



Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Ενεργειακά και Περιβαλλοντικά Έργα»

Σχολή Μηχανικών

Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών

---

Τίτλος διπλωματικής εργασίας:

*«Διερεύνηση σεναρίων διείσδυσης του H<sub>2</sub> στον τομέα των οδικών μεταφορών.»*



Μεταπτυχιακή Φοιτήτρια: *Αναγνωστοπούλου Νεφέλη*

Επιβλέπων Καθηγητής: *Καβαδίας Κοσμάς*

**Αθήνα, Απρίλιος 2024**



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΠΜΣ «ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΑ ΕΡΓΑ»

**Τίτλος εργασίας:** «Διερεύνηση σεναρίων διείσδυσης του Η<sub>2</sub> στον τομέα των οδικών μεταφορών.»

**Μέλη Εξεταστικής Επιτροπής συμπεριλαμβανομένου και του Εισηγητή**

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκε επιτυχώς από την κάτωθι Εξεταστική Επιτροπή:

<b>α/α</b>	<b>ΟΝΟΜΑ ΕΠΩΝΥΜΟ</b>	<b>ΒΑΘΜΙΔΑ/ΙΔΙΟΤΗΤΑ</b>	<b>ΨΗΦΙΑΚΗ ΥΠΟΓΡΑΦΗ</b>
1	Ι. Κ. Καλδέλλης		
2	Αιμ. Κονδύλη		
3	Κ. Καββαδίας		

## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη ΑΝΑΓΝΩΣΤΟΠΟΥΛΟΥ ΝΕΦΕΛΗ του ΙΩΑΝΝΗ, με αριθμό μητρώου eed-202101 φοιτήτρια του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ενεργειακά και Περιβαλλοντικά Έργα» του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

Νεφέλη Αναγνωστοπούλου  


## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την παρούσα διπλωματική εργασία ολοκληρώνονται οι σπουδές μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα σπουδών «Ενεργειακά και Περιβαλλοντικά Έργα» του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής.

Στις σπουδές μου ήταν καθοριστική η συμβολή των καθηγητών μου στα γνωστικά αντικείμενα που παρακολούθησα, στους οποίους οφείλω να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες για τη συμβολή τους στην ολοκλήρωση των σπουδών μου.

Ιδιαίτερα επιθυμώ να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα στην παρούσα διπλωματική εργασία, κ. Καββαδία Κοσμά, για την επιστημονική και συμβουλευτική καθοδήγηση που μου προσέφερε καθώς και τον Τζελέπη Στέφανο για τις εύστοχες και πολύ εποικοδομητικές παρατηρήσεις του.

Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τον σύντροφό μου, για τη συμπαράσταση και την υπομονή τους.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετώνται επιλεγμένα σενάρια διείσδυσης του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών.

Πιο συγκεκριμένα, αναλύονται όλα τα τμήματα της αλυσίδας του υδρογόνου (παραγωγή, μεταφορά και αποθήκευση). Γίνεται έρευνα και αναφορά στο ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα που ελευθερώνουν οι οδικές μεταφορές τόσο στην Ευρώπη όσο και στην Ελλάδα.

Εν συνεχεία, παρουσιάζεται η παρούσα κατάσταση των σταθμών ανεφοδιασμού του υδρογόνου σε παγκόσμιο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο καθώς και αναλύεται η τρέχουσα κατάσταση της υδρογονοκίνησης στην Ασία, την Ευρώπη και την Βόρεια Αμερική. Συγκεκριμένα η υδρογονοκίνηση βρίσκεται ακόμα σε αρχικό στάδιο αλλά έχουν ξεκινήσει μία σειρά από προγράμματα, σε συνεργασία με τη βιομηχανία, για την ευρύτερη υιοθέτηση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών π.χ. με τη δημιουργία νέων σταθμών ανεφοδιασμού, τη δημιουργία δικτύου αγωγών κ.α.

Παράλληλα, γίνεται μία οικονομική έρευνα και ανάλυση ως προς την τιμή πώλησης του υδρογόνου και ως προς τον τρόπο και το σχετικό κόστος για τη μεταφορά του. Τέλος, πραγματοποιείται μία σύγκριση των συμβατικών – ηλεκτρικών – υδρογονοκίνητων οχημάτων καθώς και υλοποιείται μελέτη και έρευνα με τέσσερα διαφορετικά σενάρια ποσοστού διείσδυσης των οχημάτων υδρογόνου στον οδικό τομέα μεταφορών.

**Λέξεις κλειδιά:** Υδρογόνο, υδρογονοκίνηση, μεταφορές, ενεργειακό αποτύπωμα, περιβαλλοντικό αποτύπωμα, σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου.

## ABSTRACT

In this dissertation, selected scenarios of hydrogen penetration in the transport sector are studied.

More specifically, all parts of the hydrogen chain (production, transport and storage) are analyzed. The energy and environmental footprint released by road transport in both Europe and Greece is researched and reported.

Afterwards, the current situation of hydrogen refueling stations at global and European level is presented and the current state of hydrogen propulsion in Asia, Europe and North America is analyzed. In particular, hydrogen propulsion is still at an early stage, but a number of projects have been launched, in cooperation with industry, for the wider adoption of hydrogen in the transport sector, e.g. by setting up new refueling stations, building a network of pipelines, etc.

At the same time, an economic study and analysis of the selling price of hydrogen and of the way and the associated costs of transporting it is being carried out. Finally, a comparison of conventional - electric - hydrogen vehicles is made and a study and research are carried out with four different scenarios of the penetration rate of hydrogen vehicles in the road transport sector.

**Key words:** Hydrogen, hydrogen vehicles, transport, energy footprint, environmental footprint, hydrogen

## Περιεχόμενα

ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ .....	11
1.1 Παραγωγή υδρογόνου .....	11
1.1.1 Παραγωγή υδρογόνου μέσω Φυσικού Αερίου και Υδρογονάνθρακες .....	13
1.1.2 Αεριοποίηση άνθρακα .....	17
1.1.3 Ηλεκτρόλυση νερού .....	18
1.1.4 Παραγωγή υδρογόνου με τη χρήση Πυρηνικής Ενέργειας.....	18
1.1.5 Θερμοχημικές μέθοδοι .....	20
1.1.6 Παραγωγή υδρογόνου μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας .....	21
1.2 Αποθήκευση υδρογόνου .....	23
1.2.1 Αποθήκευση πεπιεσμένου αερίου.....	25
1.2.2 Αποθήκευση υγρού υδρογόνου.....	26
1.2.3 Αποθήκευση μεταλλικών υδριδίων .....	26
1.2.4 Χημική αποθήκευση υδρογόνου.....	27
1.2.5 Αποθήκευση σε υλικά με βάση τον άνθρακα .....	28
1.3 Μεταφορά υδρογόνου.....	30
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟΜΕΑΣ ΟΔΙΚΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ (ΣΗΜΕΡΑ) .....	32
2.1 Ενεργειακό & Περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μεταφορών στην Ευρώπη	32
2.2 Ενεργειακό & Περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μεταφορών στην Ελλάδα	34
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΥΔΡΟΓΟΝΟΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ & ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ (ΣΗΜΕΡΑ) .....	36
3.1 Σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο	36
3.2 Η υδρογονοκίνηση σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο .....	39
3.2.1 Ασία .....	39
3.2.2 Ευρώπη.....	40
3.2.3 Βόρεια Αμερική .....	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ - ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ .....	43
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ .....	44

5.1	Τιμή πώλησης υδρογόνου ανά περιοχή .....	44
5.2	Τρόπος προμήθειας υδρογόνου .....	51
5.2.1	Τρόποι και σχετικό κόστος για τη μεταφορά υδρογόνου.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ .....		56
6.1	Σύγκριση συμβατικών – ηλεκτρικών – υδρογονοκίνητων οχημάτων ...	56
6.2	Μελέτη ποσοστού αντικατάστασης συμβατικών οχημάτων με υδρογονοκίνητα οχήματα στον τομέα των οδικών μεταφορών.....	69
6.3	Αποτελέσματα διείσδυσης του υδρογόνου στις οδικές μεταφορές .....	80
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....		88
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....		92



## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υδρογόνο είναι το πρώτο στοιχείο του περιοδικού πίνακα με ατομικό αριθμό ίσο με 1, μοριακό βάρος ίσο με 2,01594 g και ατομικό βάρος ίσο με 1,00797 g/mol. Σε κανονικές συνθήκες είναι άνοστο, άχρωμο και άοσμο. Είναι μία από τις κύριες ενώσεις του νερού και είναι ευρέως διαδεδομένο, όχι μόνο στη Γη, αλλά σε ολόκληρο το σύμπαν (Lenntech, 2008).

Το υδρογόνο (H<sub>2</sub>) είναι ένα εξαιρετικά άφθονο και ευπροσάρμοστο στοιχείο που έχει κερδίσει την προσοχή ως δυνητική πηγή καυσίμου για ποικίλες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών, της παραγωγής ενέργειας και των βιομηχανικών διεργασιών. Όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο, το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, δεδομένου ότι μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές και παράγει μόνο νερό ως παραπροϊόν κατά την καύση. Έχει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και εκπέμπει μόνο υδρατμούς και θερμότητα όταν χρησιμοποιείται ως καύσιμο (Lenntech, 2008).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του υδρογόνου ως καυσίμου είναι το υψηλό ενεργειακό του περιεχόμενο. Κατά την καύση του, το υδρογόνο παράγει σημαντική ποσότητα ενέργειας σε σχέση με το βάρος του, γεγονός που το καθιστά ελκυστική επιλογή για εφαρμογές μεταφορών όπου το βάρος και η αποδοτικότητα αποτελούν βασικούς παράγοντες. Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την απευθείας μετατροπή του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια, με πολύ μεγαλύτερη απόδοση από τις παραδοσιακές μηχανές εσωτερικής καύσης (International Energy Agency, 2019).

Ωστόσο, υπάρχουν επίσης αρκετές προκλήσεις που σχετίζονται με τη χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου. Ένα από τα κύρια εμπόδια για την ευρεία υιοθέτηση είναι η έλλειψη μιας ολοκληρωμένης υποδομής υδρογόνου, η οποία περιλαμβάνει την παραγωγή, την αποθήκευση και τη διανομή του. Το υδρογόνο είναι επίσης εξαιρετικά εύφλεκτο και μπορεί να είναι δύσκολος ο ασφαλής χειρισμός του. Τέλος, η παραγωγή υδρογόνου μπορεί να είναι ενεργοβόρα, ανάλογα με τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, γεγονός που μπορεί να αντισταθμίσει ορισμένα από τα περιβαλλοντικά οφέλη της χρήσης του υδρογόνου ως καυσίμου (International Energy Agency, 2019).

Παρά τις προκλήσεις αυτές, το υδρογόνο θεωρείται όλο και περισσότερο ως μια πολλά υποσχόμενη επιλογή καυσίμου για ένα ενεργειακό μέλλον με χαμηλές εκπομπές άνθρακα. Οι συνεχιζόμενες προσπάθειες έρευνας και ανάπτυξης επικεντρώνονται στην αντιμετώπιση των εναπομενόντων τεχνικών και οικονομικών εμποδίων για τη χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου, καθώς και στην κλιμάκωση της υποδομής παραγωγής και διανομής που είναι απαραίτητη για την υποστήριξη της ευρείας υιοθέτησης.

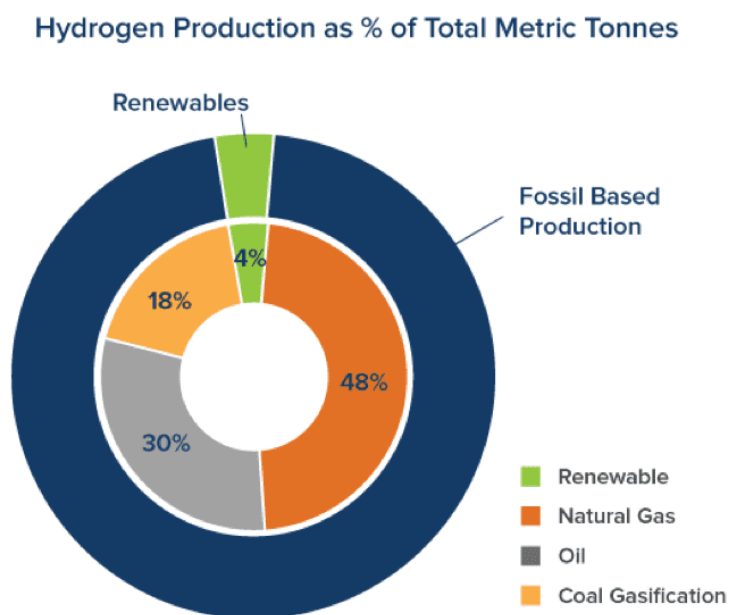
# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΠΑΡΑΓΩΓΗ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Σε αυτό το κεφάλαιο θα μελετηθούν και θα αναπτυχθούν οι τρόποι με τους οποίους παράγεται, αποθηκεύεται και μεταφέρεται το υδρογόνο.

## 1.1 Παραγωγή υδρογόνου

Τα στατιστικά στοιχεία παραγωγής υδρογόνου ποικίλλουν ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής, τη χώρα ή την περιοχή καθώς και τη χρονική περίοδο.

Η παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου το 2020 ήταν περίπου 115 εκατομμύρια τόνοι, με περίπου το 96% αυτής να προέρχεται από ορυκτά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο, ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Το υπόλοιπο 4% παρήχθη με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλεκτρόλυση και η αεριοποίηση βιομάζας.



Εικόνα 1: Πηγές παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου το 2020,

Πηγή: (International Energy Agency, 2021)

Το 2020, η Κίνα ήταν ο μεγαλύτερος παραγωγός υδρογόνου στον κόσμο, αντιπροσωπεύοντας το 30% της παγκόσμιας παραγωγής, ακολουθούμενη από τις Ηνωμένες Πολιτείες (18%) και την Ευρώπη (14%).

Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (ΔΟΕ) εκτιμά ότι η παγκόσμια παραγωγή υδρογόνου θα μπορούσε να αυξηθεί σε 530 εκατομμύρια τόνους έως το 2050, με το μεγαλύτερο μέρος αυτής της παραγωγής να παράγεται με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Όσον αφορά τις μεθόδους παραγωγής υδρογόνου, η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό (SMR) είναι επί του παρόντος η πιο διαδεδομένη, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 75% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου το 2020. Η ηλεκτρόλυση, η οποία παράγει υδρογόνο χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές, αντιπροσωπεύει λιγότερο από το 1% της παγκόσμιας παραγωγής (International Energy Agency, 2021).

Οι κυριότερες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου είναι:

- ❖ Παραγωγή υδρογόνου μέσω Φυσικού Αερίου και Υδρογονάνθρακες,
- ❖ Αεριοποίηση άνθρακα,
- ❖ Ηλεκτρόλυση νερού,
- ❖ Παραγωγή υδρογόνου με τη χρήση Πυρηνικής Ενέργειας,
- ❖ Θερμοχημικές μέθοδοι,
- ❖ Παραγωγή υδρογόνου μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.

### 1.1.1 Παραγωγή υδρογόνου μέσω Φυσικού Αερίου και Υδρογονάνθρακες

Το φυσικό αέριο αποτελεί μία ιδανική, από οικονομική άποψη, πρώτη ύλη για την παραγωγή υδρογόνου, επειδή είναι ευρέως διαθέσιμο, είναι εύκολο να διαχειριστεί και έχει υψηλή αναλογία υδρογόνου-άνθρακα, η οποία ελαχιστοποιεί το σχηματισμό CO<sub>2</sub> ως παραπροϊόν.

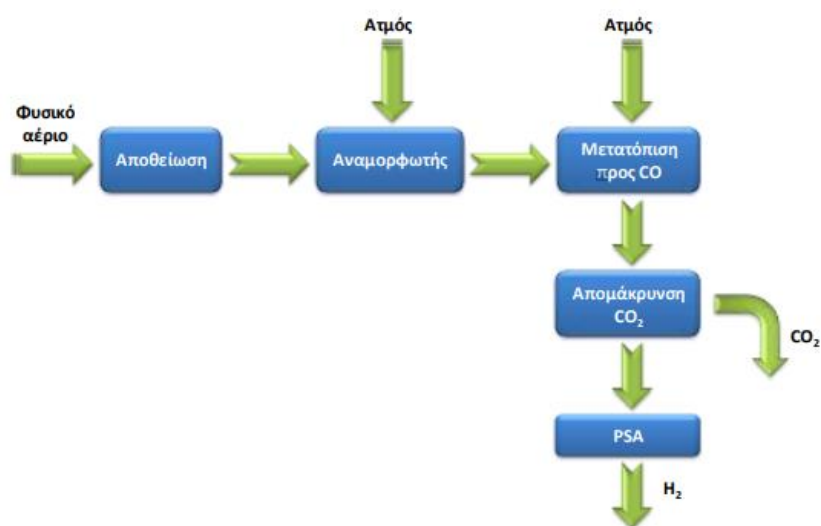
Το υδρογόνο σήμερα μπορεί να παραχθεί από το φυσικό αέριο χρησιμοποιώντας τις παρακάτω διεργασίες: (Φραντζής, 2022)

- ✚ Αναμόρφωση με ατμό (αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό, SMR),
- ✚ Μερική οξείδωση (POX),
- ✚ Αυτόθερμη αναμόρφωση (ATR).

#### Αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό, SMR

Η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό (SMR) είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου, αντιπροσωπεύοντας το 95% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου. Η SMR περιλαμβάνει μια καταλυτική αντίδραση μεταξύ ατμού και φυσικού αερίου (κυρίως μεθανίου), με αποτέλεσμα την παραγωγή υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα. (Robert Hren, 2023)

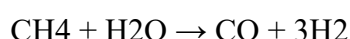
Η διαδικασία της αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό περιλαμβάνει διάφορα στάδια:



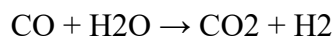
Εικόνα 2: Στάδια της διεργασίας αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό

Πηγή: (Φραντζής, 2022)

- ✓ Προετοιμασία της τροφοδοσίας: Το φυσικό αέριο, συνήθως μεθάνιο (CH<sub>4</sub>), είναι η κύρια πρώτη ύλη για την SMR. Το φυσικό αέριο υφίσταται προεπεξεργασία για την απομάκρυνση ακαθαρσιών, όπως οι ενώσεις θείου.
- ✓ Αντίδραση αναμόρφωσης: Το προεπεξεργασμένο φυσικό αέριο αναμιγνύεται με ατμό και περνά πάνω από καταλύτη, συνήθως με βάση το νικέλιο. Η αντίδραση λαμβάνει χώρα σε υψηλές θερμοκρασίες (700-1.000°C) και υψηλές πιέσεις. Η καταλυτική αντίδραση διασπά το μόριο του μεθανίου, παράγοντας υδρογόνο (H<sub>2</sub>) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO).



- ✓ Αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου: Για να αυξηθεί περαιτέρω η περιεκτικότητα σε υδρογόνο και να μειωθεί το μονοξείδιο του άνθρακα, το αέριο μίγμα υφίσταται αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου. Ο ατμός αντιδρά με το μονοξείδιο του άνθρακα, παράγοντας επιπλέον υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα.



- ✓ Καθαρισμός: Το προκύπτον αέριο μείγμα περιέχει υδρογόνο, διοξείδιο του άνθρακα, μονοξείδιο του άνθρακα και ίχνη άλλων ακαθαρσιών. Το αέριο καθαρίζεται για την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ακαθαρσιών, με αποτέλεσμα να προκύπτει υδρογόνο υψηλής καθαρότητας.

### **Μερική οξείδωση (POX)**

Η παραγωγή υδρογόνου μέσω μερικής οξείδωσης (POX) είναι μια διεργασία που περιλαμβάνει την αντίδραση μιας πρώτης ύλης υδρογονανθράκων με περιορισμένη ποσότητα οξυγόνου ή αέρα, με αποτέλεσμα την παραγωγή υδρογόνου, μονοξειδίου του άνθρακα, διοξειδίου του άνθρακα και νερού. Η POX χρησιμοποιείται συνήθως σε βιομηχανικές εφαρμογές, ιδίως στην παραγωγή syngas, το οποίο είναι ένα μείγμα υδρογόνου και μονοξειδίου του άνθρακα που χρησιμοποιείται για διάφορους σκοπούς. (International Energy Agency, 2021)

Η διαδικασία της μερικής οξείδωσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- ✓ Προετοιμασία της πρώτης ύλης: Η πρώτη ύλη υδρογονανθράκων, όπως φυσικό αέριο, μεθάνιο ή υγροί υδρογονάνθρακες, προθερμαίνεται και αναμιγνύεται με ελεγχόμενη ποσότητα οξυγόνου ή αέρα για να επιτευχθούν συνθήκες μερικής οξείδωσης.
- ✓ Αντίδραση: Το μίγμα της πρώτης ύλης εισάγεται σε αντιδραστήρα, όπου αντιδρά με το οξυγόνο ή τον αέρα σε αυξημένες θερμοκρασίες και πιέσεις. Η εξώθερμη αντίδραση μερικής οξείδωσης έχει ως αποτέλεσμα το σχηματισμό υδρογόνου (H<sub>2</sub>), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και νερού (H<sub>2</sub>O).
- ✓ Αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου: Το προκύπτον αέριο μίγμα, που περιέχει υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα και νερό, μπορεί να υποστεί αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου για τη μετατροπή μέρους του μονοξειδίου του άνθρακα σε πρόσθετο υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Το στάδιο αυτό αυξάνει την περιεκτικότητα του μίγματος αερίου σε υδρογόνο.
- ✓ Καθαρισμός αερίου: Το μίγμα αερίου καθαρίζεται για την απομάκρυνση ακαθαρσιών, όπως ενώσεις θείου, ενώσεις αζώτου και ίχνη ρύπων, ώστε να ληφθεί υδρογόνο υψηλής καθαρότητας.

### **Αυτόθερμη αναμόρφωση (ATR)**

Η αυτόθερμη αναμόρφωση (ATR) είναι μια διεργασία για την παραγωγή υδρογόνου που συνδυάζει στοιχεία τόσο της αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό (SMR) όσο και της μερικής οξείδωσης. Στην ATR, ένα μείγμα φυσικού αερίου ή άλλων υδρογονανθράκων, οξυγόνο (ή αέρας) και ατμός αντιδρούν σε καταλυτικό αναμορφωτή σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις. (International Energy Agency, 2021)

Η διαδικασία της αυτόθερμης αναμόρφωσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- ✓ Προετοιμασία της τροφοδοσίας: Η πρώτη ύλη, συνήθως φυσικό αέριο (μεθάνιο), προθερμαίνεται και αναμιγνύεται με ατμό και ελεγχόμενη ποσότητα οξυγόνου ή αέρα. Η αναλογία ατμού προς άνθρακα (S/C) διατηρείται για να εξασφαλιστεί η αποτελεσματική παραγωγή υδρογόνου και να αποφευχθεί ο σχηματισμός άνθρακα.
  
- ✓ Αντίδραση αναμόρφωσης: Το μίγμα της πρώτης ύλης τροφοδοτείται σε αντιδραστήρα καταλυτικού αναμορφωτή, όπου υφίσταται συνδυασμό ενδοθερμικών αντιδράσεων αναμόρφωσης με ατμό και εξώθερμων αντιδράσεων μερικής οξείδωσης. Ο καταλύτης αναμόρφωσης διευκολύνει τη μετατροπή της πρώτης ύλης υδρογονανθράκων σε υδρογόνο (H<sub>2</sub>), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) και νερό (H<sub>2</sub>O).
  
- ✓ Αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου: Για να αυξηθεί η περιεκτικότητα σε υδρογόνο και να μειωθεί το μονοξείδιο του άνθρακα, το αέριο μίγμα υφίσταται αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου. Ο ατμός αντιδρά με το μονοξείδιο του άνθρακα, παράγοντας επιπλέον υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα.
  
- ✓ Ανάκτηση θερμότητας: Η διεργασία περιλαμβάνει ενσωμάτωση θερμότητας για την ανάκτηση της ενέργειας που απελευθερώνεται κατά τις αντιδράσεις μερικής οξείδωσης και τη χρησιμοποίησή της για την παραγωγή ατμού ή για σκοπούς προθέρμανσης.
  
- ✓ Καθαρισμός αερίου: Το προκύπτον μίγμα αερίου, το οποίο περιέχει υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, νερό και ίχνη ακαθαρσιών, υποβάλλεται σε διεργασίες καθαρισμού για την απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα, των ενώσεων του θείου και άλλων ρύπων, με αποτέλεσμα να προκύπτει υδρογόνο υψηλής καθαρότητας.



### 1.1.2 Αεριοποίηση άνθρακα

Η παραγωγή υδρογόνου μέσω αεριοποίησης άνθρακα είναι μια διαδικασία που περιλαμβάνει τη μετατροπή του άνθρακα σε ένα αέριο μείγμα γνωστό ως syngas, το οποίο αποτελείται κυρίως από υδρογόνο (H<sub>2</sub>) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO). Η αεριοποίηση του άνθρακα προσφέρει μια πιθανή οδό για την παραγωγή υδρογόνου, ιδίως σε περιοχές με άφθονα αποθέματα άνθρακα (International Energy Agency, 2021).

Η διαδικασία αεριοποίησης του άνθρακα περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- ✓ Προετοιμασία του άνθρακα: Ο άνθρακας αρχικά κονιορτοποιείται σε λεπτή σκόνη και στη συνέχεια υποβάλλεται σε διαδικασία προετοιμασίας του άνθρακα για την απομάκρυνση προσμίξεων, όπως πετρώματα, θείο και τέφρα.
- ✓ Αεριοποίηση: Ο προετοιμασμένος άνθρακας τροφοδοτείται σε αεριοποιητή, όπου υφίσταται αντίδραση υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης με ελεγχόμενη ποσότητα οξυγόνου ή αέρα και ατμού. Ο άνθρακας αντιδρά με το οξυγόνο και τον ατμό και παράγει ένα ακατέργαστο αέριο σύνθεσης που αποτελείται από υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του άνθρακα, υδρατμούς και ίχνη ακαθαρσιών.
- ✓ Καθαρισμός του syngas: Το ακατέργαστο αέριο σύνθεσης υποβάλλεται σε διάφορες διεργασίες καθαρισμού αερίου για την απομάκρυνση ακαθαρσιών όπως ενώσεις θείου, σωματίδια και ίχνη ρύπων. Η διαδικασία καθαρισμού βελτιώνει την ποιότητα και την καθαρότητα του syngas.
- ✓ Αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου: Το αέριο σύνθεσης υφίσταται αντίδραση μετατόπισης νερού-αερίου, όπου ο ατμός αντιδρά με μονοξείδιο του άνθρακα για την παραγωγή πρόσθετου υδρογόνου και διοξειδίου του άνθρακα. Το στάδιο αυτό συμβάλλει στην αύξηση της περιεκτικότητας του αερίου σύνθεσης σε υδρογόνο.
- ✓ Καθαρισμός: Το αέριο σύνθεσης καθαρίζεται περαιτέρω για την απομάκρυνση των υπόλοιπων ακαθαρσιών, συμπεριλαμβανομένου του

διοξειδίου του άνθρακα και άλλων ιχθών ρύπων, με αποτέλεσμα την παραγωγή υδρογόνου υψηλής καθαρότητας.

### 1.1.3 Ηλεκτρόλυση νερού

Η παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης είναι μια διαδικασία που χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό για τη διάσπαση μορίων νερού σε υδρογόνο (H<sub>2</sub>) και οξυγόνο (O<sub>2</sub>). Η ηλεκτρόλυση προσφέρει ένα πολλά υποσχόμενο μονοπάτι για την παραγωγή υδρογόνου, ιδίως όταν τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Di Li, 2023).

Η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- ✓ Επιλογή ηλεκτρολύτη: Ένας ηλεκτρολύτης, συνήθως ένα υδατικό διάλυμα υδροξειδίου αλκαλικών μετάλλων, όπως υδροξείδιο του καλίου (KOH) ή υδροξείδιο του νατρίου (NaOH), χρησιμοποιείται για να παρέχει αγωγιμότητα και να διευκολύνει την κίνηση των ιόντων κατά την ηλεκτρόλυση.
- ✓ Κυψελίδα ηλεκτρόλυσης: Η κυψελίδα ηλεκτρόλυσης αποτελείται από δύο ηλεκτρόδια, μια άνοδο και μια κάθοδο, τα οποία είναι βυθισμένα στον ηλεκτρολύτη. Η άνοδος συνδέεται με τον θετικό ακροδέκτη μιας πηγής ενέργειας, ενώ η κάθοδος με τον αρνητικό ακροδέκτη.
- ✓ Ηλεκτροχημική αντίδραση: Όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα διέρχεται από τον ηλεκτρολύτη, τα μόρια του νερού υφίστανται ηλεκτρόλυση στα ηλεκτρόδια. Στην άνοδο αναπτύσσεται αέριο οξυγόνο ( $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ ), ενώ στην κάθοδο παράγεται αέριο υδρογόνο ( $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$ ).
- ✓ Διαχωρισμός αερίων: Τα αέρια που αναπτύσσονται, υδρογόνο και οξυγόνο, συλλέγονται και διαχωρίζονται με διάφορες μεθόδους, όπως ο διαχωρισμός με μεμβράνες, η προσρόφιση εναλλασσόμενης πίεσης (PSA) ή άλλες τεχνικές καθαρισμού.

### 1.1.4 Παραγωγή υδρογόνου με τη χρήση Πυρηνικής Ενέργειας,

Η παραγωγή υδρογόνου με χρήση πυρηνικής ενέργειας περιλαμβάνει τη χρήση πυρηνικών αντιδραστήρων για την παραγωγή θερμότητας, η οποία στη συνέχεια χρησιμοποιείται σε διάφορες διεργασίες για την παραγωγή υδρογόνου. Η πυρηνική ενέργεια προσφέρει τη δυνατότητα παραγωγής υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα,

συνεχώς και με χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (International Energy Agency, 2021).

