



ΔΙΕΘΝΕΣ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΤΗΣ ΕΛΛΑΔΟΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

**ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΕΣ ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ
ΚΑΙ ΧΡΗΣΗ ΣΤΗΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΣΗ**

ΓΙΑΝΝΟΥΔΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ

ΑΜ:39

ΌΝΟΜΑ ΕΠΙΒΛΕΠΟΝΤΟΣ: ΤΣΟΧΑΤΖΙΔΗΣ ΝΙΚΟΛΑΟΣ

2023

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία αναλύει τον ρόλο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ειδικότερα εστιάζει στην χρήση του υδρογόνου ως καύσιμου στα οχήματα. Στο πρώτο κεφάλαιο, παρουσιάζονται οι διάφοροι τύποι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή, η αιολική και η ενέργεια βιομάζας, εξετάζοντας επίσης την επίδρασή τους στην οικονομία και την πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Επιπλέον, αναλύεται η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε θέρμανση, ψύξη και μεταφορικές δραστηριότητες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εξετάζεται η χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου σε οχήματα. Παρουσιάζονται ζητήματα και προβληματισμοί σχετικά με τα καύσιμα των σημερινών οχημάτων, ενώ αναλύονται τα κίνητρα που ωθούν στην υιοθέτηση της ενέργειας υδρογόνου. Επιπλέον, γίνεται σύγκριση μεταξύ ηλεκτροκίνητων οχημάτων με μπαταρία και υβριδικών ηλεκτροκίνητων οχημάτων που χρησιμοποιούν υδρογόνο, καθώς και η αξιοπιστία του υδρογόνου ως καυσίμου για μεταφορικά μέσα.

Το τρίτο κεφάλαιο εξετάζει το μέλλον των κυψελών υδρογόνου στις μεταφορές, εστιάζοντας στις μορφές αποθήκευσης του υδρογόνου. Περιλαμβάνει ανάλυση της αποθήκευσης υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου (FCV), αποθήκευσης υπό πίεση, καθήλωσης σε ενώσεις με μέταλλα και αποθήκευσης υγρού υδρογόνου μέσω κρυογονικής.

Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει τους διάφορους τύπους κυψελών καυσίμου, όπως οι κυψέλες στερεών οξειδίων (SOFC), κυψέλες άμεσης μεθανόλης (DMFC), κυψέλες φωσφορικού οξέος (PAFC) και κυψέλες με μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC), αναδεικνύοντας τα χαρακτηριστικά και τις εφαρμογές τους.

Τέλος, το πέμπτο κεφάλαιο παρέχει συμπεράσματα και παρατηρήσεις για την εξεταζόμενη θεματολογία, ενώ παραθέτει βιβλιογραφικές αναφορές για περαιτέρω μελέτη και έρευνα στον τομέα. Η εργασία αυτή αποτελεί σημαντική συνεισφορά στην κατανόηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της χρήσης του υδρογόνου ως καυσίμου στον τομέα των μεταφορών.

Λέξεις κλειδιά: ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, υδρογόνο, οχήματα με κυψέλες υδρογόνου

ABSTRACT

The present study examines the role of renewable energy sources, with a specific focus on the utilization of hydrogen as a fuel for vehicles. In the first chapter, various types of renewable energy sources are presented, including solar, wind, and biomass energy, while also exploring their impact on the economy and the policies of the European Union. Additionally, the use of renewable energy sources in heating, cooling, and transportation activities is analyzed.

The second chapter investigates the use of hydrogen as a fuel in vehicles. It addresses issues and concerns related to the fuels used in current vehicles, and it delves into the motivations driving the adoption of hydrogen energy. Furthermore, a comparison is drawn between battery-powered electric vehicles and hybrid electric vehicles utilizing hydrogen, along with an assessment of the reliability of hydrogen as a transportation fuel.

Chapter three examines the future prospects of hydrogen fuel cells in transportation, focusing on various forms of hydrogen storage. This includes an analysis of hydrogen storage in fuel cells (FCVs), high-pressure storage, hydrogen adsorption in metal compounds, and the storage of liquid hydrogen through cryogenic methods.

The fourth chapter introduces different types of fuel cells, such as solid oxide fuel cells (SOFC), direct methanol fuel cells (DMFC), phosphoric acid fuel cells (PAFC), and polymer electrolyte membrane fuel cells (PEMFC), highlighting their characteristics and applications.

Finally, the fifth chapter provides conclusions and observations on the discussed themes, accompanied by bibliographical references for further study and research in the field. This work constitutes a significant contribution to the understanding of renewable energy sources and the utilization of hydrogen as a fuel in the transportation sector.

Keywords: renewable energy sources, hydrogen, hydrogen fuel cell vehicles

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο : ΤΥΠΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ.....	8
1.1 Εισαγωγή στις ΑΠΕ.....	8
1.2 Ηλιακή ενέργεια	10
1.3 Αιολική ενέργεια.....	14
1.4 Ενέργεια Βιομάζας.....	16
1.5 Η επίδραση των ΑΠΕ στην οικονομία	16
1.6 Η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις Α.Π.Ε.....	17
1.7 Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, και μεταφορικές δραστηριότητες.....	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο : ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΕ ΟΧΗΜΑΤΑ	26
2.1 Εισαγωγή.....	26
2.2 Ζητήματα και προβληματισμοί σχετικά με τα καύσιμα των σημερινών οχημάτων	30
2.3 Κίνητρα για την υιοθέτηση της ενέργειας υδρογόνου.....	35
2.4 Ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα με μπαταρία σε σύγκριση με υβριδικά ηλεκτροκίνητα που χρησιμοποιούν υδρογόνο	37
2.5 Το υδρογόνο ως καύσιμο για μεταφορικά μέσα.....	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ.....	43
3.1 Εισαγωγή.....	43
3.2 Μορφές αποθήκευσης υδρογόνου.....	45
3.2.1 Αποθήκευση υδρογόνου σε FCV	45
3.2.2 Αποθήκευση σε δεξαμενή υπό πίεση	46
3.2.3 Καθήλωση υδρογόνου σε ενώσεις με βάση τα μέταλλα	46
3.2.4 Αποθήκευση υγρού υδρογόνου μέσω κρυογονικής	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ	47
4.1 Τύποι κυψελών καυσίμου.....	47
4.2 Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC).....	49
4.3 Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)	50
4.4 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC).....	51

4.5 Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC)	51
4.6 Μοναδιαία αναστρέψιμη κυψέλη καυσίμου.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ	53
Βιβλιογραφικές αναφορές	55

