπαίνει σε λειτουργία.

Ο οδηγός ενός HEV θα ακούει τον κινητήρα βενζίνης/ντίζελ να λειτουργεί τις περισσότερες φορές. Ο οδηγός του PHEV συνήθως δεν θα ακούει τον κινητήρα, εκτός από τις μεγαλύτερες διαδρομές όταν η μπαταρία έχει εξαντληθεί.

Η ίδια η μπαταρία φορτίζεται εν μέρει μέσω της "αναγεννητικής πέδησης". Όταν ο οδηγός πατάει το πεντάλ του φρένου, ο ηλεκτροκινητήρας κινείται με την όπισθεν και

λειτουργεί ως γεννήτρια. Ως γεννήτρια, ο ηλεκτροκινητήρας μπορεί να φορτίσει την μπαταρία (Zakaria et al., 2019).

Έτσι, φρενάρισμα = φόρτιση της ενσωματωμένης μπαταρίας. Αυτός είναι ένας από τους τρόπους με τους οποίους τα HEV παρακάμπτουν το πρόβλημα ότι δεν μπορούν να συνδεθούν στην πρίζα όπως τα PHEV.

Στην πραγματικότητα, τα HEV φορτίζουν επίσης τις πολύ μικρές μπαταρίες τους καίγοντας βενζίνη ή ντίζελ μέσα στους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Αυτή είναι η όχι και τόσο πράσινη πλευρά της τεχνολογίας των μπαταριών σε ένα HEV.

Το ακρωνύμιο χρειάζεται ελάχιστα εξηγήσεις:

Υβριδικό = H

Ηλεκτρικό όχημα = EV

Υβριδικό ηλεκτρικό όχημα = HEV

Παραδείγματα HEV περιλαμβάνουν (Zakaria et al., 2019):

- Toyota Corolla Hybrid
- Toyota Yaris Hybrid
- Lexus RX450h
- Ford Mondeo Hybrid
- Honda NSX

Κεφάλαιο 7: Μοντέλα θέσης ανεφοδιασμού

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει αναφορά στα μοντέλα θέσης ανεφοδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση θέσης, τα μοντέλα με βάση το σημείο και τη ροή, οι στόχοι του μοντέλου και οι παραδοχές/περιορισμοί.

Το πρόβλημα της συστηματικής επιλογής του τόπου τοποθέτησης σταθμών ανεφοδιασμού οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων (Alternative Fuel Vehicles – AFV) σε μια πόλη δεν είναι ασήμαντο. Οι περισσότερες από τις μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί, προσπαθούν να το επιλύσουν μέσω τεχνικών βελτιστοποίησης, όπως ο μαθηματικός προγραμματισμός και οι ευρετικές μέθοδοι. Ο στόχος αυτών των μοντέλων έχει ποικίλλει από την ελαχιστοποίηση των απωλειών ισχύος των χρηστών κατά τη διαδρομή προς τους σταθμούς ανεφοδιασμού μέσω της κατάτμησης του δικτύου, την ενσωμάτωση των απωλειών των χρηστών με την ελαχιστοποίηση των επενδύσεων ή τη μεγιστοποίηση της κάλυψης του συνόλου της ζήτησης. Αυτές οι επιλογές σκοπεύουν να μετρήσουν το όφελος από την προώθηση μιας δομής δικτύου ανεφοδιασμού, χρησιμοποιώντας μαθηματικές διατυπώσεις όπως η παραδοσιακή p -median, η flow-capture και η activity based σε συνδυασμό με ευρετικές μεθόδους (Cavadas, de Almeida Correia & Gouveia, 2015).

7.1 Προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση θέσης

Η βασική ιδέα για τον καθορισμό των θέσεων ανεφοδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση του σχετικού κόστους (δηλαδή του χρόνου ταξιδιού ή της απόστασης προς τις θέσεις ανεφοδιασμού) ή η μεγιστοποίηση της εξυπηρετούμενης ζήτησης, όπως εφαρμόζεται στα γενικά προβλήματα θέσης. Τα προβλήματα τοποθεσίας μπορούν να χωριστούν χονδρικά σε τέσσερις κατηγορίες: πρόβλημα κάλυψης συνόλου, πρόβλημα μέγιστης κάλυψης, πρόβλημα p -κέντρου και πρόβλημα p -μέσου (He, Kuo & Wu, 2016). Μεταξύ αυτών των προβλημάτων, το p -median είναι το πιο συχνά εφαρμοζόμενο στη βιβλιογραφία. Ένα p -median πρόβλημα είναι να εντοπιστούν p εγκαταστάσεις και να κατανεμηθεί κάθε σταθμισμένο σημείο ζήτησης στην πλησιέστερη εγκατάσταση ώστε να ελαχιστοποιηθεί το άθροισμα του κόστους ταξιδιού. Το p -median μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί και στην παρούσα διατριβή (Daskin & Maass, 2015).

Το άλλο συνηθισμένο μοντέλο είναι το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης, το οποίο αναζητά τη μέγιστη ζήτηση που μπορεί να εξυπηρετηθεί εντός μιας καθορισμένης απόστασης εξυπηρέτησης (ή χρόνου) δεδομένου περιορισμένου αριθμού εγκαταστάσεων ανεφοδιασμού. Η λύση αυτού του προβλήματος προσδιορίζει τόσο το μεγαλύτερο ποσό ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί όσο και τις p εγκαταστάσεις που επιτυγχάνουν τη

μέγιστη κάλυψη. Το μοντέλο εντοπισμού θέσης που καταγράφει τη ροή (flow capturing location model - FCLM) και οι παραλλαγές του έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί εκτενώς.

Διάφοροι ερευνητές έχουν ακολουθήσει την έννοια της κάλυψης συνόλου για να προτείνουν ένα μοντέλο θέσης σταθμού ανεφοδιασμού χρησιμοποιώντας μεθόδους μικτού ακέραιου προγραμματισμού (model using mixed integer programming - MILP) που βασίζονται σε λογικές δρομολόγησης οχημάτων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η εμβέλεια είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση του κόστους χωροθέτησης των εγκαταστάσεων και, ως εκ τούτου, αποτελεί σημαντικό ζήτημα στην ανάπτυξη της τεχνολογίας οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων. Μια τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου κάλυψης συνόλου χρησιμοποιήθηκε επίσης στη μελέτη των Chen και Hua (2014), όπου οι δύο βασικοί στόχοι για το πρόβλημα χωροθέτησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, συμπεριλαμβανομένου του κόστους κατασκευής, του ολοκληρωμένου κόστους κ.ο.κ., και η ελαχιστοποίηση των απωλειών των χρηστών. Το προτεινόμενο μοντέλο ασχολείται με τη χωροθέτηση των σταθμών ταχείας φόρτισης των EV. Δεν λαμβάνει υπόψη τους περιοριστικούς περιορισμούς του χρόνου φόρτισης, όπως συμβαίνει στην περίπτωση του συμβατικού τρόπου αργής φόρτισης. Έτσι, αναπτύχθηκε ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για σταθμούς ταχείας φόρτισης, λαμβάνοντας υπόψη το υπάρχον παραδοσιακό δίκτυο πρατηρίων βενζίνης ως πιθανές υποψήφιες τοποθεσίες. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται επίσης ως αναφορά για τις ανάγκες της διατριβής για την ανάπτυξη ενός μοντέλου για την τοποθέτηση σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου για FCEV.

Εν τω μεταξύ, οι He, Kuo και Wu (2016) εφάρμοσαν και τα τρία μοντέλα εντοπισμού - τα μοντέλα κάλυψης συνόλου, μέγιστης κάλυψης και p-median - για τον εντοπισμό δημόσιων σταθμών φόρτισης EV στο Πεκίνο της Κίνας, συγκρίνοντας τις επιδόσεις των τριών μοντέλων. Με βάση τη σύγκριση, υποστήριξαν ότι οι λύσεις p-median είναι πιο αποτελεσματικές, καθώς το μοντέλο εντοπίζει τους σταθμούς φόρτισης κοντά στις κοινότητες με υψηλότερη ζήτηση EV, άρα υψηλότερο βαθμό προσβασιμότητας για τους περισσότερους χρήστες EV (He, Kuo & Wu, 2016).

7.2 Μοντέλα με βάση το σημείο και τη ροή

Τα μοντέλα που βασίζονται σε σημεία υποθέτουν ότι η ζήτηση ανεφοδιασμού μπορεί να εντοπιστεί σε κόμβους που αντιπροσωπεύουν, για παράδειγμα, το σπίτι ή το χώρο εργασίας. Η προσέγγιση λαμβάνει συνήθως υπόψη τις αφετηρίες και τους προορισμούς των διαδρομών των οχημάτων για τις υποψήφιες θέσεις ανεφοδιασμού και όχι την εξέταση των διαδρομών μεταξύ της προέλευσης και του προορισμού (Origin Destination - OD). Έτσι, τα χαρακτηριστικά των κόμβων, για παράδειγμα, το μέγεθος του πληθυσμού τους, ο αριθμός των θέσεων εργασίας και το ποσοστό διείσδυσης των οχημάτων AFV, αποτελούν κρίσιμα στοιχεία για τον καθορισμό της θέσης των σταθμών ανεφοδιασμού. Στην περίπτωση των Ηλεκτρικών Οχημάτων, η δραστηριότητα στάθμευσης είναι ένας άλλος σημαντικός παράγοντας στα μοντέλα, καθώς η ζήτηση στάθμευσης μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε ζήτηση ανεφοδιασμού, ιδίως για εγκαταστάσεις που απαιτούν παρατεταμένο χρόνο επαναφόρτισης. Για τον καθορισμό των χαρακτηριστικών του

κόμβου, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν για τη γεωγραφική τους μονάδα ανάλυσης τη ζώνη ανάλυσης κυκλοφορίας ή το τετράγωνο απογραφής, λαμβάνοντας υπόψη τη διαθεσιμότητα των δεδομένων (Ko, Gim & Guensler, 2017).

Σε αντίθεση με τα μονοδιάστατα μοντέλα που βασίζονται σε σημεία, τα μοντέλα που βασίζονται στη ροή θεωρούν δισδιάστατες ροές, διαδρομές ή ταξίδια ως ζήτηση ανεφοδιασμού. Το FCLM, που προτάθηκε από τον Hodgson (1990), είναι το κλασικό μοντέλο που βασίζεται στη ροή. Το μοντέλο, μια παραλλαγή ενός προβλήματος μέγιστης κάλυψης, τοποθετεί τις εγκαταστάσεις p έτσι ώστε να αναχαιτίζει όσο το δυνατόν περισσότερες διαδρομές. Μετά τον Hodgson (1990), το FCLM αναπτύχθηκε περαιτέρω και εφαρμόστηκε σε διάφορα προβλήματα χωροθέτησης. Ωστόσο, το FCLM έχει έναν περιορισμό για να αντικατοπτρίζει πλήρως τα χαρακτηριστικά των οχημάτων AFV, δηλαδή την περιορισμένη εμβέλεια οδήγησης, καθώς επιτρέπει στις ροές να συλλαμβάνονται από μία μόνο εγκατάσταση οπουδήποτε κατά μήκος της διαδρομής τους, ανεξάρτητα από την απόσταση του ταξιδιού. Τα οχήματα AFV με περιορισμένη εμβέλεια οδήγησης χρειάζονται πολλαπλές στάσεις για ανεφοδιασμό όταν οι αποστάσεις του ταξιδιού τους υπερβαίνουν την εμβέλεια οδήγησης (Ko, Gim & Guensler, 2017).

Αντανακλώντας την περιορισμένη εμβέλεια οδήγησης των AFV, οι Urchurch και Kubby (2010) και Kubby et al. (2009) επέκτειναν το FCLM προτείνοντας ένα μοντέλο θέσης ροής-ανεφοδιασμού (flow-refueling location model - FRLM). Στο FRLM, μια ροή δεν θεωρείται καταγεγραμμένη (ανεφοδιασμένη) εκτός εάν είναι δυνατόν να ταξιδέψει από την αφετηρία στον προορισμό και πίσω χωρίς να ξεμείνει από καύσιμα, κάτι που, δεδομένης της περιορισμένης εμβέλειας οδήγησης των AFV, μπορεί να απαιτεί πολλαπλούς σταθμούς ανεφοδιασμού κατάλληλα κατανομημένους κατά μήκος μιας καλυμμένης διαδρομής ροής OD. Για την επέκταση του FRLM, οι ίδιοι ερευνητές έχουν προτείνει προσεγγίσεις για τον εντοπισμό των σταθμών ανεφοδιασμού κατά μήκος τόξων (Kubby & Lim, 2007) και την απόκλιση από σταθερές διαδρομές ή συντομότερες διαδρομές (Kim & Kubby, 2012). Το τελευταίο, το οποίο ονομάστηκε μοντέλο θέσης απόκλισης-ροής-ανεφοδιασμού (deviation-flow-refuelling location model - DFRLM), έχει νόημα, δεδομένου ότι προσπαθεί να αντικατοπτρίσει την προθυμία των οδηγών οχημάτων AFV να παρεκκλίνουν σε σταθμό ανεφοδιασμού εκτός της προσχεδιασμένης διαδρομής τους. Μια τέτοια συμπεριφορά των οδηγών φαίνεται αποδεκτή και ρεαλιστική όταν ένα δίκτυο ανεφοδιασμού είναι αραιό, κάτι που μπορεί να παρατηρείται συχνά στο αρχικό στάδιο της ανάπτυξης των οχημάτων AFV. Επιπλέον, το FRLM θα μπορούσε να επεκταθεί ώστε να αντικατοπτρίζει τη σταδιακή παροχή υποδομών φόρτισης με την πάροδο του χρόνου (Kubby et al., 2009).

Στην πραγματικότητα, οι Urchurch και Kubby (2010) ασχολήθηκαν με το πρόβλημα της χωροθέτησης σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου, δοκιμάζοντας πόσο καλά οι εγκαταστάσεις που εντοπίζονται με p -median ή FRLM αποδίδουν στην αντικειμενική συνάρτηση του άλλου, δείχνοντας ότι το αποτέλεσμα του μοντέλου που βασίζεται στη ροή είναι μάλλον πιο σταθερό από αυτό του μοντέλου που βασίζεται στο σημείο. Ειδικότερα, διαπιστώθηκε ότι το FRLM αποδίδει αισθητά καλύτερα για μεγαλύτερη

γεωγραφική κλίμακα (δηλ. πολιτεία έναντι μητροπολιτικής περιοχής). Οι ερευνητές υποστήριξαν ότι η σταθερότητα των θέσεων ανεφοδιασμού μπορεί να είναι επωφελής στο πρώιμο στάδιο της ανάπτυξης, καθώς οι επιλεγμένες -σταθερές- θέσεις είναι πιθανό να παραμείνουν καλές ακόμη και όταν προστίθενται περισσότεροι σταθμοί (Urchurch & Kuby, 2010).