Η διαδικασία παραγωγής υδρογόνου με χρήση πυρηνικής ενέργειας περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- ✓ Πυρηνικός αντιδραστήρας: Οι πυρηνικοί αντιδραστήρες, όπως οι αντιδραστήρες νερού υπό πίεση (PWR) ή οι αερόψυκτοι αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας (HTGR), παράγουν θερμότητα μέσω ελεγχόμενων αντιδράσεων πυρηνικής σχάσης. Η θερμότητα που παράγεται από τους πυρηνικούς αντιδραστήρες χρησιμοποιείται ως πρωτογενής πηγή ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου.
- ✓ Θερμοχημική διάσπαση νερού: Μια μέθοδος αξιοποίησης της πυρηνικής θερμότητας για την παραγωγή υδρογόνου είναι η θερμοχημική διάσπαση νερού. Οι θερμοχημικές διεργασίες περιλαμβάνουν μια σειρά χημικών αντιδράσεων που χρησιμοποιούν θερμότητα υψηλής θερμοκρασίας για τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει συνήθως πολλαπλά στάδια αντίδρασης, όπως η διάσπαση του νερού, η παραγωγή υδρογόνου και η αναγέννηση του νερού.
- ✓ Ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας: Μια άλλη προσέγγιση είναι η χρήση πυρηνικής θερμότητας για την ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας. Η ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες με τη χρήση κυψελών ηλεκτρόλυσης στερεών οξειδίων (SOEC) ή κυψελών ηλεκτρόλυσης λιωμένου άλατος (MSEC). Οι υψηλές θερμοκρασίες βελτιώνουν την απόδοση της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας.
- ✓ Διαχωρισμός και καθαρισμός υδρογόνου: Μετά την παραγωγή του υδρογόνου μέσω θερμοχημικής διάσπασης νερού ή ηλεκτρόλυσης υψηλής θερμοκρασίας, το υδρογόνο διαχωρίζεται και καθαρίζεται με διάφορες τεχνικές, όπως διαχωρισμός με μεμβράνες, προσρόφηση ταλάντευσης πίεσης (PSA) ή άλλες διαδικασίες καθαρισμού.

### 1.1.5 Θερμοχημικές μέθοδοι

Η παραγωγή υδρογόνου μέσω θερμοχημικών μεθόδων περιλαμβάνει μια σειρά χημικών αντιδράσεων που χρησιμοποιούν θερμότητα για τη διάσπαση του νερού ή άλλων ενώσεων για την παραγωγή υδρογόνου. Οι θερμοχημικές διεργασίες προσφέρουν δυνητικές οδούς για την παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα, με υψηλή απόδοση και χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (Mao, 2020).

Θερμοχημικές μέθοδοι διάσπασης νερού:

- ✓ Ηλεκτρόλυση με ατμό υψηλής θερμοκρασίας (HTSE): Η HTSE χρησιμοποιεί κυψέλες ηλεκτρόλυσης υψηλής θερμοκρασίας για την παραγωγή υδρογόνου με τη διέλευση ατμού πάνω από έναν ηλεκτρολύτη στερεού οξειδίου, όπου διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Οι υψηλές θερμοκρασίες βελτιώνουν την απόδοση της διαδικασίας ηλεκτρόλυσης, μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας.
- ✓ Κύκλος θείου-ιωδίου (SI): Ο κύκλος SI είναι μια θερμοχημική διαδικασία διάσπασης νερού που περιλαμβάνει διάφορες χημικές αντιδράσεις, συμπεριλαμβανομένης της διάσπασης του θειικού οξέος και της παραγωγής ιωδιούχου υδρογόνου. Το ιωδιούχο υδρογόνο διασπάται στη συνέχεια για την παραγωγή υδρογόνου και την αναγέννηση των αρχικών υλικών.
- ✓ Κύκλος θείου-ιωδίου (SI): Ο κύκλος SI είναι μια θερμοχημική διαδικασία διάσπασης νερού που περιλαμβάνει διάφορες χημικές αντιδράσεις, συμπεριλαμβανομένης της διάσπασης του θειικού οξέος και της παραγωγής ιωδιούχου υδρογόνου. Το ιωδιούχο υδρογόνο διασπάται στη συνέχεια για την παραγωγή υδρογόνου και την αναγέννηση των αρχικών υλικών.

### 1.1.6 Παραγωγή υδρογόνου μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Η παραγωγή υδρογόνου με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πραγματοποιείται με τις εξής μεθόδους:

#### **Αεριοποίηση Βιομάζας**

Η αεριοποίηση της βιομάζας είναι μια θερμοχημική διεργασία που μετατρέπει τη βιομάζα σε μείγμα αερίων, όπως υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο. Η παραγωγή υδρογόνου από αεριοποίηση βιομάζας έχει κερδίσει σημαντική προσοχή λόγω των δυνατοτήτων της ως ανανεώσιμη και βιώσιμη πηγή ενέργειας. Η αεριοποίηση της βιομάζας περιλαμβάνει τη μερική καύση της βιομάζας σε ελεγχόμενο περιβάλλον, όπως ένας αεριοποιητής, για την παραγωγή αερίου σύνθεσης (syngas) που περιέχει υδρογόνο. Η διαδικασία αποτελείται συνήθως από τέσσερα κύρια στάδια: ξήρανση, πυρόλυση, καύση και αναγωγή. Κατά το στάδιο της ξήρανσης, η υγρασία αφαιρείται από τη βιομάζα. Στο στάδιο της πυρόλυσης, η βιομάζα θερμαίνεται απουσία οξυγόνου, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση πτητικών ενώσεων. Το στάδιο της καύσης περιλαμβάνει την εισαγωγή αέρα ή οξυγόνου για τη μερική οξείδωση της βιομάζας, παράγοντας θερμότητα και παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμούς. Τέλος, στο στάδιο της αναγωγής, το εναπομείναν διοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται σε μονοξείδιο του άνθρακα μέσω μιας σειράς χημικών αντιδράσεων.

Το υδρογόνο παράγεται κατά τη διαδικασία αεριοποίησης μέσω της αντίδρασης μετατόπισης νερού-αερίου, όπου το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά με ατμό για την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα και υδρογόνου (Hao Song, 2022).

#### **Πυρόλυση**

Η παραγωγή υδρογόνου με πυρόλυση είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος που περιλαμβάνει τη θερμική αποσύνθεση της βιομάζας ή άλλων οργανικών υλικών απουσία οξυγόνου. Η πυρόλυση είναι μια θερμοχημική διεργασία που διασπά τη βιομάζα σε τρία κύρια προϊόντα: βιοάνθρακα, βιοέλαιο και αέριο σύνθεσης. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα απουσία οξυγόνου, συνήθως σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 400 έως 800°C. Η βιομάζα θερμαίνεται γρήγορα, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση πτητικών ενώσεων, οι οποίες στη συνέχεια συμπυκνώνονται για να ληφθεί βιοέλαιο. Το εναπομένον στερεό υπόλειμμα είναι ο βιοάνθρακας, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εδαφοβελτιωτικό ή για άλλες εφαρμογές. Το syngas που

παράγεται κατά την πυρόλυση περιέχει υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο και άλλα αέρια.

Το υδρογόνο είναι ένα από τα κύρια συστατικά του syngas που παράγεται κατά την πυρόλυση. Η περιεκτικότητα σε υδρογόνο στο αέριο σύνθεσης μπορεί να αυξηθεί με τη βελτιστοποίηση των συνθηκών πυρόλυσης, όπως η θερμοκρασία, ο χρόνος παραμονής και η σύνθεση της πρώτης ύλης (Bridgwater, 2012).

### **Σκοτεινή ζύμωση**

Η σκοτεινή ζύμωση είναι η μετατροπή της βιοχημικής ενέργειας που αποθηκεύεται στην οργανική ύλη σε άλλες μορφές ενέργειας απουσία φωτός.

Η παραγωγή υδρογόνου με σκοτεινή ζύμωση έχει πολλά πλεονεκτήματα όπως η ικανότητα παραγωγής υδρογόνου από οργανικά απόβλητα. Η παραγωγή υδρογόνου από οργανικά απόβλητα έχει τη δυνατότητα μείωσης του κόστους παραγωγής υδρογόνου, δεδομένου ότι είναι οργανική (Φραντζής, 2022).

### **Βιοφωτόλυση**

Η βιοφωτόλυση αποτελεί μια διαδικασία «φωτονικής παραγωγής υδρογόνου», στην οποία η διάσπαση του νερού επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας κυανοβακτήρια και γαλαζοπράσινα φύκια (Φραντζής, 2022).

### **Ζύμωση με αέριο**

Στη ζύμωση με αέριο, το υδρογόνο παράγεται από την αντίδραση μονοξειδίου του άνθρακα και νερού παρουσία φωτοσυνθετικών βακτηρίων υπό αναερόβιες συνθήκες, μέσω της συνολικής αντίδρασης (Φραντζής, 2022).

### **Ζύμωση παρουσία φωτός**

Η φωτοζύμωση είναι μια διαδικασία κατά την οποία το υδρογόνο παράγεται από οργανικές ενώσεις μέσω μιας αντίδρασης που καταλύεται από νιτρογενάση, παρουσία φωτεινής ενέργειας, από φωτοσυνθετικά ή αναερόβια βακτήρια. Οι κύριοι περιορισμοί για την εφαρμογή της φωτοζύμωσης σε βιομηχανική κλίμακα είναι η διαθεσιμότητα και η κατανομή του φωτός και η ανάγκη για χημικές ουσίες όπως τα λιπαρά οξέα (Φραντζής, 2022).

## 1.2 Αποθήκευση υδρογόνου

Η αποθήκευση του υδρογόνου αποτελεί κρίσιμη πρόκληση για την ανάπτυξη ενεργειακών συστημάτων που βασίζονται στο υδρογόνο. Η σωστή αποθήκευση του υδρογόνου είναι εξαιρετικά σημαντική για διάφορους βασικούς λόγους όπως (A Hydrogen Strategy, 2020):

- ❖ Ασφάλεια: Ο κακός χειρισμός ή η ακατάλληλη αποθήκευση μπορεί να οδηγήσει σε κινδύνους για την ασφάλεια. Το υδρογόνο έχει ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας, πράγμα που σημαίνει ότι μπορεί να αναφλεγεί εύκολα παρουσία πηγής ανάφλεξης, ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Η διασφάλιση της σωστής αποθήκευσης ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο ατυχημάτων, εκρήξεων και πυρκαγιών.
- ❖ Πρόληψη διαρροών: Το υδρογόνο είναι το μικρότερο μόριο, γεγονός που το καθιστά επιρρεπές στη διαρροή μέσω υλικών που κατά τα άλλα είναι αδιαπέραστα για άλλα αέρια. Η διαρροή δεν οδηγεί μόνο στην απώλεια του αποθηκευμένου υδρογόνου, αλλά ενέχει επίσης κινδύνους για την ασφάλεια και μπορεί δυνητικά να μολύνει το περιβάλλον. Τα κατάλληλα συστήματα αποθήκευσης και οι τεχνολογίες περιορισμού είναι απαραίτητα για την ελαχιστοποίηση της διαρροής και τη διατήρηση της ακεραιότητας του συστήματος.
- ❖ Ενεργειακή απόδοση: Η αποτελεσματική αποθήκευση του υδρογόνου είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ενεργειακής πυκνότητάς του. Το υδρογόνο έχει χαμηλή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα, επομένως πρέπει να αποθηκεύεται και να μεταφέρεται με συμπαγή και αποτελεσματικό τρόπο. Οι κατάλληλες μέθοδοι αποθήκευσης επιτρέπουν την αποτελεσματική αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου του υδρογόνου και διευκολύνουν την εφαρμογή του σε διάφορους τομείς, όπως οι μεταφορές, η βιομηχανία και η ηλεκτροπαραγωγή.
- ❖ Ανάπτυξη υποδομών: Η δημιουργία μιας ισχυρής υποδομής για την αποθήκευση υδρογόνου είναι ζωτικής σημασίας για την ευρεία υιοθέτηση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα. Οι κατάλληλες λύσεις αποθήκευσης επιτρέπουν την ανάπτυξη του υδρογόνου σε διάφορες κλίμακες, από εφαρμογές μικρής κλίμακας, όπως κυψέλες καυσίμου για φορητές

ηλεκτρονικές συσκευές, έως συστήματα μεγάλης κλίμακας, όπως σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου για οχήματα ή αποθήκευση υδρογόνου για βιομηχανικές διεργασίες. Η κατάλληλη υποδομή αποθήκευσης υποστηρίζει την ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου και διευκολύνει τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό μέλλον.

- ❖ **Μακροπρόθεσμη αποθήκευση:** Για να εξασφαλιστεί η διαθεσιμότητα και η ευελιξία στον ενεργειακό εφοδιασμό, το υδρογόνο μπορεί να χρειαστεί να αποθηκευτεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Για παράδειγμα, η πλεονάζουσα ανανεώσιμη ενέργεια μπορεί να αποθηκευτεί ως υδρογόνο και να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους υψηλής ζήτησης ή χαμηλής παραγωγής ενέργειας. Οι κατάλληλες τεχνικές αποθήκευσης επιτρέπουν τη μακροπρόθεσμη αποθήκευση και συμβάλλουν στην αντιμετώπιση της ασυνέχειας και της μεταβλητότητας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.
- ❖ **Βελτιστοποίηση της παράδοσης:** Η αποτελεσματική αποθήκευση υδρογόνου επιτρέπει τη βελτιστοποίηση των μεθόδων παράδοσης. Είτε πρόκειται για μεταφορά υδρογόνου μέσω αγωγών, είτε για αποθήκευση σε κινητές δεξαμενές για διανομή, είτε για ενσωμάτωσή του σε υφιστάμενες υποδομές, η κατάλληλη αποθήκευση εξασφαλίζει ότι το υδρογόνο μπορεί να παραδοθεί αποτελεσματικά στους τελικούς χρήστες χωρίς σημαντικές απώλειες ή ανησυχίες για την ασφάλεια.

Με την πάροδο των ετών, έχουν διερευνηθεί διάφορες μέθοδοι για την ασφαλή και αποτελεσματική αποθήκευση του υδρογόνου.

Οι κυριότερες μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου είναι:

- ❖ Αποθήκευση πεπιεσμένου αερίου,
- ❖ Αποθήκευση υγρού υδρογόνου,
- ❖ Αποθήκευση μεταλλικών υδριδίων,
- ❖ Χημική αποθήκευση υδρογόνου,
- ❖ Αποθήκευση σε υλικά με βάση τον άνθρακα.



### 1.2.1 Αποθήκευση πεπιεσμένου αερίου

Η αποθήκευση πεπιεσμένου αερίου είναι μια ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την αποθήκευση υδρογόνου. Περιλαμβάνει τη συμπίεση του αερίου υδρογόνου και την αποθήκευσή του σε δεξαμενές υψηλής πίεσης. Η πίεση αποθήκευσης κυμαίνεται συνήθως από 350 έως 700 bar (5.000 έως 10.000 psi). Η αποθήκευση με πεπιεσμένο αέριο προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα, όπως απλότητα, ευκολία στη λειτουργία και αποδεδειγμένο ιστορικό σε εφαρμογές όπως τα οχήματα που λειτουργούν με υδρογόνο και η βιομηχανική αποθήκευση (Chen P. , 2017).

#### **Πλεονεκτήματα μεθόδου:**

- ✓ **Καθιερωμένη τεχνολογία:** Η αποθήκευση πεπιεσμένου αερίου χρησιμοποιείται εδώ και δεκαετίες σε διάφορες εφαρμογές. Επωφελείται από ώριμες υποδομές, σαφώς καθορισμένα πρότυπα και καθιερωμένα πρωτόκολλα ασφαλείας.
- ✓ **Ευελιξία και γρήγορος ανεφοδιασμός με καύσιμα:** Το συμπιεσμένο υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί εύκολα σε οχήματα κυψελών καυσίμου και άλλες εφαρμογές, προσφέροντας ευελιξία και γρήγορους χρόνους ανεφοδιασμού σε σύγκριση με εναλλακτικές μεθόδους αποθήκευσης.
- ✓ **Επεκτασιμότητα:** Τα συστήματα αποθήκευσης πεπιεσμένου αερίου μπορούν να κλιμακωθούν προς τα πάνω ή προς τα κάτω για να καλύψουν διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις, καθιστώντας τα κατάλληλα τόσο για εφαρμογές μικρής κλίμακας όσο και για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.
- ✓ **Υψηλή ενεργειακή απόδοση:** Η ενεργειακή απόδοση της αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου είναι σχετικά υψηλή, ιδίως όταν συνδυάζεται με συστήματα κυψελών καυσίμου, επιτρέποντας την αποτελεσματική αξιοποίηση του αποθηκευμένου υδρογόνου.

### 1.2.2 Αποθήκευση υγρού υδρογόνου

Η αποθήκευση υγρού υδρογόνου περιλαμβάνει την ψύξη του αερίου υδρογόνου σε κρυογονικές θερμοκρασίες ( $-253^{\circ}\text{C}$ ) για τη μετατροπή του σε υγρή κατάσταση. Η μέθοδος αυτή αυξάνει σημαντικά την ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου, καθιστώντας την πολύτιμη επιλογή για ορισμένες εφαρμογές (Chen P. , 2017).

#### **Πλεονεκτήματα μεθόδου:**

- ✓ Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα: Το υγρό υδρογόνο προσφέρει σημαντικά υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με την αποθήκευση συμπιεσμένου αερίου, επιτρέποντας την αποδοτικότερη αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου.
- ✓ Μακροπρόθεσμη αποθήκευση: Το υγρό υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί για μεγάλα χρονικά διαστήματα, επιτρέποντας τη μακροπρόθεσμη διαθεσιμότητα και χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές που απαιτούν αποθηκευμένη ενέργεια για παρατεταμένη διάρκεια.
- ✓ Ψύξη και βρασμός: Η διαδικασία υγροποίησης του υδρογόνου περιλαμβάνει ψύξη, η οποία μπορεί να επιτευχθεί με διάφορες τεχνικές ψύξης, όπως η κρυογενική ψύξη. Ωστόσο, το βράσιμο του υδρογόνου λόγω μεταφοράς θερμότητας στο σύστημα αποθήκευσης αποτελεί πρόκληση που πρέπει να αντιμετωπιστεί για να αποφευχθεί η απώλεια του αποθηκευμένου υδρογόνου.
- ✓ Διαστημικές εφαρμογές: Το υγρό υδρογόνο έχει χρησιμοποιηθεί εκτενώς στην αεροδιαστημική βιομηχανία, συγκεκριμένα σε συστήματα προώθησης πυραύλων, λόγω της υψηλής ειδικής ώσης και των αποδοτικών χαρακτηριστικών καύσης.

### 1.2.3 Αποθήκευση μεταλλικών υδριδίων

Η αποθήκευση μεταλλικών υδριδίων περιλαμβάνει τη χρήση ορισμένων μετάλλων και των κραμάτων τους για την απορρόφηση και απελευθέρωση υδρογόνου μέσω αντιστρεπτών αντιδράσεων, σχηματίζοντας μεταλλικά υδρίδια. Η μέθοδος αυτή

προσφέρει δυνητικά πλεονεκτήματα όσον αφορά τις υψηλές βαρυμετρικές και ογκομετρικές πυκνότητες υδρογόνου, καθώς και τη δυνατότητα αντιστρεπτής αποθήκευσης υδρογόνου (Chen Z. , 2021).

#### **Πλεονεκτήματα μεθόδου:**

- ✓ Υψηλή πυκνότητα υδρογόνου: Τα υδρίδια μετάλλων μπορούν να επιτύχουν υψηλή χωρητικότητα αποθήκευσης υδρογόνου, παρέχοντας υψηλή βαρυμετρική πυκνότητα υδρογόνου. Αυτό τα καθιστά ελκυστικά για εφαρμογές όπου η συμπαγής αποθήκευση είναι ζωτικής σημασίας.
- ✓ Αναστρεψιμότητα: Τα υδρίδια μετάλλων μπορούν να απορροφούν και να απελευθερώνουν υδρογόνο αντιστρεπτά, επιτρέποντας πολλαπλές ανακυκλώσεις χωρίς σημαντική υποβάθμιση της αποθηκευτικής ικανότητας. Αυτή η αντιστρεψιμότητα είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό για την απελευθέρωση υδρογόνου κατά παραγγελία.
- ✓ Ασφάλεια: Τα υδρίδια μετάλλων θεωρούνται γενικά ασφαλή και σταθερά, με χαμηλή ευφλεκτότητα και μειωμένο κίνδυνο διαρροής υδρογόνου σε σύγκριση με τις μεθόδους αποθήκευσης αέριου υδρογόνου.
- ✓ Δυνατότητα προσαρμογής των ιδιοτήτων: Οι ιδιότητες των υδριδίων μετάλλων μπορούν να τροποποιηθούν μέσω τεχνικών κραματοποίησης και νανοδομής για τη βελτιστοποίηση της ικανότητας αποθήκευσης υδρογόνου, της κινητικής και της θερμοδυναμικής.

#### 1.2.4 Χημική αποθήκευση υδρογόνου

Η χημική αποθήκευση υδρογόνου περιλαμβάνει την αποθήκευση υδρογόνου σε διάφορες στερεές ή υγρές ενώσεις, όπως η αμμωνία ( $\text{NH}_3$ ) ή τα οργανικά υδρίδια, που μπορούν να απελευθερώσουν υδρογόνο μέσω χημικών αντιδράσεων. Η μέθοδος αυτή προσφέρει τη δυνατότητα για υψηλές ενεργειακές πυκνότητες, αναστρέψιμη αποθήκευση και εναλλακτικά μέσα απελευθέρωσης υδρογόνου (Yang, 2018).

### **Πλεονεκτήματα μεθόδου:**

- ✓ Υψηλή ενεργειακή πυκνότητα: Οι ενώσεις χημικής αποθήκευσης υδρογόνου μπορούν να προσφέρουν υψηλές πυκνότητες ενέργειας, επιτρέποντας τη συμπαγή αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου.
- ✓ Αναστρεψιμότητα: Πολλά συστήματα χημικής αποθήκευσης επιτρέπουν την αντιστρεπτή απελευθέρωση και πρόσληψη υδρογόνου, επιτρέποντας επανειλημμένες ανακυκλώσεις χωρίς σημαντική υποβάθμιση της χωρητικότητας. Αυτή η αντιστρεψιμότητα είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική αποθήκευση και απελευθέρωση υδρογόνου κατά ζήτηση.
- ✓ Εναλλακτικές μέθοδοι απελευθέρωσης: Η χημική αποθήκευση υδρογόνου μπορεί να προσφέρει εναλλακτικά μέσα απελευθέρωσης υδρογόνου, όπως μέσω θερμικών, ηλεκτροχημικών ή καταλυτικών διεργασιών. Αυτή η ευελιξία επιτρέπει διαφορετικές εφαρμογές και ενσωμάτωση με διάφορα συστήματα μετατροπής ενέργειας.
- ✓ Ασφάλεια: Ορισμένες ενώσεις χημικής αποθήκευσης υδρογόνου είναι πιο σταθερές και έχουν χαμηλότερη ευφλεκτότητα σε σύγκριση με το αέριο ή το υγρό υδρογόνο, συμβάλλοντας στην ενίσχυση της ασφάλειας κατά την αποθήκευση και το χειρισμό.

#### 1.2.5 Αποθήκευση σε υλικά με βάση τον άνθρακα

Υλικά με βάση τον άνθρακα, όπως ο ενεργός άνθρακας, οι νανοσωλήνες άνθρακα και το γραφένιο, έχουν μελετηθεί εκτενώς ως πιθανοί υποψήφιοι για την αποθήκευση υδρογόνου μέσω προσρόφησης. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη φυσική προσρόφηση μορίων υδρογόνου στην επιφάνεια του υλικού άνθρακα. Τα υλικά με βάση τον άνθρακα προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως η μεγάλη επιφάνεια και το πορώδες, τα οποία παρέχουν άφθονες θέσεις προσρόφησης για το υδρογόνο (Wang, 2019).

### **Πλεονεκτήματα μεθόδου:**

- ✓ **Μεγάλη επιφάνεια:** Τα υλικά με βάση τον άνθρακα διαθέτουν μεγάλες επιφάνειες, επιτρέποντας μεγαλύτερο αριθμό θέσεων προσρόφησης υδρογόνου και αυξάνοντας τη δυνατότητα για υψηλές χωρητικότητες αποθήκευσης.
- ✓ **Αναστρέψιμη προσρόφηση:** Η προσρόφηση είναι μια αντιστρεπτή διαδικασία, που επιτρέπει την απελευθέρωση υδρογόνου υπό κατάλληλες συνθήκες, καθιστώντας τα υλικά με βάση τον άνθρακα κατάλληλα για απελευθέρωση υδρογόνου κατά παραγγελία.
- ✓ **Ασφάλεια:** Τα υλικά με βάση τον άνθρακα παρουσιάζουν γενικά χαμηλότερη ευφλεκτότητα σε σύγκριση με το αέριο ή το υγρό υδρογόνο, συμβάλλοντας στην ενίσχυση της ασφάλειας κατά την αποθήκευση και το χειρισμό.
- ✓ **Αφθονία και χαμηλό κόστος:** Τα υλικά με βάση τον άνθρακα είναι άφθονα και μπορούν να προέρχονται από διάφορες πηγές, γεγονός που τα καθιστά σχετικά χαμηλού κόστους σε σύγκριση με άλλα υλικά αποθήκευσης.

### 1.3 Μεταφορά υδρογόνου

Η μεταφορά του υδρογόνου έχει σημαντική σημασία για την ευρεία υιοθέτηση και χρήση του υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα. Η αποτελεσματική μεταφορά του υδρογόνου παίζει καθοριστικό ρόλο για να καταστεί δυνατή η ενσωμάτωσή του σε διάφορους τομείς και να υποστηριχθεί η ανάπτυξη μιας οικονομίας υδρογόνου. Οι τρόποι με τους οποίους μπορεί να πραγματοποιηθεί η μεταφορά του υδρογόνου είναι:

- ❖ Με αγωγούς: Οι αγωγοί είναι μία από τις πιο καθιερωμένες μεθόδους μεταφοράς υδρογόνου σε μεγάλες αποστάσεις. Αποτελούν οικονομικά αποδοτικό τρόπο μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου και έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για τη μεταφορά φυσικού αερίου. Με την επαναχρησιμοποίηση υφιστάμενων αγωγών φυσικού αερίου ή την κατασκευή ειδικών αγωγών υδρογόνου, το υδρογόνο μπορεί να διανεμηθεί αποτελεσματικά σε διάφορους καταναλωτές, συμπεριλαμβανομένων των βιομηχανικών εγκαταστάσεων και των σταθμών ανεφοδιασμού καυσίμων. Οι αγωγοί προσφέρουν αξιόπιστη και συνεχή παροχή υδρογόνου στους τελικούς χρήστες, υποστηρίζοντας διάφορες εφαρμογές, συμπεριλαμβανομένων των υδρογονοκίνητων οχημάτων και των βιομηχανικών διεργασιών. Επιτρέπουν την ενσωμάτωση εγκαταστάσεων παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές με απομακρυσμένα κέντρα ζήτησης, διευκολύνοντας την ανάπτυξη μιας οικονομίας υδρογόνου με χαμηλές εκπομπές άνθρακα (ORTIZ CEBOLLA, 2022).
- ❖ Ρυμουλκούμενα με σωλήνες υψηλής πίεσης: Το υδρογόνο μπορεί να συμπιεστεί σε υψηλές πιέσεις και να μεταφερθεί σε ρυμουλκούμενα με σωλήνες, τα οποία είναι μεγάλοι κύλινδροι που μπορούν να μεταφέρουν συμπιεσμένο αέριο. Τα ρυμουλκούμενα σωληνώσεων χρησιμοποιούνται συνήθως για την παράδοση υδρογόνου σε βιομηχανικούς πελάτες ή σταθμούς ανεφοδιασμού, ιδίως σε περιοχές όπου δεν υπάρχουν ακόμη αγωγοί (Reuß, 2021).
- ❖ Με δεξαμενόπλοια υγρού υδρογόνου: Το υγρό υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί σε κρυογενικά βυτιοφόρα σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες.

Το υγρό υδρογόνο προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με το συμπιεσμένο υδρογόνο, καθιστώντας το κατάλληλο για μεταφορά και αποθήκευση σε μεγάλες αποστάσεις. Το υγρό υδρογόνο μπορεί να μεταφερθεί διεθνώς για την υποστήριξη της παγκόσμιας αγοράς υδρογόνου. Παρέχει ένα μέσο αποθήκευσης της περίσσειας υδρογόνου που παράγεται σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ή υψηλής παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές (Brändle, 2021).

- ❖ Με αμμωνία: Το υδρογόνο συνδέεται χημικά με το άζωτο για να σχηματιστεί αμμωνία. Η αμμωνία έχει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα από το υγρό υδρογόνο και είναι ήδη καθιερωμένη στις βιομηχανικές αλυσίδες εφοδιασμού.

Η αμμωνία μπορεί να αξιοποιήσει την υπάρχουσα υποδομή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή, αποθήκευση και μεταφορά αμμωνίας, καθιστώντας την πρακτική λύση για τη μεταφορά υδρογόνου. Επιτρέπει την αποτελεσματική μεταφορά υδρογόνου σε μεγάλες αποστάσεις, συμπεριλαμβανομένης της διεθνούς ναυτιλίας (Hydrogen Transport-Ammonia Cracking, 2022).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟΜΕΑΣ ΟΔΙΚΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ (ΣΗΜΕΡΑ)

### 2.1 Ενεργειακό & Περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μεταφορών στην Ευρώπη

Οι οδικές μεταφορές διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στο τοπίο των μεταφορών στην Ευρώπη, προσφέροντας ουσιαστική κινητικότητα και διευκολύνοντας τις οικονομικές δραστηριότητες. Ωστόσο, αυτή η ευκολία συνοδεύεται από περιβαλλοντικό κόστος, το οποίο περιλαμβάνει την κατανάλωση ενέργειας και το σχετικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Το ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα των οδικών μεταφορών στην Ευρώπη αποτελεί κρίσιμο ζήτημα, με σημαντικές επιπτώσεις στην κατανάλωση ενέργειας, την ποιότητα του αέρα και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Οι οδικές μεταφορές στην Ευρώπη έχουν σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπο, κυρίως όσον αφορά την ποιότητα του αέρα και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η κατανόηση του αντίκτυπου αυτού είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη στρατηγικών μετριασμού του αποτυπώματός τους. Η πρωταρχική περιβαλλοντική ανησυχία που συνδέεται με τις οδικές μεταφορές στην Ευρώπη είναι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), ιδίως διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Οι εκπομπές αυτές συμβάλλουν στην υπερθέρμανση του πλανήτη και στην κλιματική αλλαγή. Στην Ευρώπη, οι οδικές μεταφορές αποτελούν σημαντική πηγή εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ο τομέας έχει κληθεί να μειώσει το αποτύπωμά του σε άνθρακα. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος (ΕΟΠ) (Energy Environment Agency, 2023), οι οδικές μεταφορές αντιπροσώπευαν περίπου το 72% των συνολικών εκπομπών των μεταφορών το 2019 καθώς και αναφέρει ότι οι οδικές μεταφορές αντιπροσώπευαν το 33% της τελικής κατανάλωσης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) το 2019. Η καύση ορυκτών καυσίμων σε κινητήρες εσωτερικής καύσης είναι η κύρια πηγή εκπομπών CO<sub>2</sub> σε αυτόν τον τομέα.