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που παρέχει ο ήλιος σε σύγκριση με την καταναλισκόμενη ενέργεια στη γη σε ένα χρόνο από διάφορες πηγές (European Photovoltaic Industry Association, EPIA).....	13
Εικόνα 2: Δημιουργία ρεύματος μεταξύ των δύο στρώσεων ημιαγωγικών υλικών σε φωτοβολταϊκά κύτταρα.	14
Εικόνα 3: Ένα τυπικό αιολικό πάρκο (http://stopmagneticgenerator.com).....	15
Σχήμα 1: Συνολικό μερίδιο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ανανεώσιμων πηγών στην Ε.Ε., το 2018 (%) [2].....	21
Σχήμα 2: Συνολικό μερίδιο κατανάλωσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών στην Ε.Ε. για θέρμανση και ψύξη, 2018 (%) [24]	22
Σχήμα 3: Μερίδιο κατανάλωσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών στην Ε.Ε. και στην Ελλάδα για θέρμανση και ψύξη, 2010-2018 (%) [24]	23
Σχήμα 4: Μερίδιο χρήσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών στις μεταφορές στην Ε.Ε., 2018 (%) [25]	24
Σχήμα 5: Μερίδιο χρήσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών στις μεταφορές στην Ε.Ε.....	25
Εικόνα 4: Ενσωμάτωση κυψελών υδρογόνου σε όχημα (Πηγή: afdc.energy.gov).....	40
Εικόνα 5: Όχημα με κυψέλες υδρογόνου (Πηγή: www.toyota.com).....	41
Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μίας κυψέλης υδρογόνου (Πηγή: Μπομπολάκη, 2015)	48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο: ΤΥΠΟΙ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

1.1 Εισαγωγή στις ΑΠΕ

Η ταχεία αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας, ιδιαίτερα τις τελευταίες δεκαετίες, δημιούργησε φόβους εξάντλησης των αποθεμάτων πετρελαίου και άλλων πόρων του πλανήτη στο εγγύς μέλλον. Η τεράστια κατανάλωση ορυκτών καυσίμων έχει προκαλέσει ορατές βλάβες στο περιβάλλον υπό διάφορες μορφές. Περίπου το 90% της καταναλισκόμενης ενέργειας προέρχεται από ορυκτά καύσιμα. Λόγω της εκβιομηχάνισης και της αύξησης του πληθυσμού, η οικονομία και οι τεχνολογίες σήμερα εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από φυσικούς πόρους, οι οποίοι δεν μπορούν να αντικατασταθούν [1].

Τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι μέρος των ανανεώσιμων πηγών, δηλαδή αντλούνται και έχουν πεπερασμένους πόρους που τελικά θα μειωθούν, θα γίνουν υπερβολικά δαπανηροί ή πολύ επιβλαβείς για το περιβάλλον. Κάθε χρόνο, η ανθρώπινη δραστηριότητα μεταφέρει περίπου 8 δισεκατομμύρια τόνους άνθρακα στην ατμόσφαιρα, 6,5 δισεκατομμύρια τόνους από ορυκτά καύσιμα και 1,5 δισεκατομμύρια από την αποδάσωση. Η τεράστια κατανάλωση ορυκτών καυσίμων έχει προκαλέσει ορατές βλάβες στο περιβάλλον υπό διάφορες μορφές. Δημιουργεί πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα και έχει επηρεαστεί συνολικά ο οικολογικός κύκλος [2]. Η ενεργειακή βιομηχανία πρέπει να επωφεληθεί περισσότερο από τα υπάρχοντα πεδία έρευνας για την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων, ενώ συνεχίζει να αναζητά νέα μέσα. Επίσης, απαιτούνται βελτιώσεις ώστε οι αιολικοί, ηλιακοί και υδροκίνητοι μετατροπείς να παίζουν πιο σημαντικό ρόλο στον ενεργειακό τομέα. Οι πολλοί τύποι ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, ανανεώνονται συνεχώς και ποτέ δεν θα εξαντληθούν, γεγονός που αποτελεί ένα όφελος. Οι περισσότερες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προέρχονται είτε άμεσα είτε έμμεσα από τον ήλιο

[3,4]. Το ηλιακό φως ή η ηλιακή ενέργεια μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατευθείαν για τη θέρμανση και το φωτισμό σπιτιών και άλλων κτιρίων, για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και για θέρμανση ζεστού νερού, την ηλιακή ψύξη και έχει διάφορες εμπορικές και βιομηχανικές χρήσεις [5].

Το άλλο πλεονέκτημα που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές είναι ότι διανέμονται σε μεγάλο γεωγραφικό εύρος, διασφαλίζοντας ότι οι αναπτυσσόμενες περιφερειακές περιοχές έχουν πρόσβαση στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με σταθερό κόστος για το μακροπρόθεσμο μέλλον. Η θερμότητα του ήλιου οδηγεί επίσης στους ανέμους, των οποίων η ενέργεια, συλλαμβάνεται με ανεμογεννήτριες. Στη συνέχεια, οι άνεμοι και η θερμότητα του ήλιου προκαλούν την εξάτμιση του νερού. Όταν οι υδρατμοί μετατρέπονται σε βροχή ή χιόνι και ρέουν προς τα κάτω σε ποτάμια ή ρέματα, η ενέργεια τους μπορεί να συλληφθεί χρησιμοποιώντας υδροηλεκτρική ενέργεια.

Τα παραπάνω φαινόμενα οδηγούν στην ανάπτυξη φυτών. Η οργανική ύλη που συλλέγεται από αυτά τα φυτά είναι γνωστή ως βιομάζα. Η βιομάζα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καυσίμων μεταφοράς ή χημικών ουσιών. Η χρήση της βιομάζας για οποιονδήποτε από αυτούς τους σκοπούς ονομάζεται βιοενέργεια.

Δεν είναι όμως όλες οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από τον ήλιο. Η γεωθερμική ενέργεια χρησιμοποιεί την εσωτερική θερμότητα της Γης για ποικίλες χρήσεις, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και της θέρμανσης και ψύξης των κτιρίων. Και η ενέργεια από των παλίρροια των ωκεανών προέρχεται από την βαρυτική έλξη του φεγγαριού και του ήλιου πάνω στη Γη. Στην πραγματικότητα, η ενέργεια των ωκεανών προέρχεται από διάφορες πηγές. Εκτός από την παλιρροιακή ενέργεια, υπάρχει η ενέργεια των κυμάτων του ωκεανού, τα οποία κινούνται τόσο από τις παλίρροιας όσο και από τους ανέμους. Ο ήλιος θερμαίνει επίσης την επιφάνεια του ωκεανού περισσότερο από τα βάθη των ωκεανών, δημιουργώντας μια διαφορά θερμοκρασίας που

μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πηγή ενέργειας. Όλες αυτές οι μορφές ενέργειας των ωκεανών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρισμού.