Εκτός από τα μοντέλα που βασίζονται σε σημεία, όπως το *p*-median, και τα μοντέλα που βασίζονται στη ροή, όπως το FRLM, οι ερευνητές έχουν αναγνωρίσει και μια τρίτη κατηγορία μοντέλων που βασίζονται σε τόξα. Τα μοντέλα με βάση το τόξο συσχετίζουν τη ζήτηση με τα τόξα του οδικού δικτύου και αξιολογούν το μέγεθός τους ξεχωριστά, με τον αριθμό των σταθμών κατά μήκος κάθε τόξου να είναι ανάλογος του μήκους του τόξου και της ζήτησης. Πρόσφατες μελέτες έχουν αναπτύξει περαιτέρω τα μοντέλα με βάση τη ροή προς τα μοντέλα με βάση την περιήγηση, τα οποία μπορούν να θεωρηθούν ως μια τέταρτη κατηγορία μοντέλων θέσης ανεφοδιασμού. Σε αυτή την κατηγορία ένα προτεινόμενο μοντέλο είναι αυτό των Cavadas, de Almeida Correia & Gouveia (2015), ένα μοντέλο MILP για τον εντοπισμό σταθμών αργής φόρτισης για ηλεκτρικά οχήματα σε αστικές περιοχές που λαμβάνει υπόψη τις περιηγήσεις των οδηγών. Η αντικειμενική συνάρτηση αυτού του μοντέλου MILP μεγιστοποιεί την ικανοποιημένη ζήτηση, λαμβάνοντας υπόψη την αποσύνθεση της απόστασης με σκοπό να δοθεί προτεραιότητα στις θέσεις ζήτησης που βρίσκονται πλησιέστερα στο σταθμό φόρτισης και να αποφευχθεί η αναγκαστική μετακίνηση των χρηστών σε μεγάλες αποστάσεις.

7.3 Στόχοι του μοντέλου και παραδοχές/περιορισμοί

7.3.1 Στόχοι

Με βάση όσα συζητήσαμε προηγουμένως, οι προσεγγίσεις για την απόφαση των θέσεων ανεφοδιασμού αποσκοπούν κυρίως στην ελαχιστοποίηση του κοινωνικού κόστους που αντιπροσωπεύεται από τον επιπλέον χρόνο ταξιδιού για τη μετάβαση στους πλησιέστερους σταθμούς ανεφοδιασμού ή το κόστος κατασκευής των εγκαταστάσεων ανεφοδιασμού (Chen & Hua, 2014). Στην περίπτωση των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου και λόγω των ιδιαίτερων φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του υδρογόνου (αποθηκεύεται υπό υψηλή πίεση, είναι εξαιρετικά εύφλεκτο) πρέπει να αντιμετωπίζεται με προσοχή. Αυτό επιβάλλει ιδιαίτερα αυστηρούς κανόνες ασφαλείας. Ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη ότι θα χρησιμοποιηθεί η υπάρχουσα υποδομή των παραδοσιακών πρατηρίων καυσίμων, οι κανονισμοί αυτοί αναμένεται να τηρηθούν σε μεγάλο βαθμό (Chen & Hua, 2014).

Σε άλλες περιπτώσεις, οι τοποθεσίες καθορίστηκαν έτσι ώστε να μεγιστοποιείται η κάλυψη των χρηστών ή ειδικά στην περίπτωση των ηλεκτρικών οχημάτων να ελαχιστοποιείται ο αριθμός των χαμένων διαδρομών που ορίζονται ως η διαδρομή της οποίας η απόσταση είναι μεγαλύτερη από την εναπομένουσα εμβέλεια της μπαταρίας.

Το FRLM μεγιστοποιεί τις καλυπτόμενες διαδρομές οχημάτων με τη στρατηγική τοποθέτηση ενός προκαθορισμένου αριθμού σταθμών σε ένα δίκτυο. Εν τω μεταξύ, το χωρητικό FRLM μεγιστοποιεί το VMT (Vehicle Miles Travelled) προσθέτοντας έναν συντελεστή βαρύτητας της συντομότερης απόστασης μεταξύ ζευγών OD, διασφαλίζοντας ότι τα μεγαλύτερα ταξίδια έχουν προτεραιότητα για ανεφοδιασμό. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να μειώσει καλύτερα τη χρήση παραδοσιακών καυσίμων, δεδομένου ότι το VMT είναι γενικά ανάλογο της κατανάλωσης καυσίμων. Επιπλέον, έχουν επίσης προταθεί διαφορετικές προσεγγίσεις με στόχους από την πλευρά των παρόχων υπηρεσιών ανταλλαγής μπαταριών, με στόχο (Ko, Gim & Guensler, 2017):

1. Την ελαχιστοποίηση του κόστους που συνδέεται με την κατασκευή και τη λειτουργία των σταθμών
2. Τη μεγιστοποίηση της πιθανότητας επίτευξης ενός στόχου απόδοσης της επένδυσης.

Για παράδειγμα, όπως αναφέρεται στη μελέτη των Chen και Hua (2014), τα αποτελέσματα μελετών που εφάρμοσαν την έννοια της κάλυψης συνόλου για την πρόταση ενός μοντέλου χωροθέτησης σταθμών ανεφοδιασμού με τη χρήση μεθόδων μικτού ακέрайου προγραμματισμού που βασίζονται σε λογικές δρομολόγησης οχημάτων έδειξαν ότι η εμβέλεια είναι ζωτικής σημασίας για τη μείωση του κόστους χωροθέτησης των εγκαταστάσεων και, ως εκ τούτου, αποτελεί σημαντικό ζήτημα για την ανάπτυξη της τεχνολογίας οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων. Μια άλλη προτεινόμενη προσέγγιση είναι αυτή ενός υβριδικού μοντέλου με διπλούς στόχους για την οικονομική χωροθέτηση σταθμών ανεφοδιασμού ώστε να εξυπηρετούνται ταυτόχρονα υπεραστικές και ενδοαστικές μετακινήσεις. Ένα τέτοιο μοντέλο θα μπορούσε εύκολα να εφαρμοστεί για το σχεδιασμό ενός δικτύου σταθμών ανεφοδιασμού για την αναδυόμενη αγορά αυτοκινήτων με οχήματα εναλλακτικών καυσίμων.

Μια τροποποιημένη έκδοση του μοντέλου κάλυψης συνόλου χρησιμοποιήθηκε επίσης στη μελέτη των Chen και Hua (2014), όπου οι δύο βασικοί στόχοι για το πρόβλημα χωροθέτησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, συμπεριλαμβανομένου του κόστους κατασκευής, του ολοκληρωμένου κόστους κ.ο.κ., και η ελαχιστοποίηση της απώλειας των χρηστών. Το προτεινόμενο μοντέλο αφορά τη χωροθέτηση σταθμών ταχείας φόρτισης των EV, οπότε δεν εξετάζει τους περιοριστικούς περιορισμούς του χρόνου φόρτισης, όπως συμβαίνει συνήθως στην περίπτωση των συμβατικών αργών φορτιστών. Έτσι, χρησιμοποιείται ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για σταθμούς ταχείας φόρτισης λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος και τη χρήση του υπάρχοντος παραδοσιακού δικτύου πρατηρίων βενζίνης. Αυτό το μοντέλο χρησιμοποιείται επίσης ως αναφορά για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής για την ανάπτυξη ενός μοντέλου για την τοποθέτηση σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου για FCV (Chen & Hua, 2014).

Τα μοντέλα χωροθέτησης πολλαπλών στόχων μπορούν να είναι χρήσιμα όταν η απόφαση χωροθέτησης δεν μπορεί να ληφθεί από έναν μόνο κυρίαρχο παράγοντα. Οι Wang και Wang (2010) ανέπτυξαν ένα υβριδικό μοντέλο με διπλούς στόχους που εξετάζουν

ταυτόχρονα το ελάχιστο κόστος του σταθμού και τη μέγιστη κάλυψη, επεκτείνοντας την προηγούμενη εργασία τους. Ομοίως, οι Brey et al. (2016) πρότειναν ένα μοντέλο θέσης με αντικειμενική συνάρτηση που αποτελείται από δύο όρους:

1. την ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης από τα σπίτια των χρηστών μέχρι τον πλησιέστερο σταθμό (p-median problem)
2. τη μεγιστοποίηση του VMT (Vehicle Miles Travelled) εντός της εμβέλειας κάθε σταθμού.

Επιπλέον, οι Brey et al. (2016) κατέδειξαν ότι μια έρευνα προτίμησης οδηγών μπορεί να εφαρμοστεί για τη συστηματική κατασκευή μιας καμπύλης συμβιβασμού που εξηγεί τη σχέση μεταξύ δύο διαφορετικών στόχων. Οι Carar και Kuby (2012) έδειξαν περαιτέρω ότι το FRLM μπορεί να γενικευτεί με την ενσωμάτωση ενός μοντέλου πολλαπλών στόχων που συνδυάζει το μοντέλο p-median ή το μοντέλο μέγιστης κάλυψης με το FRLM.

7.3.2. Παραδοχές / περιορισμοί

Σύμφωνα με τους Ko, Gim και Guensler (2017), οι περισσότερες μελέτες έχουν υποθέσει ότι οι σταθμοί ανεφοδιασμού έχουν απεριόριστη χωρητικότητα, άρα δεν υπάρχει καθυστέρηση για την υπηρεσία ανεφοδιασμού. Η παραδοχή αυτών των σταθμών ανεφοδιασμού χωρίς χωρητικότητα βασίζεται στο γεγονός ότι στο αρχικό στάδιο της ανάπτυξης των οχημάτων AFV, η έλλειψη χωρητικότητας ανεφοδιασμού είναι απίθανο να παρατηρηθεί λόγω ανεπαρκούς ζήτησης. Ωστόσο, η ζήτηση ανεφοδιασμού μπορεί να συγκεντρωθεί σε συγκεκριμένους σταθμούς, ακόμη και στο αρχικό στάδιο της ανάπτυξης των οχημάτων AFV, ανάλογα με τις συνθήκες μετακίνησης, υπερβαίνοντας τη χωρητικότητα ανεφοδιασμού (ιδίως για τα ηλεκτρικά οχήματα όταν χρησιμοποιούνται σταθμοί αργού φορτιστή). Όταν λαμβάνεται υπόψη η περιορισμένη χωρητικότητα, η καθυστέρηση της ουράς πρέπει να θεωρείται καθοριστικός παράγοντας.

Μια άλλη κοινή παραδοχή είναι ότι το καύσιμο καταναλώνεται με σταθερό ρυθμό με την απόσταση ταξιδιού, ανεξάρτητα από τις συνθήκες οδήγησης και οχήματος (Ko, Gim & Guensler, 2017). Ωστόσο, έχει διαπιστωθεί ότι στην περίπτωση των EV, η αποδοτικότητα των καυσίμων μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με τις συνθήκες οδήγησης και συνεπώς η οδήγηση σε διαδρομές εντός πόλης είναι πιο αποδοτική από την οδήγηση σε διαδρομές αυτοκινητοδρόμων. Το αντίθετο ισχύει γενικά για τα βενζινοκίνητα οχήματα που δεν διαθέτουν συστήματα αναγεννητικής πέδησης και είναι πιο αποδοτικά σε υψηλότερη ταχύτητα. Επιπλέον, προτείνεται γενικά ότι ο ρυθμός εκφόρτισης της μπαταρίας μπορεί να ποικίλλει ανάλογα με την ηλικία του οχήματος, παρουσιάζοντας υψηλότερο ρυθμό εκφόρτισης για τα παλαιότερα αυτοκίνητα (Ko, Gim & Guensler, 2017).

Η στρατηγική αρχικής φόρτισης - ή στάθμης δεξαμενής - είναι ένα άλλο θέμα που πρέπει να υποτεθεί. Οι ερευνητές μπορούν να υποθέσουν αρχική πλήρη φόρτιση, μισή πλήρη φόρτιση ή τυχαία. Ωστόσο, θα πρέπει να γίνει η κατάλληλη παραδοχή λαμβάνοντας υπόψη το πλαίσιο των συνθηκών της μελέτης. Για παράδειγμα, εάν υπάρχει σταθμός

ανεφοδιασμού στην αφετηρία, το μοντέλο μπορεί εύλογα να υποθέσει μια αρχική πλήρη φόρτιση. Αυτό σημαίνει ότι, ιδίως για τα EV, το ζήτημα της οικιακής φόρτισης που μπορεί να συμπληρώσει τους δημόσιους φορτιστές θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τις θέσεις και τον αριθμό των φορτιστών (Caraf & Kuby, 2012).

Ένας περιορισμός προϋπολογισμού λαμβάνεται επίσης συχνά υπόψη σε διάφορα προβλήματα θέσης καθώς και στο FRLM και τις παραλλαγές του. Στην περίπτωση αυτή, ο προϋπολογισμός ελέγχει το μέγεθος (τον αριθμό των σταθμών ανεφοδιασμού) και τη σύνθεση (τύποι φορτιστών) ενός δικτύου σταθμών ανεφοδιασμού. Εάν το κόστος κατασκευής σταθμών ανεφοδιασμού ποικίλλει από θέση σε θέση, ο περιορισμός του προϋπολογισμού θα επηρεάσει σημαντικά τις αποφάσεις σχετικά με τη θέση των σταθμών ανεφοδιασμού. Για παράδειγμα, σύμφωνα με τους González et al. (2014) υπάρχουν δύο τύποι σταθμών φόρτισης εναλλασσόμενου ρεύματος και ένας τύπος σταθμών φόρτισης συνεχούς ρεύματος.

1. Ένας φορτιστής επιπέδου 1, που χρησιμοποιεί μια τυπική τάση 240 V, 16 A, 3,3 kW, η οποία βρίσκεται σε μια συνηθισμένη οικιακή πρίζα.
2. Ένας φορτιστής εναλλασσόμενου ρεύματος επιπέδου 2 7 kW-22 kW ημι-ταχείας φόρτισης και είναι κατάλληλος για εμπορικά κτίρια.
3. Έναν ταχυφορτιστή επιπέδου 3 DC 50 kW, ο οποίος μπορεί να φορτίσει μια μπαταρία αυτοκινήτου κατά περίπου 80% σε μόλις 15-30 λεπτά.