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των οδικών μεταφορών εκτείνεται πέρα από την κατανάλωση ενέργειας και περιλαμβάνει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, την ατμοσφαιρική ρύπανση και την ηχορύπανση. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, ιδίως διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), αποτελούν μείζον περιβαλλοντικό πρόβλημα που συνδέεται με τις οδικές μεταφορές. Ο ΕΟΠ (Energy Environment Agency, 2023) αναφέρει ότι το 2019 οι οδικές μεταφορές ήταν υπεύθυνες για το 72% των συνολικών



εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα των μεταφορών στην ΕΕ. Παράλληλα, οι οδικές μεταφορές συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση εκπέμποντας ρύπους όπως οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>), σωματίδια (PM) και πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC). Στην ΕΕ, περίπου το 40% των συνολικών εκπομπών NO<sub>x</sub> και το 20% των εκπομπών PM προέρχονται από τις οδικές μεταφορές. Επιπρόσθετα, η ηχορύπανση είναι μια άλλη περιβαλλοντική επίπτωση των οδικών μεταφορών. Στις αστικές περιοχές, ο κυκλοφοριακός θόρυβος μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την ευημερία των κατοίκων. Στην Ευρώπη, εκτιμάται ότι πάνω από 100 εκατομμύρια άνθρωποι εκτίθενται σε επίπεδα θορύβου από την οδική κυκλοφορία που υπερβαίνουν τα 55 ντεσιμπέλ, τα οποία θεωρούνται ενοχλητικά για τον ύπνο και την υγεία.

## 2.2 Ενεργειακό & Περιβαλλοντικό αποτύπωμα των μεταφορών στην Ελλάδα

Το ενεργειακό και περιβαλλοντικό αποτύπωμα των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα, όπως και σε πολλές άλλες χώρες, αποτελεί κρίσιμο ζήτημα στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης και του μετριασμού της κλιματικής αλλαγής. Η εξάρτηση της Ελλάδας από τις οδικές μεταφορές για τη μετακίνηση ανθρώπων και αγαθών, σε συνδυασμό με τα μοναδικά γεωγραφικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά της, καθιστά τον τομέα αυτό σημαντικό πεδίο μελέτης.

Η κατανάλωση ενέργειας στον τομέα των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα περιλαμβάνει κυρίως τη χρήση ορυκτών καυσίμων, ιδίως βενζίνης και ντίζελ. Το 2019, ο τομέας των οδικών μεταφορών ήταν υπεύθυνος για το 42% περίπου της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας της χώρας. Αυτό περιλαμβάνει την ενέργεια που απαιτείται για τον ανεφοδιασμό των οχημάτων με καύσιμα, καθώς και την ενέργεια που απαιτείται για τις υποδομές και τις λειτουργίες, όπως η κατασκευή και η συντήρηση του οδικού δικτύου. Το 2019, η συνολική κατανάλωση ενέργειας στην Ελλάδα ήταν περίπου 47,4 εκατομμύρια τόνοι πετρελαίου (Mtoe). Αυτό σημαίνει ότι οι οδικές μεταφορές αντιπροσώπευαν περίπου 19,9 Mtoe. Πιο συγκεκριμένα, οι οδικές μεταφορές στην Ελλάδα κατανάλωσαν περίπου 18,5 Mtoe για τα οδικά οχήματα (επιβατικά αυτοκίνητα, φορτηγά, λεωφορεία κ.λπ.) και περίπου 1,4 Mtoe για τις οδικές υποδομές και τις λειτουργίες (International Energy Agency, 2021).

Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τις οδικές μεταφορές στην Ελλάδα συμβάλλουν σημαντικά στις συνολικές εκπομπές της χώρας, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 21% των συνολικών εκπομπών της χώρας το 2019. Οι εκπομπές αυτές αποτελούνται κυρίως από διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), αλλά περιλαμβάνουν επίσης μεθάνιο (CH<sub>4</sub>) και οξείδιο του αζώτου (N<sub>2</sub>O) από τα καυσαέρια των οχημάτων και την παραγωγή καυσίμων. Το 2019, οι συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην Ελλάδα ήταν περίπου 78,8 εκατομμύρια τόνοι ισοδύναμου CO<sub>2</sub> (MtCO<sub>2</sub>e). Ο τομέας των οδικών μεταφορών ήταν υπεύθυνος για την εκπομπή περίπου 16,5 MtCO<sub>2</sub>e. Η τιμή αυτή περιλαμβάνει τις εκπομπές τόσο από τα καυσαέρια των οχημάτων όσο και από την παραγωγή των καυσίμων που χρησιμοποιούνται στις οδικές μεταφορές (International Energy Agency, 2021). Η μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα των οδικών μεταφορών αποτελεί προτεραιότητα για την Ελλάδα, δεδομένης της δέσμευσής της στους στόχους μείωσης των εκπομπών της Ευρωπαϊκής Ένωσης και στη Συμφωνία των Παρισίων. Η χώρα έχει εφαρμόσει

διάφορα μέτρα για τον περιορισμό των εκπομπών, συμπεριλαμβανομένης της προώθησης των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων και της βελτίωσης των συστημάτων δημόσιων μεταφορών.

Εκτός από τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, οι οδικές μεταφορές στην Ελλάδα έχουν επίσης σημαντικές επιπτώσεις στην ποιότητα του αέρα. Οι εκπομπές από τα οχήματα συμβάλλουν στο σχηματισμό ατμοσφαιρικών ρύπων όπως τα οξειδία του αζώτου (NOx), τα σωματίδια (PM) και οι πτητικές οργανικές ενώσεις (VOC).

Ο μετριασμός του ενεργειακού και περιβαλλοντικού αποτυπώματος των οδικών μεταφορών στην Ελλάδα απαιτεί μια πολύπλευρη προσέγγιση. Ορισμένα από τα βασικά μέτρα και στρατηγικές περιλαμβάνουν:

**Προώθηση των ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων:** Η Ελλάδα προωθεί την υιοθέτηση ηλεκτρικών και υβριδικών οχημάτων μέσω κινήτρων, όπως φορολογικές ελαφρύνσεις και επιδοτήσεις. Τα οχήματα αυτά παράγουν χαμηλότερες ή μηδενικές εκπομπές καυσαερίων και μειώνουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

**Βελτίωση των δημόσιων μεταφορών:** Η βελτίωση των συστημάτων δημόσιων μεταφορών, συμπεριλαμβανομένων των λεωφορείων και των τραμ, μπορεί να μειώσει τον αριθμό των ιδιωτικών οχημάτων στους δρόμους. Αυτό όχι μόνο μειώνει τις εκπομπές αλλά και ανακουφίζει την κυκλοφοριακή συμφόρηση.

**Επενδύσεις σε βιώσιμες υποδομές:** Η ανάπτυξη υποδομών που υποστηρίζουν εναλλακτικούς τρόπους μεταφοράς, όπως η ποδηλασία και το περπάτημα, μπορεί να μειώσει την εξάρτηση από τα αυτοκίνητα και να μειώσει τις εκπομπές.

**Βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων:** Η βελτίωση της ποιότητας των καυσίμων και η μείωση της περιεκτικότητας των καυσίμων σε θείο μπορεί να οδηγήσει σε καθαρότερη καύση και μειωμένες εκπομπές από τα οχήματα.

**Διαχείριση της κυκλοφορίας:** Η εφαρμογή αποτελεσματικής διαχείρισης της κυκλοφορίας μπορεί να μειώσει την κυκλοφοριακή συμφόρηση και τις εκπομπές.

**Ευαισθητοποίηση και εκπαίδευση του κοινού:** Η ευαισθητοποίηση του κοινού σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των οδικών μεταφορών και η προώθηση φιλικών προς το περιβάλλον πρακτικών οδήγησης μπορούν να οδηγήσουν σε αλλαγές συμπεριφοράς.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: Η ΥΔΡΟΓΟΝΟΚΙΝΗΣΗ ΣΕ ΠΑΓΚΟΣΜΙΟ & ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΕΠΙΠΕΔΟ (ΣΗΜΕΡΑ)

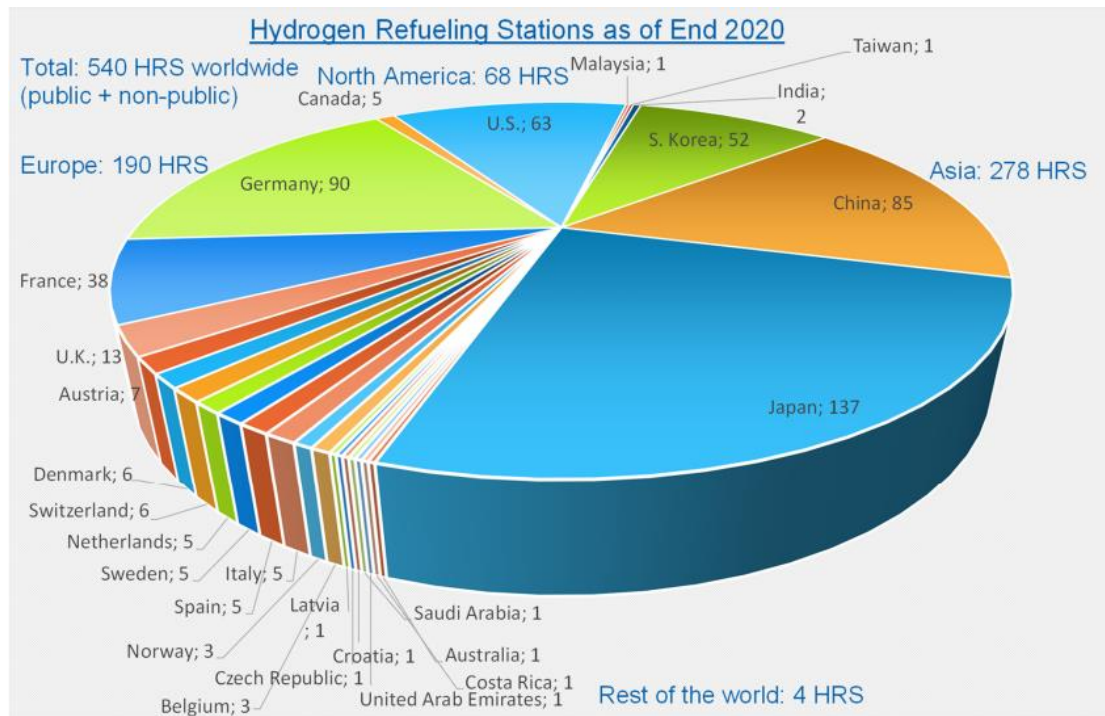
Στο Κεφάλαιο αυτό θα αναλυθεί η τρέχουσα κατάσταση χρήσης υδρογόνου στον τομέα των οδικών μεταφορών στην Ευρωπαϊκή Ένωση, την Ιαπωνία και τις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής και αξιολογείται η σημερινή παγκόσμια υποδομή σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου.

### 3.1 Σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο

Στο τέλος του 2020, λειτουργούσαν 540 σταθμοί ανεφοδιασμού καυσίμου, συμπεριλαμβανομένων τόσο δημόσιων όσο και ιδιωτικών εγκαταστάσεων.

Μια ανάλυση με βάση τις ηπείρους δείχνει ότι οι περισσότεροι σταθμοί υδρογόνου είναι συγκεντρωμένοι στην Ασία, με 278 σταθμούς ανεφοδιασμού, ακολουθούμενη από την Ευρώπη, με 190 και 68 στη Βόρεια Αμερική.

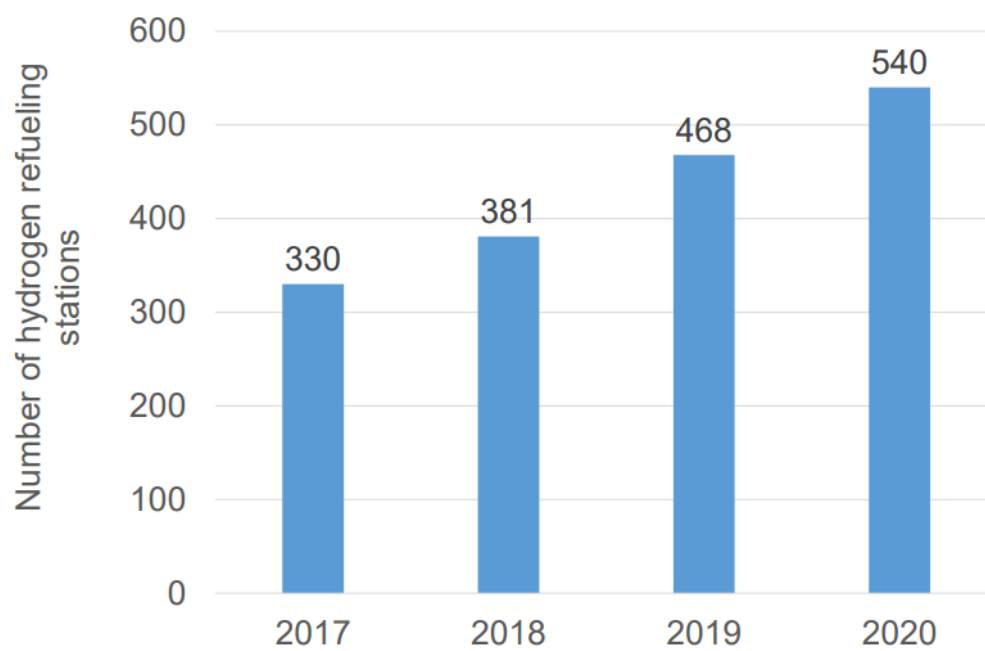
Η χώρα με τον υψηλότερο αριθμό σταθμών είναι η Ιαπωνία με 137. Η Γερμανία με 90 και η Κίνα με 85 κατέχουν τη δεύτερη και την τρίτη θέση, αντίστοιχα, στην κατάταξη αυτή. Οι ΗΠΑ καταλαμβάνουν πλέον την τέταρτη θέση αντί της τρίτης, έχοντας υποστεί μια στασιμότητα, με 63 σταθμούς, μπροστά από τη Νότια Κορέα με 52 και τη Γαλλία με 38. Οι πιο αξιοσημείωτες μεταβολές καταγράφηκαν για την Κίνα και την Ιαπωνία, η καθεμία από τις οποίες εκκίνησαν 24 νέους σταθμούς το 2020, ακολουθούμενες από τη Νότια Κορέα με 18, τη Γαλλία με 13 και την Γερμανία με 9 νέους σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου (Remzi Can Samsun, 2022).



Εικόνα 3: Επισκόπηση των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου ανά χώρα παγκοσμίως μέχρι το 2020, Πηγή: (Remzi Can Samsun, 2022)

Οι τρεις χώρες με τον υψηλότερο αριθμό σε δημόσια διαθέσιμους σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου είναι η Ιαπωνία με 137, η Γερμανία με 90 και η Κίνα με 66. Ακολουθούν οι ΗΠΑ με 46 δημόσιους διαθέσιμους σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου. Η κατάταξη αυτή είναι επομένως ίδια με τον συνολικό αριθμό των σταθμών. Στη Γερμανία και την Ιαπωνία όλοι οι σταθμοί είναι δημόσιοι. Με αυτούς οι δημόσια διαθέσιμοι σταθμοί αντιπροσωπεύουν το 63% του συνόλου των σταθμών (δημόσιων και ιδιωτικών) παγκοσμίως.

Ο συνολικός αριθμός των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου σε όλο τον κόσμο σημείωσε αύξηση 15% το 2020. Η αύξηση ήταν ασθενέστερη από το 23% που παρατηρήθηκε το 2019, αλλά στο ίδιο επίπεδο με εκείνη του 2018. Στην Εικόνα 4 παρουσιάζεται διάγραμμα με τον ρυθμό αύξησης των σταθμών ανεφοδιασμού σε παγκόσμιο επίπεδο (Remzi Can Samsun, 2022).



Εικόνα 4: Παγκόσμιο αριθμητική ανάπτυξη των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου 2017-2020,

Πηγή: (Remzi Can Samsun, 2022)

## 3.2 Η υδρογονοκίνηση σε παγκόσμιο και ευρωπαϊκό επίπεδο

### 3.2.1 Ασία

Ο οδικός χάρτης της **Νότιας Κορέας** για την οικονομία του υδρογόνου περιγράφει ένα από τα σημαντικότερα εθνικά σχέδια ανάπτυξης για τις κυψέλες καυσίμου και το υδρογόνο. Σε αυτό το σχέδιο, η κυβέρνηση ορίζει έναν βασικό ρόλο για την οικονομία του υδρογόνου, ώστε να γίνει η κινητήρια δύναμη της ανάπτυξης της καινοτομίας το 2040. Αναμένεται ότι η οικονομία του υδρογόνου θα δημιουργήσει 43 KRW (Γουόν Νότιας Κορέας) τρισεκατομμύρια σε προστιθέμενη αξία ετησίως και 420.000 νέες θέσεις εργασίας μέχρι τότε.

Πιο συγκεκριμένα, το 2022 παράχθηκαν 81.000 οχήματα υδρογόνου (79.000 επιβατικά αυτοκίνητα και 2.000 λεωφορεία) και 310 νέοι σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου. Στόχος για το 2040 είναι η παραγωγή 6,2 εκατομμυρίων οχημάτων υδρογόνου (5,9 εκατομμύρια επιβατικά αυτοκίνητα, 120.000 ταξί, 60.000 λεωφορεία και 120.000 φορτηγά) και η δημιουργία 1.200 σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου. Η ετήσια προμήθεια υδρογόνου θα φτάνει τους 5.260.000 τόνους. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι προαναφερόμενες τιμές αφορούν τους αριθμούς παραγωγής των οχημάτων που χρησιμοποιούνται στη χώρα και εκείνων που εξάγονται. Χωρίς τις εξαγόμενες μονάδες, μέχρι το 2040 προβλέπεται να κυκλοφορούν στη Νότια Κορέα 2,9 εκατομμύρια επιβατικά αυτοκίνητα, 80.000 ταξί, 40.000 λεωφορεία και 30.000 φορτηγά (Remzi Can Samsun, 2022).

Η Βασική Στρατηγική Υδρογόνου της **Ιαπωνίας** καθορίζει ένα όραμα για κοινούς στόχους που θα πρέπει να επιδιώξουν από κοινού ο δημόσιος και ο ιδιωτικός τομέας με στόχο την επίτευξή τους έως το 2050. Μεταξύ άλλων σημαντικών σημείων, η στρατηγική προτείνει ότι η Ιαπωνία θα πρέπει να ηγηθεί παγκοσμίως στην υλοποίηση μιας κοινωνίας βασισμένης στο υδρογόνο. Το βασικό σημείο της εθνικής στρατηγικής περιλαμβάνει στόχο για το 2025 να κινούνται 200.000 επιβατικά αυτοκίνητα και να υπάρχουν 320 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου και το 2030 να κινούνται 800.000 επιβατικά αυτοκίνητα, 1.200 λεωφορεία και να υπάρχουν 900 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου (Remzi Can Samsun, 2022).

Παρόμοια με τη Νότια Κορέα και την Ιαπωνία, στην **Κίνα** έχουν αναπτυχθεί περαιτέρω φιλόδοξα σχέδια. Σύμφωνα με την αναθεωρημένη έκδοση του χάρτη

πορείας για τα οχήματα υδρογόνου και κυψελών καυσίμου, για την Κίνα ορίζεται ως στόχος το 2025 να κινούνται 100.000 οχήματα κυψελών καυσίμου και να υπάρχουν 1.000 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου ενώ το 2035 ο αριθμός των οχημάτων να ανέρχεται σε 1.000.000 μονάδες και ο αριθμός των σταθμών να φτάνει τους 5.000 σταθμούς (Remzi Can Samsun, 2022).

### 3.2.2 Ευρώπη

Η Ευρωπαϊκή Ένωση και πολλές ευρωπαϊκές χώρες έχουν θέσει στόχους για το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου. Η ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία περιλαμβάνει ένα σχέδιο δράσης για την ενίσχυση της αποδοτικότητας της χρήσης των πόρων με τη μετάβαση σε μια καθαρή, κυκλική οικονομία και την αποκατάσταση της βιοποικιλότητας, καθώς και τη μείωση της ρύπανσης με στόχο την εξάλειψη των καθαρών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου έως το 2050. Η στρατηγική της ΕΕ για το υδρογόνο ορίζει μια προσέγγιση τριών φάσεων για την ανάπτυξη ανανεώσιμου υδρογόνου, το οποίο μπορεί να υποστηρίξει την απαλλαγή από τον άνθρακα πολλών τομέων σε ολόκληρη την Ευρώπη στο πλαίσιο ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού συστήματος. Μερικοί από τους στόχους της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και άλλων κρατών της Ευρώπης είναι (Φραντζής, 2022):

- Το Εθνικό Σχέδιο της **Γαλλίας** στοχεύει σε 5.000 επιβατικά αυτοκίνητα και επαγγελματικά ελαφρά οχήματα, 200 λεωφορεία και φορτηγά και 100 σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου έως το 2025. Οι στόχοι του 2028 περιλαμβάνουν 20.000–50.000 επιβατικά και εμπορικά αυτοκίνητα και 800–2.000 λεωφορεία και φορτηγά.
- Η **Κροατία** στοχεύει σε 25 σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου έως το 2030, έως 50 το 2040 και έως 75 το 2050.
- Η **Γερμανία** έθεσε ως στόχο την αύξηση των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου σε 400 έως το 2025. Από το 2021 έχουν τεθεί σε κυκλοφορία επίσης 14 επιβατικά τρένα με τεχνολογία κυψελών καυσίμου και 27 επιπλέον έχουν προγραμματιστεί έως το 2023. Το κρατίδιο της Βόρειας Ρηνανίας-Βεστφαλίας (NRW) στοχεύει να θέσει σε κυκλοφορία περισσότερα από 400 φορτηγά που λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου, στη δημιουργία τουλάχιστον 20 σταθμών ανεφοδιασμού φορτηγών, στη δημιουργία 60 σταθμών ανεφοδιασμού



αυτοκινήτων καθώς και στη κυκλοφορία 500 λεωφορείων υδρογόνου για τις δημόσιες συγκοινωνίες έως το 2025. Οι στόχοι για το 2030 περιλαμβάνουν την κυκλοφορία 11.000 φορτηγών άνω των 20 τόνων τα οποία θα χρησιμοποιούν κυψέλες καυσίμου, τη δημιουργία 200 σταθμών ανεφοδιασμού φορτηγών και αυτοκινήτων, τη δημιουργία 1.000 κάδων για την απόρριψη των κυψελών καυσίμου και την κυκλοφορία 3.800 λεωφορείων κυψελών καυσίμου για χρήση από τις δημόσιες συγκοινωνίες.

- Στην **Ισπανία**, οι στόχοι που ορίζονται για το έτος 2030 περιλαμβάνουν τη χρήση 5.000–7.000 ελαφρών και βαρέων οχημάτων για μεταφορά εμπορευμάτων, 150–200 λεωφορείων, δύο γραμμές τρένων που θα λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου και τη λειτουργία 100–150 σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου για δημόσια χρήση.
- Στην **Ελβετία**, 1.600 βαρέα φορτηγά έχουν προγραμματιστεί να κυκλοφορήσουν ως το 2025.
- Στην **Ιταλία**, η κυκλοφορία 290.000 επιβατικών αυτοκινήτων και 3.600 λεωφορείων είναι οι στόχοι για το 2030. Μέχρι τότε προγραμματίζονται επίσης 346 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου για επιβατικά αυτοκίνητα και 96 για λεωφορεία. Επιπλέον, η Ιταλία στοχεύει σε 200.000 βαρέα φορτηγά για το 2030 και σε μια υποδομή 40 σταθμών ανεφοδιασμού για βαρέα οχήματα τα επόμενα έξι χρόνια.

Τέλος, ο «χάρτης» για το υδρογόνο στην Ευρώπη ο οποίος αντιπροσωπεύει τις απόψεις της βιομηχανίας που εκπροσωπείται από την «Hydrogen Europe», προτείνει τα ακόλουθα (Φραντζής, 2022):

- ✚ Έως το 2030 τα οχήματα τα οποία θα λειτουργούν με κυψέλες καυσίμου θα μπορούσαν να αντιπροσωπεύουν 1 στα 22 επιβατικά οχήματα (συνολικό στόλος 3.7 εκατομμύρια οχήματα) και 1 στα 12 ελαφρά επαγγελματικά οχήματα (συνολικός στόλος 500.000) ενώ παράλληλα στην κυκλοφορία θα βρίσκονται 45.000 φορτηγά και λεωφορεία και 570 τρένα. Επίσης, αναμένεται αύξηση του αριθμού των σταθμών ανεφοδιασμού στην Ευρώπη.
- ✚ Έως το 2040 το παραπάνω ποσοστό θα αυξηθεί σε 1 στα 7 επιβατικά οχήματα και 1 στα 5 ελαφρά επαγγελματικά οχήματα ενώ παράλληλα στην κυκλοφορία

θα βρίσκονται 450.000 φορτηγά και λεωφορεία, 2.000 τρένα και οι σταθμοί ανεφοδιασμού στην Ευρώπη θα ανέρχονται στους 15.000.

- 🇺🇸 Μέχρι το 2050, 45 εκατομμύρια επιβατικά αυτοκίνητα, 6.5 εκατομμύρια ελαφρά επαγγελματικά οχήματα, 1.7 εκατομμύρια φορτηγά και 250.000 θα υπάρχουν στην κυκλοφορία ένα σενάριο ωστόσο που είναι αρκετά φιλόδοξο.

### 3.2.3 Βόρεια Αμερική

Ο **Καναδάς** έχει καθορίσει το μακροπρόθεσμο όραμα της λειτουργίας περισσότερων από πέντε εκατομμυρίων ηλεκτρικών οχημάτων κυψελών καυσίμου και ενός δικτύου ανεφοδιασμού υδρογόνου σε ολόκληρο τον Καναδά έως το 2050, στο πλαίσιο της στρατηγικής για το υδρογόνο στον Καναδά, που δημοσιεύθηκε τον Δεκέμβριο του 2020. Ως βραχυπρόθεσμους και μεσοπρόθεσμους στόχους, η κυβέρνηση του Καναδά έθεσε στόχους για τα μερίδια των οχημάτων μηδενικών εκπομπών, στα οποία περιλαμβάνονται τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία, τα FCEV και τα υβριδικά-ηλεκτρικά οχήματα με σύνδεση (Remzi Can Samsun, 2022).

Οι **ΗΠΑ** στοχεύουν σε μια εθνική οικονομία καθαρής ενέργειας 100% με καθарές μηδενικές εκπομπές μέχρι το 2050. Περαιτέρω, η **Καλιφόρνια** θα επενδύει 20 εκατομμύρια δολάρια ετησίως μέχρι να τεθούν σε λειτουργία 100 δημόσιοι σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου. Μέχρι το τέλος του 2025, η Καλιφόρνια σκοπεύει να έχει 200 σταθμούς σε λειτουργία. Στην πολιτεία αυτή, προβλέπεται ότι το 100% των πωλήσεων νέων επιβατικών αυτοκινήτων και φορτηγών εντός της πολιτείας μέχρι το 2035, το 100% των μεσαίων και βαρέων οχημάτων μέχρι το 2045 και το 100% των εκτός δρόμου οχημάτων και εξοπλισμού θα είναι, όπου είναι εφικτό, μηδενικών εκπομπών (Remzi Can Samsun, 2022).

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΡΕΥΝΑΣ - ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΕΡΩΤΗΜΑΤΑ

Η μεθοδολογία έρευνας που πραγματοποιείται στα επόμενα κεφάλαια είναι βασισμένη στην ανάπτυξη μίας σειράς σεναρίων διείσδυσης των ηλεκτρικών και των υδρογονοκίνητων οχημάτων με ποσόστωση υιοθέτησης στον τομέα της αγοράς. Παράλληλα, υλοποιείται συλλογή σχετικών δεδομένων και πληροφοριών για την παραμετροποίηση των σεναρίων, συμπεριλαμβανομένων τεχνικών δεδομένων σχετικά με τις τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου, τις υποδομές μεταφορών, τα χαρακτηριστικά των οχημάτων, τις τιμές ενέργειας και μελέτες αγοράς. Τέλος, πραγματοποιείται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των τεσσάρων υποθετικών σεναρίων για την επίτευξη των επιθυμητών στόχων.

Τα ερευνητικά ερωτήματα που προκύπτουν είναι τα εξής:

1. Ποιο είναι το κόστος παραγωγής του υδρογόνου ανά περιοχή και ανάλογα με τον τρόπο παραγωγής αυτού;
2. Ποιο είναι το δυναμικό παραγωγής του υδρογόνου ανά τον κόσμο;
3. Σύγκριση συμβατικών – ηλεκτρικών – υδρογονοκίνητων οχημάτων: Ποιο είναι οικονομικότερο κατά τη μετακίνηση;
4. Ποια είναι η πρόβλεψη του ποσοστού του στόλου των BEV και των FCEV σε σχέση με το συνολικό αριθμό αυτοκινήτων έως το 2050;
5. Ποια είναι η πρόβλεψη των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων που προκύπτουν από στόλο επιβατικών οχημάτων που αποτελείται ICEV, BEV και FCEV έως το 2050;
6. Πόσες μονάδες ηλεκτρόλυσης απαιτούνται για την κάλυψη της ζήτησης του υδρογόνου για τα 4 σενάρια ανάλυσης;

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ

### 5.1 Τιμή πώλησης υδρογόνου ανά περιοχή

Μετά την υπογραφή της Συμφωνίας του Παρισίου το 2016, όπου τα υπογράφοντα κράτη δεσμεύονται να επιτύχουν μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το 2050, οι αρμόδιοι φορείς και οι κυβερνήσεις στράφηκαν στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την ενεργειακή τροφοδοσία τομέων με υψηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Με τον τομέα των μεταφορών να είναι υπεύθυνος για το 14% των συνολικών ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (IPCC, 2014), η αλλαγή σε εναλλακτικές βιώσιμες λύσεις όπως τα εναλλακτικά καύσιμα, κερδίζουν ολοένα και περισσότερους υποστηρικτές. Σε αυτή την κατηγορία εμπίπτει και το υδρογόνο, που πλέον θεωρείται ως μια πολλά υποσχόμενη ενεργειακή πηγή απαραίτητη για την απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές (Robinius, 2017).

Στον τομέα των μεταφορών, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε σε συμβατικούς κινητήρες εσωτερικής καύσης ή ως καύσιμο σε κυψέλες καυσίμων. Η τιμή πώλησης του υδρογόνου είναι άμεσα συνυφασμένη με το κόστος παραγωγής του, που με τη σειρά του καθορίζεται από την τεχνολογία που χρησιμοποιείται για την παραγωγή, όσο και με το κόστος μεταφοράς και προμήθειας του. Ως κόστος παραγωγής ορίζεται το ετήσιο λειτουργικό κόστος προς την ετήσια παραγωγή υδρογόνου (Lysenko, 2012) και υπολογίζεται ξεχωριστά ανάλογα τον τρόπο παραγωγής υδρογόνου (βλ. §1.1).