Οι τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι καθαρές πηγές ενέργειας που έχουν πολύ μικρότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από τις συμβατικές τεχνολογίες ενέργειας [6].

1.2 Ηλιακή ενέργεια

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν εξαντλούνται και κατανέμονται σε μεγάλο εύρος γεωγραφικών περιοχών, ενώ οι πόροι αυτοί ανανεώνονται γρήγορα μέσω φυσικών διεργασιών. Δεν δημιουργεί προβλήματα ρύπανσης του περιβάλλοντος. Το κύριο πλεονέκτημα της χρήσης ανανεώσιμων πόρων είναι ότι είναι διαθέσιμοι καθ' όλη τη διάρκεια του έτους [7].

Η ηλιακή ενέργεια έχει τις μεγαλύτερες δυνατότητες για την παροχή καθαρής, ασφαλούς και αξιόπιστης ενέργειας. Η ηλιακή ενέργεια που πέφτει στις ηπείρους της Γης είναι πάνω από 200 φορές μεγαλύτερη της συνολικής ετήσιας εμπορικής ενέργειας που χρησιμοποιείται σήμερα από τον άνθρωπο. Ένας καταναλωτής που εγκαθιστά μια συστοιχία ηλιακών συλλεκτών σε ένα σπίτι μπορεί να πουλήσει την πλεονάζουσα ενέργεια στις τοπικές επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας ή στο κράτος, ανάλογα με το νομικό περιβάλλον [8].

Η χρήση της ηλιακής ενέργειας έχει αρχίσει να παίρνει τη θέση της σε όλο τον κόσμο στην αγορά ενέργειας, κυρίως λόγω της καθαρής από άποψη ρύπων ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει. Η εμπορική χρήση της ηλιακής ενέργειας είναι, δυστυχώς, ακόμη μάλλον μικρή, κυρίως λόγω των υψηλών τιμών και της χαμηλής απόδοσης σε σύγκριση με άλλες πηγές.

Υπάρχουν σημαντικά προβλήματα κόστους στην ηλιακή ενέργεια, που την εμποδίζουν να γίνει μια περισσότερο χρησιμοποιούμενη πηγή ενέργειας. Σημαντικός παράγοντας για τη μείωση του κόστους είναι η αναπτυξιακή διαδικασία. Η σχεδιαστική και αναπτυξιακή του διαδικασία, είναι το ταξίδι των προϊόντων από την ιδέα στο τελικό προϊόν. Αν η διαδικασία είναι προσαρμοσμένη στο προϊόν, μπορεί να συμβάλει στην ελαχιστοποίηση των ανεπιθύμητων επιδράσεων (κόστος) και στη μεγιστοποίηση των επιθυμητών αποτελεσμάτων (υψηλή ενεργειακή απόδοση) [9].

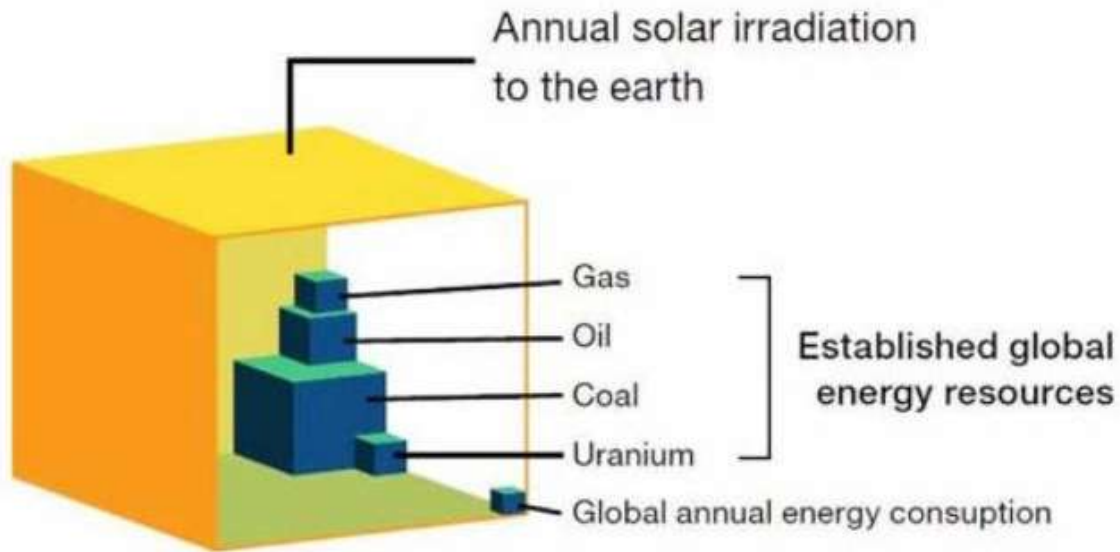
Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας που χρησιμοποιείται σήμερα προέρχεται από ορυκτά καύσιμα όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο. Οι πόροι αυτοί είναι περιορισμένοι και οι φυσικές προμήθειες της γης μειώνονται γρηγορότερα από την αναδημιουργία τους. Για να αποφευχθεί η αύξηση της αποστράγγισης των πόρων της γης και να ξεκινήσει μια αγορά για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή δημιούργησε την «οδηγία για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας». Η οδηγία αυτή προωθεί την αύξηση χρήσης των ανανεώσιμων πόρων όλων των χωρών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης, ώστε η κοινή χρήση στην Ένωση να ανέρχεται σε 20% έως το 2020. Ορισμένες από τις πηγές ενέργειας που μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια από ανανεώσιμες πηγές είναι η αιολική ενέργεια, η ενέργεια των κυμάτων, η χρήση των ηλιακών πάνελ κτλ [10].