Επομένως, ανάλογα με τον διαθέσιμο δημόσιο προϋπολογισμό για υποδομές φόρτισης, μπορούν να εγκατασταθούν διαφορετικοί τύποι φορτιστών. Υποστηρίζεται ότι με περιορισμένο προϋπολογισμό, είναι προτιμότερο να εγκατασταθούν περισσότεροι φορτιστές χαμηλής ισχύος παρά λιγότεροι γρήγοροι φορτιστές σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Η υπόθεση του μεταβαλλόμενου κόστους συναντάται επίσης σε αρκετές μελέτες (Brandstätter, Leitner & Ljubić, 2020· Chen & Hua, 2014· Wang & Wang, 2010).

Κεφάλαιο 8: Εκτίμηση της ζήτησης ανεφοδιασμού

Το κεφάλαιο αυτό έχει ως θέμα την εκτίμηση της ζήτησης ανεφοδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η συμπεριφορά ανεφοδιασμού, η ιδιοκτησία οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων και οι προσεγγίσεις εκτίμησης της ζήτησης.

8.1 Συμπεριφορά ανεφοδιασμού

Η κατανόηση της συμπεριφοράς του οδηγού κατά τον ανεφοδιασμό αποτελεί το σημείο εκκίνησης της εκτίμησης της ζήτησης ανεφοδιασμού (Ko, Gim & Guensler, 2017). Μια τέτοια προσπάθεια συναντάται στη μελέτη των Kitamura και Sperling (1987), όπου απευθύνθηκε μια έρευνα σε περισσότερους από 1500 οδηγούς στη βόρεια Καλιφόρνια των ΗΠΑ, με την οποία ζητήθηκε να μάθουν πού ανεφοδιάζουν τα αυτοκίνητά τους. Η έρευνα αποκάλυψε ότι οι περισσότεροι οδηγοί προτιμούν να ανεφοδιάζονται 5 λεπτά από την αφετηρία ή τον προορισμό τους και τείνουν να ανεφοδιάζονται στην αρχή των ταξιδιών, γεγονός που δείχνει ότι οι οδηγοί τείνουν να ανεφοδιάζονται πριν κάνουν ταξίδια σε λιγότερο οικείες περιοχές. Οι ερευνητές την ονόμασαν «συμπεριφορά που αποφεύγει τον κίνδυνο».

Στη μελέτη των Urcurch και Kubly (2010) αναφέρονται επίσης ορισμένα ευρήματα της εμπειρικής έρευνας των Kitamura και Sperling (1987) σε οδηγούς. Πήραν συνεντεύξεις από τους οδηγούς την ώρα που ανεφοδιάζονταν με καύσιμα και διαπίστωσαν ότι το 74,8% πραγματοποιούσε ταξίδια προς ή από το σπίτι, συμπεριλαμβανομένου του 7% σε ταξίδια με ένα μόνο σκοπό από το σπίτι. Η ίδια μελέτη, ωστόσο, διαπίστωσε ότι το 28,6% των οδηγών ανεφοδιάζονταν σε ταξίδια προς ή από την εργασία. Από τη μελέτη αυτή προκύπτουν διάφορα σημαντικά ζητήματα όσον αφορά την ανάπτυξη ενός αρχικού δικτύου διανομής ενός νέου καυσίμου. Όπως ότι οι οδηγοί τείνουν να ανεφοδιάζονται σε περιοχές που είναι λεπτομερώς καταγεγραμμένες στους νοητικούς τους χάρτες, π.χ. στις περιοχές κοντά στο σπίτι και τον χώρο εργασίας. Επιπλέον, οι οδηγοί τείνουν να διακόπτουν τη διαδρομή τους κοντά στην αρχή ή το τέλος και όχι στη μέση, προκειμένου να ανεφοδιαστούν. Ο ανεφοδιασμός πραγματοποιείται συχνά σε ταξίδια μετακίνησης, ενώ συνδέεται με τα ψώνια με μικρότερη από την αναμενόμενη συχνότητα. Επιπλέον, ο ανεφοδιασμός για ένα μόνο σκοπό δεν είναι ασυνήθιστος. Σε συνδυασμό με τις υπάρχουσες βάσεις δεδομένων που προσφέρουν την κατανομή των ταξιδιών σε μια μητροπολιτική περιοχή, τα ευρήματα αυτά θα αποτελέσουν ένα βασικό σύνολο σχέσεων για τον καθορισμό της χωρικής κατανομής των θέσεων ανεφοδιασμού στην περιοχή που θα είναι περισσότερο αποδεκτές από τους οδηγούς μη πετρελαιοκίνητων οχημάτων. Ως στρατηγικές τοποθεσίες για τα αρχικά σημεία πώλησης, η ανάλυση υποδεικνύει τοποθεσίες κατά μήκος διαδρομών με μεγάλο όγκο μετακινήσεων.

Πραγματοποιήθηκε εμπειρική μελέτη με τη χρήση έρευνας βάσει ερωτηματολογίου για τη διερεύνηση των προτύπων ανεφοδιασμού με σύγκριση των οδηγών οχημάτων βενζίνης και συμπιεσμένου φυσικού αερίου (Compressed Natural Gas - CNG) (Kuby, Kelley & Schoenemann, 2013). Κατά τη στιγμή της εν λόγω μελέτης, μόνο 60 πρατήρια CNG, που αντιστοιχούσαν μόλις στο 0,02% των 3200 πρατηρίων βενζίνης στην περιοχή, ήταν ανοικτά στο ευρύ κοινό. Η έρευνα διαπίστωσε ότι οι οδηγοί οχημάτων CNG γεμίζουν συχνότερα τις δεξαμενές τους και παρακάμπτουν τον δρόμο τους για να ανεφοδιαστούν από ό,τι οι οδηγοί βενζινοκίνητων οχημάτων. Όσον αφορά τις τοποθεσίες των σταθμών ανεφοδιασμού AFV, η μελέτη κατέληξε στο συμπέρασμα ότι οι σταθμοί ανεφοδιασμού θα πρέπει να τοποθετούνται στο δρόμο προς τους προορισμούς ή στις εισόδους των αυτοκινητοδρόμων και όχι σε σημεία κοντά στο σπίτι, γεγονός που υποδηλώνει ότι τα μοντέλα βέλτιστης τοποθέτησης με βάση τη ροή θα ήταν κατάλληλα στο πρώιμο στάδιο της ανάπτυξης των AFV (Ko, Gim & Guensler, 2017).

Μια παρόμοια ερευνητική προσπάθεια παρατηρείται στους Kelley και Kuby (2013), όπου 259 οδηγοί οχημάτων CNG πήραν συνεντεύξεις στη Νότια Καλιφόρνια των ΗΠΑ προκειμένου να διερευνηθεί η συμπεριφορά τους στον ανεφοδιασμό. Εστιάζοντας στο κατά πόσον οι ερωτηθέντες επιλέγουν τους σταθμούς που βρίσκονται πλησιέστερα στο σπίτι τους ή σε διαδρομές που απαιτούν τη μικρότερη δυνατή απόκλιση, η έρευνα κατέληξε στο συμπέρασμα ότι θα ήταν καλύτερο οι σταθμοί ανεφοδιασμού AFV να βρίσκονται κατά μήκος των διαδρομών που διανύουν συχνά οι οδηγοί, όπως οι διαδρομές μετακίνησης από το σπίτι στη δουλειά.

Αντίθετα, στο πλαίσιο της μελέτης των Brey et al. (2016), μια έρευνα που διεξήχθη στη Σεβίλλη της Ισπανίας το 2015 αποκάλυψε ότι οι οδηγοί ήταν πιο πρόθυμοι να ανεφοδιάζονται κοντά στην αφετηρία ή τον προορισμό τους (57,0%) παρά στο δρόμο (28,5%). Άλλοι οδηγοί (14,5%) απάντησαν ότι θα έκαναν ειδικές διαδρομές μετ' επιστροφής για ανεφοδιασμό ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των σταθμών. Οι πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά ανεφοδιασμού και τις προτιμήσεις των δυνητικών καταναλωτών αποτελούν βασική εισροή για το σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού δικτύου σταθμών HRS. Οι πληροφορίες αυτές εξαρτώνται από την περιοχή στην οποία πρόκειται να αναπτυχθεί η υποδομή ανεφοδιασμού υδρογόνου. Η έρευνα που διεξήχθη στη Σεβίλλη έδειξε ότι η γειτνίαση με το σπίτι είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά των σημερινών οδηγών της Σεβίλλης όσον αφορά τον ανεφοδιασμό. Επιπλέον, οι οδηγοί της Σεβίλλης δήλωσαν ότι ο αριθμός των σταθμών ανεφοδιασμού καυσίμων στην πόλη και η εγγύτητά τους με τα σπίτια τους είναι δύο παράγοντες που λαμβάνουν πολύ σοβαρά υπόψη στην απόφασή τους να μεταβούν σε οχήματα κυψελών καυσίμου ή σε οποιοδήποτε άλλο όχημα AFV, εκφράζοντας μια μέση τιμή της απαιτούμενης εγγύτητας 10 λεπτών οδήγησης.

Η γνώση της στάθμης της δεξαμενής ανεφοδιασμού των οδηγών οχημάτων AFV είναι επίσης σημαντική, καθώς μπορεί να παράσχει πληροφορίες για τον καθορισμό της κατανομής των σταθμών ανεφοδιασμού. Είναι χαρακτηριστικό ότι οι Kelley & Kuby (2013) διαπίστωσαν ότι οι οδηγοί CNG τείνουν να ανεφοδιάζονται με περισσότερο υπόλοιπο στη δεξαμενή τους από ό,τι οι οδηγοί βενζινοκίνητων οχημάτων.

Όσον αφορά τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, έχουν διεξαχθεί εμπειρικές μελέτες σχετικά με τη συμπεριφορά ανεφοδιασμού σε πραγματικό περιβάλλον. Οι Smart και Schey (2012) διερεύνησαν τη συμπεριφορά οδήγησης και φόρτισης των EV χρησιμοποιώντας δεδομένα που συλλέχθηκαν από 2903 EV στο πλαίσιο μιας επίδειξης, με την ονομασία "The EV project", που λειτούργησε σε πόλεις των ΗΠΑ. Η μελέτη ανέφερε ότι οι χρήστες EV άρχισαν να φορτίζουν σε επίπεδο φόρτισης 20% ή υψηλότερο και το 82% των συμβάντων φόρτισης πραγματοποιήθηκε στο σπίτι των οδηγών. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν προκύψει και από άλλους ερευνητές, υποδεικνύοντας ότι οι χρήστες EV αφήνουν συνήθως 20 μίλια ως εφεδρική αυτονομία για μια μπαταρία με αυτονομία 100 μιλίων. Με βάση αυτή τη διαπίστωση, συνήθως χρησιμοποιείται ένα όριο 80% ως παράμετρος για το εύρος ανοχής. Παρόμοια ευρήματα αποκαλύπτει και η μελέτη των González et al. (2014) στην οποία, αναλύοντας τις δραστηριότητες που πραγματοποιούνται κατά τις περιόδους φόρτισης, αποδεικνύεται ότι οι περισσότερες φορτίσεις πραγματοποιούνται όταν οι χρήστες του οχήματος βρίσκονται στο σπίτι ή στην εργασία τους. Ωστόσο, έχει γίνει μια πιο λεπτομερής ανάλυση που μελετά τη σχέση μεταξύ δραστηριότητας και χρέωσης για κάθε ζώνη ανάλυσης κυκλοφορίας (Traffic Analysis Zone - TAZ), παρουσιάζοντας πρόσθετα αποτελέσματα. Η ανάλυση αυτή δείχνει ότι, ανάλογα με τη μελετώμενη ζώνη, οι περισσότερες χρεώσεις θα μπορούσαν να πραγματοποιηθούν ενώ οι χρήστες του οχήματος κάνουν άλλη δραστηριότητα (π.χ. ψώνια) που δεν σχετίζεται με την εργασία ή την παραμονή στο σπίτι. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό να προωθηθούν τα σημεία φόρτισης στο χώρο εργασίας μέσω δημόσιας χρηματοδότησης.

8.2 Ιδιοκτησία οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων

Δεδομένου ότι οι σταθμοί εφοδιασμού AFV αναπτύσσονται για να καλύψουν την υπάρχουσα και να προωθήσουν περαιτέρω μια μελλοντική ζήτηση, οι χρήστες-στόχοι πρέπει να προσδιοριστούν και να διαφοροποιηθούν ανάλογα με τις δυνατότητές τους να χρησιμοποιήσουν τους σταθμούς αυτούς. Στην πραγματικότητα, η περιοχή με περισσότερους δυνητικούς αγοραστές οχημάτων AFV απαιτεί περισσότερους σταθμούς ανεφοδιασμού, και ως εκ τούτου η εκτίμηση της ιδιοκτησίας οχημάτων AFV αποτέλεσε κρίσιμο βήμα στη διαδικασία προσδιορισμού της ζήτησης ανεφοδιασμού. Γενικά, η ιδιοκτησία AFV εκτιμάται πολλαπλασιάζοντας ένα υποτιθέμενο ποσοστό διείσδυσης AFV και τον αριθμό των αυτοκινήτων που κυκλοφορούν στην περιοχή. Ωστόσο, το ποσοστό διείσδυσης είναι πιθανό να επηρεάζεται από πολυάριθμους παράγοντες (Agnolucci & McDowall, 2013).

Μελέτες έχουν δείξει ότι διάφοροι κοινωνικοοικονομικοί παράγοντες, όπως το μορφωτικό επίπεδο, το εισόδημα, το φύλο, η ηλικία, η ιδιοκτησία αυτοκινήτου και η απόσταση μετακίνησης σχετίζονται με την προθυμία αγοράς ή χρήσης φιλικών προς το περιβάλλον οχημάτων, συμπεριλαμβανομένων των οχημάτων AFV (Ko, Gim & Guensler, 2017· Giménez-Gaydou et al., 2016). Γενικά, οι μελέτες δείχνουν ότι τα άτομα με πανεπιστημιακή εκπαίδευση, οι μεσαίες και υψηλές εισοδηματικές ομάδες και τα νοικοκυριά με περισσότερα από ένα αυτοκίνητα έχουν την τάση να αποδέχονται

ευκολότερα τα οχήματα AFV. Επιπλέον, μια μεγαλύτερη απόσταση μετακίνησης μπορεί να ασκήσει αρνητική επίδραση στην προτίμηση για τα οχήματα AFV λόγω της περιορισμένης διαθεσιμότητας καυσίμων, όπως καταδεικνύει μια μελέτη δηλωμένων προτιμήσεων των Potoglou & Kanaroglou (2007), που διεξήχθη σε μια καναδική αστική περιοχή, το Χάμιλτον στο Οντάριο.