Ο κάθε διαφορετικός τρόπος παραγωγής υδρογόνου, αντιστοιχεί σε διαφορετικά κόστη παραγωγής και σε διαφορετικές εκπομπές άνθρακα που καθορίζουν την τελική τιμή του προϊόντος πριν σε αυτή προστεθούν τα έξοδα μεταφοράς και αποθήκευσης. Βάσει του τρόπου παραγωγής, το υδρογόνο χωρίζεται σε χρωματικές κατηγορίες (Πίνακας 1), τρεις από τις οποίες είναι οι συχνότερα χρησιμοποιούμενες, συγκεκριμένα το γκρι, το μπλε και το πράσινο υδρογόνο (Massarweh, 2023). Αυτές οι κατηγορίες χρησιμοποιούνται στην αγορά και τις οικονομικές μελέτες για τον διαχωρισμό του υδρογόνου και των οικονομοτεχνικών χαρακτηριστικών του.

Τύπος	Πηγή/διαδικασία παραγωγής	Εκπομπές CO <sub>2</sub>
Καφέ H <sub>2</sub>	Ορυκτοί άνθρακες (λιγνίτης)	Στο περιβάλλον
Γκρι H <sub>2</sub>	Ορυκτοί άνθρακες (φυσικό αέριο)	Στο περιβάλλον
Μπλε H <sub>2</sub>	Ορυκτοί άνθρακες (φυσικό αέριο)	Δέσμευση μεγάλου μέρους. Ποσοστό στο περιβάλλον
Πράσινο H <sub>2</sub>	Ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ΑΠΕ	Μηδενικές ή ελάχιστες
Τιρκουάζ H <sub>2</sub>	Ορυκτοί άνθρακες (φυσικό αέριο)	Παραγωγή στερεού άνθρακα
Χρυσό H <sub>2</sub>	Βιολογική παραγωγή από υπολείμματα υδρογονανθράκων	Ουδέτερο ισοζύγιο
Μωβ H <sub>2</sub>	Ηλεκτρόλυση νερού με πυρηνική ενέργεια	Μηδενικές ή ελάχιστες

Πίνακας 1: Οι 7 διαφορετικές κατηγορίες υδρογόνου σύμφωνα με τη διαδικασία παραγωγής του και τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

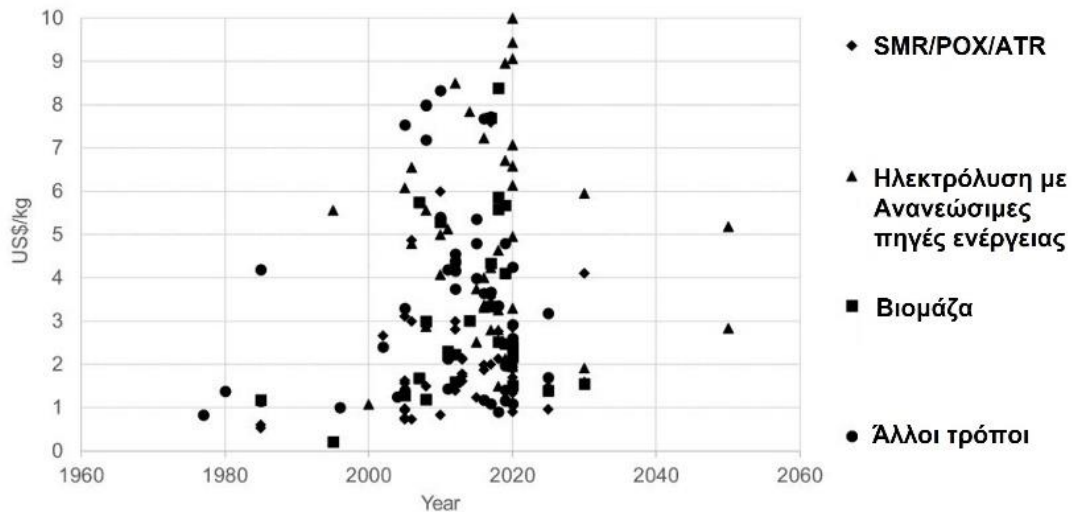
Το γκρι υδρογόνο παράγεται κυρίως μέσω φυσικού αερίου και δευτερευόντως άλλων υδρογονανθράκων που ταυτόχρονα με το υδρογόνο, παράγει μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα, ενός από τα πιο σημαντικά αέρια του θερμοκηπίου. Συγκεκριμένα μέσω της αναμόρφωσης του μεθανίου με ατμό (SMR), παράγονται 8.47 kg διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) για κάθε 1 kg υδρογόνου (H<sub>2</sub>) (Katebah, 2022). Παρόλα αυτά, η παραγωγή με αυτή τη διαδικασία είναι μέχρι αυτή τη στιγμή ο πιο οικονομικός τρόπος παραγωγής υδρογόνου και η τιμή του καθορίζεται από την τιμή του φυσικού αερίου, η οποία όμως, τα τελευταία χρόνια, παρουσιάζει διακυμάνσεις (π.χ. με τον πόλεμο στην Ουκρανία) και δεν αποκλείεται στο μέλλον να επηρεάσει και την τελική τιμή του υδρογόνου.

Το μπλε υδρογόνο, αποτελεί μια πιο καθαρή και βιώσιμη εκδοχή του γκρι υδρογόνου, καθώς και αυτό παράγεται με την διαδικασία SMR, αλλά σε αντίθεση με το γκρι, στην παραγωγή μπλε υδρογόνου προστίθεται και ένα σύστημα δέσμευσης και αποθήκευσης του παραγόμενου διοξειδίου του άνθρακα. Με αυτό το σύστημα, το μεγαλύτερο μέρος του παραγόμενου αερίου του θερμοκηπίου δεν απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα αλλά δεσμεύεται και αποθηκεύεται κάτω από την επιφάνεια του εδάφους, σε ειδικούς γεωλογικούς σχηματισμούς κ.α. Ωστόσο, το ποσοστό του διοξειδίου του άνθρακα που δεσμεύεται κατά τη διαδικασία παραγωγής κυμαίνεται από

50-80% (Bauer, 2022). Το μπλε υδρογόνο, όπως και το γκρι, χρησιμοποιεί ως πρώτη ύλη το φυσικό αέριο με αποτέλεσμα η τιμή του παραγόμενου υδρογόνου να επηρεάζεται και σε αυτή την περίπτωση άμεσα από την τιμή του φυσικού αερίου αλλά ταυτόχρονα το κόστος αυξάνεται ανάλογα με την τεχνολογία του συστήματος δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα καθώς και την απόσταση της μονάδας παραγωγής από τους κατάλληλους γεωλογικούς σχηματισμούς που επιτρέπουν την υπο-επιφανειακή αποθήκευσή του άνθρακα.

Στον αντίποδα, το πράσινο υδρογόνο, αποτελεί την πιο βιώσιμη μέθοδο παραγωγής υδρογόνου καθώς από αυτή τη διαδικασία δεν προκύπτουν εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα ή άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Με την χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την ενεργειακή τροφοδοσία της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης νερού, το παραγόμενο υδρογόνο έχει μηδενικό ανθρακικό αποτύπωμα και είναι ανεξάρτητο από την τιμή των ορυκτών καυσίμων, παραμένει όμως από τις πιο κοστοβόρες διαδικασίες παραγωγής, εξαιτίας του υψηλού κόστους της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και το κόστος των ηλεκτρολυτών (Agaton, 2022).

Κάνοντας μια ανασκόπηση στο κόστος παραγωγής υδρογόνου από το 1977 και μετά, φαίνεται πως διαχρονικά το κόστος παραγωγής πράσινου υδρογόνου βρισκόταν πάντα υψηλότερα, ενώ η παραγωγή γκρι υδρογόνου είχε ανέκαθεν το χαμηλότερο κόστος παραγωγής σε σχέση με τις άλλες μεθόδους, ακόμα και όταν στην τιμή προστίθεται ο φόρος άνθρακα που επιβάλλεται στην παραγωγή γκρι και μπλε υδρογόνου εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Εικόνα 5) (T. Miyagawa, 2022). Επιπρόσθετα, εξετάζοντας τις μελλοντικές εκτιμήσεις για το κόστος παραγωγής, φαίνεται ότι τουλάχιστον μέχρι και το 2030 η παραγωγή πράσινου υδρογόνου δε θα είναι οικονομικά ανταγωνιστική με τις τιμές του μπλε και του γκρι υδρογόνου σε παγκόσμιο επίπεδο.



Εικόνα 5: Διάγραμμα κόστους και προβλεπόμενου κόστους παραγωγής υδρογόνου (σε δολάρια ανά kg) για τα έτη 1977 μέχρι το 2050 για παραγωγή μέσω: φυσικού αερίου και υδρογονανθράκων (SMR/POX/ATR), ηλεκτρόλυσης με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, αεριοποίηση βιομάζας και άλλους τρόπους οι οποίοι περιλαμβάνουν θερμοχημικές, φωτοκαταλυτικές, ηλεκτρόλυση χωρίς χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας κ.ά.

Πηγή: (T. Miyagawa, 2022)

Σύμφωνα με τα δεδομένα από S&P Global Platts, τον κορυφαίο ανεξάρτητο πάροχο τιμών αναφοράς για τις αγορές ενέργειας, τον Ιούνιο του 2023, οι τιμές του κόστους παραγωγής υδρογόνου κυμαίνονταν από 0.96 – 7.19 \$/kg ανάλογα την περιοχή αλλά και τον τρόπο παραγωγής του (Πίνακας 2). Βάσει των στοιχείων αυτών, παρατηρούμε ότι οι Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής παράγουν υδρογόνο με μικρότερο κόστος συγκριτικά με την Ευρώπη, την Ασία-Ωκεανία αλλά και την Μέση Ανατολή με διαφορά κόστους που σε κάποιες κατηγορίες όπως την αναμόρφωση με ατμό, αγγίζει το 150%. Η Ευρώπη έχει το μεγαλύτερο κόστος παραγωγής υδρογόνου, ενώ τα κόστη είναι σχεδόν εξίσου υψηλά και στις παραγωγές χώρες της Ασίας-Ωκεανίας. Παρότι η μέση ετήσια παγκόσμια τιμή, όπως δίνεται από τον ίδιο φορέα, βρίσκεται στα 1.5-2 \$/kg για την παραγωγή γκρι υδρογόνου, στα 2.5-3 \$/kg για μπλε υδρογόνο και στα 4.2-5.3 \$/kg για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου, φαίνεται ότι οι ΗΠΑ παράγουν πράσινο υδρογόνο σε τιμές σχεδόν ίδιες ή και μικρότερες με τις τιμές παραγωγής μπλε ή γκρι υδρογόνου σε Ευρώπη, Ασία-Ωκεανία και Μέση Ανατολή.

Τρόπος παραγωγής	Περιοχή	Μέση τιμή - Ιουνιος 2023 (\$/kg)
Ηλεκτρόλυση νερού	ΗΠΑ	2,98
	Ασία-Ωκεανία	6,46
	Ευρώπη	7,19
	Μέση Ανατολή	4,37
Αυτόθερμη αναμόρφωση με σύστημα δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα	ΗΠΑ	-
	Ασία-Ωκεανία	-
	Ευρώπη	2,57
	Μέση Ανατολή	-
Αναμόρφωση με ατμό με σύστημα δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα	ΗΠΑ	-
	Ασία-Ωκεανία	2,12
	Ευρώπη	3,27
	Μέση Ανατολή	2,10
Αναμόρφωση με ατμό	ΗΠΑ	0,96
	Ασία-Ωκεανία	2,40
	Ευρώπη	-
	Μέση Ανατολή	-

\*οι τιμές για την Ευρώπη περιλαμβάνουν το φόρο άνθρακα.

Πίνακας 2: Μέση τιμή κόστους παραγωγής υδρογόνου για τον Ιούνιο του 2023 (σε δολάρια ανά κιλό) σε σχέση με την περιοχή παραγωγής και τον τρόπο.

Πηγή: (S&P Global Platts)

Παρόλα αυτά, η ολοένα και αυξανόμενη δημιουργία και εξέλιξη υποδομών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας τα τελευταία χρόνια, έχει οδηγήσει στη μείωση του κόστους και κατ' επέκταση της τιμής της πράσινης αυτής ενέργειας, με αποτέλεσμα οι εκτιμήσεις για το κόστος παραγωγής πράσινου υδρογόνου για το 2050 να δείχνουν ότι αρκετές από τις χώρες παραγωγούς θα παράγουν πράσινο υδρογόνο σε τιμές μικρότερες από 1.5 \$/kg, που θα κάνουν το υδρογόνο οικονομικά ανταγωνιστική πηγή ενέργειας (Green Hydrogen Cost Development report, 2021) (Πίνακας 3).

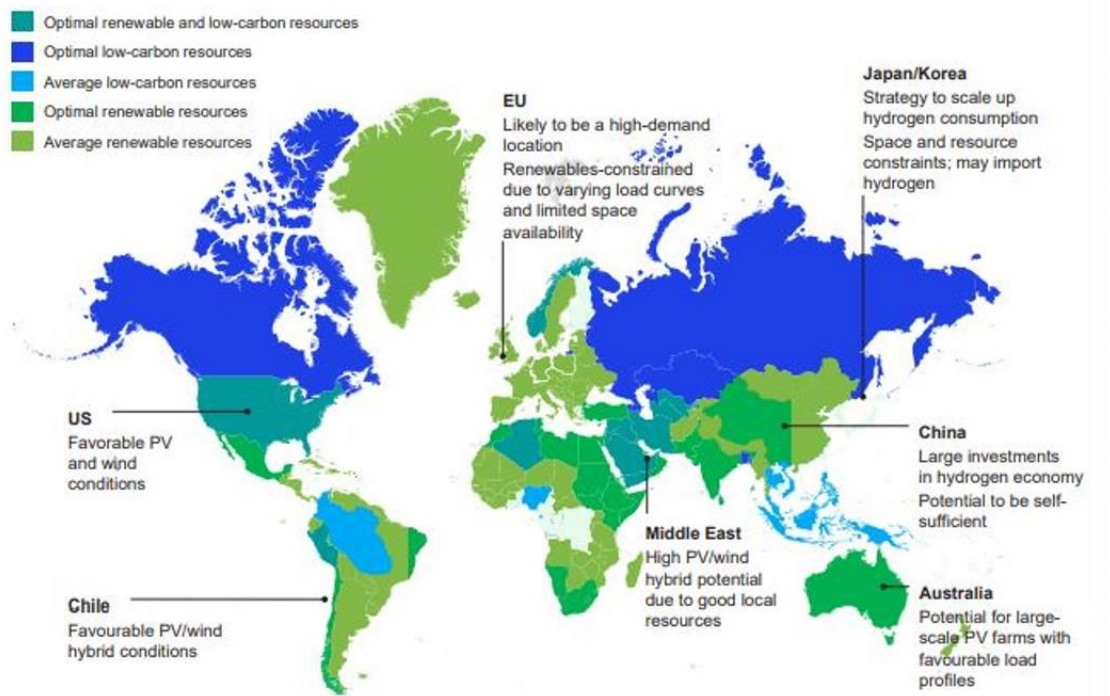


Χώρα	Μέση προβλεπόμενη τιμή 2030 (\$/kg)	Μέση προβλεπόμενη τιμή 2050 (\$/kg)
Αργεντινή	2,38	1,38
Αυστραλία	2,68	1,13
Βραζιλία	2,38	1,13
Καναδάς	2,68	1,38
Χιλή	2,13	1,13
Κίνα	2,13	1,13
Γαλλία	3,13	1,88
Γερμανία	3,13	2,13
Ινδία	2,68	1,13
Ιαπωνία	3,88	2,68
Μαρόκο	2,68	1,13
Πολωνία	3,38	2,38
Ρωσία	2,38	1,38
Σαουδική Αραβία	2,38	1,13
Νότια Αφρική	2,68	1,13
Νότια Κορέα	3,88	2,68
Ισπανία	2,68	1,13
Σουηδία	4,68	2,88
Ηνωμένο Βασίλειο	2,68	1,88
Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής	2,68	1,13

Πίνακας 3: Κόστος παραγωγής πράσινου υδρογόνου ανά χώρα για το 2030 και το 2050

Πηγή: (Green Hydrogen Cost Development report, 2021)

Οι χώρες που προβλέπεται να έχουν τις χαμηλότερες τιμές, όπως η Αυστραλία, είναι κυρίως χώρες με προγραμματισμένες και εν ενεργεία μεγάλες επενδύσεις στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, με μεγάλες διαθέσιμες εκτάσεις για εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων και ανεμογεννητριών, καθώς και με διαθεσιμότητα πόρων χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος στα εδάφη τους (Εικόνα 6).



Εικόνα 6: Δυναμικό παραγωγής υδρογόνου ανά περιοχή.

Βάσει χρωμάτων, οι περιοχές χωρίζονται σε: με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και πόρους με χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα (πετρέλ), με πόρους με χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα (μπλε), με μέτριους πόρους χαμηλού ανθρακικού αποτύπωματος (γαλάζιο), με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (πράσινο σκούρο) και με μέτρια προοπτική για ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (πράσινο ανοικτό).

Πηγή: (Path to hydrogen competitiveness, A cost perspective, 2020)

Το κόστος παραγωγής υδρογόνου που αναλύθηκε, αποτελεί έναν από τους καθοριστικούς παράγοντες της τιμής του υδρογόνου στην αντλία, δηλαδή στον τελικό καταναλωτή. Παρόλα αυτά, εξίσου σημαντικό ρόλο στην τελική τιμή διαδραματίζουν τα προστιθέμενα κόστη μεταφοράς, τροφοδοσίας και δευτερευόντως των δασμών, που έχουν ως αποτέλεσμα η λιανική τιμή πώλησης υδρογόνου ως καύσιμο για αυτοκίνητα, τον Ιούλιο του 2023 να φτάνει τα 12.4 \$/kg στη Γερμανία, τα 7.6 \$/kg στην Ιαπωνία, τα 8.5 \$/kg στην Κίνα, τα 15.2 \$/kg στο Ηνωμένο Βασίλειο και 27.5 \$/kg στην Καλιφόρνια των ΗΠΑ.

## 5.2 Τρόπος προμήθειας υδρογόνου

Για την προμήθεια του υδρογόνου σε τελική μορφή, είναι αναγκαία η μεταφορά του από τις μονάδες παραγωγής και η αποθήκευσή του στον τελικό προορισμό (π.χ. βιομηχανία, σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου για αυτοκίνητα κλπ.). Έτσι, για να γίνει το υδρογόνο οικονομικά ανταγωνιστικό, πέρα από την επίτευξη της μείωσης του κόστους παραγωγής του, είναι αναγκαία και η ανάπτυξη υποδομών ώστε να προκύψει ταυτόχρονη μείωση του κόστους της εφοδιαστικής αλυσίδας, δηλαδή της μεταφοράς και αποθήκευσης.

### 5.2.1 Τρόποι και σχετικό κόστος για τη μεταφορά υδρογόνου

Για την μεταφορά, μέσω οδικού δικτύου, μέσω θάλασσας ή μέσω αγωγών απαιτούνται διαφορετικές προδιαγραφές ως προς τη μορφή του μεταφερόμενου υδρογόνου με τους πιο κοινά αποδεκτούς να είναι: ως υγρό στην φυσική του μορφή (LH<sub>2</sub>), ως συμπιεσμένο αέριο (CGH<sub>2</sub>), ως αμμωνία ή ως πρόσμιξη με διαφορετικούς υγρούς οργανικούς φορείς υδρογόνου (Liquid Organic Hydrogen Carriers – LOHCs) (T. Notteboom, 2023). Η κάθε μια από αυτές τις μορφές καθορίζεται και από τον τύπο μεταφοράς, με τους αγωγούς να μπορούν να μεταφέρουν μόνο συμπιεσμένο αέριο, τις οδικές μεταφορές να υποστηρίζουν τόσο το συμπιεσμένο αέριο όσο και το υγρό υδρογόνο ενώ μόνο στις θαλάσσιες μεταφορές μπορούν να χρησιμοποιηθούν και οι τέσσερις μορφές (Πίνακας 3).

	LH <sub>2</sub>	CGH <sub>2</sub>	Αμμωνία	LOHCs
Χερσαία μεταφορά	•	•		
Θαλάσσια μεταφορά	•	•	•	•
Σύστημα Αγωγών		•		

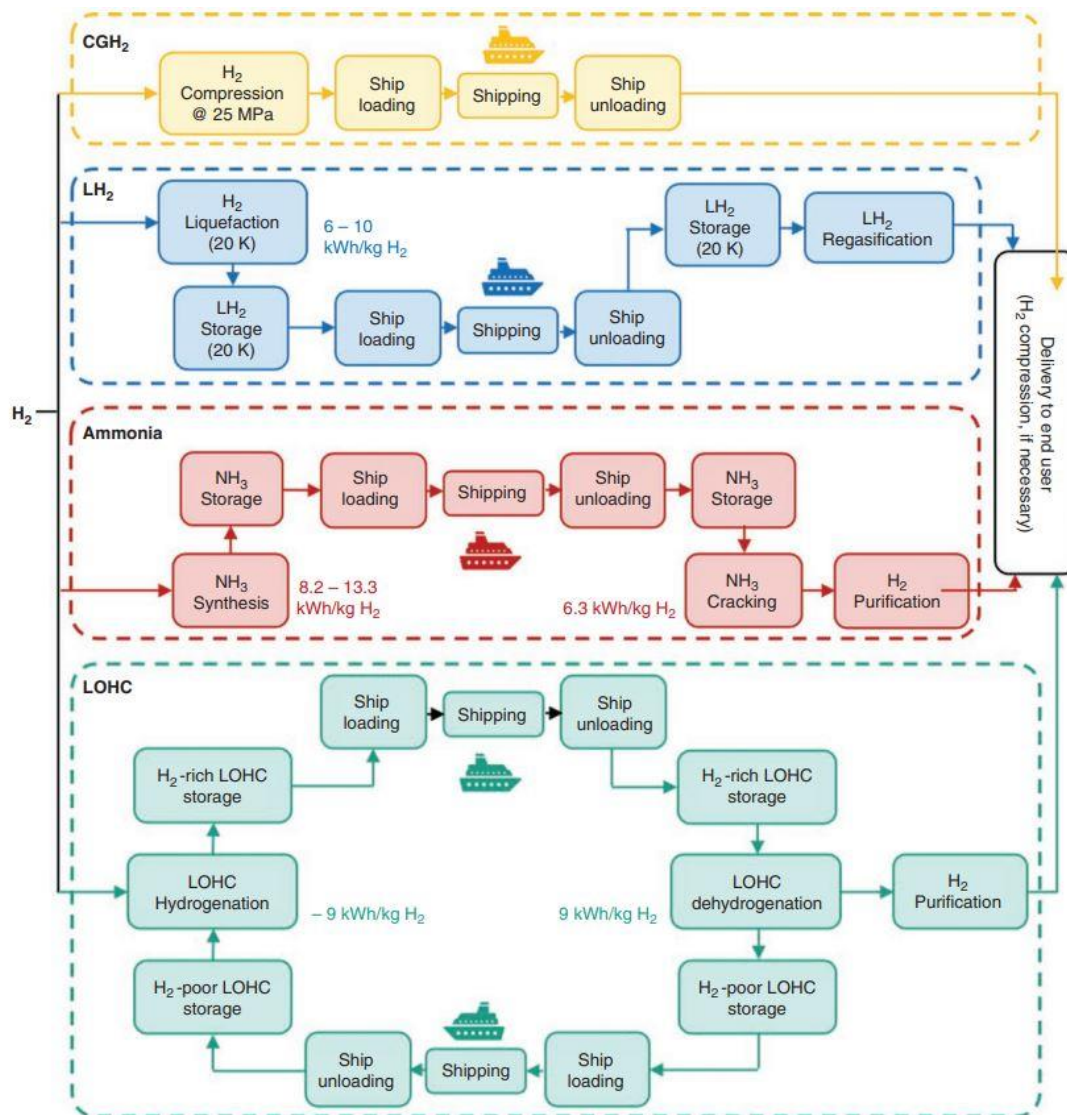
Πίνακας 3: Συμβατοί τρόποι μεταφοράς για κάθε μια από τις μορφές υδρογόνου.

Οι χερσαίες μεταφορές συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου είναι ιδανικές για την κάλυψη της ζήτησης σε μικρές αποστάσεις, συνήθως 100-200 χιλιόμετρα, όπως για παράδειγμα από την μονάδα παραγωγής ή αποθήκευσης υδρογόνου σε σταθμούς ανεφοδιασμού αυτοκινήτων, καθώς ανάλογα με την χωρητικότητα και την πίεση της δεξαμενής του, ένα φορτηγό μπορεί να μεταφέρει μόλις 560-900 kg υδρογόνου. Σε αντίθεση με το CGH<sub>2</sub>, το υγρό υδρογόνο είναι κατάλληλο για χερσαία μεταφορά σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 130 χιλιόμετρα (Reuß, 2021), ενώ η δεξαμενή του φορτηγού οχήματος μπορεί να μεταφέρει μέχρι περίπου 3850 kg υδρογόνου (Petitpas, 2018). Το κόστος χερσαίας μεταφοράς CGH<sub>2</sub> υπολογίζεται στο 1 \$/kg/100 km, ενώ για την χερσαία μεταφορά LH<sub>2</sub> το κόστος παρουσιάζει μεγάλη διαφορά και ανέρχεται στα 0.1 \$/kg/100 km.

Η μεταφορά αέριου συμπιεσμένου υδρογόνου με την χρήση αγωγών, είναι τεχνολογικά παρεμφερής με την μεταφορά του φυσικού αερίου και θεωρείται ως ο πιο οικονομικός τρόπος μεταφοράς μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου. Αυτό καθιστά τους αγωγούς ως τη βέλτιστη λύση για πυκνοκατοικημένες ή/και βιομηχανικές περιοχές. Παρόλα αυτά, η κατασκευή ενός νέου δικτύου αγωγών για την μεταφορά υδρογόνου απαιτεί μεγάλα κεφάλαια και είναι χρονοβόρα. Για να λυθεί αυτό το πρόβλημα, έχει προταθεί η ανακατασκευή του υπάρχοντος δικτύου αγωγών που χρησιμοποιείται για τη μεταφορά του φυσικού αερίου με σημαντικά χαμηλότερο κόστος, ώστε να πληροί τις προδιαγραφές για την μεταφορά υδρογόνου (Wlodek, 2019). Για ένα δίκτυο μεταφοράς 1000 χιλιομέτρων, το κόστος μεταφοράς σε δολάρια ανά κιλό υδρογόνου κυμαίνεται από 0.12 – 0.21.

Τέλος, η θαλάσσια μεταφορά με κατάλληλα πλοία θεωρείται ως η ιδανική για τη μεταφορά υδρογόνου μεταξύ χωρών που βρίσκονται σε μεγάλες αποστάσεις (Brändle, 2021). Αυτό συμβαίνει καθώς σε αντίθεση με τους διεθνείς αγωγούς μεταφοράς υδρογόνου που είναι εξαρτημένοι από τις γεωπολιτικές συνθήκες της εκάστοτε περιοχής για την κατασκευή/ανακατασκευή και λειτουργία τους, η ναυσιπλοΐα είναι πιο ανεξάρτητη και ευέλικτη. Παρόλα αυτά, ανάλογα με την μορφή του υδρογόνου, απαιτούνται κάποιες διεργασίες τόσο για την μεταφορά με πλοία όσο και στον τελικό προορισμό ώστε να μπορεί να γίνει εκφόρτωση και αποθήκευση του υδρογόνου (Εικόνα 7). Η μεταφορά CGH<sub>2</sub> μέσω θαλάσσης υπολογίζεται ως η πιο οικονομική τεχνολογία προς το παρόν (υπολογίζεται να κυμαίνεται από 1,40 – 1,80 \$/kg), καθώς το κόστος συμπίεσης του υδρογόνου είναι το χαμηλότερο σε σχέση με τις άλλες

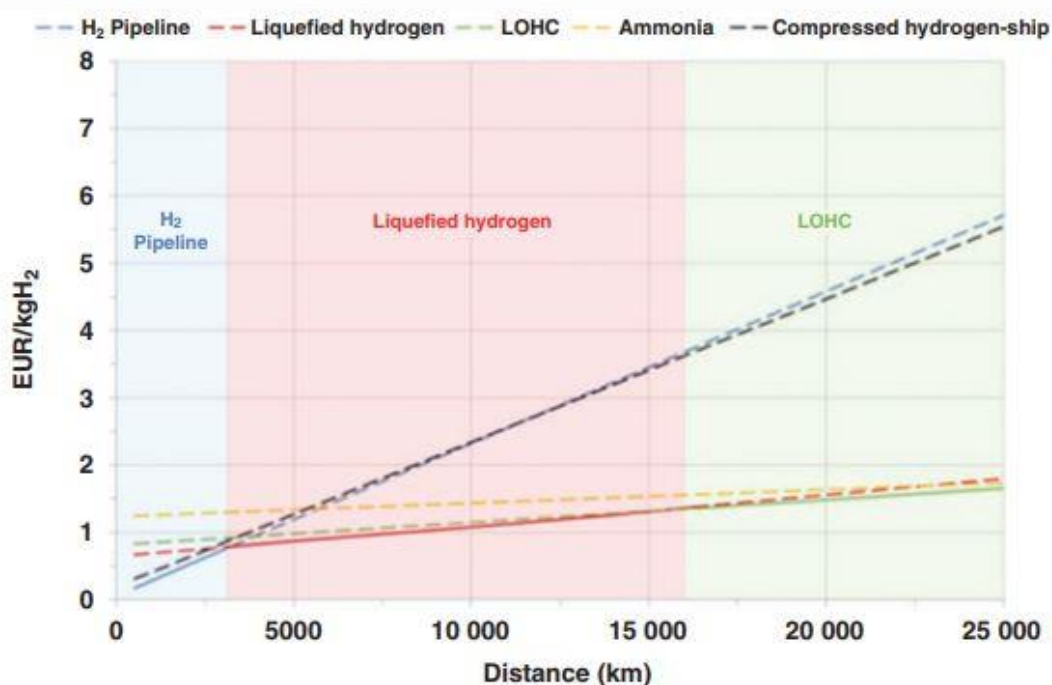
μεθόδους μετατροπής (Pure Hydrogen provides details of the order of Seven, 2021). Τα πρώτα πλοία που θα υποστηρίζουν την μεταφορά συμπιεσμένου υδρογόνου υπολογίζονται να είναι έτοιμα για εμπορική χρήση το 2025. Η μεταφορά υγρού υδρογόνου τα τελευταία χρόνια γίνεται ολοένα και πιο δημοφιλής προσέγγιση, κυρίως λόγω της υπάρχουσας υποδομής και τεχνογνωσίας στην κρυογονική αποθήκευση που χρησιμοποιείται στην μεταφορά του φυσικού αερίου, μολονότι σε υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που απαιτεί το υδρογόνο (Yanfei Li, 2021). Για να είναι οικονομικά συμφέρουσα η μεταφορά υγρού υδρογόνου μέσω θαλάσσης, η βέλτιστη απόσταση μεταφοράς είναι μεγαλύτερη από τα 2500 χιλιόμετρα ενώ δεν πρέπει να ξεπερνά τα 16000 χιλιόμετρα (υπολογίζεται να κυμαίνεται από 2,00 – 3,70 \$/kg). Φεύγοντας από τις καθарές μορφές υδρογόνου (αερίου ή υγρού), η μεταφορά του υδρογόνου ως πρόσμιξη, υπό τη μορφή αμμωνίας παρουσιάζει κάποια πλεονεκτήματα όπως το ότι δεν χρειάζεται ειδικές κρυογονικές συνθήκες ή υψηλές πιέσεις στις δεξαμενές και ότι υπάρχουν παγκοσμίως ήδη σε λειτουργία 38 τερματικά εξαγωγής και 88 εισαγωγής αμμωνίας, τα οποία εξυπηρετούνται από στόλο 170 πλοίων που μεταφέρουν αμμωνία για χρήση στην παρασκευή λιπασμάτων. Όμως, τόσο η διαδικασία της σύνθεσης αμμωνίας από υδρογόνο στο τερματικό εξαγωγής όσο και η διάσπαση της αμμωνίας στο τερματικό εισαγωγής, είναι διαδικασίες με μεγάλες ενεργειακές απαιτήσεις που καθιστούν αυτόν τον τρόπο μεταφοράς μια μη βιώσιμη οικονομικά επιλογή (υπολογίζεται να κυμαίνεται από 1,90 – 2,20 \$/kg) (Pure Hydrogen provides details of the order of Seven, 2021). Τέλος, η πρόσμιξη του υδρογόνου με LOHCs, που παρουσιάζει τα ίδια πλεονεκτήματα με την αμμωνία, δηλαδή δεν χρειάζεται κρυογονικές ή υψηλής πίεσης συνθήκες και μπορεί να γίνει χρήση των υπάρχουσών υποδομών για μεταφορά και αποθήκευση. Παρόλα αυτά τα υπολείμματα των LOHCs που παραμένουν στις δεξαμενές των πλοίων και επαναχρησιμοποιούνται, θα πρέπει να επιστρέφουν στον τόπο αφετηρίας γεγονός που επηρεάζει την οικονομική βιωσιμότητα αλλά το καθιστά ιδανική λύση για πολύ μεγάλες αποστάσεις (από 16000 χιλιόμετρα και πάνω) (υπολογίζεται να κυμαίνεται από 2,00 – 2,50 \$/kg) (ORTIZ CEBOLLA, 2022).