Ο ήλιος παρέχει σταθερά στη γη ενέργεια με μορφή φωτός και θερμότητας. Οι ηλιακοί συλλέκτες μετατρέπουν το φως από τον ήλιο σε ηλεκτρική ενέργεια. Παρόλο που η έννοια των ηλιακών συλλεκτών υπήρχε για ένα μεγάλο διάστημα ως τώρα (ένα πρώιμο ηλιακό στοιχείο κατασκευάστηκε το 1955 στη Georgia των ΗΠΑ) η ανάπτυξη αποδοτικών ηλιακών συλλεκτών έγινε σχετικά πρόσφατα. Επίσης, υπάρχει σχετικά μικρή χρήση παγκοσμίως. Ένας λόγος για τη μικρή χρήση είναι ότι έχουν μάλλον χαμηλή απόδοση. Μια γενική εμπορική ηλιακή μονάδα έχει απόδοση 15%, σε σύγκριση με την αιολική ενέργεια όπου η

υψηλότερη θεωρητική απόδοση είναι 60%. Εκτός από το γεγονός της χαμηλής αποδοτικότητας υπάρχει και ο παράγοντας κόστους που αναφέρθηκε ήδη, δεδομένου ότι οι ηλιακοί συλλέκτες εξακολουθούν να είναι μάλλον ακριβοί σε σύγκριση με άλλες μορφές ενέργειας [11].

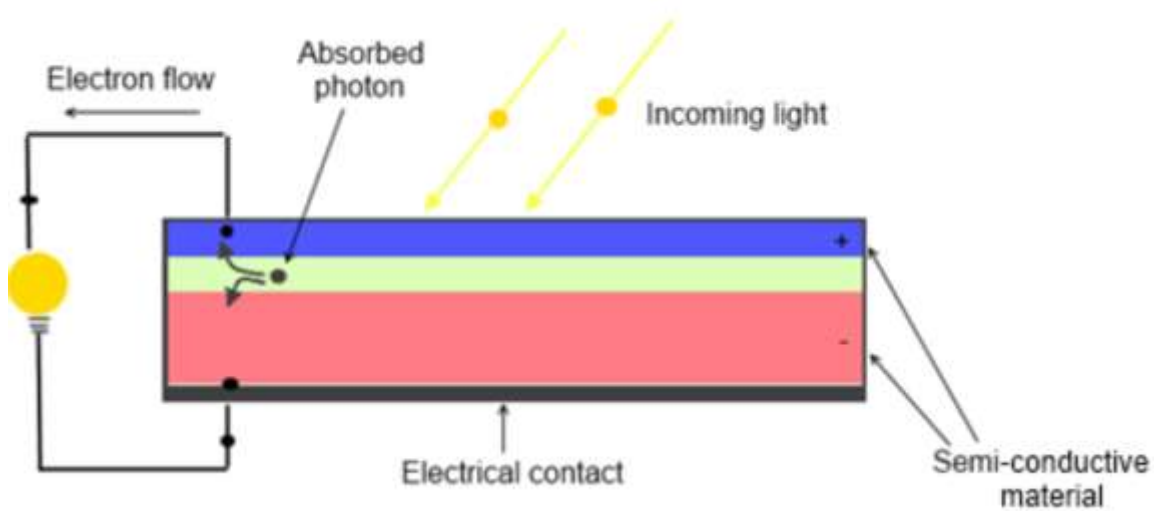
Η παραγωγή ενέργειας από τους ηλιακούς συλλέκτες παρουσιάζει ενδιαφέρον σήμερα λόγω μιας παγκόσμιας προσπάθειας να μειωθεί η χρήση των περιορισμένων ορυκτών πόρων, όπως το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, και να αυξηθεί η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι ηλιακοί συλλέκτες και η αιολική ενέργεια μεταξύ άλλων [12].

Η ηλιακή ενέργεια είναι η ενέργεια που παράγεται από την πυρηνική σύντηξη σε ένα αστέρι, στην περίπτωση μας τον ήλιο. Αυτή η ενέργεια ταξιδεύει μέσα από τα στρώματα του ήλιου μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια του ήλιου, όπου εκπέμπεται φως. Εμείς μπορούμε να αντλήσουμε με διάφορους τρόπους ενέργεια από αυτή που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, ένας από τους οποίους είναι η χρήση ηλιακών κυψελών. Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που παρέχει ο ήλιος σε σύγκριση με την καταναλισκόμενη ενέργεια στη γη σε ένα χρόνο απεικονίζεται στο Σχήμα 1. Το σχήμα δείχνει την πολύ υψηλή ηλιακή ακτινοβολία που θα έπρεπε να χρησιμοποιείται ως εναλλακτική μέθοδος για τα ορυκτά καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα [13].



Εικόνα 1: Η ποσότητα της ηλιακής ακτινοβολίας που παρέχει ο ήλιος σε σύγκριση με την καταναλισκόμενη ενέργεια στη γη σε ένα χρόνο από διάφορες πηγές (European Photovoltaic Industry Association, EPIA)

Για να παράγουμε ηλεκτρική ενέργεια από μια ακτινοβόλο πηγή χρησιμοποιούμε τη φωτοβολταϊκή τεχνολογία (ή τεχνολογία ΦΒ). Στην τεχνολογία ΦΒ χρησιμοποιείται ένα ημιαγωγικό υλικό με τρόπο που να απελευθερώνει ηλεκτρόνια. Το φως προσπίπτει σε ένα φωτοκύτταρο που έχει τουλάχιστον δύο στρώματα ημιαγωγούς, ένα με αρνητικό φορτίο και ένα με θετικό. Το ηλεκτρικό πεδίο διαμέσου της διασταύρωσης μεταξύ των στρώσεων προκαλεί ροή ηλεκτρικής ενέργειας και παράγεται συνεχές ρεύμα. Μια απεικόνιση της προκαλούμενης ροής ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των ημιαγωγών εμφανίζεται στο Σχήμα 2.



Εικόνα 2: Δημιουργία ρεύματος μεταξύ των δύο στρώσεων ημιαγωγίμων υλικών σε φωτοβολταϊκά κύτταρα

Τα φωτοβολταϊκά κύτταρα χρειάζονται φως για να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Δεν χρειάζεται όμως άμεσο ηλιακό φως, και μπορεί να λειτουργήσουν ακόμα και σε μια σχετικά σκοτεινή ή νεφελώδη ημέρα [14].