Τα κίνητρα πολιτικής μπορούν επίσης να επηρεάσουν την ιδιοκτησία των οχημάτων AFV, κάτι που έχει αναφερθεί συχνά στη βιβλιογραφία. Για παράδειγμα, οι Kelley και Kuby (2013) ανέφεραν ότι το 63% των ερωτηθέντων στην έρευνα απάντησε ότι ο κύριος λόγος για την κατοχή οχήματος CNG είναι η απεριόριστη χρήση των λωρίδων οχημάτων υψηλής πληρότητας (high occupancy vehicle - HOV). Παρομοίως, οι κάτοικοι της Καλιφόρνιας απάντησαν ότι ένας σημαντικός λόγος για να εξετάσουν το ενδεχόμενο υβριδικών ηλεκτροκίνητων οχημάτων είναι η δυνατότητα χρήσης των λωρίδων HOV ενώ οδηγούν μόνοι τους, ιδίως για άτομα με δυνητικά μεγάλες μετακινήσεις προς τη δουλειά. Μια έρευνα που διεξήχθη στη Γερμανία έδειξε επίσης ότι κυβερνητικά κίνητρα όπως η απαλλαγή από τον φόρο κυκλοφορίας οχημάτων, η δωρεάν στάθμευση και η πρόσβαση σε λεωφορειολωρίδες θα μπορούσαν να ενισχύσουν την ιδιοκτησία των οχημάτων AFV. Όπως φαίνεται, η εξέταση των πολιτικών κινήτρων μπορεί να είναι σημαντική για τον καθορισμό των θέσεων των σταθμών ανεφοδιασμού όταν οι δράσεις πολιτικής περιορίζονται μόνο σε μια συγκεκριμένη περιοχή, για παράδειγμα, δωρεάν ή μειωμένη χρέωση για τα οχήματα AFV στο κέντρο της πόλης (Kelley & Kuby, 2013).

8.3 Προσεγγίσεις εκτίμησης της ζήτησης

Η εκτίμηση της ζήτησης ανεφοδιασμού μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Για παράδειγμα, μπορούν να εφαρμοστούν μαθηματικά μοντέλα για τον προσδιορισμό ενός προφίλ ζήτησης ανεφοδιασμού. Το προφίλ μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με τη χωρική και χρονική κατανομή της ζήτησης κατανάλωσης καυσίμων (Agnolucci & McDowall, 2013· Ko, Gim & Guensler, 2017). Τα δεδομένα λειτουργίας οχημάτων υψηλής ανάλυσης του πραγματικού κόσμου, τα οποία καθίστανται όλο και περισσότερο διαθέσιμα, ιδίως για τα εμπορικά οχήματα που είναι εξοπλισμένα με συσκευές εντοπισμού θέσης, μπορούν επίσης να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη δυνητική ζήτηση ανεφοδιασμού. Για παράδειγμα, οι Tu et al. (2016) απεικόνισαν πώς τέτοια δεδομένα του πραγματικού κόσμου, που προέρχονται από βάση δεδομένων λειτουργίας ταξί διάρκειας μίας εβδομάδας, μπορούν να εφαρμοστούν για τη βελτιστοποίηση των θέσεων φόρτισης ηλεκτρικών ταξί, λαμβάνοντας υπόψη τόσο τη χωρική όσο και τη χρονική κατανομή της ζήτησης φόρτισης.

Τέτοια εναλλακτικά οχήματα όπως τα EV μπορεί να χρειάζονται αρκετές ώρες για επαναφόρτιση, ανάλογα με τους τύπους των φορτιστών. Ως εκ τούτου, οι οδηγοί μπορεί να προτιμούν την επαναφόρτιση των οχημάτων τους κατά τη διάρκεια της στάθμευσης σε χώρους εργασίας ή εμπορικά κέντρα, γεγονός που σημαίνει ότι ο προσδιορισμός των

θέσεων των σταθμών ανεφοδιασμού συνδέεται στενά με τη ζήτηση στάθμευσης (Chen & Hua, 2014· Gonzalez et al., 2014· Giménez-Gaydou et al., 2016).

Στην ίδια κατεύθυνση οι Giménez-Gaydou et al. (2016) προτείνουν ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, τα σχέδια επιλέγουν τοποθεσίες σε δημοφιλείς χώρους στάθμευσης, όπως κέντρα πόλεων, εμπορικές περιοχές, σιδηροδρομικούς σταθμούς και πανεπιστημιούπολεις. Οι θέσεις αυτές είναι ιδιαίτερα ορατές, ωστόσο, ο χαμηλός χρόνος στάθμευσης και τα υψηλά ποσοστά εναλλαγής που συχνά παρατηρούνται εκεί, θα μπορούσαν να προσφέρουν μια ανεπαρκή λύση για τις πραγματικές καθημερινές ανάγκες φόρτισης των χρηστών. Τέτοια προτεινόμενα μοντέλα δίνουν έμφαση σε μια προσέγγιση "με βάση τη στάθμευση", η οποία είναι χρήσιμη ιδίως για την εξυπηρέτηση της ζήτησης ανεφοδιασμού κατά τη διάρκεια της ημέρας και κατά το πρώτο βήμα μιας διαδικασίας προσδιορισμού θέσης δημόσιας φόρτισης.

Η πιο συνηθισμένη προσέγγιση για την εκτίμηση της ζήτησης ανεφοδιασμού είναι η χρήση ταξιδιών OD. Στην προσέγγιση αυτή, οι αποστάσεις οδήγησης μεταξύ ζευγών OD εκτιμώνται συνήθως με τη χρήση αλγορίθμων συντομότερης διαδρομής και οι υποψήφιες τοποθεσίες για ανεφοδιασμό υποτίθεται ότι βρίσκονται σε προορισμούς ή σταθερές εγκαταστάσεις. Η προσέγγιση με βάση τη ροή είναι μια άλλη μορφή προσέγγισης "με βάση την OD", καθώς χρησιμοποιεί τα ταξίδια OD για την κατασκευή διαδρομών κατά μήκος των οποίων οι υποψήφιοι σταθμοί βρίσκονται κυρίως σε κόμβους ή τόξα. Ωστόσο, η κατασκευή ενός μοντέλου βασισμένου στη ροή με τη χρήση ταξιδιών OD είναι μάλλον περίπλοκη και επαχθής, καθώς απαιτεί δεδομένα ροής δικτύου, τα οποία δεν είναι πάντα εύκολο να αποκτηθούν, ιδίως όταν η γεωγραφική κάλυψη του δικτύου είναι ευρεία.

Για τον μετριάσμό αυτού του ζητήματος, προτάθηκε και εφαρμόστηκε για τον εντοπισμό σταθμών υδρογόνου από τους Lin et al. (2008) μια προσέγγιση που απαιτεί μόνο την κατανομή των διανυθέντων οχηματοχιλιομέτρων (Vehicle Miles Travelled - VMT). Αυτή η εφαρμογή VMT, υπό την προϋπόθεση ότι δεν ήταν διαθέσιμες οι διαδρομές OD, βρίσκεται επίσης στους Brey et al. (2016). Στη μελέτη, οι ερευνητές όρισαν δύο ομόκεντρους κύκλους με διαφορετικές ακτίνες γύρω από κάθε σταθμό υδρογόνου και εξέτασαν το VMT εντός των κύκλων, αποδίδοντας υψηλότερα βάρη στα οδικά τμήματα στους εσωτερικούς κύκλους.

Ελλείπει διαθέσιμων δεδομένων, μια άλλη προσέγγιση που έχει χρησιμοποιηθεί είναι η ακόλουθη. Δεδομένου ότι οι διαδρομές OD των οχημάτων AFV ενδέχεται να μην είναι εύκολα διαθέσιμες, έχει απλώς υποτεθεί ότι το πρότυπο ροής των οχημάτων AFV ακολουθεί εκείνο της γενικής κυκλοφορίας και, συνεπώς, εφαρμόζεται ένα ομοιογενές ποσοστό υιοθέτησης ανεξάρτητα από τις γεωγραφικές περιοχές όπου αναχωρούν ή φθάνουν οι διαδρομές OD (Brey et al., 2016).

Κεφάλαιο 9: Επιλεγμένα μοντέλα

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται ορισμένα επιλεγμένα μοντέλα. Αυτά είναι το Μοντέλο μέγιστης κάλυψης, το p -median & FRL καθώς και τα Μοντέλα πολλαπλών στόχων.

Κατά την επιλογή των κατάλληλων υποψήφιων χώρων για τους σταθμούς ανεφοδιασμού οχημάτων AFV, όπως σημεία φόρτισης, σταθμοί ανταλλαγής μπαταριών που προσφέρουν υπηρεσίες ταχείας φόρτισης και ανταλλαγής, σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου κ.λπ., θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι βασικοί κανονισμοί ασφαλείας. Σε γενικές γραμμές, αυτοί είναι οι εξής (Chen & Hua, 2014):

1. Ο συνολικός σχεδιασμός θα πρέπει να είναι συμβατός με το τοπικό περιφερειακό και πολεοδομικό σχέδιο και σύμφωνα με τις απαιτήσεις της προστασίας του περιβάλλοντος και της πυρασφάλειας.
2. Οι χώροι θα πρέπει να είναι εύκολο να ανεφοδιαστούν (π.χ. παροχή ρεύματος, παροχή αερίου) και να επωφεληθούν από τις μεταφορές, την πυροπροστασία, την υδροδότηση, την αποχέτευση και την αντιπλημμυρική προστασία και άλλες δημόσιες εγκαταστάσεις που βρίσκονται κοντά.
3. Οι σταθμοί εντός των ορίων της πόλης θα πρέπει να βρίσκονται κοντά στους δρόμους της πόλης και μακριά από διασταυρώσεις των δρόμων της πόλης, μεγάλη κυκλοφορία, δυνητικά επικίνδυνα σημεία, σκόνες, διαβρωτικά αέρια και έντονες δονήσεις ή υψηλές θερμοκρασίες.

Εκτός αυτού, η κατασκευή των σταθμών τροφοδοσίας AFV θα πρέπει να ικανοποιεί μια σειρά απαιτήσεων από την παροχή ενέργειας, το σύστημα παρακολούθησης και την ασφάλεια. Επιπλέον, στην περίπτωση των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου οι απαιτήσεις αυτές μπορεί να είναι πιο αυστηρές λόγω των ιδιαίτερων φυσικών και χημικών ιδιοτήτων του υδρογόνου (αποθήκευση υπό υψηλή πίεση, υψηλή ευφλεκτότητα) που απαιτούν ειδικό χειρισμό. Ωστόσο, οι περισσότερες απαιτήσεις είναι παρόμοιες με εκείνες των συμβατικών πρατηρίων καυσίμων. Έτσι, τα παραδοσιακά πρατήρια καυσίμων έχουν ικανοποιήσει σχεδόν όλες αυτές τις απαραίτητες απαιτητικές απαιτήσεις, έτσι ώστε οι ειδικοί κανονισμοί αναμένεται να ικανοποιηθούν σε μεγάλο βαθμό. Κατά συνέπεια, τα παραδοσιακά πρατήρια βενζίνης μπορούν να θεωρηθούν ως οι υποψήφιοι χώροι που μπορούν να μετατραπούν σε σταθμούς AFV. Το σύστημα αυτό εξοικονομεί πολλές προσπάθειες και εκμεταλλεύεται ένα υπάρχον δίκτυο σε μια επιλεγμένη περιοχή (Chen & Hua, 2014).

Οι περισσότερες από τις μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί για τον εντοπισμό σταθμών ανεφοδιασμού AFV προσπαθούν να επιλύσουν το ζήτημα μέσω τεχνικών βελτιστοποίησης, όπως ο μαθηματικός προγραμματισμός και οι ευρετικές μέθοδοι. Τα προβλήματα χωροθέτησης μπορούν να χωριστούν χονδρικά σε τέσσερις κατηγορίες: το

πρόβλημα κάλυψης συνόλου, το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης, το πρόβλημα p -κέντρου και το πρόβλημα p -μέσου, καθώς και συνδυασμένα πολυκριτήρια μοντέλα. Για τις ανάγκες της παρούσας διατριβής εστιάζουμε σε επιλεγμένα μοντέλα όπως το p -median μοντέλο, μια τροποποιημένη εκδοχή του προβλήματος κάλυψης συνόλου, ένα εκτεταμένο μοντέλο θέσης σύλληψης ροής (flow capturing location model - FCLM) που ονομάζεται μοντέλο θέσης ροής-αναπλήρωσης (flow-refueling location model - FRLM) και ένα μοντέλο πολλαπλών στόχων. Τα μοντέλα αυτά χρησιμοποιούνται ως αναφορά στο πλαίσιο της διατριβής για την ανάπτυξη ενός μοντέλου για τον εντοπισμό του δικτύου σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου για τις ανάγκες των FCEV στο αρχικό στάδιο ανάπτυξής τους (Ko, Gim & Guensler, 2017).

Το μοντέλο p -median, ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα χωροθέτησης κάθε είδους, εντοπίζει p εγκαταστάσεις και κατανέμει τους κόμβους ζήτησης σε αυτές ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνολική σταθμισμένη απόσταση που διανύεται.

Το άλλο συνηθισμένο μοντέλο είναι το πρόβλημα μέγιστης κάλυψης, το οποίο αναζητά τη μέγιστη ζήτηση που μπορεί να εξυπηρετηθεί εντός μιας καθορισμένης απόστασης εξυπηρέτησης (ή χρόνου) δεδομένου περιορισμένου αριθμού εγκαταστάσεων ανεφοδιασμού. Η λύση αυτού του προβλήματος προσδιορίζει τόσο το μεγαλύτερο ποσό ζήτησης που μπορεί να καλυφθεί όσο και τις p εγκαταστάσεις που επιτυγχάνουν τη μέγιστη κάλυψη (Ko, Gim & Guensler, 2017).

Το μοντέλο εντοπισμού θέσης με καταγραφή ροής (FCLM) και οι παραλλαγές του, σε αντίθεση με τα μονοδιάστατα μοντέλα που βασίζονται σε σημεία, τα μοντέλα "με βάση τη ροή" θεωρούν διδιάστατες ροές, διαδρομές ή ταξίδια ως ζήτηση ανεφοδιασμού. Το FCLM, που προτάθηκε αρχικά από τον Hodgson (1990), είναι το κλασικό μοντέλο που βασίζεται στη ροή και αποτελεί παραλλαγή ενός προβλήματος μέγιστης κάλυψης που εντοπίζει τις εγκαταστάσεις p έτσι ώστε να αναχαιτίζει όσο το δυνατόν περισσότερες διαδρομές. Μια εκτεταμένη εκδοχή του FCLM που θα συζητηθεί στη συνέχεια είναι το μοντέλο θέσης ροής-καυσίμου (FRLM).