Εικόνα 7: Σχηματική απεικόνιση της αλυσίδας εφοδιασμού για μεταφορά συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου (CGH<sub>2</sub>), υγρού υδρογόνου (LH<sub>2</sub>), αμμωνίας (Ammonia), και ως μίξη με υγρούς οργανικούς φορείς υδρογόνου (LOHC)

Πηγή: (ORTIZ CEBOLLA, 2022)

Συγκριτικά, αν εξαιρέσουμε την χερσαία μεταφορά μέσω του οδικού δικτύου που είναι κατάλληλη να εξυπηρετήσει αποκλειστικά μικρές ποσότητες και για μικρές αποστάσεις, οι οικονομικά συμφέροντες τρόποι μεταφοράς είναι άμεσα εξαρτώμενοι από την απόσταση που πρέπει να μεταφερθεί το υδρογόνο. Έτσι σε ένα εξιδανικευμένο σύστημα μεταφοράς υδρογόνου, το βέλτιστο κόστος για αποστάσεις μικρότερες από 2.500 χιλιόμετρα υπάρχει όταν η μεταφορά γίνεται μέσω συστήματος αγωγών, για αποστάσεις από 2.500 μέχρι 16.000 χιλιόμετρα με θαλάσσιες μεταφορές υγρού υδρογόνου, ενώ για αποστάσεις άνω των 16.000 και μέχρι τα 25.000 χιλιόμετρα με θαλάσσια μεταφορά υδρογόνου ως πρόσμιξη με LOHCs.



Εικόνα 8: Εκτιμώμενο κόστος μεταφοράς για φορτίο ενός μεγατόνου H<sub>2</sub> το 2050, στο σενάριο με χαμηλό ενεργειακό κόστος.

Πηγή: (ORTIZ CEBOLLA, 2022)



## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΣΕΝΑΡΙΑ ΔΙΕΙΣΔΥΣΗΣ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΙΣ ΟΔΙΚΕΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ

### 6.1 Σύγκριση συμβατικών – ηλεκτρικών – υδρογονοκίνητων οχημάτων

Σε μια προσπάθεια μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στον τομέα της αυτοκίνησης ο στόχος που έχει τεθεί τόσο από την Ευρωπαϊκή Ένωση όσο και από πολλά από τα ανεπτυγμένα κράτη, είναι η σταδιακή κατάργηση των μηχανών εσωτερικής καύσης, που χρησιμοποιούν τα συμβατικά αυτοκίνητα, με ηλεκτροκίνητα και υδρογονοκίνητα οχήματα.

Τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα έκαναν την εμφάνισή τους λίγο μετά τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα όπου εφευρέτες από την Ουγγαρία, την Ολλανδία και τις ΗΠΑ κατασκεύασαν τα πρώτα, μικρής κλίμακας, ηλεκτρικά αυτοκίνητα εκμεταλλευόμενοι τις τότε καινοτόμες τεχνολογίες της μπαταρίας και των ηλεκτροκινητήρων που βρίσκονταν σε άνθιση (Εικόνα 9).

Το 1832 ο Robert Anderson κατασκεύασε το πρώτο ηλεκτρικό όχημα. Όμως, τα πρώτα πρακτικά ηλεκτρικά οχήματα σχεδιάστηκαν περισσότερο από 30 χρόνια αργότερα από Άγγλους και Γάλλους εφευρέτες. Χαρακτηριστικό παράδειγμα για την δημοφιλία των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα είναι το ότι στη Νέα Υόρκη υπήρχε στόλος από 60 ηλεκτρικά ταξί, ενώ σύμφωνα επίσης με στοιχεία από την αμερικανική κυβέρνηση το 1900, ένα στα τρία οχήματα σε κυκλοφορία ήταν ηλεκτρικό. Η δημοφιλία τους σε σχέση με τα οχήματα της εποχής (ατμοκίνητα και πετρελαιοκίνητα) ήταν κυρίως βασισμένη στην αθόρυβη λειτουργία τους και στο ότι δεν εξέπεμπαν ρύπους με δυσάρεστη οσμή (Energy, 2015).

Το 1901, ο Ferdinand Porsche, ιδρυτής της ομώνυμης αυτοκινητοβιομηχανίας, κατασκεύασε το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο που χρησιμοποιούσε τις δύο διαθέσιμες τεχνολογίες της εποχής, την μπαταρία και την μηχανή εσωτερικής καύσης. Παρόλα αυτά, το 1908 ο Henry Ford εισάγοντας σε κατασκευαστικό επίπεδο την καινοτομία της μαζικής παραγωγής, βγάζει στην αγορά το Model T, ένα βενζινοκίνητο όχημα που μπορεί να κατασκευαστεί και να διατεθεί γρηγορότερα και κυρίως σε πολύ χαμηλότερη τιμή. Ενδεικτικά το 1912 το βενζινοκίνητο αυτοκίνητο κόστιζε στις ΗΠΑ 650 δολάρια

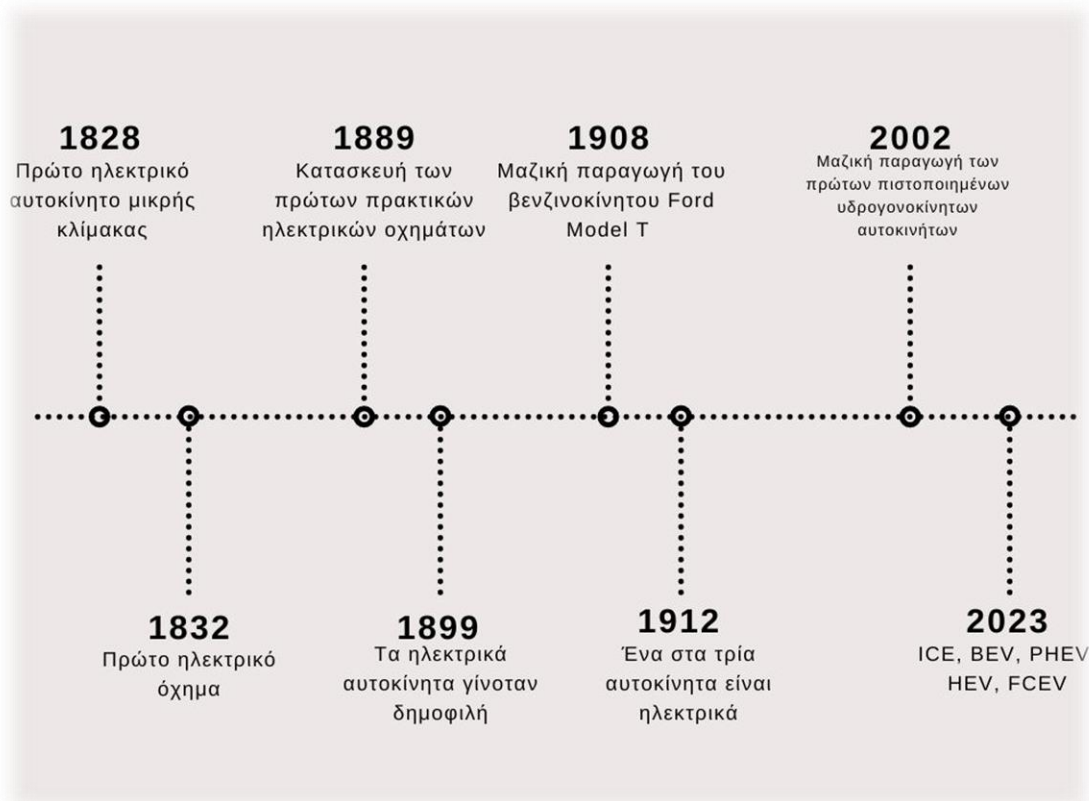


ενώ το ηλεκτρικό 1750. Με την τεχνολογία των μηχανών εσωτερικής καύσης να βελτιώνεται συνεχώς, το πετρέλαιο και τα ορυκτά καύσιμα να γίνονται ευρέως διαθέσιμα καθώς και τα οδικά δίκτυα να μεγαλώνουν, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, στα οποία δεν υπήρχε ανάλογη τεχνολογική εξέλιξη, άρχισαν να εκλείπουν από την αγορά και να αντικαθίστανται ολοκληρωτικά από τα οχήματα που ονομάζουμε σήμερα συμβατικά.

Σε επίπεδο καταναλωτή τα αυτοκίνητα ηλεκτρικής τεχνολογίας ξεκίνησαν να βρίσκουν ξανά απήχηση το 1997 όπου η ιαπωνική αυτοκινητοβιομηχανία Toyota παρουσίασε το μοντέλο Prius, το πρώτο υβριδικό αυτοκίνητο μαζικής παραγωγής το οποίο σημείωσε τεράστια εμπορική επιτυχία καθώς οι αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες του καταναλωτή μαζί με την αύξηση του κόστους των ορυκτών καυσίμων έκανα το Prius το υβριδικό μοντέλο με τις μεγαλύτερες πωλήσεις σε παγκόσμιο επίπεδο. Επιπρόσθετα, το 2006 μια πρωτοεμφανιζόμενη εταιρεία τότε, η Tesla Motors, ανακοίνωσε την παραγωγή ηλεκτρικών αυτοκινήτων με αγωνιστικά χαρακτηριστικά με την μεγαλύτερη αυτονομία που είχε ποτέ επιτευχθεί με μια μόνο φόρτιση, αυτή των 320 χιλιομέτρων.

Σήμερα, κατασκευάζονται ηλεκτρικά και υβριδικά αυτοκίνητα από όλες σχεδόν τις μεγάλες αυτοκινητοβιομηχανίες με αυξανόμενη αυτονομία, ενώ ταυτόχρονα επεκτείνονται τα δίκτυα και οι υποδομές φόρτισης σε παγκόσμιο επίπεδο.

Το πρώτο υδρογονοκίνητο όχημα παρουσιάστηκε το 1966 από την General Motors, παρόλα αυτά σε εμπορικό επίπεδο τα πρώτα πιστοποιημένα για οδική χρήση υδρογονοκίνητα επιβατικά οχήματα εμφανίστηκαν το 2002 από τις Honda και Toyota.



Εικόνα 9: Χρονοδιάγραμμα της τεχνολογίας των οχημάτων από τον 19<sup>ο</sup> αιώνα έως σήμερα.

Σήμερα, τα διαθέσιμα επιβατικά οχήματα χωρίζονται σε δύο κατηγορίες.

Η πρώτη και πιο διαδεδομένη είναι τα αποκαλούμενα συμβατικά οχήματα που φέρουν κινητήρες **εσωτερικής καύσης (ICE)** και καταναλώνουν ορυκτά καύσιμα για την λειτουργία τους με τις γνωστές περιβαλλοντικές συνέπειες. Με γνώμονα τους εκπεμπόμενους περιβαλλοντικούς ρύπους, για τη μείωση των ρύπων και των αερίων του θερμοκηπίου από τα συμβατικά οχήματα, η Ευρωπαϊκή Ένωση θέσπισε το 1992 το πρότυπο εκπομπών “Euro” βάσει του οποίου επιβάλλεται ένας κανονισμός ανώτερων ορίων εκπομπών στους κατασκευαστές αυτοκινήτων με αποτέλεσμα την περαιτέρω εξέλιξη κινητήρων εσωτερικής καύσης για την παραγωγή λιγότερων εκπομπών. Το πρότυπο Euro 1 ξεκίνησε να επιβάλλεται τον Ιούλιο του 1992 ενώ σήμερα βρισκόμαστε στο Euro 6 (Πίνακας 4).

Πρότυπο Euro	Ημερομηνία	Πετρελαιοκίνητα οχήματα			Βενζινοκίνητα οχήματα		
		CO	NO <sub>x</sub>	PM	CO	NO <sub>x</sub>	PM
Euro 1	Ιούλιος 1992	2,72	-	0,14	2,72	-	-
Euro 2	Ιανουάριος 1996	1	-	0,08	2,2	-	-
Euro 3	Ιανουάριος 2000	0,64	0,5	0,05	2,3	0,15	-
Euro 4	Ιανουάριος 2005	0,5	0,25	0,025	1	0,08	-
Euro 5	Σεπτέμβριος 2009	0,5	0,18	0,005	1	0,06	0,005
Euro 6	Σεπτέμβριος 2014	0,5	0,08	0,005	1	0,06	0,005
Euro 7*	Ιούλιος 2025	0,5	0,06	0,005	0,5	0,06	0,005

\*Το Euro 7 έχει προταθεί για εφαρμογή από τον Ιούλιο του 2025, έχει όμως καταψηφιστεί ως μη ρεαλιστικό από 8 χώρες της Ε.Ε.

Πίνακας 4: Πρότυπα εκπομπών Euro για τα βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα επιβατικά οχήματα και τα όρια εκπομπών για μονοξείδιο του άνθρακα (CO), οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και στερεά σωματίδια (PM).

Η δεύτερη κατηγορία, τα ηλεκτροκίνητα οχήματα, περιλαμβάνει όλα τα οχήματα που κινούνται με ηλεκτροπρόωση και κατηγοριοποιούνται περαιτέρω ανάλογα με την τεχνολογία ή των συνδυασμό των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν.

Συγκεκριμένα, υπάρχουν 4 τύποι ηλεκτρικών οχημάτων (Electric Vehicle – **EV**): τα ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicle – **BEV**), τα υδρογονοκίνητα ή αλλιώς οχήματα με ηλεκτροχημικές κυψέλες καυσίμου (Fuel-cell Electric Vehicle – **FCEV**), τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα που φορτίζονται με ρευματολήπτη και μηχανή εσωτερικής καύσης (Plug-in Hybrid Electric Vehicle – **PHEV**) και τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης (Hybrid Electric Vehicle – **HEV**). (Selmi, 2022)

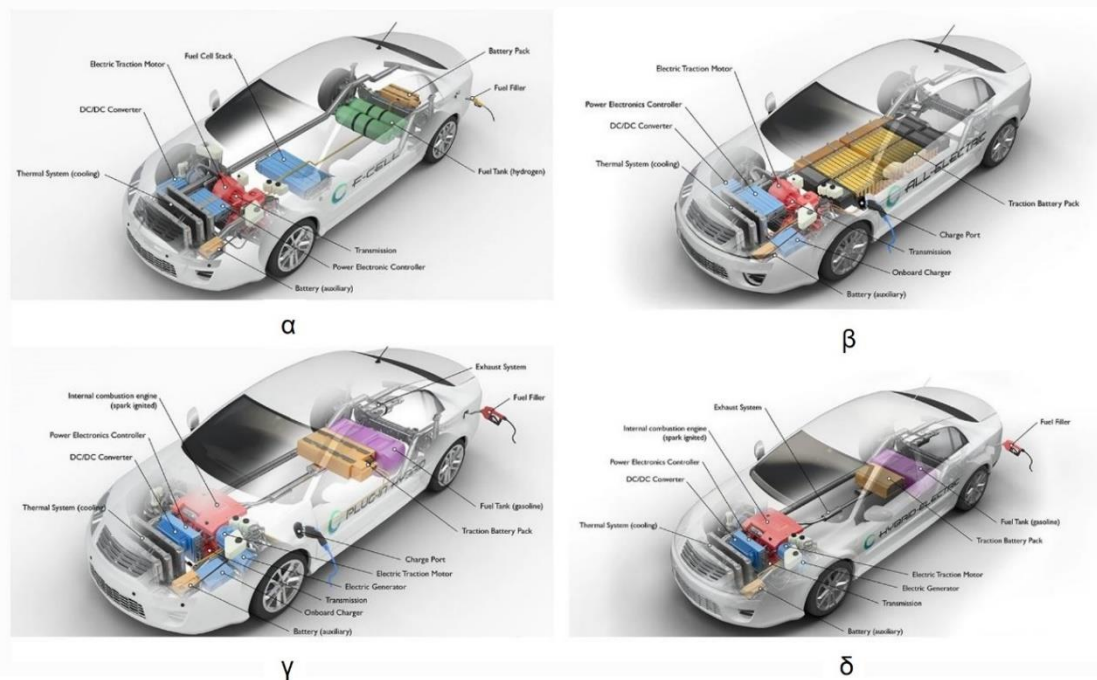
Τα **FCEV** χρησιμοποιούν ηλεκτρικό κινητήρα ο οποίος τροφοδοτείται από ένα συνδυασμό ηλεκτροχημικής κυψέλης καυσίμων και μπαταρίας (Εικόνα 10α). Στα

συγκεκριμένα οχήματα η παραγωγή ενέργειας γίνεται από την ηλεκτροχημική κυψέλη με τη χρήση υδρογόνου και έτσι ο κινητήρας δεν τροφοδοτείται από τη μπαταρία. Με αυτόν τον τρόπο, η διαθέσιμη ενέργεια και ως εκ τούτου η αυτονομία ενός FCEV εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος της δεξαμενής υδρογόνου που φέρει το όχημα και όχι από το μέγεθος της μπαταρίας του.

Τα **BEV** από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιούν μπαταρίες μεγάλης χωρητικότητας που φορτίζουν μέσω ρευματολήπτη. Σε αυτή την κατηγορία οχημάτων η ενέργεια μεταφέρεται από τις μπαταρίες στον κινητήρα και η αυτονομία του οχήματος εξαρτάται αποκλειστικά από το μέγεθος των μπαταριών του (Εικόνα 10β).

Τα **PHEV** χρησιμοποιούν ηλεκτρικό κινητήρα που τροφοδοτείται από μπαταρία και φορτίζει μέσω ρευματολήπτη ενώ ταυτόχρονα έχει κινητήρα εσωτερικής καύσης που τροφοδοτείται από ορυκτά καύσιμα (βενζινοκινητήρας, πετρελαιοκινητήρας κ.ά) (Εικόνα 10γ). Η ηλεκτρική αυτονομία των PHEV κυμαίνεται από 40-80 χιλιόμετρα αναλόγως το μοντέλο του οχήματος και στη συνέχεια κινείται με την χρήση του κινητήρα εσωτερικής καύσης.

Τέλος, τα **HEV**, των οποίων η μπαταρία δεν φορτίζει μέσω ρευματολήπτη αλλά χρησιμοποιεί την ενέργεια που παράγεται από τα φρένα για την φόρτισή τους. Φυσικά τα HEV φέρουν κινητήρα εσωτερικής καύσης (Εικόνα 10δ). (Selmi, 2022)

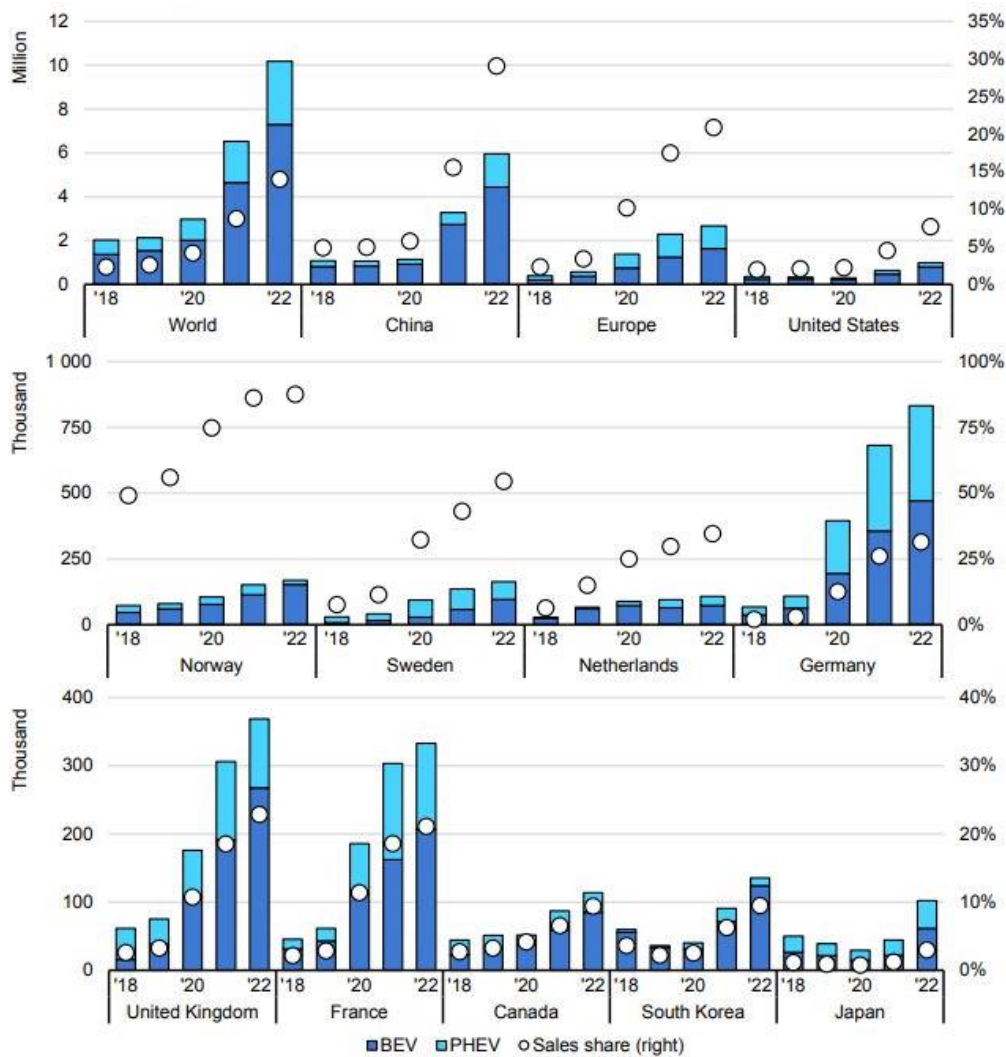


Εικόνα 10: Οι 4 κατηγορίες ηλεκτρικών οχημάτων: α) υδρογονοκίνητο όχημα (ηλεκτροχημικές κυψέλες καυσίμου), β) ηλεκτρικό μπαταρίας, γ) ηλεκτρικό υβριδικό με φόρτιση από ρευματολήπτη και δ) υβριδικό ηλεκτρικό όχημα.

Πηγή: (Selmi, 2022)

Τα τελευταία χρόνια, η αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων παρουσιάζει εκθετική αύξηση με το 2022 να γίνεται η πρώτη χρονιά κατά την οποία οι πωλήσεις ηλεκτρικών αυτοκινήτων, συγκεκριμένα οι υποκατηγορίες BEV και PHEV, ξεπέρασαν τα 10 εκατομμύρια, ενώ από το 2016 στο 2022 οι πωλήσεις ηλεκτρικών οχημάτων παρουσίασαν αύξηση από το 4% στο 14% (Εικόνα 11), ενώ το σύνολο των ηλεκτρικών αυτοκινήτων που κυκλοφορούν στο δρόμο υπολογίζεται ότι αγγίζει τα 26 εκατομμύρια (Global Hydrogen review , 2022) με περίπου το 73% να αφορά ηλεκτρικά οχήματα τύπου BEV.

Παρόμοια μεγάλη αυξητική τάση της τάξης του 15% από το 2021 στο 2022 παρουσιάζουν και τα FCEV. Παρόλα αυτά ο απόλυτος αριθμός υδρογονοκίνητων οχημάτων σε κυκλοφορία είναι αξιοσημείωτα μικρός με μόλις 59.000 τέτοιου τύπου οχήματα στους δρόμους το 2022 (Global Hydrogen review , 2022). Συγκριτικά, τα συμβατικά αυτοκίνητα που κυκλοφορούν στο δρόμο υπολογίζεται για το 2022 ότι φτάνουν τα 1.45 δισεκατομμύρια (Company, 2022).



Εικόνα 11: Εγγεγραμμένα ηλεκτρικά αυτοκίνητα (στήλες) και το μερίδιο αναφοράς τους (κύκλος) για επιλεγμένες περιοχές και χώρες για BEV (μπλε) και PHEV (γαλάζιο).

Εικόνα 16β: Πρόβλεψη του ποσοστού του (Global Hydrogen review , 2022)

Το αρχικό κόστος αγοράς ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου είναι σημαντικά μεγαλύτερο από το κόστος αγοράς ενός, αντίστοιχης κατηγορίας, συμβατικού αυτοκινήτου. Με την πάροδο του χρόνου και την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας των EV, όπως για παράδειγμα την ανάπτυξη των μπαταριών με μεγαλύτερη χωρητικότητα, το κόστος αγοράς παρουσιάζει φθίνουσα πορεία (M. Weiss, 2019).

Για να προωθήσουν την αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων ώστε να μειωθούν οι εθνικές εκπομπές, πολλές χώρες προσφέρουν φορολογικά και χρηματοδοτικά κίνητρα για την αγορά ηλεκτροκίνητου αυτοκινήτου ώστε να εξισορροπήσουν τη διαφορά της τιμής αγοράς τους με τα συμβατικά αυτοκίνητα. Σε 14 από τις πρωτοπόρες χώρες στην αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων, τα οικονομικά κίνητρα εφαρμόζονται είτε κατά

την αγορά είτε μετά από αυτή, με τη μορφή φοροαπαλλαγής, απευθείας χρηματοδότησης, μεταγενέστερων εκπτώσεων από το κράτος καθώς και μέσω φόρων που εφαρμόζονται για τα συμβατικά αυτοκίνητα λόγω εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Πίνακας 4).

Χώρα	BEV (\$)	PHEV (\$)	Οικονομικό κίνητρο
Γαλλία	7000	1200	Φόρος εκπομπών
Γερμανία	10600	7950	50% έκπτωση κατά την αγορά - 50% εκπτώσεις μετά την αγορά
Ηνωμένο Βασίλειο	2040	0	Έκπτωση κατά την αγορά
ΗΠΑ	7500	7500	Έκπτωση στο φόρο εισοδήματος
Ιαπωνία	7710	3850	Έκπτωση κατά την αγορά
Ισπανία	6500	3200	Έκπτωση κατά την αγορά
Ιταλία	4700	1800	Έκπτωση κατά την αγορά
Καναδάς	4000	4000	Έκπτωση κατά την αγορά
Κίνα	2400	1000	Έκπτωση κατά την αγορά
Νορβηγία	10700	9200	Φοροαπαλλαγή ΦΠΑ και φόρου αφοράς
Νότια Κορέα	7200	7200	Έκπτωση κατά την αγορά
Ολλανδία	4700	0	Έκπτωση κατά την αγορά και φοροαπαλλαγή καταχώρησης
Πορτογαλία	2650	1325	Έκπτωση κατά την αγορά
Σουηδία	6900	2400	Φόρος εκπομπών

Πίνακας 4: Χρηματοδοτικά και φοροαπαλλακτικά οικονομικά κίνητρα για την αγορά PHEV και BEV το 2021, για 14 από τις χώρες με το μεγαλύτερο μερίδιο στην αγορά ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Πηγή: (Eben Kohn, 2022)

Ωστόσο, για να εκτιμηθεί η διαφορά κόστους μεταξύ συμβατικών και ηλεκτρικών οχημάτων, πέρα από την τιμή αγοράς, πρέπει να υπολογιστούν και άλλοι παράμετροι όπως η χρήση του αυτοκινήτου, ο τρόπος φόρτισής του, που επηρεάζεται από την τιμή της ενέργειας στην εκάστοτε χώρα, τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και το αντίστοιχο αντισταθμιστικό κόστος καθώς και το κόστος συντήρησης του οχήματος (Han Hao, 2017).

Με βάση αυτές τις παραμέτρους οι (Eleonora Ruffini, 2018), υπολόγισαν ότι το κόστος τόσο των υδρογονοκίνητων όσο και των ηλεκτρικών οχημάτων υπερέβαινε το κόστος ενός συμβατικού οχήματος, παρόλα αυτά υπολογίζεται ότι αυτό θα εξισωθεί μέχρι το 2030 (Zhao, 2015). Νεότερες μελέτες έδειξαν ότι για κάποιες κατηγορίες επιβατικών οχημάτων ήδη τα ηλεκτρικά είναι οικονομικότερα από τα συμβατικά αν ληφθούν υπόψιν τα έξοδα ασφάλισης, συντήρησης και επισκευής, το κόστος καυσίμων/ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και την τιμή αγοράς σε σχέση με την τιμή μεταπώλησης (Εικόνα 12) (Rosenberg, 2022). Επιπλέον, φαίνεται ότι το μεγαλύτερο κόστος αγοράς ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου εξισώνεται από το μειωμένο κόστος καυσίμου και συντήρησης σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, ενώ προβλέπεται μείωση του αρχικού κόστους κατασκευής όσο μεγαλώνει η κλίμακα παραγωγής και βελτιώνεται η τεχνολογία των μπαταριών (IEA, 2022). Το κόστος συντήρησης και επισκευών είναι σημαντικά μειωμένο στα ηλεκτρικά αυτοκίνητα, καθώς οι ηλεκτροκινητήρες αποτελούνται από λιγότερα μέρη (Εικόνα 11), έχουν απλούστερες αρχές λειτουργίας και συνολικά λιγότερες φθορές.