1.3 Αιολική ενέργεια

Ο άνεμος, οδηγούμενος από τον ατμοσφαιρικό αέρα, είναι ένας άλλος τρόπος συλλογής ενέργειας. Ο ήλιος θερμαίνει επίσης την ατμόσφαιρα, η οποία παράγει άνεμο. Λειτουργεί σε συννεφιασμένες μέρες και βροχερή εποχή επίσης. Η θέση των ανεμογεννητριών είναι ένας πολύ σημαντικός παράγοντας, που επηρεάζει την απόδοση της κατασκευής. Οι ανεμόμυλοι βρίσκονται γενικά στην κορυφή της κατασκευής σε ύψος περίπου 30 μ. Οι ανεμόμυλοι λειτουργούν τόσο στον

οριζόντιο άξονα όσο και στον κατακόρυφο άξονα [20]. Η βασική μηχανική των δύο συστημάτων είναι παρόμοια. Ο αέρας που διέρχεται από τα πτερύγια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, η οποία τροφοδοτείται μέσω μετάδοσης σε μια ηλεκτρική γεννήτρια. Οι ανεμογεννήτριες δεν λειτουργούν σε ανέμους κάτω των 13 χλμ. την ώρα. Λειτουργούν καλύτερα όπου η ταχύτητα ανέμου είναι κατά μέσο όρο 22 χλμ. την ώρα. Η πλειοψηφία των ανεμογεννητριών που παράγονται επί του παρόντος είναι ο τουρμπίνας οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια, διαμέτρου 15-30 m, που παράγουν 50-350 KW ηλεκτρικής ενέργειας. Η αιολική ενέργεια δεν προκαλεί ρύπανση από τον αέρα ή το νερό, δεν ενέχει τοξικές ή επικίνδυνες ουσίες και δεν αποτελεί απειλή για τη δημόσια ασφάλεια.



Εικόνα 3: Ένα τυπικό αιολικό πάρκο (<http://stopmagneticgenerator.com>)

1.4 Ενέργεια Βιομάζας

Η βιομάζα είναι η σημαντικότερη πηγή ενεργειακής παραγωγής που προέρχεται από τη γεωργία. Η βιομάζα αναφέρεται στα καύσιμα που παράγονται από φυτά και ζωικά απόβλητα. Ο πόρος της βιομάζας είναι οργανική ύλη στην οποία η ενέργεια του ηλιακού φωτός αποθηκεύεται σε χημικούς δεσμούς. Όταν οι δεσμοί μεταξύ μορίων άνθρακα, υδρογόνου και οξυγόνου διασπώνται με πέψη, καύση (ή) αποσύνθεση, οι ουσίες αυτές απελευθερώνουν την αποθηκευμένη ενέργεια. Στην ζύμωση αλκοόλης, το άμυλο σε οργανική ύλη μετατρέπεται σε ζάχαρη με θέρμανση. Αυτό το σάκχαρο στη συνέχεια ζυμώνεται και τελικά η αιθανόλη είναι απόσταγμα και στη συνέχεια αναμειγνύεται με άλλο καύσιμο. Επίσης με αερόβια χώνευση μπορεί να παραχθεί βιομάζα, ειδικά από απόβλητα όπως τα αστικά στερεά απόβλητα. Σε αυτή τη διαδικασία, τα βακτηρίδια διασπούν το οργανικό υλικό απουσία οξυγόνου και παράγουν μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα. Η βιομετατροπή είναι μια μη ρυπογόνος, περιβαλλοντικά εφικτή και οικονομικά αποδοτική διαδικασία. Τα υπολείμματα υγρών αποβλήτων είναι πλούσια σε άζωτο και φώσφορο, τα οποία μπορούν να ανακυκλωθούν στο έδαφος ως λίπασμα. Με τη χρήση αυτής της μεθόδου μπορούμε να αντλήσουμε το 70% της ενέργειας. Η βιομάζα αναμειγνύεται με νερό και αποθηκεύεται σε αεροστεγή δεξαμενή. Τα οργανικά απόβλητα (δημοτικά στερεά απόβλητα) συλλέγονται ξεχωριστά και αποξηραίνονται με φυσική μέθοδο και τεμαχίζονται στο μέγιστο μέγεθος τεμαχιδίων μεγέθους 2 - 4 mm και αποθηκεύονται σε πλαστικά δοχεία [21].

1.5 Η επίδραση των ΑΠΕ στην οικονομία

Τα τελευταία χρόνια, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) αύξησαν το μερίδιό τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας των πιο ανεπτυγμένων οικονομιών λόγω των προβληματισμών για το περιβάλλον και την ασφάλεια εφοδιασμού υδρογονανθράκων [22].

Με την επικύρωση από πολλές χώρες του Πρωτοκόλλου του Κιότο, το 1997, δόθηκε μεγάλη έμφαση στην ανάγκη αντικατάστασης των ορυκτών καυσίμων με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ). Το πρωτόκολλο αυτό υποχρέωνε τις βιομηχανικές χώρες να περιορίσουν τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου (GHG), και κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα (CO₂). Φυσικά έχει παρατηρηθεί απότομη αύξηση της συγκέντρωσης CO₂ στην ατμόσφαιρα, κυρίως λόγω της καύσης ορυκτών καυσίμων (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο). Διαδικασία που είναι υπεύθυνη σε μεγάλο βαθμό, για την αλλαγή του κλίματος. Ταυτόχρονα, τα περισσότερα ενεργειακά ισοζύγια των αναπτυσσόμενων χωρών και των αναπτυσσόμενων χωρών αποκαλύπτουν αυξανόμενο μερίδιο της ηλεκτρικής ενέργειας στη συνολική παραγωγή ενέργειας που συμβάλλει σε μεγάλο βαθμό στις εκπομπές CO₂.

Άρα, οι αρνητικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις του ενεργειακού τομέα μπορεί να μειωθούν αξιοσημείωτα από ένα μεγαλύτερο μερίδιο των ΑΠΕ στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (RES-E). Αυτές οι πηγές είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη βιωσιμότητας με τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και τη βελτίωση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού για τις χώρες που εξαρτώνται από τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων [23].

1.6 Η πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τις Α.Π.Ε.

Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει εκπονήσει διάφορες ενεργειακές στρατηγικές για μια ασφαλέστερη οικονομία, βιώσιμη και χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Εκτός από την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής μέσω της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ενδέχεται να έχει ως αποτέλεσμα ασφαλέστερο ενεργειακό εφοδιασμό, μεγαλύτερη διαφοροποίηση στον ενεργειακό εφοδιασμό, λιγότερη ατμοσφαιρική ρύπανση, καθώς και δυνατότητα δημιουργίας θέσεων απασχόλησης στις μονάδες παραγωγής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [24].