Το μοντέλο θέσης ροής-ανεφοδιασμού (FRLM) είναι ένα μοντέλο ζήτησης με βάση τη διαδρομή που τοποθετεί p σταθμούς ώστε να μεγιστοποιεί τον αριθμό των ταξιδιών στις συντομότερες διαδρομές τους που μπορούν να ανεφοδιαστούν. Έτσι, μια ροή δεν θεωρείται ότι έχει καταληφθεί (ανεφοδιαστεί) εκτός εάν είναι δυνατόν να ταξιδέψει από την αφετηρία στον προορισμό και πίσω χωρίς να ξεμείνει από καύσιμα, πράγμα που, δεδομένης της περιορισμένης εμβέλειας οδήγησης των οχημάτων AFV, μπορεί να απαιτεί πολλαπλούς σταθμούς ανεφοδιασμού κατάλληλα τοποθετημένους κατά μήκος μιας καλυμμένης διαδρομής ροής αφετηρίας προορισμού (OD) (Hong et al., 2017).

Η βασική ιδέα για τον καθορισμό των θέσεων ανεφοδιασμού είναι η ελαχιστοποίηση του σχετικού κόστους (δηλαδή του χρόνου ταξιδιού ή της απόστασης προς τις θέσεις ανεφοδιασμού) ή η μεγιστοποίηση της εξυπηρετούμενης ζήτησης, όπως εφαρμόζεται στα γενικά προβλήματα θέσης (Hong et al., 2017).

9.1 Μοντέλο μέγιστης κάλυψης

Μια τροποποιημένη έκδοση του μοντέλου μέγιστης κάλυψης χρησιμοποιήθηκε στη μελέτη των Chen και Hua (2014). Η προσέγγιση βασίζεται σε ένα μοντέλο κάλυψης μέγιστης ζήτησης για τη βελτιστοποίηση της θέσης των σταθμών ταχείας φόρτισης για τα EV. Δεν λαμβάνει υπόψη τους περιοριστικούς περιορισμούς του χρόνου φόρτισης, όπως συμβαίνει στην περίπτωση των συμβατικών αργών φορτιστών. Ως εκ τούτου, αναπτύσσεται ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για σταθμούς ταχείας φόρτισης που λαμβάνει υπόψη το περιβαλλοντικό κόστος και τη χρήση του υφιστάμενου παραδοσιακού δικτύου πρατηρίων καυσίμων. Στην εν λόγω μελέτη οι δύο βασικοί στόχοι για το πρόβλημα χωροθέτησης είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους, συμπεριλαμβανομένου του κόστους κατασκευής, του ολοκληρωμένου κόστους κ.ο.κ., και η ελαχιστοποίηση της απώλειας των χρηστών.

Το πρόβλημα θα μπορούσε να περιγραφεί ως εξής: Στο δίκτυο σταθμών φυσικού αερίου, η δυνητική αρχή (δηλαδή η κυβέρνηση) πρέπει να αποφασίσει πόσοι σταθμοί πρέπει να κατασκευαστούν, πού πρέπει να τοποθετηθούν και σε ποια βαθμίδα πρέπει να είναι. Το κόστος μετατροπής κάθε υποψήφιας τοποθεσίας εξαρτάται από την κλίμακα και τις συνθήκες της. Ο στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος ανακατασκευής (Chen & Hua, 2014).

Λαμβάνοντας υπόψη, ταυτόχρονα, το πράσινο και χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα υπόβαθρο αυτής της προώθησης, ο στόχος είναι να επιλεγούν οι κατάλληλες υποψήφιες τοποθεσίες που κάθε πελάτης θα εξαντλήσει τις λιγότερες εκπομπές κατά τη διαδρομή. Δεδομένου ότι εξετάζουν επίσης το κόστος μετατροπής, δεν είναι σκόπιμο να προσθέσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα απευθείας στην αντικειμενική συνάρτηση. Ως εκ τούτου, αποδίδουν ένα μοναδιαίο κόστος για να παρουσιάσουν το περιβαλλοντικό κόστος που παράγεται από τη συμπεριφορά φόρτισης του πελάτη. Γενικά, αυτό το μοναδιαίο κόστος ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα, το έδαφος που διανύεται και τις τάσεις του οδηγού. Σε αυτή την περίπτωση, υπέθεσαν ότι πρόκειται για μια μετρήσιμη σταθερά που αντιπροσωπεύει τα χιλιόμετρα και το περιβαλλοντικό κόστος. Σύμφωνα με τη μελέτη, εξετάζονται τέσσερα επίπεδα σταθμών φόρτισης (Chen & Hua, 2014).

Οι παραδοχές αυτού του μοντέλου είναι οι εξής:

1. Οι υποψήφιες τοποθεσίες για τους σταθμούς φόρτισης επιλέγονται από όλα τα βενζινάδικα σε της περιοχής σχεδιασμού.
2. Κάθε σημείο ζήτησης αντιπροσωπεύει μια μικρή περιοχή και η ζήτηση σημαίνει το συνολικό αριθμό των ηλεκτρικών οχημάτων που χρειάζονται φόρτιση.
3. Όλοι οι χρήστες σε κάθε σημείο ζήτησης μπορούν να δέχονται την υπηρεσία μόνο σε έναν σταθμό σε ένα σταθερή χρονική περίοδο.

4. Το περιβαλλοντικό κόστος έχει μια απλή γραμμική σχέση με την απόσταση, η οποία είναι η ευκλείδεια απόσταση.

Ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται έχει ως εξής.

ρ : Ο σταθερός αριθμός σταθμών φόρτισης ηλεκτρικών οχημάτων στην περιοχή σχεδιασμού.

$P=\{p\}$: Το σύνολο των διαδρομών προέλευσης-προορισμού που επιλέγονται στο δίκτυο.

V_p : Το σύνολο των κόμβων που ανήκουν σε μια διαδρομή p

I : Το σύνολο των σημείων ζήτησης

J : Το σύνολο των υποψήφιας θέσεων

D_i : Η ζήτηση στον κόμβο i

m : Η βαθμίδα του σταθμού φόρτισης

F_{jm} : Το κόστος μετασχηματισμού του σταθμού φόρτισης βαθμού m στον υποψήφιο j

C_m : Η ικανότητα εξυπηρέτησης του σταθμού φόρτισης βαθμού m

d_{ij} : Η απόσταση μεταξύ του σημείου ζήτησης i και της υποψήφιας θέσης j

x_{jm} :

1, αν γίνει επιλογή της υποψήφιας θέσης j και μετατραπεί σε σταθμό φόρτισης βαθμού m

0, διαφορετικά.

y_{ij} :

1, εάν το σημείο ζήτησης i καλύπτεται από σταθμό φόρτισης ή ανταλλαγής μπαταριών που βρίσκεται στο j

0, διαφορετικά

Στη συνέχεια, με βάση την αντικειμενική συνάρτηση και τους περιορισμούς, το πρόβλημα διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής (Chen & Hua, 2014):

$$\min \sum_j \sum_m F_{jm} x_{jm} \quad (4)$$

$$\sum_j \sum_m x_{jm} y_{ij} \geq 1, \forall i \in I \quad (5)$$

$$y_{ij} \leq \sum_m x_{jm}, \forall i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$\sum_i D_i y_{ij} \leq \sum_m C_m x_{jm}, \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_m x_{jm} \leq 1, \forall j \in J \quad (8)$$

$$x_{jm} \in \{0,1\}, \forall j \in J, m \in M \quad (9)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in I, j \in J \quad (10)$$

Η αντικειμενική συνάρτηση (4) είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους μετασχηματισμού. Ο περιορισμός (5) ορίζει ότι κάθε σημείο ζήτησης πρέπει να καλύπτεται από τουλάχιστον έναν σταθμό φόρτισης. Ο περιορισμός (6) σημαίνει ότι η υπηρεσία μπορεί να προσφερθεί μόνο εάν ο σταθμός φόρτισης βρίσκεται σε αυτό το υποψήφιο σημείο. Ο περιορισμός (7) περιορίζει την ικανότητα εξυπηρέτησης του σταθμού φόρτισης. Ο περιορισμός (8) σημαίνει ότι ένας υποψήφιος χώρος μπορεί να μετατραπεί μόνο σε έναν βαθμό σταθμό φόρτισης. Τέλος, οι περιορισμοί (9) και (10) είναι οι περιορισμοί ολοκλήρωσης.

Το παραπάνω προτεινόμενο μοντέλο, βασικά λόγω του γεγονότος ότι αφορά τους σταθμούς ταχείας φόρτισης, δεν περιλαμβάνει τον χρονικό περιορισμό που συνήθως αντιμετωπίζουν τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα προκειμένου να φορτίσουν πλήρως τις μπαταρίες τους. Έτσι, μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί στις ανάγκες χωροθέτησης σταθμών HRS για τα FCEV, τα οποία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως ο χρόνος ανεφοδιασμού τους είναι λίγο πολύ ίδιος με αυτόν των συμβατικών οχημάτων (Chen & Hua, 2014).

9.2 p-median & FRLM

Τα μοντέλα p-median και flow-refueling είναι δύο από τα πιο δημοφιλή μοντέλα για τη βέλτιστη χωροθέτηση σταθμών εναλλακτικών καυσίμων. Το μοντέλο p-median, ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μοντέλα χωροθέτησης κάθε είδους, εντοπίζει p εγκαταστάσεις και κατανέμει τους κόμβους ζήτησης σε αυτές ώστε να ελαχιστοποιηθεί η συνολική σταθμισμένη απόσταση που διανύεται. Συγκριτικά, το μοντέλο θέσης ροής-ανεφοδιασμού (FRLM) είναι ένα μοντέλο ζήτησης με βάση τη διαδρομή που τοποθετεί p σταθμούς για να μεγιστοποιήσει τον αριθμό των ταξιδιών στις συντομότερες διαδρομές τους που μπορούν να ανεφοδιαστούν (Urchurch & Kubby, 2010).

Για τη χωροθέτηση σταθμών εναλλακτικών καυσίμων, το μοντέλο p-median έχει τη γοητεία της χωροθέτησης σταθμών που βρίσκονται κοντά στον τόπο κατοικίας των ανθρώπων. Το μοντέλο p-median έχει το πρόσθετο πλεονέκτημα ότι έχει απλές απαιτήσεις δεδομένων. Για παράδειγμα, τα δεδομένα του οδικού δικτύου και τα πληθυσμιακά δεδομένα είναι ευρέως διαθέσιμα σε μορφή συστήματος γεωγραφικών πληροφοριών (GIS) από διάφορες πηγές (π.χ. Στατιστική Αρχή, Υπουργείο Υποδομών, Μεταφορών και Δικτύων) και οι αποστάσεις μεταξύ των κόμβων μπορούν εύκολα να υπολογιστούν με τη χρήση ενός προσαρμοσμένου λογισμικού (Urchurch & Kubby, 2010).

Αντίθετα, οι βασικές μονάδες ζήτησης στα μοντέλα εντοπισμού ροής δεν είναι σημεία στο χώρο που αντιπροσωπεύουν τον τόπο διαμονής των ανθρώπων (μοντέλα p-median), ούτε σύνδεσμοι δικτύου (μοντέλα καταμέτρησης της κυκλοφορίας), αλλά ροές σε διαδρομές σε ένα δίκτυο που αντιπροσωπεύουν τις διαδρομές που διανύουν οι άνθρωποι.

Από πλευράς συμπεριφοράς, τα μοντέλα θέσης που αναχαιτίζουν τη ροή (FILM) είναι κατάλληλα για εγκαταστάσεις στις οποίες οι καταναλωτές σταματούν κατά τη διαδρομή τους προς κάπου αλλού, αντί να κάνουν ένα ειδικό ταξίδι από το σπίτι τους και πίσω. Δεδομένου ότι οι οδηγοί σπάνια πραγματοποιούν ειδικά ταξίδια από το σπίτι προς τους σταθμούς και πίσω μόνο για να ανεφοδιάσουν τα οχήματά τους, μπορεί να υποστηριχθεί ότι η καταγραφή της ροής παρέχει μια συμπεριφορικά ρεαλιστική βάση για τον εντοπισμό των σταθμών ανεφοδιασμού (Urchurch & Kubby, 2010).

Ωστόσο, υπάρχουν δύο βασικά προβλήματα στην εφαρμογή μοντέλων καταγραφής ροής όπως το βασικό FILM για τον εντοπισμό σταθμών ανεφοδιασμού. Πρώτον, αυτά τα μοντέλα απαιτούν έναν πίνακα ροών κυκλοφορίας από την προέλευση προς τον προορισμό, καθεμία από τις οποίες πρέπει στη συνέχεια να αντιστοιχιστεί σε μια συγκεκριμένη πιθανή διαδρομή μέσω του δικτύου. Αυτά τα δεδομένα του "πίνακα ταξιδιών" είναι πιο δύσκολο να χρησιμοποιηθούν από ό,τι τα δεδομένα πληθυσμού και δεν είναι πάντα διαθέσιμα για όλες τις περιοχές και τις γεωγραφικές κλίμακες (Brey et al., 2016).

Η προσέγγιση p-median

Το μοντέλο p-median ελαχιστοποιεί τη συνολική απόσταση μεταξύ του πληθυσμού και του πλησιέστερου εγκατάσταση. Η διατύπωση του μοντέλου p-median έχει ως εξής (Brey et al., 2016):

$$\text{Min} \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} \quad (11)$$

Υπόκειται σε:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (12)$$

$$\sum_j X_j = p \quad (13)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j \quad (14)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \quad (15)$$

$$Y_{ij} = 0,1 \quad \forall i, j \quad (16)$$

όπου Y_{ij} είναι 1 εάν ο πελάτης i εξυπηρετείται από την εγκατάσταση j , 0 εάν όχι, X_j είναι 1 εάν μια εγκατάσταση βρίσκεται στην υποψήφια τοποθεσία j , 0 εάν όχι, h_i είναι η ζήτηση στη θέση i , d_{ij} είναι η απόσταση από τη θέση i στη θέση j , p είναι ο αριθμός των εγκαταστάσεων που πρέπει να τοποθετηθούν.

Η αντικειμενική συνάρτηση (11) ελαχιστοποιεί τη σταθμισμένη ως προς τη ζήτηση απόσταση μεταξύ κάθε κόμβου ζήτησης και της πλησιέστερης εγκατάστασης.

Ο πρώτος περιορισμός (12) εξασφαλίζει ότι κάθε κόμβος ζήτησης θα κατανομηθεί σε μία και μόνο μία εγκατάσταση. Ο δεύτερος περιορισμός (13) θέτει τον αριθμό των εγκαταστάσεων που πρέπει να ανοίξουν σε ακριβώς p . Ο επόμενος περιορισμός (14) αποτρέπει την κατανομή της ζήτησης σε υποψήφιες τοποθεσίες που δεν διαθέτουν εγκαταστάσεις. Οι δύο τελευταίοι περιορισμοί εξασφαλίζουν ότι οι X_j και Y_{ij} έχουν Boolean τιμές 0 ή 1 (Hwang et al., 2015).