Συνεπώς, με καθαρά οικονομικούς όρους, τα ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα με μπαταρία έχουν αρχίσει να ανταγωνίζονται τα συμβατικά ενώ προσφέρουν πλεονεκτήματα όπως τις μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, το χαμηλό κόστος συντήρησης, την αξιοπιστία εξαιτίας μειωμένων φθορών στον κινητήρα, την οικονομία στο κόστος καυσίμου/ενέργειας, και την άνεση που προσφέρει η αθόρυβη και χωρίς κραδασμούς λειτουργία ενός ηλεκτρικού κινητήρα (Sanguesa, 2021). Παρόλα αυτά και ενώ ο αριθμός των ηλεκτρικών αυτοκινήτων με μπαταρία στους δρόμους αυξάνεται εκθετικά, υπάρχουν αρκετά μειονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά οχήματα, τα οποία λαμβάνουν υπόψιν τους οι καταναλωτές στην τελική απόφαση για την αγορά αυτοκινήτου.





Εικόνα 12: Συνολικό κόστος ηλεκτρικών και συμβατικών οχημάτων για 8 χρόνια χρήσης με 25.000 χιλιόμετρα ανά έτος για α) όχημα τύπου sedan χαμηλού κόστους β) όχημα τύπου sedan μεσαίας κατηγορίας, γ) όχημα τύπου SUV και δ) όχημα τύπου pick-up. Τα επιμέρους κόστη διακρίνονται σε: φόρους (πορτοκαλί), κόστος ασφάλισης (ροζ), κόστος συντήρησης και επισκευών (μωβ), κόστος καυσίμου (βενζίνη και ηλεκτρική ενέργεια) (κόκκινο), τιμή αγοράς μείον τιμή μεταπώλησης μετά το πέρας της δετίας (μπλε). Οι τιμές είναι σε δολάρια (\$).

Τα μειονεκτήματα αυτά μπορούν να συνοψιστούν σε 4 κατηγορίες (Εικόνα 13) (Krishna, 2021).

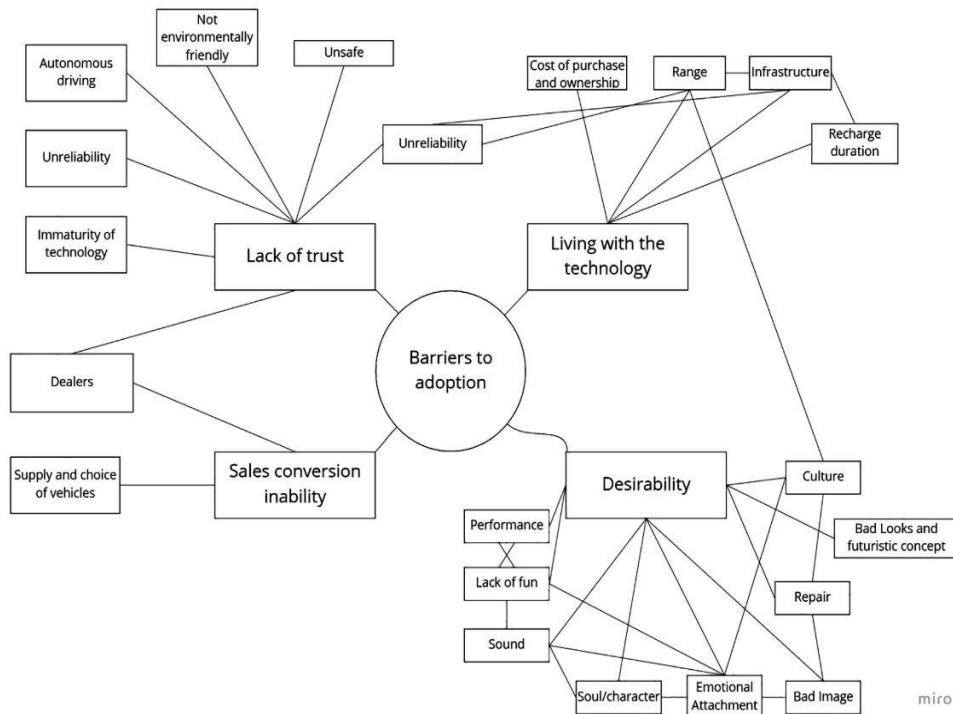
Η πρώτη κατηγορία χαρακτηρίζεται ως η αδυναμία μετατροπής πωλήσεων και προκύπτει από διάφορες παραμέτρους όπως για παράδειγμα το χρόνο αναμονής μεταξύ της παραγγελίας ενός EV και της παράδοσής του, την μικρή προσφορά στην αγορά

μεταχειρισμένων EV, την έλλειψη κατάρτισης για τα EV των πωλητών αυτοκινήτων και την μικρή ποικιλία σε μοντέλα μέχρι πρόσφατα.

Η δεύτερη κατηγορία αφορά την έλλειψη εμπιστοσύνης στην τεχνολογία των EV και περιλαμβάνει τον φόβο για έκρηξη της μπαταρίας και την απώλεια της αίσθησης της ταχύτητας λόγω της αθόρυβης λειτουργίας του κινητήρα.

Η τρίτη κατηγορία αφορά στην θελκτικότητα του προϊόντος ως προς τον καταναλωτή σε σχέση με την υπάρχουσα κουλτούρα, την οικειότητα με την τεχνολογία των ICE, την έλλειψη χαρακτηριστικών όπως το μηχανικό κιβώτιο ταχυτήτων που για πολλούς οδηγούς κάνει τη διαδικασία της οδήγησης διασκεδαστική, καθώς και τον φουτουριστικό σχεδιασμό των περισσότερων EV.

Η τέταρτη κατηγορία αφορά το πρακτικό κομμάτι της κατοχής και χρήσης ενός EV, με έναν από τους βασικούς αποτρεπτικούς παράγοντες να είναι η τιμή πώλησης, την έλλειψη υποδομών για την φόρτιση τους τόσο σε οικιακό επίπεδο όσο και σε επίπεδο οδικού δικτύου, την αυτονομία χιλιομέτρων με μια φόρτιση καθώς και τον χρόνο φόρτισης και το κόστος των ταχυφορτιστών.



Εικόνα 13: Οι 4 βασικοί πυλώνες που αποτελούν εμπόδιο για τον καταναλωτή στην αγορά ηλεκτρικού αυτοκινήτου.

Πηγή: (Krishna, 2021)

Συνολικά, η απόφαση για την αγορά ενός EV έναντι ενός ICE, έχει να κάνουν τόσο με την τοποθεσία του εκάστοτε καταναλωτή, τις περιβαλλοντικές του συνήθειες, την προσβασιμότητα σε υποδομές φόρτισης, τις χιλιομετρικές του ανάγκες καθώς και τα γενικά χαρακτηριστικά των ίδιων των οχημάτων (Πίνακας 5).

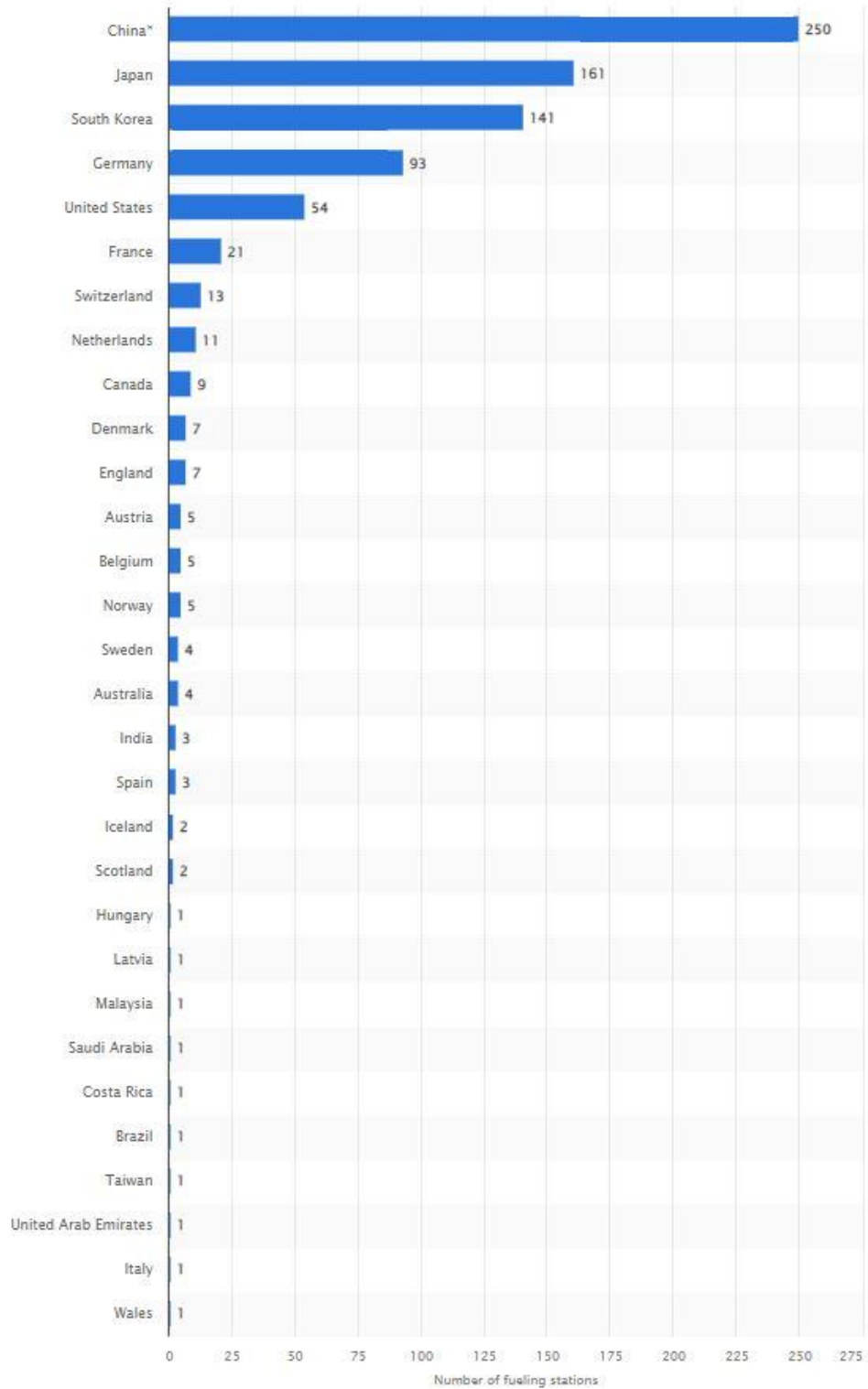
Χαρακτηριστικά	ICE	BEV	PHEV	FCEV
Αριθμός οχημάτων σε κυκλοφορία	1.45 δις	26 εκατ.		59 χιλιάδες
Πηγή ενέργειας	Ορυκτοί άνθρακες	Μπαταρία	Μπαταρία/ Ορ. άνθρακες	Υδρογόνο/Μπαταρία
Αυτονομία (μ.ό. σε χιλιόμετρα)	320	320	550	480
Χρόνος ανεφοδιασμού (μ.ό. σε λεπτά)	3	480+	300	3
Εκπομπές CO <sub>2</sub> (μ.ό. σε κιλά ανά έτος)	5450	0	2500	0

Πίνακας 5: Συγκριτικός πίνακας χαρακτηριστικών των διάφορων τύπων οχημάτων (2023).

Πηγή: (hedgescompany, 2024)

Όσον αφορά τη σημαντική διαφορά στον αριθμό των BEV και PHEV σε σχέση με τα FCEV που υπάρχουν σε κυκλοφορία, αυτή έγκειται στην έλλειψη δικτύου διανομής και τροφοδοσίας υδρογόνου, καθώς ως προς την ευκολία χρήσης τα FCEV υπερτερούν λόγω του μικρού χρόνου ανεφοδιασμού που απαιτούν σε αντίθεση με τα BEV/PHEV ο οποίος είναι από τους βασικούς αποτρεπτικούς παράγοντες για την μετάβαση από τα ICE στα EV. Αυτό αποτυπώνεται χαρακτηριστικά αν εξετάσουμε τον συνολικό αριθμό των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου ο οποίος το 2022 ανερχόταν στους 814 αλλά και στην διασπορά τους, καθώς τέτοιοι σταθμοί λειτουργούν μόνο σε 30 χώρες (Εικόνα 14).

Ενδεικτικά, οι σταθμοί ανεφοδιασμού πετρελαίου και βενζίνης, στην Ευρωπαϊκή Ένωση το 2022 ανέρχονταν σε 140.165, ενώ υπάρχουν διαθέσιμοι μόλις 254 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου (statista, 2022).



Εικόνα 14: Ο αριθμός των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου σε λειτουργία μέχρι τον Απρίλιο του 2022 ανά χώρα. Πηγή: (statista, 2022)

## 6.2 Μελέτη ποσοστού αντικατάστασης συμβατικών οχημάτων με υδρογονοκίνητα οχήματα στον τομέα των οδικών μεταφορών

Σύμφωνα με τα επίσημα στοιχεία από την European Automobiles Manufacturers' Association (ACEA) για το 2020 (Πίνακες 6, 7 και 9), στην Ευρωπαϊκή Ένωση υπάρχουν 560 επιβατικά οχήματα και 81 φορτηγά για κάθε 1.000 κατοίκους. Τα επιβατικά ηλεκτρικά οχήματα στην Ευρωπαϊκή Ένωση αποτελούν μόλις το 2,3% των συνολικών επιβατικών οχημάτων ενώ η τιμή αυτή πέφτει στο 0,7% στην Ελλάδα. Το ποσοστό αυτό στην Ελλάδα προκύπτει από οχήματα της κατηγορίας HEV, δηλαδή οχήματα που έχουν ως κύριο τύπο καυσίμου ορυκτούς άνθρακες και χρησιμοποιούν την ενέργεια της μπαταρίας, που παράγεται μέσω της πέδησης, ως βοηθητική (Πίνακας 4).

Τύπος καυσίμου	Επιβατικά οχήματα		Εμπορικά οχήματα μέχρι 3.5 τόνους		Εμπορικά οχήματα άνω των 3.5 τόνων		Λεωφορεία	
	Ελλάδα	Ε.Ε.	Ελλάδα	Ε.Ε.	Ελλάδα	Ε.Ε.	Ελλάδα	Ε.Ε.
<b>Βενζίνη</b>	88,0%	51,7 %	39,9%	6,2%	0,1%	0,7%	0,0%	0,2%
<b>Πετρέλαιο</b>	8,5%	42,8 %	40,0%	91,2 %	55,5%	96,3 %	96,5%	93,5 %
<b>BEV</b>	0,0%	0,5%	0,0%	0,4%	0,0%	0,2%	0,0%	0,9%
<b>PHEV</b>	0,0%	0,6%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
<b>HEV</b>	0,7%	1,2%	0,0%	0,1%	0,0%	0,0%	0,0%	1,4%
<b>Φυσικό αέριο</b>	0,1%	0,5%	0,1%	0,6%	0,0%	0,5%	3,4%	3,5%
<b>LPG</b>	0,7%	2,5%	0,0%	0,8%	0,0%	0,1%	0,0%	0,1%
<b>Άλλο/άγνωστο</b>	2,7%	0,2%	20,0%	0,8%	44,4%	2,2%	0,0%	0,3%

Πίνακας 6: Ποσοστό επιβατικών οχημάτων, φορτηγών οχημάτων και λεωφορείων ανά τύπο καυσίμου, για την Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση.

Πηγή: (ACEA, 2022)

Ο στόλος οχημάτων στην Ελλάδα ανέρχεται στα 5.315.875 επιβατικά αυτοκίνητα, στα 921.776 φορτηγά οχήματα μέχρι 3.5 τόνους, στα 225.216 φορτηγά οχήματα άνω των 3.5 τόνων (Πίνακας 7). Στην Ελλάδα, σε αντίθεση με την Ε.Ε., η συντριπτική πλειοψηφία των επιβατικών οχημάτων είναι βενζινοκίνητα (88% έναντι 51,7%), ενώ ο στόλος των μικρών (κάτω των 3,5 τόνων) φορτηγών οχημάτων αποτελείται τόσο από βενζινοκίνητα όσο και πετρελαιοκίνητα οχήματα σε σχεδόν ίσα ποσοστά, σε αντίθεση με την Ε.Ε. όπου η πλειοψηφία των μικρών φορτηγών οχημάτων είναι πετρελαιοκίνητα (91,2%) (Πίνακας 6).

Κατηγορία οχήματος	Έτος	Ελλάδα	Ευρωπαϊκή Ένωση
Επιβατικά οχήματα	2016	5.126.024	229.202.483
	2017	5.169.026	234.364.223
	2018	5.164.183	239.001.589
	2019	5.247.295	243.491.725
	<b>2020</b>	<b>5.315.875</b>	<b>246.345.770</b>
Εμπορικά οχήματα μέχρι 3.5 τόνους	2016	858.287	26.294.146
	2017	871.773	27.126.697
	2018	889.638	27.824.973
	2019	906.798	28.285.850
	<b>2020</b>	<b>921.776</b>	<b>28.715.247</b>
Εμπορικά οχήματα άνω των 3.5 τόνων	2016	227.990	5.794.166
	2017	223.680	5.931.832
	2018	229.776	6.052.048
	2019	226.913	6.128.743
	<b>2020</b>	<b>225.216</b>	<b>6.230.100</b>
Λεωφορεία	2016	23.460	656.245
	2017	24.016	669.688
	2018	27.970	685.316
	2019	27.988	695.506
	<b>2020</b>	<b>28.196</b>	<b>684.285</b>

Πίνακας 7: Αριθμός οχημάτων ανά κατηγορία οχήματος για τα έτη 2016-2020 στην Ελλάδα και την Ευρωπαϊκή Ένωση. Πηγή: (ACEA, 2022)

Χρησιμοποιώντας τα ποσοστά για κάθε τύπο καυσίμου προκύπτει ότι στην Ελλάδα κυκλοφορούν **4.677.970 επιβατικά αυτοκίνητα με βενζίνη ως καύσιμο, 451.840 πετρελαιοκίνητα, 37.211 υβριδικά HEV και 42.527 που χρησιμοποιούν αέρια καύσιμα (φυσικό αέριο και LPG)** (Πίνακας 8).

Τύπος καυσίμου	Επιβατικά οχήματα	Εμπορικά οχήματα μέχρι 3.5 τόνους	Εμπορικά οχήματα άνω των 3.5 τόνων	Λεωφορεία
Βενζίνη	4.677.970	367.789	225	0
Πετρέλαιο	451.849	368.710	124.995	27.209
BEV	0	0	0	0
PHEV	0	0	0	0
HEV	37.211	0	0	0
Φυσικό αέριο/LPG	42.527	922	0	959
Άλλο/άγνωστο	143.529	184.355	99.996	0
<b>Σύνολο</b>	<b>5.315.875</b>	<b>921.776</b>	<b>225.216</b>	<b>28.196</b>

Πίνακας 8: Αριθμός επιβατικών οχημάτων, φορτηγών οχημάτων και λεωφορείων ανά τύπο καυσίμου, για την Ελλάδα (2020).

Πηγή: (ACEA, 2022)

Επιπλέον, η τελευταία έκθεση της ACEA, προσδιορίζει και το μέσο όρο ηλικίας των επιβατικών οχημάτων ανά χώρα και στην Ευρωπαϊκή Ένωση ως σύνολο.

Συγκεκριμένα, **ο Ευρωπαϊκός μέσος όρος ηλικίας των επιβατικών οχημάτων είναι τα 11,8 έτη** ενώ ο μέσος όρος ανεβαίνει στο 11,9 και 13,9 έτη για τα φορτηγά οχήματα κάτω των 3.5 τόνων και άνω των 3.5 τόνων αντίστοιχα. **Για την Ελλάδα τα νούμερα αυτά παρουσιάζονται ιδιαίτερα αυξημένα αφού ο μέσος όρος ηλικίας των επιβατικών αυτοκινήτων είναι τα 16,6 χρόνια**, για τα μικρά φορτηγά τα 20,2 χρόνια ενώ για μεγάλα φορτηγά και λεωφορεία τα 21,4 και 19,4 έτη αντίστοιχα (Πίνακας 9). Ως προς τα επιβατικά οχήματα με 16,6 έτη μέσο όρο ηλικίας, η Ελλάδα καταλαμβάνει την 4<sup>η</sup> θέση από το τέλος ανάμεσα στις χώρες της Ε.Ε. με μόνο την Εσθονία, τη Ρουμανία και τη Λιθουανία να εμφανίζουν υψηλότερη τιμή μέσης ηλικίας με 16,7, 16,9

και 17 έτη αντίστοιχα (ACEA, 2022). Στην κατηγορία των μικρών φορτηγών η Ελλάδα καταλαμβάνει την τελευταία θέση ανάμεσα στις χώρες τις Ε.Ε. ενώ δεύτερη είναι η Ρουμανία που όμως έχει κατά 3,1 χρόνια νεότερο στόλο μικρών φορτηγών ενώ την τελευταία θέση κατέχει η Ελλάδα και στα μεγάλα φορτηγά με την αμέσως επόμενη χώρα να είναι η Ιταλία με 18,5 έτη μέσο όρο (ACEA, 2022). Τέλος, στην κατηγορία των λεωφορείων η Ελλάδα και πάλι είναι ουραγός με την Ρουμανία να έχει το δεύτερο γηραιότερο στόλο με μέσο όρο τα 18,1 έτη.

Ο μεγάλος μέσος όρος ηλικίας για όλες τις κατηγορίες οχημάτων στην Ελλάδα σημαίνει ότι η πλειοψηφία των οχημάτων ακολουθούν παλαιότερα πρότυπα εκπομπών Euro με αποτέλεσμα τις ακόμα υψηλότερες εκπομπές ρύπων σε σχέση με χώρες με νεότερο στόλο οχημάτων.

Τύπος οχήματος	Ελλάδα			
	≤5 έτη	5-10 έτη	>10 έτη	Μέσος όρος (έτη)
Επιβατικά οχήματα	457.316	348.070	4.510.489	16,6
Φορτηγά οχήματα μέχρι 3.5 τόνους	33.557	23.190	865.029	20,2
Φορτηγά οχήματα άνω των 3.5 τόνων	2.027	1.317	221.872	21,4
Λεωφορεία	1.777	248	26.671	19,4

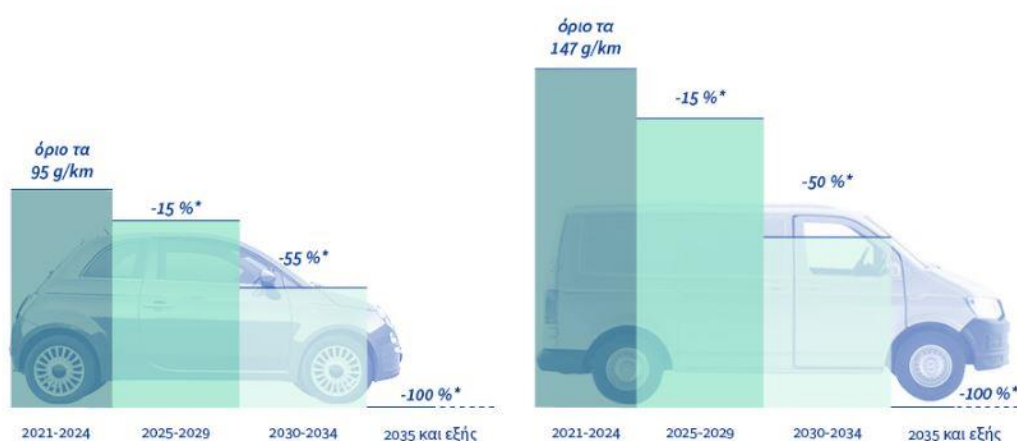
Πίνακας 9: Αριθμός οχημάτων σε ηλικιακές κατηγορίες (λιγότερο από 5 έτη, μεταξύ 5 και 10 ετών και μεγαλύτερο από 10 έτη) για κάθε μια από τις κατηγορίες οχημάτων καθώς και ο μέσος όρος ηλικίας οχημάτων για κάθε κατηγορία.

Πηγή: (ACEA, 2022)

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Επιτροπή (European Commission), **τα επιβατικά αυτοκίνητα μαζί με τα μικρά φορτηγά ευθύνονται για το 15% των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου της Ε.Ε..**



Για την επίτευξη της μείωσης των εκπομπών, έχει προταθεί και ψηφιστεί μια νέα σειρά κανονισμών με τον όνομα «fit for 55» που αποσκοπεί στη μείωση τους κατά 55% μέχρι το 2030. Σε αυτό το πλαίσιο, όσο αφορά τα οχήματα, ο στόχος που έχει τεθεί είναι η μείωση κατά 55% μέχρι το 2034 και κατά 100% μέχρι το 2035 τόσο για τα επιβατικά όσο και για τα μικρά φορτηγά οχήματα (Εικόνα 15). Αυτό σημαίνει ότι εντός της Ε.Ε. τα οχήματα που θα διατίθενται από το 2035 και μετά θα είναι οχήματα μηδενικών εκπομπών, δηλαδή BEV και FCEV.



\*σε σύγκριση με τους στόχους του 2021

Εικόνα 15: Προβλεπόμενες μειώσεις εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου για τα νέα επιβατικά και μικρά φορτηγά οχήματα στην Ε.Ε. μέχρι το 2035 σύμφωνα με τη δέσμη μέτρων «Fit for 55».

Πηγή: European Commission.

Με βάση αυτά τα στοιχεία, δημιουργήθηκαν τέσσερα διαφορετικά σενάρια, ανάλογα του ποσοστού αντικατάστασης των συμβατικών οχημάτων από ηλεκτρικά και υδρογονοκίνητα οχήματα στην Ελλάδα με σκοπό να αναλυθούν τα αποτελέσματα της διείσδυσης αυτής στην αγορά (βλ. §5.3).

Στο Σενάριο 1 (Σ1 εφεξής), τα BEV και FCEV λαμβάνουν κομμάτι της αγοράς ίσο με 10% αντίστοιχα, στο Σενάριο 2 (Σ2) με 15% αντίστοιχα, στο Σενάριο 3 (Σ3) με 25% αντίστοιχα ενώ στο Σενάριο 4 (Σ4) όλα τα νέα οχήματα στην αγορά είναι ηλεκτρικά και υδρογονοκίνητα με ποσοστό 50% αντίστοιχα (Πίνακας 10).

Σενάριο	Ποσοστό διείσδυσης FCEV	Ποσοστό διείσδυσης BEV
Σενάριο 1	10%	10%
Σενάριο 2	15%	15%
Σενάριο 3	25%	25%
Σενάριο 4	50%	50%

Πίνακας 10: Σενάρια ποσοστού διείσδυσης των ηλεκτρικών και υδρογονοκίνητων αυτοκινήτων στην ελληνική αγορά.

Η μετάβαση από τα συμβατικά στα υδρογονοκίνητα οχήματα επηρεάζεται από μια πλειάδα διαφορετικών ενδιαφερόμενων μερών όπως ο καταναλωτής, οι αυτοκινητοβιομηχανίες, οι παραγωγοί υδρογόνου, οι διανομείς υδρογόνου, οι ιδιοκτήτες σταθμών ανεφοδιασμού και οι νομοθέτες (Jesus Ochoa Robles a, 2020). Η μετάβαση από τα συμβατικά στα ηλεκτρικά οχήματα έχει ήδη ξεκινήσει στην Ελλάδα με βάση το έτος 2022 όπου το 0,7% των κυκλοφορούντων αυτοκινήτων ήταν ηλεκτρικά με πλήθος περίπου 40.000.

Αρχικά, για να μπορέσει το υδρογόνο να γίνει οικονομικά ανταγωνιστικό θα πρέπει να υπάρχουν πολιτικές και νομοθετικές πρωτοβουλίες για την ανάπτυξη της οικονομίας του υδρογόνου (Anna Creti, 2015). Εν συνεχεία είναι αναγκαία η στήριξη των επενδύσεων και η παροχή κινήτρων για την εξέλιξη της αλυσίδας ανεφοδιασμού υδρογόνου με τη δημιουργία κατάλληλων δομών παραγωγής ή/και αποθήκευσης, ενώ θα πρέπει και οι αυτοκινητοβιομηχανίες να στραφούν ακόμα πιο στοχευμένα στην παραγωγή υδρογονοκίνητων οχημάτων, ώστε μέσω της μεγάλης κλίμακας και της τεχνολογικής εξέλιξης να μειωθεί το κόστος τους και να αναπτυχθεί επαρκής αριθμός διαφορετικών μοντέλων όλων των κατηγοριών ώστε ο καταναλωτής να έχει περισσότερες επιλογές όπως με τα συμβατικά οχήματα (Jesus Ochoa Robles a, 2020).

Στην Ελλάδα μέχρι και τον Ιούλιο του 2023, υπάρχει μόλις ένας σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου, και συγκεκριμένα πράσινου, στο Εθνικό Κέντρο Ερευνών Δημόκριτος που μπορεί να ανεφοδιάζει μικρά οχήματα, και παρόλο που σε οδηγία της Ε.Ε., που ψηφίστηκε τον Οκτώβριο 2022, τίθεται ως στόχος η δημιουργία **τουλάχιστον ενός σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου ανά 100 km** σε όλη την Ε.Ε. με πρώτο στόχο την δημιουργία 1.780 σταθμών μέχρι το 2027, δεν υπάρχουν προς το παρόν δομημένα σχέδια για την ανάπτυξη της αλυσίδας τροφοδοσίας υδρογόνου με συγκεκριμένες χρονικές δεσμεύσεις και προβλέψεις για την Ελλάδα. Για το λόγο αυτό, για τα Σ1-Σ4,

λαμβάνεται ως δεδομένη η ύπαρξη επαρκούς δικτύου τροφοδοσίας υδρογόνου (είτε από εισαγωγή υδρογόνου είτε από μονάδες παραγωγής εντός της χώρας) καθώς και επαρκής αριθμός σταθμών ανεφοδιασμού αντίστοιχος με τα πρατήρια υγρών καυσίμων που ανέρχονται σε 5.566 (ΙΔΡΥΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ (Ι.Ο.Β.Ε.), 2022) αρχής γενομένης από το 2024.

Για την ανάλυση των σεναρίων, αρχικά λαμβάνουμε υπόψιν μας την ετήσια αύξηση του στόλου των αυτοκινήτων στην Ελλάδα από καινούρια οχήματα, η οποία είναι 3,24% (ΜΑΝΙΩΤΗΣ, 2021). Σε αυτό τον αριθμό συνυπολογίζεται και ο αριθμός των αυτοκινήτων που αποσύρονται/διαγράφονται σε ετήσια βάση όπου σύμφωνα με τον (ΜΑΝΙΩΤΗΣ, 2021) το 2019 ήταν 19.000 οχήματα με αύξηση της τάξης του 0,4% ανά έτος.