Η δέσμη μέτρων για το κλίμα και την ενέργεια που εγκρίθηκε τον Δεκέμβριο του 2008 παρείχε ένα περαιτέρω κίνητρο για αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο 20% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας, ζητώντας ταυτόχρονα μείωση της κατανάλωσης ενέργειας και των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου κατά 20%. Η οδηγία 2009/28 / ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές θέτει γενικό στόχο σε ολόκληρη την ΕΕ για μερίδιο 20% επί της κατανάλωσης ενέργειας που πρέπει να παράγεται από ανανεώσιμες πηγές, και επίσης ένα μερίδιο 10% καυσίμων από Α.Π.Ε. στον τομέα των μεταφορών μέχρι την ίδια ημερομηνία. Η οδηγία αλλάζει το νομικό πλαίσιο για την προώθηση της ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές, απαιτεί εθνικά σχέδια δράσης και από το κάθε κράτος μέλος να παρουσιάσει τον τρόπο με τον οποίο θα αναπτυχθούν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, να δημιουργήσει μηχανισμούς συνεργασίας και να καθορίσει κριτήρια βιωσιμότητας για τα υγρά βιοκαύσιμα (μετά από ανησυχίες σχετικά με τις ενδεχόμενες δυσμενείς επιπτώσεις στις τιμές των καλλιεργειών, στον εφοδιασμό σε τρόφιμα, στην προστασία των δασών, στη βιοποικιλότητα. Στις Ιουλίου 2014 εγκρίθηκε έκθεση σχετικά με τη βιωσιμότητα των στερεών και αερίων βιοκαυσίμων που χρησιμοποιούνται για την ηλεκτρική ενέργεια, τη θέρμανση και την ψύξη (SWD (2014) 259).

Στις 6 Ιουνίου του 2012, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε μια ανακοίνωση με τίτλο «Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας: ένας σημαντικός παράγοντας στην ευρωπαϊκή αγορά ενέργειας» (COM (2012) 271), στην οποία περιγράφονται οι επιλογές για μια πολιτική ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την περίοδο μετά το 2020. Η ανακοίνωση αυτή ανέφερε ότι υπάρχει ανάγκη για μια πιο συντονισμένη ευρωπαϊκή προσέγγιση όσον αφορά τη θέσπιση και τη μεταρρύθμιση των καθεστώτων στήριξης των Α.Π.Ε. και την αυξημένη χρήση του εμπορίου ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ. Τον Ιανουάριο του 2014, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε ένα σύνολο ενεργειακών και κλιματικών στόχων για το 2030 με στόχο την ενθάρρυνση των ιδιωτικών επενδύσεων σε υποδομές και τεχνολογίες χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Ένας από τους βασικούς στόχους που προτείνονται είναι το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας να φτάσει τουλάχιστον το 27% έως το 2030. Αυτοί οι στόχοι θεωρούνται ένα βήμα προς την επίτευξη των στόχων για το 2050 όσον αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που προτείνονται στο χάρτη πορείας για τη μετάβαση σε μια ανταγωνιστική και βιώσιμη οικονομία ως το 2050 (COM (2011) 112).

Μία από τις 10 προτεραιότητες της Ευρωπαϊκής Επιτροπής που υποβλήθηκαν το 2014 είναι η δημιουργία ενεργειακής ένωσης. Προβλέπεται ότι μια ευρωπαϊκή ενεργειακή ένωση θα εξασφαλίσει ασφαλή, βιώσιμη, ανταγωνιστική και προσιτή ενέργεια. Τον Φεβρουάριο του 2015, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέθεσε τα σχέδια της για μια στρατηγική-πλαίσιο για μια ενεργειακή ένωση με μια μελλοντική πολιτική για την αλλαγή του κλίματος Η ανακοίνωση προτείνει πέντε πυλώνες για τη στρατηγική μετάβαση, μία από τις οποίες είναι η εξάλειψη της ρύπανσης [24].

Στις 11 Δεκεμβρίου 2018, η ΕΕ ενέκρινε την οδηγία 2018/2001/ΕΕ για την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Το νέο κανονιστικό πλαίσιο περιλαμβάνει έναν δεσμευτικό στόχο για την ανανεώσιμη ενέργεια για την ΕΕ το 2030 με 32%, με ρήτρα αναθεώρησης προς τα πάνω έως το 2023. Αυτό θα συμβάλει σε μεγάλο βαθμό στην προτεραιότητα που θα έχουν οι ανανεώσιμες

πηγές ενέργειας στα ζητήματα της Επιτροπής. Αυτό θα επιτρέψει στην Ευρώπη να διατηρήσει τον ηγετικό ρόλο της στην καταπολέμηση της αλλαγής του κλίματος, στη μετάβαση στην καθαρή ενέργεια και στην επίτευξη των στόχων που ορίζει η συμφωνία του Παρισιού.

Η καθιέρωση της πρώτης παγκόσμιας κλίμακας οικολογικής ηπείρου μέχρι το 2050 είναι η μεγαλύτερη πρόκληση και ευκαιρία της εποχής μας. Για να επιτευχθεί αυτό, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή παρουσίασε στις 11 Δεκεμβρίου 2019 την Ευρωπαϊκή Πράσινη Βίβλο (COM (2019) 640 τελικό), την πιο φιλόδοξη δέσμη μέτρων που θα επιτρέψει στους ευρωπαίους πολίτες και επιχειρήσεις να επωφεληθούν από τη βιώσιμη πράσινη μετάβαση. Τα μέτρα συνοδεύονται από έναν αρχικό χάρτη βασικών πολιτικών, που κυμαίνονται από τη φιλόδοξη μείωση των εκπομπών, την επένδυση σε καινοτόμες έρευνες και καινοτομίες, και τη διατήρηση του φυσικού περιβάλλοντος της Ευρώπης. Πάνω από όλα, η Πράσινη Βίβλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης θέτει το δρόμο για μια κοινωνικά δίκαιη μετάβαση. Έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μην αφήνει κανένα άτομο ή περιοχή πίσω.