Προσέγγιση του μοντέλου θέσης ανεφοδιασμού ροής (Flow Refueling Location Model – FRLM)

Η διατύπωση του FRLM έχει ως εξής:

$$\text{Max} \sum_{q \in Q} f_q Y_q \quad (17)$$

Υπόκειται σε:

$$\sum_{h \in H} b_{qh} v_h \geq Y_q \quad \forall q \in Q \quad (18)$$

$$a_{hk} X_k \geq v_h \quad \forall h \in H; k \in K \quad (19)$$

$$\sum_k X_k = p \quad (20)$$

$$X_k \in \{0,1\} \quad \forall k \quad (21)$$

$$0 \leq Y_q \leq 1 \quad \forall q; 0 \leq v_h \leq 1 \quad \forall h \quad (22)$$

όπου Y_q είναι 1 εάν η διαδρομή q είναι "ανεφοδιάσιμη", 0 εάν όχι, $v_h = 1$ εάν όλες οι εγκαταστάσεις του συνδυασμού h είναι ανοικτές, 0 εάν όχι, X_k είναι 1 εάν η εγκατάσταση k είναι ανοικτή, 0 εάν όχι, f_q είναι ο συνολικός όγκος στη διαδρομή q , b_{qh} είναι 1 εάν ο συνδυασμός h μπορεί να ανεφοδιάσει τη διαδρομή q , 0 εάν όχι, a_{hk} είναι 1 εάν ο συνδυασμός h περιλαμβάνει την εγκατάσταση k , 0 εάν όχι (Hwang et al., 2015).

Η αντικειμενική συνάρτηση (17) μεγιστοποιεί την ποσότητα ροής που μπορεί να ανεφοδιαστεί. Ο πρώτος περιορισμός (18) εξασφαλίζει ότι οι ροές μπορούν να ανεφοδιαστούν μόνο εάν υπάρχει συνδυασμός ανοικτών εγκαταστάσεων που μπορεί να ανεφοδιάσει ολόκληρο το ταξίδι μετ' επιστροφής. Σε αυτή τη διατύπωση μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (mixed-integer linear programming - MILP), οι συνδυασμοί εγκαταστάσεων που μπορούν να ανεφοδιάσουν κάθε ροή πρέπει να προ-υπολογιστούν με βάση την απόσταση μεταξύ των υποψήφιων χώρων κατά μήκος κάθε διαδρομής και την εμβέλεια του οχήματος. Ο δεύτερος περιορισμός (19) εμποδίζει

τη χρήση ενός συνδυασμού εκτός εάν όλες οι εγκαταστάσεις του συνδυασμού είναι ανοικτές. Ο τρίτος περιορισμός (20) απαιτεί ακριβώς p εγκαταστάσεις να είναι ανοικτές. Ο τέταρτος περιορισμός (21) εξασφαλίζει ότι θα εντοπιστούν μόνο ολόκληρες εγκαταστάσεις. Ο τελευταίος περιορισμός (22) εμποδίζει το ποσοστό της ροής που ανεφοδιάζεται να υπερβαίνει το 1.

Οι Urchurh και Kuby (2010) στη μελέτη τους ανέλυσαν πόσο καλά αποδίδουν οι εγκαταστάσεις που εντοπίζονται από κάθε μοντέλο στην αντικειμενική συνάρτηση του άλλου σε οδικά δίκτυα στη Φλόριντα των ΗΠΑ. Ενώ κάθε αντικειμενική συνάρτηση υποβαθμίζεται κάπως όταν οι εγκαταστάσεις εντοπίζονται από το άλλο μοντέλο, οι σταθμοί που εντοπίζονται από το μοντέλο ροής-αναπλήρωσης γενικά τα καταφέρνουν καλύτερα στον στόχο p -median από ό,τι οι σταθμοί που εντοπίζονται από το μοντέλο p -median στον στόχο ροής-αναπλήρωσης. Αυτή η διαφορά μεταξύ των δύο μοντέλων είναι ακόμη πιο έντονη στην κλίμακα της πολιτείας από ό,τι στη μητροπολιτική κλίμακα. Επιπλέον, οι βέλτιστες θέσεις για το FRLM τείνουν να είναι πολύ πιο σταθερές καθώς αυξάνεται το p από εκείνες που εντοπίζονται από το p -median μοντέλο.

Πιο συγκεκριμένα, το σημαντικότερο εύρημα της μελέτης τους είναι ότι, και στις δύο κλίμακες ανάλυσης, οι θέσεις των εγκαταστάσεων του FRLM έχουν καλύτερες επιδόσεις στον στόχο p -median από ό,τι οι εγκαταστάσεις του p -median στον στόχο του FRLM. Αυτό υποδηλώνει ότι το FRLM συμπεριφέρεται καλύτερα στην εκπλήρωση και των δύο θεωριών για τη χωροθέτηση σταθμών ανεφοδιασμού καυσίμων (σταθμοί κοντά στο σπίτι των ανθρώπων και σταθμοί βολικοί για τις μετακινήσεις των ανθρώπων) από ό,τι το μοντέλο p -median. Ωστόσο, η δήλωση αυτή συνοδεύεται από ορισμένες επιφυλάξεις. Οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις είναι αρκετά διαφορετικές, καθώς η μία είναι ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης που προσπαθεί να συλλάβει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος μιας πεπερασμένης ποσότητας ροής, ενώ η άλλη είναι ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης που εργάζεται για τη μείωση της σταθμισμένης ως προς τη ζήτηση απόστασης από τις εγκαταστάσεις προς τον πληθυσμό. Η άμεση σύγκριση των επιδόσεων σε τόσο διαφορετικούς στόχους είναι δύσκολη (Urchurh & Kuby, 2010).

Μια άλλη σημαντική διαπίστωση είναι η κρίσιμη σημασία της κλίμακας του δικτύου σε σχέση με την εμβέλεια του οχήματος και το μέγεθος της αποσύνθεσης της απόστασης των ροών. Παρατηρείται έντονη διαφορά στην απόδοση και τη συμπεριφορά των δύο μοντέλων καθώς η κλίμακα αυξάνεται από μια αστική περιοχή σε επίπεδο πολιτείας. Σε μητροπολιτική κλίμακα, οι δύο αλγόριθμοι παράγουν κάπως παρόμοια αποτελέσματα όσον αφορά τη διασπορά των θέσεων των εγκαταστάσεων. Κανένας από τους δύο δεν αποδίδει βέλτιστα στην αντικειμενική συνάρτηση του άλλου μοντέλου, αλλά ο καθένας τους εμφανίζει αξιοσέβαστες επιδόσεις. Στην πολιτειακή κλίμακα, ωστόσο, τα μοντέλα παράγουν πολύ διαφορετικά πρότυπα χωροθέτησης σταθμών. Η απόδοση στην αντικειμενική συνάρτηση του άλλου μοντέλου είναι εξαιρετικά φτωχή. Σε πολιτειακή κλίμακα, το μοντέλο p -median ειδικότερα κάνει πολύ κακή δουλειά στην αναχαίτιση των ροών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το μοντέλο p -median είναι ένα μοντέλο κατανομής θέσης, κάθε εγκατάσταση χωροθετείται ώστε να βρίσκεται στο κέντρο του υποσυνόλου

των κόμβων που της έχουν κατανεμηθεί, γεγονός που συχνά μπορεί να τοποθετεί την εν λόγω εγκατάσταση στη μέση του πουθενά (Urchurch & Kubby, 2010).

Τέλος, το τρίτο σημαντικό συμπέρασμα είναι ότι οι βέλτιστες θέσεις που επιλέγονται από το FRLM είναι πολύ πιο σταθερές από εκείνες που επιλέγονται από το μοντέλο p -median καθώς η υποδομή αναπτύσσεται και ο αριθμός των σταθμών αυξάνεται. Ειδικά στη μητροπολιτική κλίμακα, οι σταθμοί που είναι βέλτιστοι για μικρό αριθμό σταθμών τείνουν να παραμένουν βέλτιστοι όταν προστίθενται περισσότεροι σταθμοί. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει για τις λύσεις p -median, στις οποίες οι σταθμοί μπαينوβαίνουν στις βέλτιστες λύσεις καθώς αυξάνεται το p . Το μοντέλο p -median που επηρεάζεται λιγότερο από τη ζήτηση στον ακριβή κόμβο όπου βρίσκεται ο σταθμός έχει ως αποτέλεσμα λύσεις που είναι λιγότερο σταθερές. Το γεγονός αυτό είναι εξαιρετικά σημαντικό για τους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων που θέλουν να χρησιμοποιήσουν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για να επιλέξουν το πρώτο σύνολο σταθμών και θέλουν αυτές οι θέσεις να παραμείνουν καλές όταν προστίθενται αργότερα περισσότεροι σταθμοί (Urchurch & Kubby, 2010).

Συνοψίζοντας, ενώ το μοντέλο p -median είναι σχετικά ρεαλιστικό σε αστικές κλίμακες, γίνεται πολύ λιγότερο ρεαλιστικό σε κρατικές κλίμακες, ιδίως για μικρό αριθμό σταθμών. Η ανάλυση που πραγματοποίησαν οι Urchurch και Kubby [16] υποδεικνύει έντονα ότι το FRLM είναι πιο κατάλληλο για την τοποθέτηση σταθμών σε επίπεδο πολιτείας. Εάν είναι επιθυμητή μια απλούστερη, λιγότερο απαιτητική σε δεδομένα μέθοδος, ένα μοντέλο μέγιστης κάλυψης με μια αρκετά μικρή κρίσιμη απόσταση που βασίζεται σε ορισμένες υποθέσεις σχετικά με το πόσο μακριά είναι διατεθειμένοι να ταξιδέψουν οι άνθρωποι για καύσιμα μπορεί να κάνει καλύτερη δουλειά από το μοντέλο p -median για την τοποθέτηση σταθμών σε πληθυσμιακά κέντρα σε επίπεδο πολιτείας. Μια άλλη εναλλακτική λύση θα ήταν να περιοριστούν οι υποψήφιας τοποθεσίες του p -median σε κόμβους με μεγάλες κυκλοφοριακές ροές, ή να χρησιμοποιηθεί κάποιο είδος προσέγγισης πολλαπλών στόχων που να συνδυάζει τις ροές οδικής κυκλοφορίας με έναν δεύτερο στόχο (Hosseini et al., 2017).

9.2 Μοντέλα πολλαπλών στόχων

Οι Brey et al. (2016) πρότειναν ένα μοντέλο θέσης με μια αντικειμενική συνάρτηση που αποτελείται από δύο όρους:

1. ελαχιστοποίηση της συνολικής απόστασης από την κατοικία των χρηστών μέχρι τον πλησιέστερο σταθμό (p -median problem)
2. μεγιστοποίηση του VMT (Vehicle Miles Travelled) εντός της εμβέλειας κάθε σταθμού.

Σκοπός της εν λόγω μελέτης ήταν να παρουσιαστεί ένα μοντέλο βελτιστοποίησης για τον σχεδιασμό της στρατηγικής ανάπτυξης σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου σε κλίμακα μεγέθους πόλης, όταν δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα προέλευσης-προορισμού

(Origin-Destination - OD). Το προτεινόμενο μοντέλο εξετάζει τους δύο στόχους της μεγιστοποίησης της κίνησης που καλύπτεται από τους επιλεγμένους σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου και της ελαχιστοποίησης της μέσης απόστασης των κατοίκων της πόλης από τον πλησιέστερο σταθμό ανεφοδιασμού υδρογόνου. Καθώς τα δεδομένα OD θεωρούνται μη διαθέσιμα, η ομαδοποίηση των σταθμών στις ζώνες με τη μεγαλύτερη κυκλοφορία αποτρέπεται με έναν νέο περιορισμό που λαμβάνει υπόψη πληροφορίες σχετικά με την κατανομή των υφιστάμενων συμβατικών σταθμών ανεφοδιασμού. Το μοντέλο εφαρμόζεται στη Σεβίλλη, μια πόλη στη νότια Ισπανία με έκταση περίπου 140 km² και πληθυσμό περίπου 700000 κατοίκων. Επιπλέον, η μελέτη επωφελείται από τα αποτελέσματα μιας έρευνας σε περισσότερους από 200 οδηγούς της Σεβίλλης σχετικά με τις τρέχουσες τάσεις ανεφοδιασμού, την προθυμία τους να χρησιμοποιήσουν οχήματα εναλλακτικών καυσίμων και τις ελάχιστες απαιτήσεις τους (όσον αφορά τη μέγιστη απόσταση που πρέπει να διανύσουν για τον ανεφοδιασμό και τον αριθμό των σταθμών στην πόλη) κατά τη δημιουργία ενός δικτύου σταθμών εναλλακτικού ανεφοδιασμού (Brey et al., 2016).

Αναλυτικότερα, ο στόχος του εν λόγω μοντέλου είναι η χωροθέτηση ενός συγκεκριμένου αριθμού σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου (Hydrogen Refuelling Stations - HRS) σε μητροπολιτικές περιοχές, προκειμένου να διευκολυνθεί η μετάβαση από τα οχήματα ορυκτών καυσίμων στα FCEV. Προς αυτή την κατεύθυνση, το μοντέλο βοηθά στον προσδιορισμό του ελάχιστου αριθμού σταθμών HRS που απαιτούνται για την παροχή ενός επιπέδου κάλυψης που θεωρείται αποδεκτό από τους δυνητικούς αγοραστές των FCEV (Apostolou & Xydis, 2019).

Τα σημερινά πρατήρια καυσίμων λαμβάνονται ως υποψήφιες τοποθεσίες για τα HRS, γεγονός που συνάδει με αρκετές μελέτες που αναφέρουν ότι η μετάβαση στην οικονομία του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών θα γίνει αρχικά με την εγκατάσταση αντλιών υδρογόνου σε συμβατικά πρατήρια. Η υπόθεση αυτή λαμβάνει υπόψη το γεγονός ότι ο σημερινός αριθμός και η θέση των συμβατικών πρατηρίων ορυκτών καυσίμων είναι το αποτέλεσμα μιας μακράς διαδικασίας ανάπτυξης και προσαρμογής που συνδέεται με το σημερινό ενεργειακό σύστημα -βασισμένο στη χρήση ορυκτών καυσίμων. Η υπόθεση αυτή λαμβάνει υπόψη την επίδραση πολλών διοικητικών, γεωγραφικών και κοινωνικοοικονομικών παραγόντων που οδήγησαν στην τρέχουσα διάταξη του δικτύου σταθμών ανεφοδιασμού σε μια πόλη. Εξάλλου, αναμένεται ότι στην πλήρη ωριμότητα του ενεργειακού συστήματος υδρογόνου, ο αριθμός και η κατανομή των σταθμών ανεφοδιασμού θα αντιστοιχούν στην τρέχουσα κατάσταση, δεδομένου ότι τα οχήματα υδρογόνου και τα οχήματα ορυκτών καυσίμων έχουν παρόμοια επίπεδα επιδόσεων. Ωστόσο, στα αρχικά στάδια, το πρόβλημα μετατρέπεται σε πρόβλημα επιλογής των καταλληλότερων θέσεων για δεδομένο αριθμό HRS μεταξύ των σημερινών θέσεων των σταθμών ανεφοδιασμού (Apostolou & Xydis, 2019).