Με αυτές τις παραμέτρους και λαμβάνοντας υπόψιν το συνολικό αριθμό οχημάτων του 2020 στην Ελλάδα, οι προβλέψεις για τον στόλο των αυτοκινήτων από το 2024 έως το 2050 παρουσιάζονται στους Πίνακες 11-14 για τα Σ1, Σ2, Σ3 και Σ4 αντίστοιχα. Συνολικά παρουσιάζονται οι προβλέψεις του στόλου των αυτοκινήτων στην Ελλάδα σύμφωνα με τα Σενάρια 1-4 για 4 διαφορετικές χρονιές.

Το 2024 που λειτουργεί ως το έτος βάσης και ορίζει το έτος όπου θεωρείται ότι υπάρχει διαθεσιμότητα υδρογόνου και υποδομών, εφοδιαστική αλυσίδα υδρογόνου σε λειτουργία καθώς και μεγάλη διασπορά σταθμών ανεφοδιασμού. Το 2030, την χρονιά που σύμφωνα με την δέσμη μέτρων «fit for 55» της Ε.Ε., ο στόχος είναι η μείωση των εκπομπών από τα οχήματα κατά 55% (Εικόνα 15), το 2035 όπου σύμφωνα με την ίδια δέσμη μέτρων στην Ε.Ε. θα γίνει υποχρεωτική η πώληση καινούριων οχημάτων να είναι οχημάτων μηδενικών εκπομπών (ηλεκτρικά και υδρογονοκίνητα) και τέλος το 2050, την χρονιά στόχο για μηδενισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου από όλες τις ανθρωπογενείς δραστηριότητες. Επίσης, στους υπολογισμούς των προβλέψεων από το 2035 και μετά ο αριθμός των καινούργιων ICE αυτοκινήτων λαμβάνεται ως ίσος με 0 σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή νομοθεσία για την πώληση αυτοκινήτων μηδενικών ρύπων.

Έτος	Συνολικός αριθμός αυτοκινήτων	Καινούργια οχήματα	Καινούργια ICE	Καινούργια FCEV	Σύνολο ICE	Ποσοστό % ICE	Σύνολο FCEV	Ποσοστό % FCEV	Καινούργια BEV	Σύνολο BEV	Ποσοστό % BEV
2020	5.296.115				5.296.115	100	0	0		0	0
2024	6.006.554	186.077	148.862	18.608	5.927.130	98,68	18.608	0,31	18.608	60.815	1,01
2030	7.254.780	224.736	179.789	22.474	7.130.410	98,29	41.081	0,57	22.474	83.289	1,15
2035	8.490.902	263.019	0	131.509	8.103.513	95,44	172.591	2,03	131.509	214.798	2,53
2050	13.612.118	421.603	0	210.802	12.803.125	94,06	383.392	2,82	210.802	425.600	3,13

Πίνακας 11: Πρόβλεψη του στόλου των οχημάτων στην Ελλάδα από το 2024 έως το 2050 για το Σενάριο 1 όπου τα καινούρια οχήματα κάθε χρόνο αποτελούνται κατά 10% από ηλεκτρικά και 10% από υδρογονοκίνητα.

Έτος	Συνολικός αριθμός αυτοκινήτων	Καινούργια οχήματα	Καινούργια ICE	Καινούργια FCEV	Σύνολο ICE	Ποσοστό % ICE	Σύνολο FCEV	Ποσοστό % FCEV	Καινούργια BEV	Σύνολο BEV	Ποσοστό % BEV
2020	5.296.115				5.296.115	100	0	0		0	0
2024	6.006.554	186.077	130.254	27.912	5.908.523	98,37	27.912	0,46	27.912	70.119	1,17
2030	7.254.780	224.736	157.315	33.710	7.089.329	97,72	61.622	0,85	33.710	103.830	1,43
2035	8.490.902	263.019	0	131.509	8.062.432	94,95	193.131	2,27	131.509	235.339	2,77
2050	13.612.118	421.603	0	210.802	12.762.044	93,76	403.933	2,97	210.802	446.141	3,28

Πίνακας 12: Πρόβλεψη του στόλου των οχημάτων στην Ελλάδα από το 2024 έως το 2050 για το Σενάριο 2 όπου τα καινούρια οχήματα κάθε χρόνο αποτελούνται κατά 15% από ηλεκτρικά και 15% από υδρογονοκίνητα.

Έτος	Συνολικός αριθμός αυτοκινήτων	Καινούργια οχήματα	Καινούργια ICE	Καινούργια FCEV	Σύνολο ICE	Ποσοστό % ICE	Σύνολο FCEV	Ποσοστό % FCEV	Καινούργια BEV	Σύνολο BEV	Ποσοστό % BEV
2020	5.296.115				5.296.115	100	0	0		0	0
2024	6.006.554	186.077	93.039	46.519	5.871.307	97,75	46.519	0,77	46.519	88.727	1,48
2030	7.254.780	224.736	112.368	56.184	7.007.166	96,59	102.703	1,42	56.184	144.911	2,00
2035	8.490.902	263.019	0	131.509	7.980.269	93,99	234.213	2,76	131.509	276.420	3,26
2050	13.612.118	421.603	0	210.802	12.679.881	93,15	445.014	3,27	210.802	487.222	3,58

Πίνακας 13: Πρόβλεψη του στόλου των οχημάτων στην Ελλάδα από το 2024 έως το 2050 για το Σενάριο 2 όπου τα καινούρια οχήματα κάθε χρόνο αποτελούνται κατά 25% από ηλεκτρικά και 25% από υδρογονοκίνητα.

Έτος	Συνολικός αριθμός αυτοκινήτων	Καινούργια οχήματα	Καινούργια ICE	Καινούργια FCEV	Σύνολο ICE	Ποσοστό % ICE	Σύνολο FCEV	Ποσοστό % FCEV	Καινούργια BEV	Σύνολο BEV	Ποσοστό % BEV
2020	5.296.115				5.296.115	100	0	0		0	0
2024	6.006.554	186.077	0	93.039	5.778.269	96,20	93.039	1,55	93.039	135.246	2,25
2030	7.254.780	224.736	0	112.368	6.801.759	93,76	205.407	2,83	112.368	247.615	3,41
2035	8.490.902	263.019	0	131.509	7.774.862	91,57	336.916	3,97	131.509	379.124	4,47
2050	13.612.118	421.603	0	210.802	12.474.474	91,64	547.718	4,02	210.802	589.926	4,33

Πίνακας 14: Πρόβλεψη του στόλου των οχημάτων στην Ελλάδα από το 2024 έως το 2050 για το Σενάριο 2 όπου τα καινούρια οχήματα κάθε χρόνο αποτελούνται κατά 50% από ηλεκτρικά και 50% από υδρογονοκίνητα.

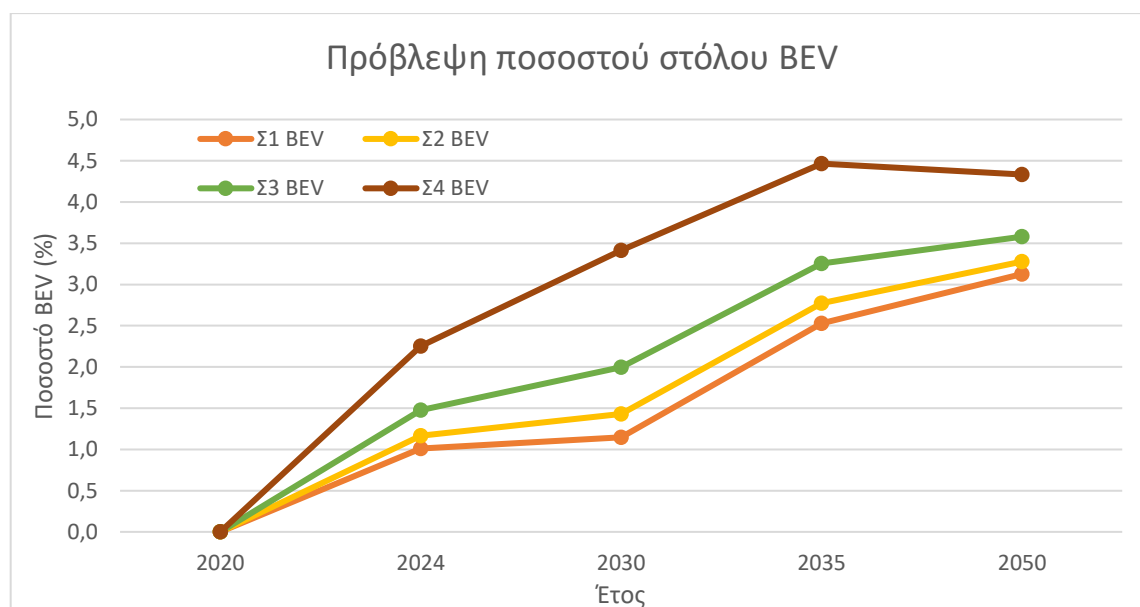
Για το **Σ1** στο οποίο υποθέτουμε διεύρυνση των ηλεκτρικών και των υδρογονοκίνητων οχημάτων στην αγορά του αυτοκινήτου κατά 10% αντίστοιχα, δηλαδή τα 2 στα 10 νέα αυτοκίνητα να είναι μηδενικών εκπομπών (1 ηλεκτρικό και 1 υδρογονοκίνητο) λαμβάνοντας ως έτος βάσης το 2024. Σε αυτό το σενάριο, τα αποτελέσματα δείχνουν για το 2030, τη χρονιά που έχει θέσει ως στόχο η Ε.Ε. με το «fit for 55» για μείωση των εκπομπών από τα οχήματα κατά 55%, η Ελλάδα θα έχει στο στόλο της 83.289 BEV τα οποία αντιπροσωπεύουν το 1,15% των συνολικών σε κυκλοφορία οχημάτων και μόλις 41.081 FCEV τα οποία αντιπροσωπεύουν το 0,57% των συνολικών σε κυκλοφορία οχημάτων (Πίνακας 11). Από την άλλη τα ICEV καταλαμβάνουν το 98,29% του συνολικού στόλου οχημάτων με 7.130.410 οχήματα σε αυτή την κατηγορία. Από το 2035 και μετά όμως που δεν θα επιτρέπεται η πώληση νέων ICEV, ο στόλος της Ελλάδας με οχήματα μηδενικών εκπομπών (ηλεκτρικά και υδρογονοκίνητα) υπολογίζεται να αυξηθεί κατά 2,85% και να φτάσει το 4,56% του συνόλου των οχημάτων. Τέλος, το 2050 προβλέπεται να κυκλοφορούν 425.600 ηλεκτρικά και 383.392 υδρογονοκίνητα αυτοκίνητα στην Ελλάδα, με αθροιστικό ποσοστό 5,94% επί του συνόλου.

Για το **Σ2**, με το ποσοστό της διεύρυνσης να ορίζεται στο 15% με ηλεκτρικά και 15% με υδρογονοκίνητα ενώ παρουσιάζονται αυξημένοι αριθμοί σε σχέση με το Σ1, τα ποσοστά BEV και FCEV επί του συνόλου των επιβατικών οχημάτων στην Ελλάδα παραμένουν σε χαμηλές τιμές, με τη μέγιστη να εκτιμάται στο 6,24% αθροιστικά το 2050 με 850.074 οχήματα μηδενικών εκπομπών (Πίνακας 12).

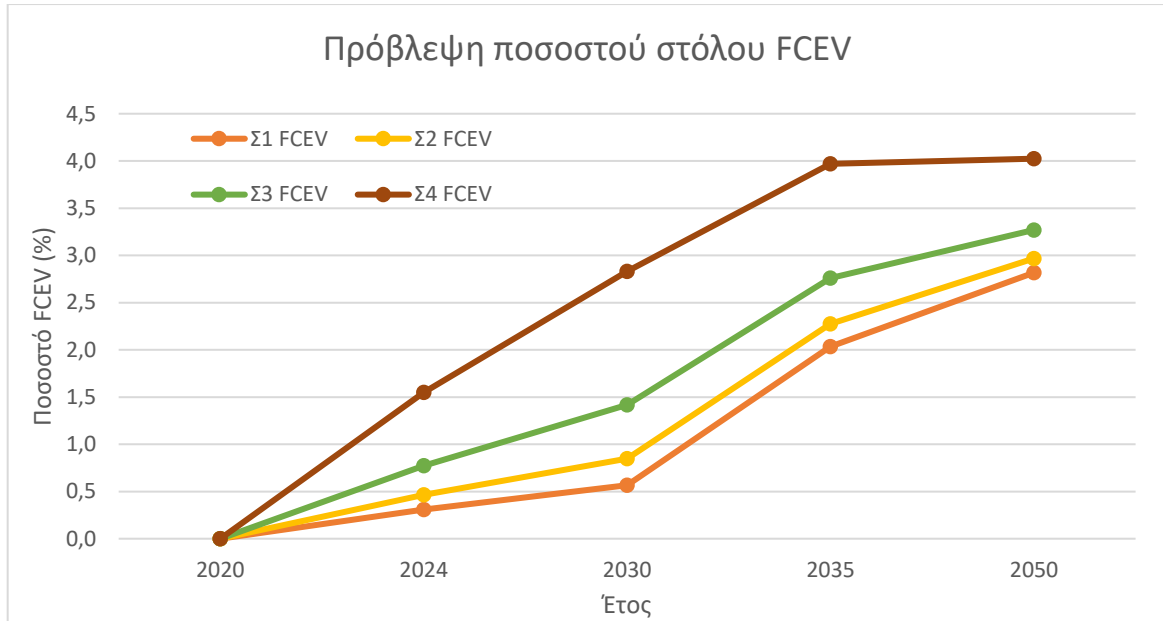
Στο **Σ3** όπου το 1 στα 2 καινούργια αυτοκίνητα μέχρι και το 2035 είναι ηλεκτρικά και υδρογονοκίνητα, ο στόλος BEV και FCEV ξεπερνάει το 6% επί του συνόλου το 2035 και το 2050 αγγίζει το 6,85% (Πίνακας 13).

Τέλος, στο **Σ4** με όλα τα καινούργια αυτοκίνητα να είναι BEV και FCEV υπολογίζεται πως το 2030 ο στόλος ηλεκτρικών και υδρογονοκίνητων θα αντιστοιχεί στο 6,24% ενώ φτάνει στο 8,35% αθροιστικά το 2050 με 1.137.644 οχήματα μηδενικών εκπομπών (Πίνακας 14).

Από τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται πως ακόμα και στο σενάριο με πλήρη διείσδυση των ηλεκτρικών και υδρογονοκίνητων οχημάτων στην αυτοκίνηση, ο ρυθμός στον οποίο ο στόλος των οχημάτων στην Ελλάδα θα καταφέρει να φτάσει ποσοστά που θα σηματοδοτούν την αλλαγή προς ένα στόλο φιλικότερο προς το περιβάλλον, είναι πολύ αργός. Έτσι, ακόμα και στο πιο αισιόδοξο σενάριο κατά το οποίο από το 2024 και μετά όλα τα καινούργια αυτοκίνητα στην Ελλάδα είναι μηδενικών εκπομπών (ηλεκτρικά και υδρογονοκίνητα), το σύνολο των ηλεκτρικών και των υδρογονοκίνητων μαζί σε σχέση με τα συμβατικά αυτοκίνητα είναι σημαντικά μικρότερο (Εικόνα 16α, 16β).



Εικόνα 16α: Πρόβλεψη του ποσοστού του στόλου των BEV σε σχέση με το συνολικό αριθμό αυτοκινήτων για τα 4 διαφορετικά σενάρια διείσδυσης.



Εικόνα 16β: Πρόβλεψη του ποσοστού του στόλου των FCEV σε σχέση με το συνολικό αριθμό αυτοκινήτων για τα 4 διαφορετικά σενάρια διείσδυσης.

Αυτό οφείλεται στον αργό ρυθμό ανανέωσης του στόλου και φαίνεται καθαρά στον μέσο όρο ηλικίας των αυτοκινήτων στην Ελλάδα (Πίνακας 9). Για να επιτύχουμε μεγαλύτερο ρυθμό αντικατάστασης, θα πρέπει να δοθούν κίνητρα τόσο από οικονομικής πλευράς όσο και από πλευράς υποδομών. Θα πρέπει αρχικά ο καταναλωτής να θεωρήσει την αγορά των BEV και των FCEV ανταγωνιστική σε σχέση με τα ICEV με βάση τις κατηγορίες που αναπτύχθηκαν παραπάνω, αλλά και να γίνουν οι απαραίτητες κρατικές και ιδιωτικές επενδύσεις για να στηρίξουν αυτό το εγχείρημα δημιουργώντας ένα δίκτυο εφάμιλλο του δικτύου ανεφοδιασμού ορυκτών καυσίμων.

### 6.3 Αποτελέσματα διείσδυσης του υδρογόνου στις οδικές μεταφορές

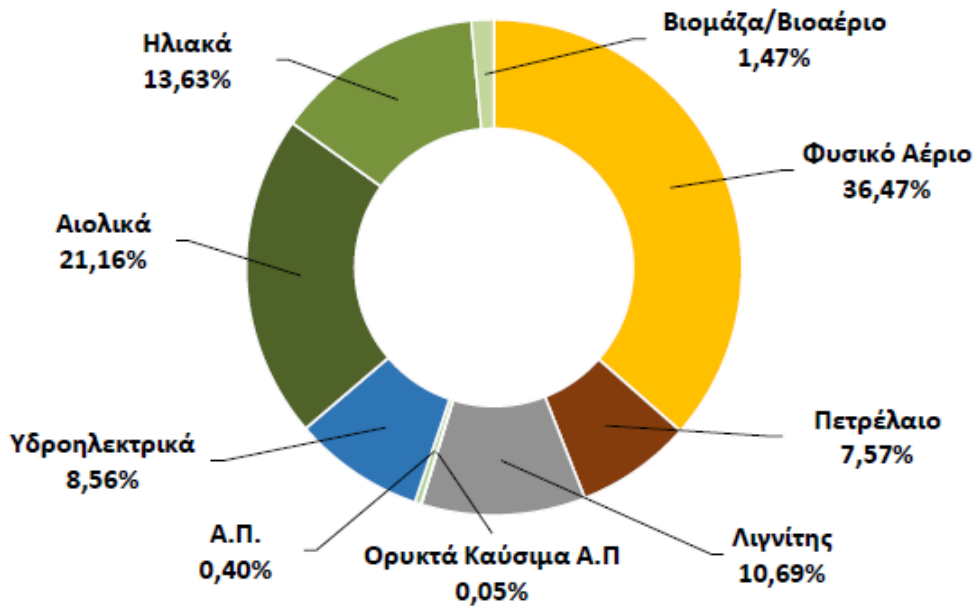
Σε αυτό το μέρος θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα βάσει των τεσσάρων σεναρίων που αναπτύχθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Να σημειωθεί ότι πρέπει να ληφθεί υπόψιν το γεγονός ότι οι προβλέψεις και τα αντίστοιχα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτές, δεν μπορούν να συνυπολογίσουν τις τεχνολογικές εξελίξεις στον τομέα των ICEV, τα νέα πρότυπα που μπορεί να εισαχθούν για περαιτέρω μείωση των εκπομπών των συμβατικών αυτοκινήτων, την ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων φιλικότερα προς το περιβάλλον καθώς και άλλους παράγοντες που μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου από τον τομέα των οδικών μεταφορών στο μέλλον, όπως για παράδειγμα τα οικονομικά κίνητρα που μπορεί να προσφέρει η κάθε χώρα για την αγορά καινούργιων EV.

Η διείσδυση των νέων τεχνολογιών στα οχήματα που αποσκοπούν στη μηδενική εκπομπή ρύπων αποτελεί μονόδρομο στην προσπάθεια που γίνεται σε παγκόσμιο επίπεδο για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος μας. Δεδομένου ότι οι εκπομπές από τις οδικές μεταφορές αποτελούν την κατηγορία των μεταφορών με το υψηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα της τάξης του 73,1% σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, η ανανέωση του στόλου των οχημάτων με οχήματα μηδενικών ρύπων είναι επιτακτική.

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που τα ηλεκτρικά οχήματα έχουν μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), δεν γίνεται να παραληφθούν οι εκπομπές για την παραγωγή ενέργειας που απαιτείται για τη φόρτιση τους. Με βάση τα διαθέσιμα στοιχεία του (ΔΑΠΕΕΠ, 2023), όσον αφορά το Ενεργειακό Μείγμα Παραγωγής-2022 (Εικόνα 16), το 55,18% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για το έτος 2022 στην Ελλάδα προερχόταν από ορυκτά καύσιμα ενώ το υπολειπόμενο 44,82% από ΑΠΕ. Κατ' επέκταση οι 28,62 TWh παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το 2022 προέρχονται από ορυκτά καύσιμα, όπου υπόκεινται εκπεμπόμενοι ρύποι, ενώ οι 23,41 TWh παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προέρχονται από ΑΠΕ με μηδενικές εκπομπές σε ρύπους. Στηριζόμενοι στα στοιχεία του (ΔΑΠΕΕΠ, 2023) το σύνολο των **εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) για το 2022 στην Ελλάδα υπολογίζεται ίσο με 346,42 gCO<sub>2</sub>/ kWh.**



## Ενεργειακό Μείγμα Παραγωγής 2022



Εικόνα 16: Ενεργειακό μείγμα παραγωγής 2022

Πηγή: (ΔΑΠΕΕΠ, 2023)

Όπως έχει γίνει αναφορά και σε προηγούμενα κεφάλαια, το 2022 στην Ελλάδα, τα ηλεκτρικά οχήματα αποτελούσαν το 0,7% των συνολικών οχημάτων στη χώρα μας με πλήθος 39.631. Σύμφωνα με τους υπολογισμούς στους Πίνακες 11-14 για τα Σ1, Σ2, Σ3 και Σ4, δεν γίνεται να παραληφθούν οι εκπομπές για την παραγωγή ενέργειας που απαιτείται για τη φόρτισης των ηλεκτρικών οχημάτων. Με στόχο τον υπολογισμό αυτών των εκπομπών, ακολουθεί ανάλυση της κατανάλωσης ενέργειας ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου για 1 χρόνο με δεδομένο ότι ένα μέσο αυτοκίνητο διανύει 15.000 χιλιόμετρα μέσα σε ένα έτος στην Ελλάδα (ACEA, 2022).

Για τον υπολογισμό του κόστους μετακίνησης, θα λάβουμε υπόψιν το σταθερό πρόγραμμα της ΔΕΗ με χρέωση 0,18€/kWh για το ρεύμα ημέρας και 0,13€/kWh για το νυχτερινό ρεύμα (ΔΕΗ, 2023). Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο φορτίζεται κατά βάση το βράδυ στο σπίτι, οπότε το κόστος υπολογίζεται με βάση το νυχτερινό τιμολόγιο της ΔΕΗ. Με κατανάλωση 15kWh/100 χλμ μέσο όρο για οδήγηση μέσα στην πόλη (Cardino, 2023), το κόστος είναι 1,95€/100 χιλιόμετρα με καθαρές τιμές (δίχως τις εξτρά χρεώσεις του ρεύματος + ΦΠΑ). Αυτό μεταφράζεται σε περίπου **3,05€ τελικό κόστος (με όλες τις εξτρά χρεώσεις + ΦΠΑ) ανά 100 χιλιόμετρα.**

Στην περίπτωση σύγκρισης του κόστους μετακίνησης ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου με ένα βενζινοκίνητο και με ένα πετρελαιοκίνητο αντίστοιχα τότε ισχύει ότι ένα βενζινοκίνητο αυτοκίνητο που έχει κατανάλωση 8 λίτρα/100 χιλιόμετρα, με τιμή βενζίνης 1,80 €/λίτρο, έχει κόστος μετακίνησης τα **14,40 €/100 χιλιόμετρα**. Αντίστοιχα, ένα πετρελαιοκίνητο αυτοκίνητο με κατανάλωση 7 λίτρα/100 χιλιόμετρα και τιμή πετρελαίου κίνησης στο 1,70€, θα έχει κόστος μετακίνησης τα **11,90 €/100 χιλιόμετρα**.

Αν στην εξίσωση προστεθεί η ανάλυση του κόστους μετακίνησης ενός υδρογονοκίνητου αυτοκινήτου με χωρητικότητα δεξαμενής ίση με 5 kg και αυτονομία ίση με 600 km καθώς και με τιμή πώλησης του H<sub>2</sub> κίνησης ίση με 12 €/kg τότε για ένα γέμισμα της δεξαμενής του αυτοκινήτου χρειάζεται 64,25 €. Κατά συνέπεια το κόστος μετακίνησης ισούται με **10,70 €/100 χιλιόμετρα**.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε πως το κόστος μετακίνησης με ηλεκτρικό αυτοκίνητο είναι αρκετά μειωμένο σε σχέση με ένα υδρογονοκίνητο ή βενζινοκίνητο ή πετρελαιοκίνητο όχημα.

Με βάση όλα τα παραπάνω υπολογίζεται ότι ένα ηλεκτρικό αυτοκίνητο (με μέσο όρο ετήσιων διανυόμενων χιλιομέτρων ίσο με 15.000 (ACEA, 2022) και με κατανάλωση 15 kWh/100 χλμ μέσο όρο για οδήγηση μέσα στην πόλη (Cardino, 2023)), καταναλώνει 2.250 kWh/έτος. Από αυτές τις 2.250 kWh, οι 1.241,55 kWh αντιστοιχούν σε παραγωγή ενέργειας από ορυκτούς άνθρακες με αποτέλεσμα την παραγωγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) ίσο με **430,10 kgCO<sub>2</sub>/έτος**, ενώ οι εναπομείναντες 1.008,45 kWh αντιστοιχούν σε παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ με μηδενικές εκπομπές σε ρύπους.

Οι τέσσερις βασικές κατηγορίες ρύπων που παράγονται από τα ICEV κατά τη χρήση τους είναι το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και τα στερεά σωματίδια με διάμετρο μικρότερη ή ίση με 10 και 2,5 μικρόμετρα (PM<sub>10</sub> και PM<sub>2.5</sub> αντίστοιχα). Οι ετήσιες εκπομπές των τεσσάρων κατηγοριών ρύπων για τα επιβατικά οχήματα στην Ελλάδα με βάση τα τελευταία διαθέσιμα στοιχεία (ΥΠΕΚΑ, 2020) που αφορούν το έτος 2018 δείχνουν ετήσιες εκπομπές σε κιλοτόνους ίσες με 7.526.013 κιλοτόνους για το διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), 67,4 κιλοτόνους για το μονοξείδιο του άνθρακα (CO), 13,14 κιλοτόνους για τα οξείδια του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και 0,10 κιλοτόνους για τα στερεά σωματίδια PM<sub>10</sub>. Οι

εκπομπές αυτές επηρεάζονται από τον τύπο καυσίμου του κάθε οχήματος, παρόλα αυτά στα πλαίσια αυτής της εργασίας υποθέτουμε ότι τα καινούργια ICEV που μπαίνουν στην αγορά ακολουθούν τα ίδια ποσοστά σε βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα.

Έτσι προκύπτουν τα στοιχεία των Πινάκων 16-19 όπου φαίνονται οι εκπομπές ατμοσφαιρικών ρύπων και για τα τέσσερα σενάρια διεξόδου Σ1-Σ4 αντίστοιχα καθώς και οι εκπομπές ρύπων σε περίπτωση που ολόκληρος ο στόλος των επιβατικών αυτοκινήτων αποτελείται από ICEV για σύγκριση (Πίνακας 15).

Έτος	Αριθμός ICEV	CO <sub>2</sub> (ktn)	CO (ktn)	NO <sub>x</sub> (ktn)	PM <sub>10</sub> (ktn)
2018	5.164.183	7.526.013	67,4	13,14	0,1
2024	5.964.346	8.692.129	77,8	15,18	0,1
2030	7.203.792	10.498.434	94,0	18,33	0,1
2035	8.431.217	12.287.219	110,0	21,45	0,2
2050	13.516.384	19.698.079	176,4	34,39	0,3

Πίνακας 15: Πρόβλεψη των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων που προκύπτουν από στόλο επιβατικών οχημάτων που αποτελείται εξ ολοκλήρου από ICEV.

Έτος	Αριθμός ICEV	Αριθμός BEV	CO <sub>2</sub> -BEV (ktn)	CO <sub>2</sub> (ktn)	CO (ktn)	Nox (ktn)	PM <sub>10</sub> (ktn)
2018	5.164.183	0	0	7.526.013	67,4	13,14	0,1
2024	5.927.130	60.815	26	8.637.919	77,4	15,08	0,1
2030	7.130.410	83.289	36	10.391.526	93,1	18,14	0,1
2035	8.103.513	214.798	92	11.809.733	105,8	20,62	0,2
2050	12.803.125	425.600	183	18.658.795	167,1	32,58	0,2

Πίνακας 16: Πρόβλεψη των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων που προκύπτουν από στόλο επιβατικών οχημάτων σύμφωνα με το Σ1.

Έτος	Αριθμός ICEV	Αριθμός BEV	CO2-BEV (ktn)	CO2 (ktn)	CO (ktn)	Nox (ktn)	PM <sub>10</sub> (ktn)
2018	5.164.183	0	0	7.526.013	67,4	13,14	0,1
2024	5.908.523	70.119	30	8.610.805	77,1	15,03	0,1
2030	7.089.329	103.830	45	10.331.665	92,5	18,04	0,1
2035	8.062.432	235.339	101	11.749.872	105,2	20,51	0,2
2050	12.762.044	446.141	192	18.598.934	166,6	32,47	0,2

Πίνακας 17: Πρόβλεψη των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων που προκύπτουν από στόλο επιβατικών οχημάτων σύμφωνα με το Σ2.

Έτος	Αριθμός ICEV	Αριθμός BEV	CO2-BEV (ktn)	CO2 (ktn)	CO (ktn)	Nox (ktn)	PM <sub>10</sub> (ktn)
2018	5.164.183	0	0	7.526.013	67,4	13,14	0,1
2024	5.871.307	88.727	38	8.556.577	76,6	14,94	0,1
2030	7.007.166	144.911	62	10.211.943	91,5	17,83	0,1
2035	7.980.269	276.420	119	11.630.150	104,2	20,31	0,2
2050	12.679.881	487.222	210	18.479.212	165,5	32,26	0,2

Πίνακας 18: Πρόβλεψη των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων που προκύπτουν από στόλο επιβατικών οχημάτων σύμφωνα με το Σ3.

Έτος	Αριθμός ICEV	Αριθμός BEV	CO2-BEV (ktn)	CO2 (ktn)	CO (ktn)	Nox (ktn)	PM <sub>10</sub> (ktn)
2018	5.164.183	0	0	7.526.013	67,4	13,14	0,1
2024	5.778.269	135.246	58	8.421.008	75,4	14,70	0,1
2030	6.801.759	247.615	106	9.912.638	88,8	17,31	0,1
2035	7.774.862	379.124	163	11.330.844	101,5	19,78	0,2
2050	12.474.474	589.926	254	18.179.907	162,8	31,74	0,2

Πίνακας 19: Πρόβλεψη των εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων που προκύπτουν από στόλο επιβατικών οχημάτων σύμφωνα με το Σ4.