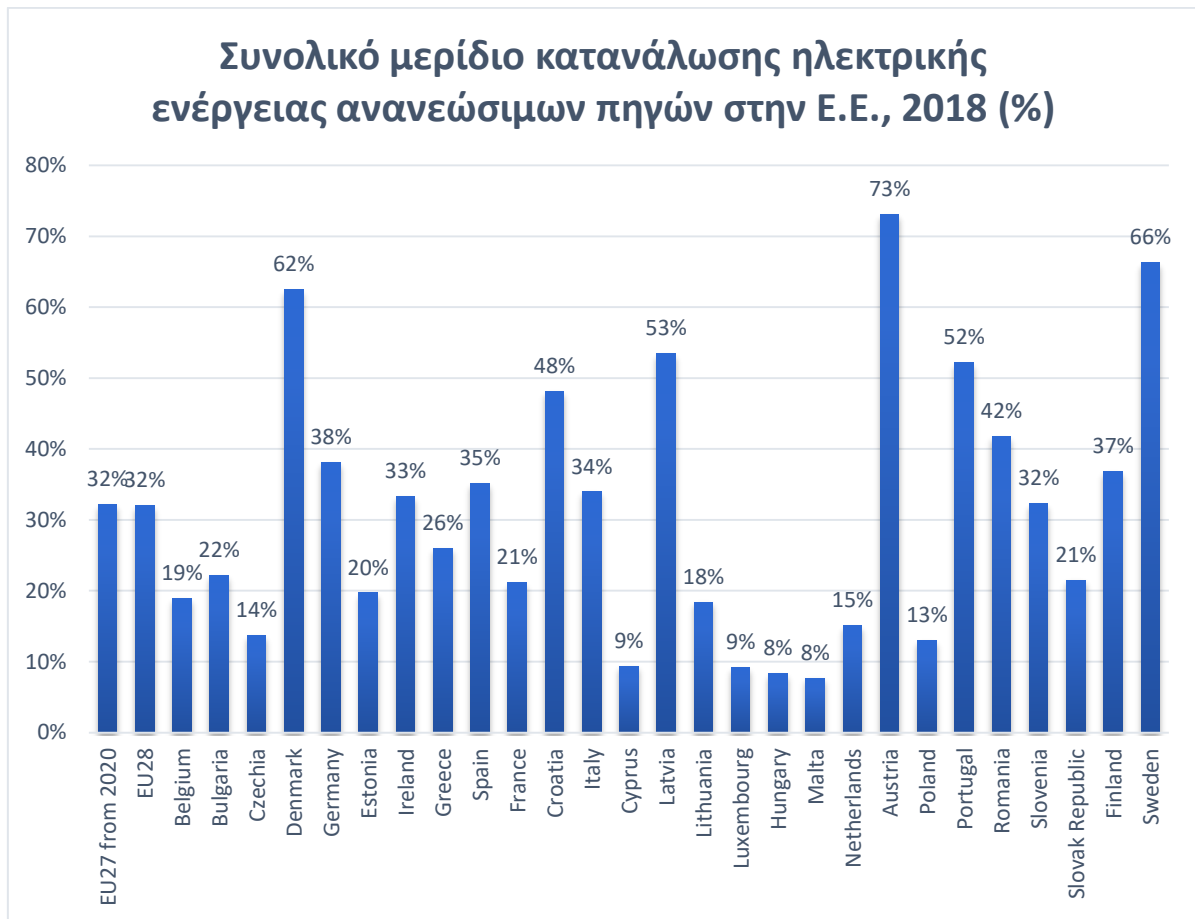
Η συμφωνία αυτή αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της στρατηγικής της Επιτροπής για την εφαρμογή της Ατζέντας των Ηνωμένων Εθνών για το 2030 και των στόχων της αειφόρου ανάπτυξης καθώς και των άλλων προτεραιοτήτων που ανακοινώθηκαν στις πολιτικές κατευθυντήριες γραμμές. Στο πλαίσιο της συμφωνίας, η Επιτροπή θα επαναπροσανατολίσει τη διαδικασία μακροοικονομικού συντονισμού για την ενσωμάτωση των στόχων των Ηνωμένων Εθνών για την αειφόρο ανάπτυξη, τη βιωσιμότητα και την ευημερία των πολιτών στο επίκεντρο της οικονομικής πολιτικής και τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης στο επίκεντρο της χάραξης πολιτικής και δράσης της ΕΕ.

Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει πολλά πιθανά οφέλη, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, της διαφοροποίησης του ενεργειακού εφοδιασμού και της μειωμένης εξάρτησης από τις αγορές ορυκτών καυσίμων (ιδίως πετρελαίου και φυσικού αερίου). Η ανάπτυξη των

ανανεώσιμων πηγών ενέργειας μπορεί επίσης να τονώσει την απασχόληση στην ΕΕ, μέσω της δημιουργίας θέσεων εργασίας σε νέες πράσινες τεχνολογίες.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας περιλαμβάνουν την αιολική ενέργεια, την ηλιακή ενέργεια (θερμική, φωτοβολταϊκή και συμπυκνωμένη), την υδροηλεκτρική ενέργεια, την παλιρροιακή ενέργεια, τη γεωθερμική ενέργεια, την θερμότητα του περιβάλλοντος που αντλείται από τις αντλίες θερμότητας, τα βιοκαύσιμα και το ανανεώσιμο τμήμα των αποβλήτων.

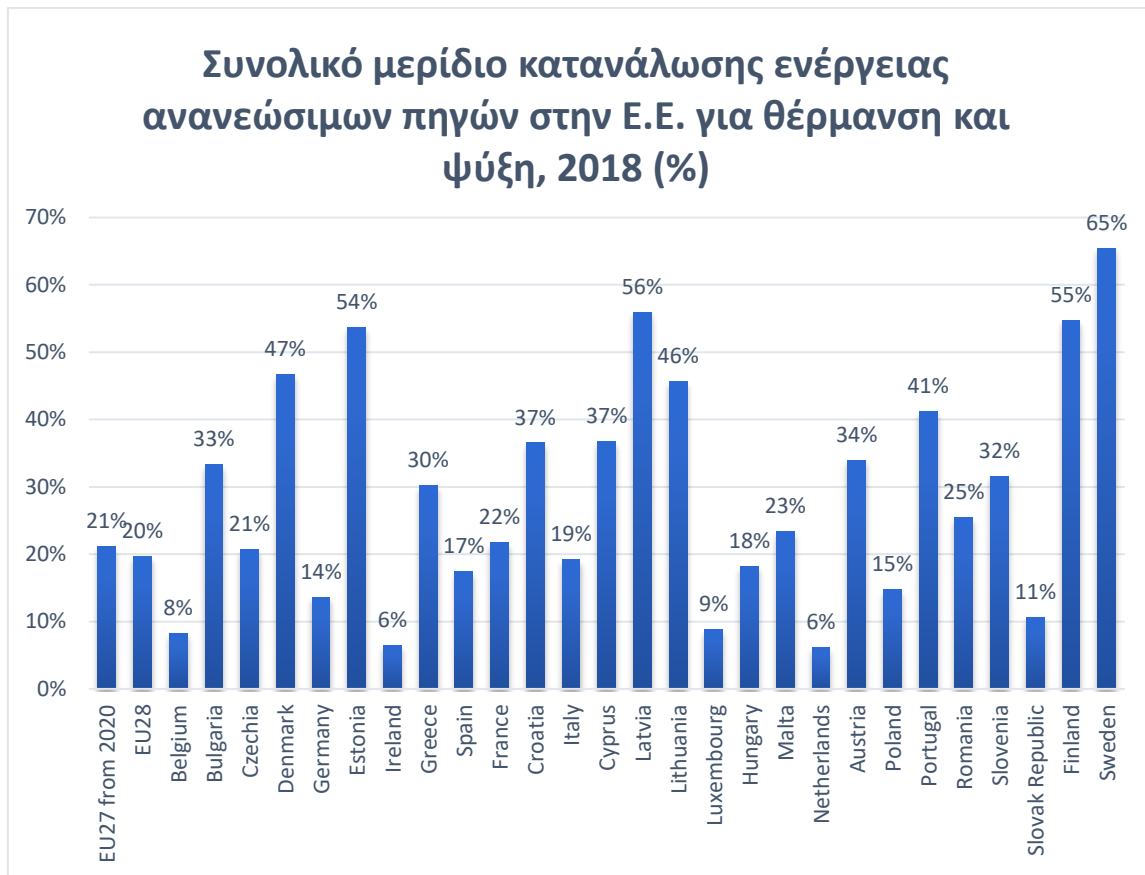
Το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας ανέρχεται σε 18,9 % στην ΕΕ το 2018, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.