Στη μελέτη, υποτίθεται σιωπηρά ότι οι αγοραστές FCEV κατανέμονται ομοιογενώς σε ποσοστιαία βάση εντός της μητροπολιτικής περιοχής, αν και θα μπορούσαν να εισαχθούν στο μοντέλο ορισμένα βάρη για να δοθεί μεγαλύτερη σημασία σε ορισμένες περιοχές που συγκεντρώνουν άτομα με χαρακτηριστικά που καθορίζουν τους αγοραστές

FCEV. Στη συνέχεια, ως μέτρο προσβασιμότητας ορίζεται η συνολική απόσταση από την κατοικία των ατόμων μέχρι τον πλησιέστερο σταθμό ανεφοδιασμού (μοντέλο p-median). Όσο μικρότερη είναι η μέση απόσταση, τόσο υψηλότερο είναι το επίπεδο προσβασιμότητας. Η αστική περιοχή χωρίζεται σε υποπεριοχές και κάθε υποπεριοχή i χαρακτηρίζεται από τον αριθμό των ατόμων p_i που ζουν σε αυτήν και την απόστασή της d_{ij} από το σταθμό ανεφοδιασμού j . Αυτή η αντικειμενική συνάρτηση p-median συμβολίζεται με f_1 και ο στόχος μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$Minf_1 = Min \sum_{i=1}^I p_i \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij} \quad (23)$$

όπου x_{ij} είναι μια δυαδική μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 εάν ο σταθμός ανεφοδιασμού j τροφοδοτεί την υποπεριοχή i και 0 διαφορετικά, I ο συνολικός αριθμός των υποπεριοχών και J ο συνολικός αριθμός των υποψήφιων περιοχών.

Το δεύτερο κριτήριο για τον εντοπισμό των HRS είναι να ληφθούν υπόψη τα διανυθέντα οχηματοχιλιόμετρα (vehicle kilometers travelled - VKT) εντός της εμβέλειας κάθε υποψήφιας θέσης j (VKT_j). Η περιοχή επιρροής κάθε πρατηρίου ορίζεται από έναν κύκλο γύρω από κάθε πρατήριο. Το VKT για κάθε υποψήφια τοποθεσία λαμβάνεται στη συνέχεια υπολογίζοντας πόσα χιλιόμετρα δρόμων τέμνουν κάθε κύκλο και πολλαπλασιάζοντας αυτά τα χιλιόμετρα με την ετήσια μέση ημερήσια κυκλοφορία τους (annual average daily traffic - AADT). Τα στοιχεία αυτά μπορούν να βρεθούν από τις σχετικές με την κυκλοφορία αρχές. Ως τρόπος αναπαράστασης του γεγονότος ότι τα οχήματα είναι πιθανότερο να ανεφοδιαστούν σε ένα σταθμό όσο πιο κοντά τους βρίσκεται, σχεδιάζονται ομόκεντροι κύκλοι (και όχι μόνο ένας) γύρω από κάθε σταθμό ανεφοδιασμού, ώστε να αποδοθούν διαφορετικά βάρη στα VKT με βάση την απόστασή τους από τον σταθμό ανεφοδιασμού. Σκοπός αυτού του κριτηρίου είναι να δοθεί μεγαλύτερη σημασία στις υποψήφιες θέσεις με υψηλότερη VKT. Αυτή η αντικειμενική συνάρτηση έντασης κυκλοφορίας γράφεται ως f_2 και ο στόχος είναι:

$$Maxf_2 = Max \sum_{j=1}^J VKT_j y_j \quad (24)$$

Όπου y_j είναι μια δυαδική μεταβλητή που παίρνει την τιμή 1 εάν ο σταθμός ανεφοδιασμού (υποψήφιος χώρος) επιλεγεί για την προμήθεια υδρογόνου και 0, διαφορετικά.

Αυτοί οι δύο στόχοι μπορούν να συνδυαστούν σε μια ενιαία συνάρτηση σταθμίζοντας κάθε αντικειμενική συνάρτηση με έναν κανονικοποιημένο συντελεστή βάρους a και $1-a$. Ο στόχος f_2 έχει ως στόχο να ευνοήσει τις υποψήφιες τοποθεσίες που βρίσκονται σε τόξα με υψηλή ροή κυκλοφορίας εις βάρος άλλων με χαμηλή ροή κυκλοφορίας.

Τα μοντέλα καταγραφής ροής απαιτούν τη διαθεσιμότητα δεδομένων OD. Αυτοί οι πίνακες είναι πολύ χρήσιμοι για το σχεδιασμό ενός βέλτιστου δικτύου HRS, βοηθώντας στην αντιμετώπιση, για παράδειγμα, του προβλήματος του κανιβαλισμού. Ωστόσο, οι πληροφορίες αυτές δεν είναι διαθέσιμες για όλες τις πόλεις και σπανιότερα για περιφερειακές ή εθνικές κλίμακες. Γι' αυτό το λόγο η μελέτη των Brey et al. (2016) παρουσιάζει ένα μοντέλο που δεν απαιτεί πληροφορίες για δεδομένα OD ως είσοδο, αλλά μόνο δεδομένα που παρέχονται από μετρητές κυκλοφορίας που είναι ευρύτερα διαθέσιμα.

Δεδομένου ότι και οι δύο στόχοι είναι διαφορετικής διάστασης (f_1 μετράται ως απόσταση ατόμων και f_2 ως μονάδες απόστασης οχημάτων ανά μονάδα χρόνου), η προσέγγιση κανονικοποίησης άνω-κάτω ορίου εφαρμόζεται σε κάθε αντικειμενική συνάρτηση:

$$\text{Min} \left[a \frac{f_1 - f_{1\min}}{f_{1\max} - f_{1\min}} - (1-a) \frac{f_2 - f_{2\min}}{f_{2\max} - f_{2\min}} \right] \quad (25)$$

Όπου f_{\min} και f_{\max} είναι, αντίστοιχα, η ελάχιστη και η μέγιστη επιτεύξιμη τιμή σε κάθε αντικειμενική συνάρτηση. Αυτό το δι-αντικειμενικό μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση του συμβιβασμού μεταξύ των δύο αντικειμενικών συναρτήσεων. Η βελτιστοποίηση αυτή υπόκειται σε ορισμένους περιορισμούς. Η εξίσωση (26) είναι ένας τυπικός περιορισμός κατανομής p -median που απαιτεί η ζήτηση κάθε υποπεριοχής i να κατανεμηθεί πλήρως σε κάποιο HRS j .

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (26)$$

Η εξίσωση (27) είναι ένας άλλος τυπικός p -median περιορισμός που επιτρέπει τη διάθεση της ζήτησης μιας υποπεριοχής i σε μια υποψήφια θέση j μόνο εάν εκεί εγκατασταθεί ένα HRS.

$$x_{ij} \leq y_j \quad \forall i, j \quad (27)$$

Η εξίσωση (28) καθορίζει τον συνολικό αριθμό των HRS που πρέπει να εγκατασταθούν (συμβολίζεται με P):

$$\sum_{j=1}^J y_j = P \quad (28)$$

Τέλος, η εξίσωση (29) αντιμετωπίζει το γεγονός ότι μπορεί να υπάρχουν πολλές υποψήφιες τοποθεσίες που ενδεχομένως να εξυπηρετούν επικαλυπτόμενη ζήτηση (Hordeski, 2020).

Η εξίσωση (29) γράφεται ως εξής:

$$\sum_{j \in P_k} y_j \leq \frac{P}{J} (|P_k| - 1) + 1 \quad \forall k \quad (29)$$

όπου P_k συμβολίζει το σύνολο των άλλων υποψήφιων θέσεων που δυνητικά εξυπηρετούν επικαλυπτόμενη ζήτηση με την υποψήφια θέση k , και $|P_k|$ το καρτελικότητα αυτού του συνόλου.

Ας θεωρηθεί ως παράδειγμα την περίπτωση όπου ορισμένες υποψήφιες τοποθεσίες βρίσκονται στο ίδιο τόξο k . Σε αυτή την περίπτωση, εάν το τόξο αυτό έχει την υψηλότερη VKT και το P είναι μικρότερο από τον αριθμό των υποψήφιων τοποθεσιών στο τόξο $|P_k|$, όλες οι HRS θα τοποθετηθούν στο τόξο αυτό, αγνοώντας το γεγονός ότι όλες αναχαιτίζουν (ή αναχαιτίζουν εν μέρει) την ίδια ροή. Η εξίσωση (29) θέτει ένα ανώτερο όριο στον αριθμό των HRS που μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτό το τόξο (με άλλα λόγια, αυτός ο περιορισμός αποτρέπει τον κανιβαλισμό από σταθμούς με επικαλυπτόμενη ζήτηση), με το όριο αυτό να σχετίζεται με τον αριθμό των υποψήφιων θέσεων, τον αριθμό των HRS που πρέπει να τοποθετηθούν και τον τρέχοντα αριθμό των σταθμών πλήρωσης σε αυτό το τόξο k (Hordeski, 2020).

Αυτός ο περιορισμός λαμβάνει υπόψη την τρέχουσα κατανομή των σταθμών ανεφοδιασμού για να θέσει ένα ανώτερο όριο στον αριθμό των σταθμών ανεφοδιασμού που μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτό το τόξο k ως συνάρτηση του P και του P_k . Με αυτόν τον τρόπο, ενσωματώνονται στο μοντέλο πληροφορίες από την τρέχουσα κατανομή των σταθμών ανεφοδιασμού σχετικά με τον αριθμό των σταθμών ανεφοδιασμού σε αυτό το τόξο, συμβατό με τον κανιβαλισμό.

Ας σημειωθεί ότι, όταν η τιμή του P είναι χαμηλή (π.χ. αρχικό στάδιο της μετάβασης σε FCV), ο περιορισμός αυτός θα οδηγήσει στην επιλογή ενός μόνο σταθμού στο εν λόγω τόξο. Ωστόσο, όταν η τιμή του P είναι υψηλότερη (υψηλή ζήτηση υδρογόνου για οχήματα), θα επιτραπεί η χωροθέτηση περισσότερων του ενός σταθμών HRS σε αυτό το τόξο, καθώς ο κίνδυνος κανιβαλισμού θα είναι μικρότερος. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τρέχουσα κατανομή των σταθμών ανεφοδιασμού παρέχει πληροφορίες σχετικά με τον αριθμό των σταθμών ανεφοδιασμού που μπορούν να τοποθετηθούν σε αυτό το τόξο k παρά τον κανιβαλισμό. Ομοίως, εάν η τιμή του P_k και η ροή κυκλοφορίας στο τόξο k είναι υψηλές, θα επιτραπεί η τοποθέτηση περισσότερων του ενός σταθμών ανεφοδιασμού HRS σε αυτό το τόξο. Αυτή θα είναι η περίπτωση, για παράδειγμα, μιας πόλης με μία μόνο κύρια λεωφόρο. Προφανώς, στην Εξίσωση (29) θα μπορούσαν να έχουν ληφθεί υπόψη και άλλοι τύποι συναρτήσεων για τον μέγιστο επιτρεπόμενο αριθμό HRS, όταν υπάρχει επικαλυπτόμενη ζήτηση.

Τέλος, συνδυάζοντας τις δύο αντικειμενικές συναρτήσεις με τον συντελεστή βαρύτητας α , το μοντέλο αυτό επιτρέπει τη βελτιστοποίηση δύο εννοιών που σχετίζονται με την ανάπτυξη υποδομών ανεφοδιασμού υδρογόνου για τις μεταφορές: την προσβασιμότητα στους καταναλωτές και τον όγκο του πωλούμενου υδρογόνου.

Οι πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά και τις προτιμήσεις των δυνητικών καταναλωτών στον ανεφοδιασμό αποτελούν βασική εισροή για το σχεδιασμό ενός αποτελεσματικού δικτύου HRS. Οι πληροφορίες αυτές εξαρτώνται από την περιοχή στην οποία πρόκειται να αναπτυχθεί η υποδομή ανεφοδιασμού υδρογόνου. Η έρευνα που διεξήχθη στη Σεβίλλη έδειξε ότι η γειτνίαση με το σπίτι είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζει τη συμπεριφορά των σημερινών οδηγών της Σεβίλλης όσον αφορά τον ανεφοδιασμό. Επιπλέον, οι οδηγοί της Σεβίλλης δήλωσαν ότι ο αριθμός των σταθμών ανεφοδιασμού καυσίμων στην πόλη και η εγγύτητά τους με τα σπίτια τους είναι δύο παράγοντες που λαμβάνουν πολύ σοβαρά υπόψη στην απόφασή τους να μεταβούν σε οχήματα κυψελών καυσίμου ή σε οποιοδήποτε άλλο όχημα AFV, εκφράζοντας μια μέση τιμή της απαιτούμενης εγγύτητας 10 λεπτών οδήγησης (Hordeski, 2020).

Κεφάλαιο 10: Συμπεράσματα

Η εργασία αυτή είχε ως θέμα τη μελέτη της χρήση του υδρογόνου στα ηλεκτρικά οχήματα. Το πρώτο κεφάλαιο αποτελεί την εισαγωγή της παρούσας εργασίας. Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα εναλλακτικά συστήματα κίνησης. Στο κεφάλαιο αυτό έγινε μια σύντομη ιστορική αναδρομή, έγινε αναφορά στο περιβάλλον καθώς και στα οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου.

Στο τρίτο κεφάλαιο αναλύθηκε το υδρογόνο ως πηγή ενέργειας, και κυρίως το περιεχόμενό του και η προέλευσή του. Το τέταρτο κεφάλαιο είχε ως θέμα διεθνή πρόοδος των κυψελών καυσίμου και υποδομών. Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιήθηκε σύγκριση πραγματικών αυτοκινήτων, έγινε αναφορά στην εξέλιξη των αυτοκινήτων και στις υποδομές.

Το πέμπτο κεφάλαιο είχε ως θέμα τις δραστηριότητες των αυτοκινητοβιομηχανιών. Έγινε αναφορά στις αυτοκινητοβιομηχανίες εν γένει και έπειτα συγκεκριμένα σε Ευρώπη και Καλιφόρνια. Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάστηκε η τεχνολογία οχημάτων και η σύγκρισή τους με τα BEV τα PHEV και τα ICE.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν τα μοντέλα θέσης ανεφοδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκαν οι προσεγγίσεις για τη μοντελοποίηση θέσης, τα μοντέλα με βάση το σημείο και τη ροή, οι στόχοι του μοντέλου και οι παραδοχές/περιορισμοί.