Από τα δεδομένα των εκπομπών-ρύπων για κάθε ένα σενάριο που παρουσιάστηκε, φαίνεται πως με τη συνεχή διείσδυση των ηλεκτρικών και των υδρογονοκίνητων οχημάτων στην αγορά των αυτοκινήτων, οι συνολικοί ρύποι και των τεσσάρων κατηγοριών μειώνονται σε ποσοστά ανάλογα αυτά της διείσδυσης της νέας τεχνολογίας μηδενικών ρύπων.

Εφόσον δεν λαμβάνονται υπόψιν οι νέες τεχνολογίες που ενδεχομένως να προκαλέσουν περαιτέρω μείωση των αέριων εκπομπών, τα νέα πρότυπα που θα θεσπιστούν στο μέλλον για τα καινούρια συμβατικά οχήματα (όπως π.χ. το Euro 7), καθώς και τα κίνητρα που θα δοθούν στο μέλλον για την απόκτηση ενός BEV, και συγκεκριμένα ενός FCEV για τα πλαίσια αυτής της εργασίας, οι εκτιμήσεις για τους μελλοντικούς αέριους ρύπους παρουσιάζουν αυξημένες τιμές σε σχέση με αυτές που αναμένονται στην πραγματικότητα.

Παρόλα αυτά, ακόμα και με αυξημένες τιμές παρατηρείται στους Πίνακες 15-19 ότι οι μειώσεις παραμένουν σε πολύ χαμηλά ποσοστά ακόμα, αντίστοιχα χαμηλά με τον αριθμό των νέων FCEV σε σχέση με τον συνολικό στόλο επιβατικών οχημάτων στην Ελλάδα.

Στο σημείο αυτό θα ήταν αξιόλογο να πραγματοποιηθεί μία ανάλυση που θα αφορά τη ζήτηση της ποσότητας υδρογόνου σε τόνους για το σύνολο των υδρογονοκίνητων οχημάτων για κάθε σενάριο υπολογισμού ξεχωριστά καθώς και την αντιστοιχία σε απαιτούμενες μονάδες ηλεκτρόλυσης νερού για την παραγωγή του υδρογόνου ως καύσιμο. Αξίζει να αναφερθεί το ευρωπαϊκό έργο “Ephya” (Δεληγιάννης, 2023) του οποίου συντονιστής είναι η εταιρεία Motor Oil για την παραγωγή «πράσινου» υδρογόνου μέχρι το 2026, στο οποίο συμμετέχουν συνολικά 10 εταίροι από επτά ευρωπαϊκές χώρες. Στο πλαίσιο του έργου, θα εγκατασταθεί μία μονάδα ηλεκτρόλυσης ισχύος 30 MW, η οποία θα εξασφαλίζει σε ετήσια βάση 4.500 τόνους ανανεώσιμου καυσίμου. Αντίστοιχα υπολογίζεται ότι μία μονάδα ηλεκτρόλυσης ισχύος 2 MW για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου (με CF=80%, B.A.=70%, κατώτερη θερμογόνος δύναμη  $H_2=120\text{MJ/kg}$ ) θα εξασφαλίζει σε ετήσια βάση 300 τόνους ανανεώσιμου καυσίμου.

Στον Πίνακα 20, πραγματοποιείται η πρόβλεψη της ζήτησης για υδρογόνο και των αντίστοιχων απαιτούμενων μονάδων ηλεκτρόλυσης (2 MW) για τα 4 διαφορετικά σενάρια διείσδυσης, με δεδομένο ότι ένα τυπικό υδρογονοκίνητο όχημα έχει

χωρητικότητα δεξαμενής καυσίμου 5 kg, αυτονομία καυσίμου 600 km καθώς και 15.000 ετήσια διανυόμενα χιλιόμετρα. Έτσι, υπολογίζεται η απαιτούμενη ποσότητα καυσίμου/υδρογόνου για ένα έτος ίση με 125 kg.

Έτος	Σύνολο FCEV (Σ1)	Σύνολο FCEV (Σ2)	Σύνολο FCEV (Σ3)	Σύνολο FCEV (Σ4)	Ζήτηση ποσότητας H2 (tn) (Σ1)	Ζήτηση ποσότητας H2 (tn) (Σ2)	Ζήτηση ποσότητας H2 (tn) (Σ3)	Ζήτηση ποσότητας H2 (tn) (Σ4)	Απαιτούμενες μονάδες ηλεκτρολύσεως (2MW) (Σ1)	Απαιτούμενες μονάδες ηλεκτρολύσεως (2MW) (Σ2)	Απαιτούμενες μονάδες ηλεκτρολύσεως (2MW) (Σ3)	Απαιτούμενες μονάδες ηλεκτρολύσεως (2MW) (Σ4)
2020	-	-	-	-								
2024	18.608	27.912	46.519	93.039	2.326	3.489	5.815	11.630	8	12	19	39
2030	41.081	61.622	102.703	205.407	5.135	7.703	12.838	25.676	17	26	43	86
2035	172.591	193.131	234.213	336.916	21.574	24.141	29.277	42.115	72	80	98	140
2050	383.392	403.933	445.014	547.718	47.924	50.492	55.627	68.465	160	168	185	228

Πίνακας 20: Πρόβλεψη ζήτησης H2 και απαιτούμενων μονάδων ηλεκτρολύσεως για τα 4 διαφορετικά σενάρια διεξόδου.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 20, στο πιο αισιόδοξο σενάριο (Σ4), το 2050, όπου τα μισά αυτοκίνητα της αγοράς θα είναι κυβελών καυσίμου η ετήσια ποσότητα υδρογόνου που θα απαιτείται συνολικά θα είναι ίση με 68.465 τόνους. Αυτή η ποσότητα αντιστοιχεί σε 228 μονάδες ηλεκτρολύσεως 2 MW για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου.

Εν κατακλείδι, για να προκύψουν μειώσεις των ατμοσφαιρικών ρύπων από τα οχήματα, θα πρέπει πέρα από τα μέτρα της Ε.Ε. και των κρατών μελών της, όπως π.χ. την αδυναμία αγοράς αυτοκινήτων μη μηδενικών ρύπων μετά το 2035 και την φορολόγηση των οχημάτων ανάλογα με τους ρύπους που εκπέμπουν, να δοθούν τα κατάλληλα κίνητρα στους πολίτες ώστε να γίνει μια ριζική ανανέωση του στόλου των οχημάτων μέχρι το 2030 αν θέλουμε να επιτύχουμε τους στόχους που έχουν θεσπιστεί για μειώσεις κατά 55%.

Αυτό απαιτεί εισροή μεγάλων επενδυτικών κεφαλαίων για την ανάπτυξη δικτύου ανεφοδιασμού BEV και FCEV, τόσο με σταθμούς ταχείας φόρτισης για τα ηλεκτροκίνητα οχήματα όσο και με σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου για τα FCEV. Για παράδειγμα, το ύψος επένδυσης που απαιτείται για την κατασκευή ενός μόνο σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου για επιβατικά οχήματα και φορτηγά ανέρχεται στα 1,4 εκατομμύρια δολάρια για την περίπτωση συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου και στα 1,9 – 4,2 για υδρογόνο σε υγρή μορφή κάτω από κρυογονικές συνθήκες (Koleva, 2020).

Ανάγοντας αυτό το κόστος στα 5.566 πρατήρια υγρών καυσίμων που λειτουργούν στην Ελλάδα, φαίνεται ότι το συνολικό ύψος της επένδυσης για τη δημιουργία ή και την ανακατασκευή των υπαρχόντων πρατηρίων ώστε να μπορούν να τροφοδοτήσουν οχήματα με υδρογόνο ανέρχεται περίπου στα 8 δις ευρώ για συμπιεσμένο υδρογόνο και από 10 έως 23 δις για υγρό υδρογόνο.

Φυσικά, το επενδυτικό κόστος εκτοξεύεται σε ακόμα μεγαλύτερα νούμερα αν προσθέσουμε και τις επενδύσεις για την ανάπτυξη υποδομών αποθήκευσης, μεταφοράς και παραγωγής υδρογόνου που είναι αναγκαίες να γίνουν για να υποστηρίξουν την μετάβαση από τα ICEV στα BEV και στα FCEV.

Ενδεικτικά, και με τα στοιχεία τα οποία είναι διαθέσιμα, στον Πίνακα 21 γίνεται μία πρόβλεψη του αριθμού των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου για τα 4 διαφορετικά σενάρια διείσδυσης σε αναλογία των 5.566 πρατηρίων υγρών καυσίμων που λειτουργούν στην Ελλάδα για την παροχή βενζίνης και πετρελαίου κίνησης.

Έτος	Σύνολο FCEV (Σ1)	Σύνολο FCEV (Σ2)	Σύνολο FCEV (Σ3)	Σύνολο FCEV (Σ4)	Απαιτούμενοι σταθμοί ανεφοδιασμού H2 (Σ1)	Απαιτούμενοι σταθμοί ανεφοδιασμού H2 (Σ2)	Απαιτούμενοι σταθμοί ανεφοδιασμού H2 (Σ3)	Απαιτούμενοι σταθμοί ανεφοδιασμού H2 (Σ4)
2020	-	-	-	-	-	-	-	-
2024	18.608	27.912	46.519	93.039	18	28	46	92
2030	41.081	61.622	102.703	205.407	41	61	102	204
2035	172.591	193.131	234.213	336.916	172	192	233	335
2050	383.392	403.933	445.014	547.718	381	401	442	544

Πίνακας 21: Πρόβλεψη σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου για τα 4 διαφορετικά σενάρια διείσδυσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Το υδρογόνο είναι ένας φορέας ενέργειας που μπορεί να μετατρέψει την οικονομία μας που εξαρτάται από τα ορυκτά καύσιμα σε μια οικονομία υδρογόνου, η οποία μπορεί να παρέχει ένα καύσιμο μεταφοράς χωρίς εκπομπές. Το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε εσωτερικής καύσης κινητήρες ή κυψέλες καυσίμου που δεν παράγουν σχεδόν καθόλου εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά την καύση με οξυγόνο. Η μόνη σημαντική εκπομπή είναι υδρατμοί.

Η αντιμετώπιση του προβλήματος της κλιματικής αλλαγής βρίσκεται ψηλά στην πολιτική ατζέντα της διεθνούς κοινότητας, η οποία έχει θέσει ως στόχο την απαλλαγή της από τα ορυκτά καύσιμα η επεξεργασία των οποίων συμβάλλει σε αυτό το πρόβλημα. Οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που παράγονται από τον τομέα των οδικών μεταφορών (εμπορευματικών και επιβατικών) συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό στο πρόβλημα της υπερθέρμανσης του πλανήτη. Για αυτόν τον λόγο η παγκόσμια κοινότητα στρέφει την προσοχή της στη χρήση εναλλακτικών καυσίμων.

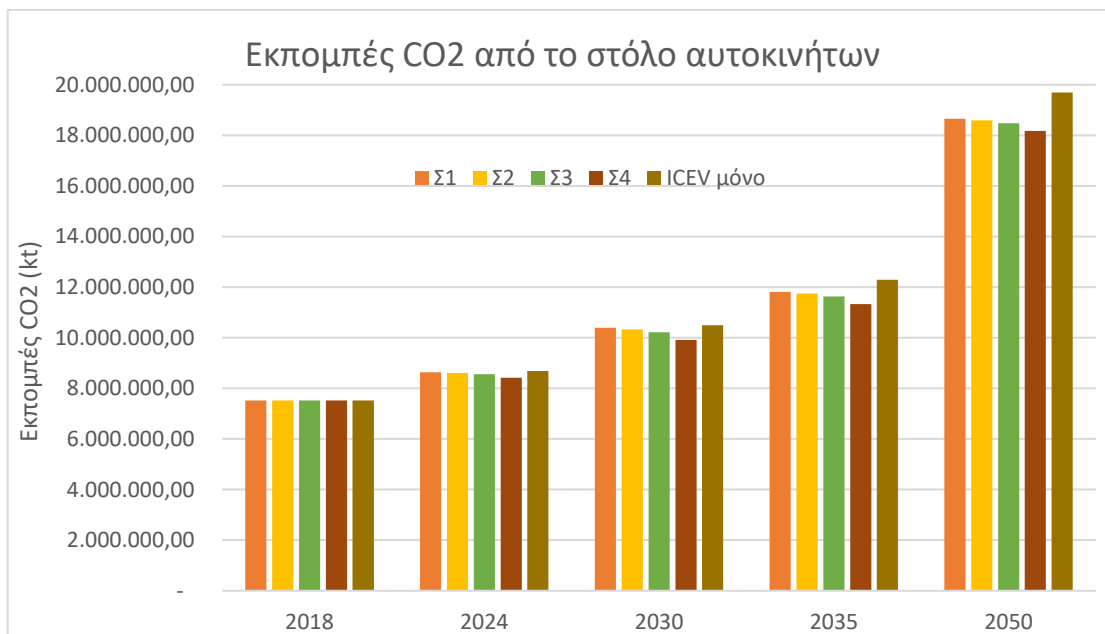
Η διείσδυση των νέων τεχνολογιών στα οχήματα που αποσκοπούν στη μηδενική εκπομπή ρύπων αποτελεί μονόδρομο στην προσπάθεια που γίνεται σε παγκόσμιο επίπεδο για τη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος μας. Δεδομένου ότι οι εκπομπές από τις οδικές μεταφορές αποτελούν την κατηγορία των μεταφορών με το υψηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα της τάξης του 73,1% σε σύγκριση με τις υπόλοιπες, η ανανέωση του στόλου των οχημάτων με οχήματα μηδενικών ρύπων είναι επιτακτική.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν διάφορα σενάρια με ποσοστά διείσδυσης των ηλεκτρικών και υδρογονοκίνητων οχημάτων στον τομέα των οδικών μεταφορών. Πιο συγκεκριμένα, στο Σενάριο 1 τα BEV και FCEV λαμβάνουν κομμάτι της αγοράς ίσο με 10% αντίστοιχα, στο Σενάριο 2 με 15% αντίστοιχα, στο Σενάριο 3 με 25% αντίστοιχα ενώ στο Σενάριο 4 όλα τα νέα οχήματα στην αγορά είναι ηλεκτρικά και υδρογονοκίνητα με ποσοστό 50% αντίστοιχα.

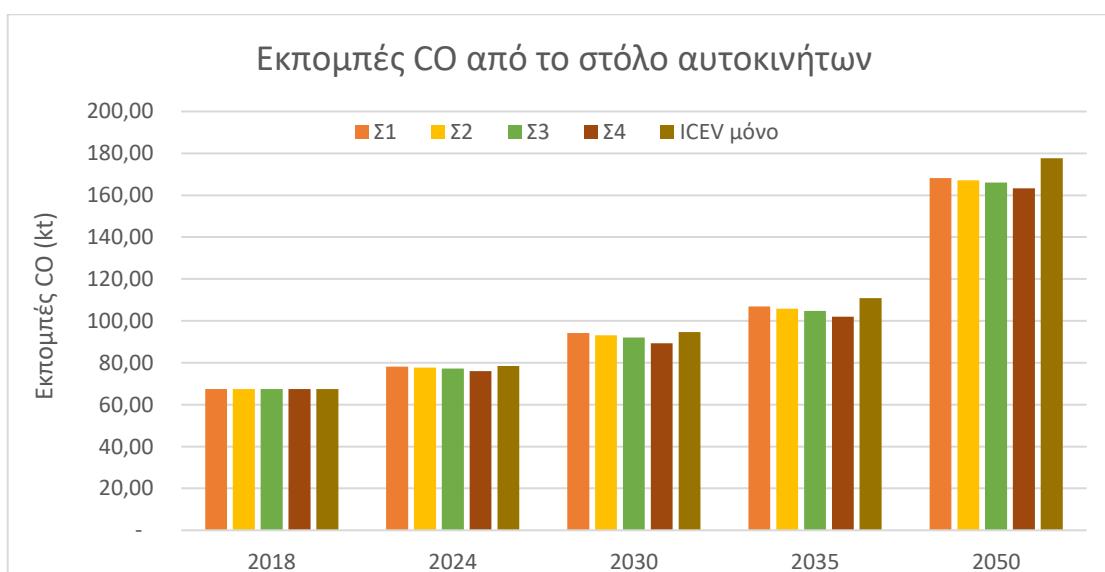
Αναλυτικότερα, και με βάση όσα αναλύθηκαν στο Κεφάλαιο 5, καταλήγουμε στο συμπέρασμα πως, τα επόμενα χρόνια, με τη διείσδυση των BEV και των FCEV στις οδικές μεταφορές θα μειωθούν οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), μονοξειδίου του άνθρακα (CO), οξειδίων του αζώτου (NO<sub>x</sub>) και στερεών σωματιδίων. Αυτό απεικονίζεται γραφικά στη συνέχεια (Εικόνα 17-20).



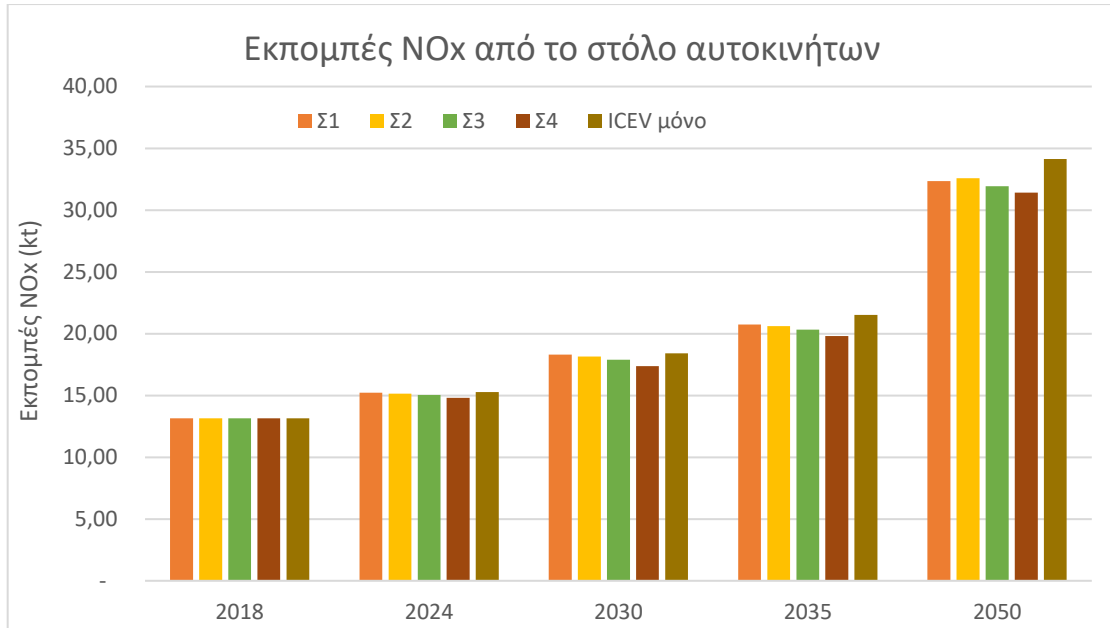
Τέλος, κάνοντας μία σύγκριση του κόστους μετακίνησης των συμβατικών – ηλεκτρικών – υδρογονοκίνητων αυτοκινήτων, φαίνεται πως το οικονομικότερο είναι το ηλεκτρικό όχημα με **3,05 €/100 χιλιόμετρα** με βάση το νυχτερινό τιμολόγιο της ΔΕΗ (0,13€/kWh) και με κατανάλωση 15 kWh/100 χλμ. Το αμέσως οικονομικότερο είναι το υδρογονοκίνητο όχημα με **10,70 €/100 χιλιόμετρα** και έπειτα το πετρελαιοκίνητο και το βενζινοκίνητο με **11,90 €/100 χιλιόμετρα** και **14,40 €/100 χιλιόμετρα** αντίστοιχα.



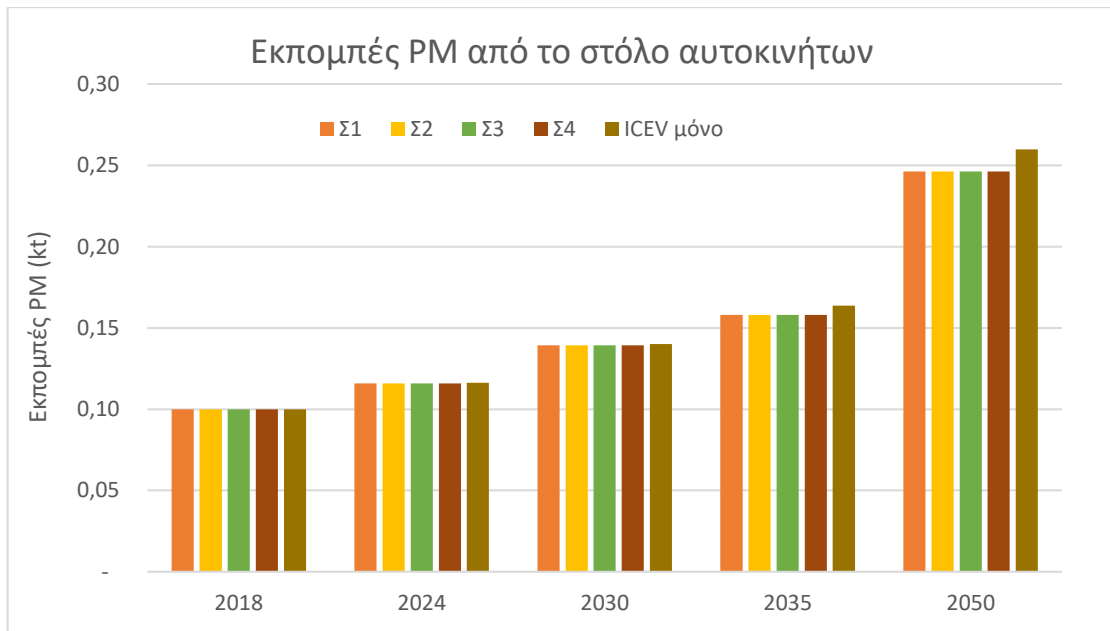
Εικόνα 17: Πρόβλεψη των εκπομπών CO<sub>2</sub> για τα 4 διαφορετικά σενάρια διεύθυνσης και μόνο για ICEV.



Εικόνα 18: Πρόβλεψη των εκπομπών CO για τα 4 διαφορετικά σενάρια διεύθυνσης και μόνο για ICEV.



Εικόνα 19: Πρόβλεψη των εκπομπών NOx για τα 4 διαφορετικά σενάρια διείσδυσης και μόνο για ICEV.



Εικόνα 20: Πρόβλεψη των εκπομπών PM για τα 4 διαφορετικά σενάρια διείσδυσης και μόνο για ICEV.

Εν συνεχεία της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας δύναται να πραγματοποιηθεί περαιτέρω έρευνα όσον αφορά τα παρακάτω ερωτήματα:

- Υπάρχουν κανονιστικά ή πολιτικά εμπόδια που δυσκολεύουν την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας καυσίμου υδρογόνου στον τομέα των οδικών μεταφορών;
- Πώς μπορεί να βελτιστοποιηθεί η αλυσίδα εφοδιασμού υδρογόνου ώστε να διασφαλιστεί η αξιόπιστη και οικονομικά αποδοτική διανομή καυσίμων;
- Ποιοι τύποι οχημάτων (π.χ. επιβατικά αυτοκίνητα, φορτηγά, λεωφορεία) είναι καταλληλότεροι για το υδρογόνο ως καύσιμο;
- Ποιοι μηχανισμοί πολιτικής (π.χ. επιδοτήσεις, τιμολόγηση άνθρακα) είναι πιο αποτελεσματικοί για την προώθηση της υιοθέτησης της τεχνολογίας καυσίμων υδρογόνου στον τομέα των οδικών μεταφορών;

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- (2020). *A Hydrogen Strategy*. European Commission.
- ACEA. (2022). *VEHICLES IN USE EUROPE* .
- Agaton, C. B. (2022). *Prospects and challenges for green hydrogen production and utilization in the Philippines*.
- Anna Creti, A. K.-P. (2015). *A cost benefit analysis of fuel cell electric vehicles*.
- (2021). *Assessment of Hydrogen Delivery Options*. European Commission.
- Bauer, C. (2022). *On the climate impacts of blue hydrogen production*.
- Brändle, G. (2021). *Estimating long-term global supply costs for low-carbon hydrogen*.
- Bridgwater, A. (2012). *Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading*.
- Cardino. (2023). What's the Consumption of an Electric Car? Measuring and Managing Energy.
- Chen, P. (2017). *Hydrogen storage: recent improvements and perspectives*.
- Chen, Z. (2021). *Perspectives and challenges of hydrogen storage in solid-state hydrides*.
- Company, H. &. (2022). *HOW MANY CARS ARE THERE IN THE WORLD IN 2023?*
- Di Li, J. T. (2023). Recent advances in hybrid water electrolysis for energy-saving hydrogen production. *Green Chemical Engineering*, 17-29.
- Eben Kohn, C. H. (2022). *Electric Vehicle Incentives in 15 Leading*.
- Eleonora Ruffini, M. W. (2018). *Future costs of fuel cell electric vehicles in California using a learning rate approach*.
- Energy Environment Agency. (2023). Ανάκτηση από Road transport: <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/road-transport>
- Energy, U. D. (2015). Ανάκτηση από [energy.gov](https://www.energy.gov/articles/history-electric-car): <https://www.energy.gov/articles/history-electric-car>
- (2022). *Global Hydrogen review* . International Energy Agency.
- (2021). *Green Hydrogen Cost Development report*. Statista.
- Han Hao, X. C. (2017). *Electric vehicles for greenhouse gas reduction in China: A cost-effectiveness analysis*.
- Hao Song, G. Y. (2022). *Recent development of biomass gasification for H<sub>2</sub> rich gas production*.

- hedgescompany. (2024). *HOW MANY CARS ARE THERE IN THE WORLD IN 2024?*  
Ανάκτηση από <https://hedgescompany.com/blog/2021/06/how-many-cars-are-there-in-the-world/>
- (2022). *Hydrogen Transport-Ammonia Cracking*. CLARIANT.
- IEA. (2022). *Global Hydrogen review*. International Energy Agency.
- International Energy Agency. (2019). Ανάκτηση από *The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities.*: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- International Energy Agency. (2021). *Global Hydrogen Review*.
- IPCC. (2014). *Synthesis Report: Climate Change 2014*.
- Jesus Ochoa Robles a, C. A.-P. (2020). *Social cost-benefit assessment as a post-optimal analysis for hydrogen supply chain design and deployment: Application to Occitania (France)*.
- Katebah, M. (2022). *Analysis of hydrogen production costs in Steam-Methane Reforming considering integration with electrolysis and CO2 capture*.
- Koleva, M. a. (2020). *Hydrogen Fueling Stations Cost*.
- Krishna, G. (2021). *Understanding and identifying barriers to electric vehicle adoption through thematic analysis*.
- Lenntech. (2008). *Chemical properties of hydrogen*. Ανάκτηση από <https://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>
- Lysenko, S. (2012). *Comparison of the cost of hydrogen from air-blown and thermally ballasted gasifiers*.
- M. Weiss, A. Z. (2019). *Fully electric and plug-in hybrid cars - An analysis of learning rates, user costs, and costs for mitigating CO2 and air pollutant emissions*.
- Mao, Y. (2020). *Hydrogen production via a two-step water splitting thermochemical cycle based on metal oxide – A review*.
- Massarweh, O. (2023). *Blue hydrogen production from natural gas reservoirs: A review of application and feasibility*.
- ORTIZ CEBOLLA, D. W. (2022). *Assessment of hydrogen delivery options*. Publications Office of the European Union.
- (2020). *Path to hydrogen competitiveness, A cost perspective*. Hydrogen Council.
- Petitpas, G. (2018). *Liquid Hydrogen Infrastructure Analysis*.
- (2021). *Pure Hydrogen provides details of the order of Seven*. ASX Announcement.
- Remzi Can Samsun, L. A. (2022). *Deployment Status of Fuel Cells in Road Transport.*
- Reuß, M. (2021). *Hydrogen Road Transport Analysis in the Energy System: A Case Study for Germany through 2050*.

- Robert Hren, A. V. (2023). Hydrogen production, storage and transport for renewable energy and. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Robinius, M. (2017). *Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model*.
- Rosenberg, T. T. (2022). *TOTAL COST OF*. WASHINGTON, USA: ATLAS PUBLIC POLICY.
- Sanguesa, T.-S. G. (2021). *A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges*.
- Selmi, T. A. (2022). *Fuel Cell-Based Electric Vehicles Technologies and Challenges*. Environmental Science and Pollution Research .
- statista. (2022). Ανάκτηση από Number of hydrogen fueling stations for road vehicles worldwide as of 2022, by country: <https://www.statista.com/statistics/1026719/number-of-hydrogen-fuel-stations-by-country/>
- T. Miyagawa, M. G. (2022). *Hydrogen Production Cost Forecasts since the 1970s and Implications for Technological Development*.
- T. Notteboomm, H. H. (2023). *Seaports as green hydrogen hubs: advances, opportunities and challenges in Europe*.
- Wang, B. Y. (2019). *Carbon-based materials for hydrogen storage: Recent advances and future prospects*.
- Wlodek, T. (2019). *Thermodynamic and Technical Issues of Hydrogen and Methane-Hydrogen Mixtures Pipeline Transmission*.
- Yanfei Li, S. K. (2021). *Economic competitiveness and environmental implications of hydrogen energy and fuel cell electric vehicles in ASEAN countries: The current and future scenarios*.
- Yang, J. S. (2018). *Chemical hydrogen storage materials*.
- Zhao, X. (2015). *The economic competitiveness and emissions of battery electric vehicles in China*.
- ΔΑΠΕΕΠ. (2023). *ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΜΕΙΓΜΑ 2022. ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΤΗΣ ΑΠΕ & ΕΓΓΥΗΣΕΩΝ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ*.
- ΔΕΗ. (2023). Ανάκτηση από <https://www.dei.gr/el/gia-to-spiti/revma/>
- Δεληγιάννης, Κ. (2023). Παραγωγή «πράσινου» υδρογόνου από το 2026 στο διυλιστήριο της Motor Oil. Ανάκτηση από <https://www.insider.gr/epiheiriseis/291309/paragogi-prasinoy-ydrogonoy-apo-2026-sto-diylistirio-tis-motor-oil>
- ΙΔΡΥΜΑ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ & ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΕΥΝΩΝ (Ι.Ο.Β.Ε.). (2022). *Συγκεντρωτικά Στοιχεία και Αριθμοδείκτες*.

ΜΑΝΙΩΤΗΣ, Γ. (2021). *Καταγραφή στόλου οχημάτων στην Αττική και η συμβολή τους στην ατμοσφαιρική ρύπανση.*

ΥΠΕΚΑ. (2020). *NATIONAL INVENTORY REPORT OF GREECE FOR GREENHOUSE AND.* Ανάκτηση από [https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2020/11/2020\\_NIR\\_Greece.pdf](https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2020/11/2020_NIR_Greece.pdf)

Φραντζής, Δ. (2022). *ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΚΑΙ Η ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ.*