Το όγδοο κεφάλαιο είχε ως θέμα την εκτίμηση της ζήτησης ανεφοδιασμού. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάστηκε η συμπεριφορά ανεφοδιασμού, η ιδιοκτησία οχημάτων εναλλακτικών καυσίμων και οι προσεγγίσεις εκτίμησης της ζήτησης.

Τέλος, στο ένατο κεφάλαιο παρουσιάστηκαν ορισμένα επιλεγμένα μοντέλα. αυτά είναι το Μοντέλο μέγιστης κάλυψης, το p-median & FRL καθώς και τα Μοντέλα πολλαπλών στόχων.

- [1]. Adolf, Jörg, et al. "Energy of the future?: Sustainable mobility through fuel cells and H₂; Shell hydrogen study." (2017).
- [2]. Agnolucci, Paolo, and William McDowall. "Designing future hydrogen infrastructure: Insights from analysis at different spatial scales." *International journal of hydrogen energy* 38.13 (2013): 5181-5191.
- [3]. Ahmadi, Pouria, and Alireza Khoshnevisan. "Dynamic simulation and lifecycle assessment of hydrogen fuel cell electric vehicles considering various hydrogen production methods." *International Journal of Hydrogen Energy* 47.62 (2022): 26758-26769.
- [4]. Ahmed, Adeel, et al. "Hydrogen fuel and transport system: A sustainable and environmental future." *International journal of hydrogen energy* 41.3 (2016): 1369-1380.
- [5]. Alazemi, Jasem, and John Andrews. "Automotive hydrogen fuelling stations: An international review." *Renewable and sustainable energy reviews* 48 (2015): 483-499.
- [6]. Apostolou, Dimitrios, and George Xydis. "A literature review on hydrogen refuelling stations and infrastructure. Current status and future prospects." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 113 (2019): 109292.
- [7]. Brandstätter, Georg, Markus Leitner, and Ivana Ljubić. "Location of charging stations in electric car sharing systems." *Transportation Science* 54.5 (2020): 1408-1438.
- [8]. Brey, J. Javier, et al. "Incorporating refuelling behaviour and drivers' preferences in the design of alternative fuels infrastructure in a city." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 65 (2016): 144-155.
- [9]. Budde, Björn, Floortje Alkemade, and Marko Hekkert. "On the relation between communication and innovation activities: A comparison of hybrid electric and fuel cell vehicles." *Environmental Innovation and Societal Transitions* 14 (2015): 45-59.
- [10]. California Fuel Cell Partnership. "A California Road Map: The Commercialization of Hydrogen Fuel Cell Vehicles." *CaFCP* 1 (2012): 1-28.
- [11]. Cano, Zachary P., et al. "Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets." *Nature Energy* 3.4 (2018): 279-289.
- [12]. Capar, Ismail, and Michael Kubly. "An efficient formulation of the flow refueling location model for alternative-fuel stations." *IIE Transactions* 44.8 (2012): 622-636.

- [13]. Cavadas, Joana, Gonçalo Homem de Almeida Correia, and Joao Gouveia. "A MIP model for locating slow-charging stations for electric vehicles in urban areas accounting for driver tours." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 75 (2015): 188-201.
- [14]. Chen, Chuyue, and Guowei Hua. "A new model for optimal deployment of electric vehicle charging and battery swapping stations." *International Journal of Control and Automation* 7.5 (2014): 247-258.
- [15]. Daskin, Mark S., and Kayse Lee Maass. "The p-median problem." *Location science*. Cham: Springer International Publishing, 2015. 21-45.
- [16]. Ding, Ning, Krishnamachar Prasad, and Tek Tjing Lie. "The electric vehicle: a review." *International Journal of Electric and Hybrid Vehicles* 9.1 (2017): 49-66.
- [17]. Ehret, Oliver, and Klaus Bonhoff. "Hydrogen as a fuel and energy storage: Success factors for the German Energiewende." *International Journal of Hydrogen Energy* 40.15 (2015): 5526-5533.
- [18]. Felgenhauer, Markus F., et al. "Evaluating co-benefits of battery and fuel cell vehicles in a community in California." *Energy* 114 (2016): 360-368.
- [19]. Filippov, Sergey P., and Andrey B. Yaroslavtsev. "Hydrogen energy: Development prospects and materials." *Russian Chemical Reviews* 90.6 (2021): 627.
- [20]. Forrest, Kate, et al. "Estimating the technical feasibility of fuel cell and battery electric vehicles for the medium and heavy duty sectors in California." *Applied Energy* 276 (2020): 115439.
- [21]. Giménez-Gaydou, Diego A., et al. "Optimal location of battery electric vehicle charging stations in urban areas: A new approach." *International Journal of Sustainable Transportation* 10.5 (2016): 393-405.
- [22]. Gong, Andrew, and Dries Verstraete. "Fuel cell propulsion in small fixed-wing unmanned aerial vehicles: Current status and research needs." *International journal of hydrogen energy* 42.33 (2017): 21311-21333.
- [23]. Gonzalez, Jairo, et al. "Determining electric vehicle charging point locations considering drivers' daily activities." *Procedia Computer Science* 32 (2014): 647-654.
- [24]. Greene, David L., Joan M. Ogden, and Zhenhong Lin. "Challenges in the designing, planning and deployment of hydrogen refueling infrastructure for fuel cell electric vehicles." *ETransportation* 6 (2020): 100086.
- [25]. He, Sylvia Y., Yong-Hong Kuo, and Dan Wu. "Incorporating institutional and spatial factors in the selection of the optimal locations of public electric vehicle charging facilities: A case study of Beijing, China." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 67 (2016): 131-148.
- [26]. Hodgson, M. John. "A flow-capturing location-allocation model." *Geographical Analysis* 22.3 (1990): 270-279.

- [27]. Hong, Bo Ki, and Sae Hoon Kim. "Recent advances in fuel cell electric vehicle technologies of Hyundai." *ECS Transactions* 86.13 (2018): 3.
- [28]. Hong, Insu, Michael Kuby, and Alan Murray. "A deviation flow refueling location model for continuous space: A commercial drone delivery system for urban areas." *Advances in Geocomputation: Geocomputation 2015--The 13th International Conference*. Springer International Publishing, 2017.
- [29]. Hordeski, Michael Frank. *Alternative fuels: the future of hydrogen*. River Publishers, 2020.
- [30]. Hosseini, Meysam, Seyyed Ali MirHassani, and Farnaz Hooshmand. "Deviation-flow refueling location problem with capacitated facilities: Model and algorithm." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 54 (2017): 269-281.
- [31]. Hwang, Seong Wook, Sang Jin Kweon, and Jose A. Ventura. "Infrastructure development for alternative fuel vehicles on a highway road system." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 77 (2015): 170-183.
- [32]. Iordache, Mihaela, Dorin Schitea, and Ioan Iordache. "Hydrogen refuelling station infrastructure roll-up, an indicative assessment of the commercial viability and profitability in the Member States of Europe Union." *International Journal of Hydrogen Energy* 42.50 (2017): 29629-29647.
- [33]. Jones, J., A. Genovese, and A. Tob-Ogu. "Hydrogen vehicles in urban logistics: A total cost of ownership analysis and some policy implications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 119 (2020): 109595.
- [34]. Kelley, Scott, and Michael Kuby. "On the way or around the corner? Observed refueling choices of alternative-fuel drivers in Southern California." *Journal of Transport Geography* 33 (2013): 258-267.
- [35]. Khan, Urwah, Toshiyuki Yamamoto, and Hitomi Sato. "Consumer preferences for hydrogen fuel cell vehicles in Japan." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 87 (2020): 102542.
- [36]. Kim, J. G., & Kuby, M. (2012). The deviation-flow refueling location model for optimizing a network of refueling stations. *international journal of hydrogen energy*, 37(6), 5406-5420.
- [37]. Kitamura, Ryuichi, and Daniel Sperling. "Refueling behavior of automobile drivers." *Transportation Research Part A: General* 21.3 (1987): 235-245.
- [38]. Ko, Joonho, Tae-Hyoung Tommy Gim, and Randall Guensler. "Locating refuelling stations for alternative fuel vehicles: a review on models and applications." *Transport Reviews* 37.5 (2017): 551-570.
- [39]. Kuby, Michael J., Scott B. Kelley, and Joseph Schoenemann. "Spatial refueling patterns of alternative-fuel and gasoline vehicle drivers in Los

Angeles." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 25 (2013): 84-92.

- [40]. Kuby, Michael, and Seow Lim. "Location of alternative-fuel stations using the flow-refueling location model and dispersion of candidate sites on arcs." *Networks and Spatial Economics* 7 (2007): 129-152.
- [41]. Kuby, Michael, et al. "Optimization of hydrogen stations in Florida using the flow-refueling location model." *International journal of hydrogen energy* 34.15 (2009): 6045-6064.
- [42]. Li, Yanfei, and Farhad Taghizadeh-Hesary. "The economic feasibility of green hydrogen and fuel cell electric vehicles for road transport in China." *Energy Policy* 160 (2022): 112703.
- [43]. Li, Yanfei, and Shigeru Kimura. "Economic competitiveness and environmental implications of hydrogen energy and fuel cell electric vehicles in ASEAN countries: The current and future scenarios." *Energy Policy* 148 (2021): 111980.
- [44]. Lin, Zhenhong, et al. "The fuel-travel-back approach to hydrogen station siting." *International journal of hydrogen energy* 33.12 (2008): 3096-3101.
- [45]. Linszen, Jochen, and Jürgen-Friedrich Hake. "Hydrogen research, development, demonstration, and market deployment activities." *Hydrogen Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology* (2016): 57-84.
- [46]. Mobilite, Hydrogene France France. "H2 Mobilite France-Study for a Fuel Cell Electric Vehicle national deployment plan." (2014).
- [47]. Oldenbroek, Vincent, et al. "Fuel cell electric vehicles and hydrogen balancing 100 percent renewable and integrated national transportation and energy systems." *Energy Conversion and Management: X* 9 (2021): 100077.
- [48]. Pollet, Bruno G., Shyam S. Kocha, and Iain Staffell. "Current status of automotive fuel cells for sustainable transport." *Current opinion in Electrochemistry* 16 (2019): 90-95.
- [49]. Potoglou, Dimitris, and Pavlos S. Kanaroglou. "Household demand and willingness to pay for clean vehicles." *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 12.4 (2007): 264-274.
- [50]. Proost, Joris. "Challenges and pitfalls while establishing a H2 mobility plan for Belgium (Invited presentation)." *7th International Conference on Hydrogen Technologies, Symposium on Implementation of H2 technologies in European regions*. 2016.
- [51]. Ratnakar, Ram R., et al. "Hydrogen supply chain and challenges in large-scale LH2 storage and transportation." *International Journal of Hydrogen Energy* 46.47 (2021): 24149-24168.
- [52]. Reddi, Krishna, et al. "Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles." *International Journal of Hydrogen Energy* 42.26 (2017): 16675-16685.

- [53]. Samsun, R. C., L. Antoni, and M. Rex. "Mobile fuel cell application: tracking market trends." *IEA Technology Collaboration Programme Advanced Cell* (2020).
- [54]. Samsun, Remzi Can, et al. "Deployment of fuel cell vehicles and hydrogen refueling station infrastructure: a global overview and perspectives." *Energies* 15.14 (2022): 4975.
- [55]. Samsun, Remzi Can. "Global development status of fuel cell vehicles." *Fuel Cells: Data, Facts and Figures* (2016): 37-60.
- [56]. Scheiper, Barbara, Maximilian Schiffer, and Grit Walther. "The flow refueling location problem with load flow control." *Omega* 83 (2019): 50-69.
- [57]. Shen, Minghai, et al. "Progress and prospects of reversible solid oxide fuel cell materials." *IScience* 24.12 (2021): 103464.
- [58]. Shen, Minghai, et al. "Progress and prospects of reversible solid oxide fuel cell materials." *IScience* 24.12 (2021): 103464.
- [59]. Smart, John, and Stephen Schey. "Battery electric vehicle driving and charging behavior observed early in the EV project." *SAE International Journal of Alternative Powertrains* 1.1 (2012): 27-33.
- [60]. Society of Automotive Engineers. *Fueling protocols for light duty gaseous hydrogen surface vehicles*. SAE international, 2016.
- [61]. Staffell, Iain, et al. "The role of hydrogen and fuel cells in the global energy system." *Energy & Environmental Science* 12.2 (2019): 463-491.
- [62]. Sulaiman, Nasrin, et al. "A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52 (2015): 802-814.
- [63]. Tanaka, Shintaro, et al. "Fuel cell system for Honda CLARITY fuel cell." *ETransportation* 3 (2020): 100046.
- [64]. Tanç, Bahattin, et al. "Overview of the next quarter century vision of hydrogen fuel cell electric vehicles." *International Journal of Hydrogen Energy* 44.20 (2019): 10120-10128.
- [65]. Trencher, Gregory. "Strategies to accelerate the production and diffusion of fuel cell electric vehicles: Experiences from California." *Energy Reports* 6 (2020): 2503-2519.
- [66]. Tu, Wei, et al. "Optimizing the locations of electric taxi charging stations: A spatial-temporal demand coverage approach." *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 65 (2016): 172-189.
- [67]. Upchurch, Christopher, and Michael Kuby. "Comparing the p-median and flow-refueling models for locating alternative-fuel stations." *Journal of Transport Geography* 18.6 (2010): 750-758.

- [68]. Walters, Marius, et al. "Fuel Cell System Development." *SAE International Journal of Alternative Powertrains* 7.3 (2018): 335-350.
- [69]. Wang, Cheng, et al. "The key materials and components for proton exchange membrane fuel cell." *Progress in Chemistry* 27.2/3 (2015): 310.
- [70]. Wang, Junye. "Barriers of scaling-up fuel cells: Cost, durability and reliability." *Energy* 80 (2015): 509-521.
- [71]. Wang, Ying-Wei, and Chuan-Ren Wang. "Locating passenger vehicle refueling stations." *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* 46.5 (2010): 791-801.
- [72]. Yartys, Volodymyr A., et al. "HYDRIDE4MOBILITY: an EU HORIZON 2020 project on hydrogen powered fuel cell utility vehicles using metal hydrides in hydrogen storage and refuelling systems." *international journal of hydrogen energy* 46.72 (2021): 35896-35909.
- [73]. Zakaria, Haji, et al. "Recent advancements and developments for electric vehicle technology." *2019 International Conference of Computer Science and Renewable Energies (ICCSRE)*. IEEE, 2019.