Σχήμα 1: Συνολικό μερίδιο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας ανανεώσιμων πηγών στην Ε.Ε., το 2018 (%) [24]

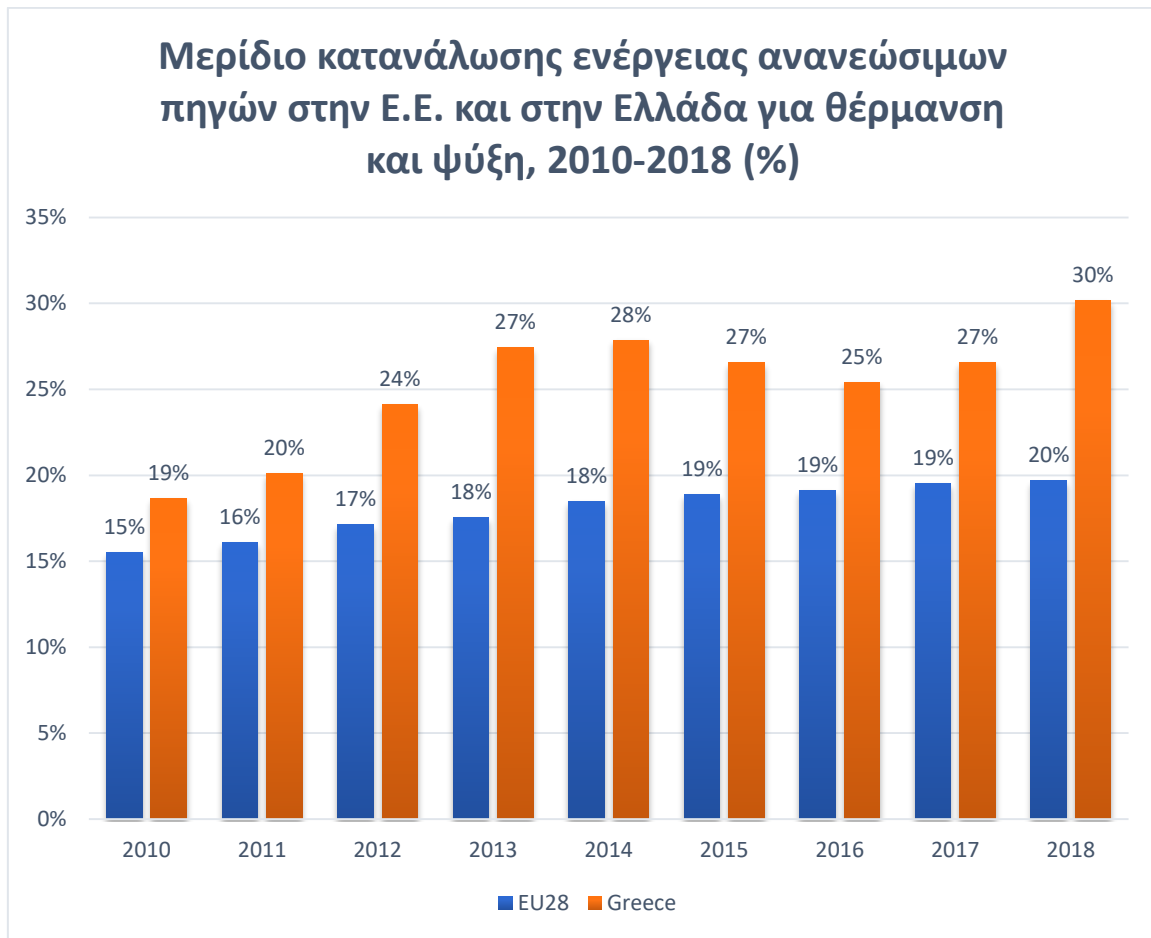
1.7 Η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για θέρμανση και ψύξη, και μεταφορικές δραστηριότητες

Πάνω από το ένα πέμπτο της ενέργειας που χρησιμοποιείται για θέρμανση και ψύξη είναι από ανανεώσιμες πηγές στην Ε.Ε. Το 2018, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντιπροσώπευαν το 21,1 % της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας για θέρμανση και ψύξη στην ΕΕ.



Σχήμα 2: Συνολικό μερίδιο κατανάλωσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών στην Ε.Ε. για θέρμανση και ψύξη, 2018 (%) [24]

Πρόκειται για μια σημαντική αύξηση από 11,7 % το 2004. Οι αυξήσεις χρήσης των βιομηχανικών τομέων, των υπηρεσιών και των νοικοκυριών (τομέας των κατασκευών) συνέβαλαν στην αύξηση αυτή. Η αεροθερμική, γεωθερμική και υδροθερμική θερμική ενέργεια που συλλαμβάνονται από αντλίες θερμότητας λαμβάνεται υπόψη, στο βαθμό που αναφέρονται από τα στοιχεία που παρέχουν οι χώρες. Το μερίδιο της ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στη θέρμανση και την ψύξη παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.



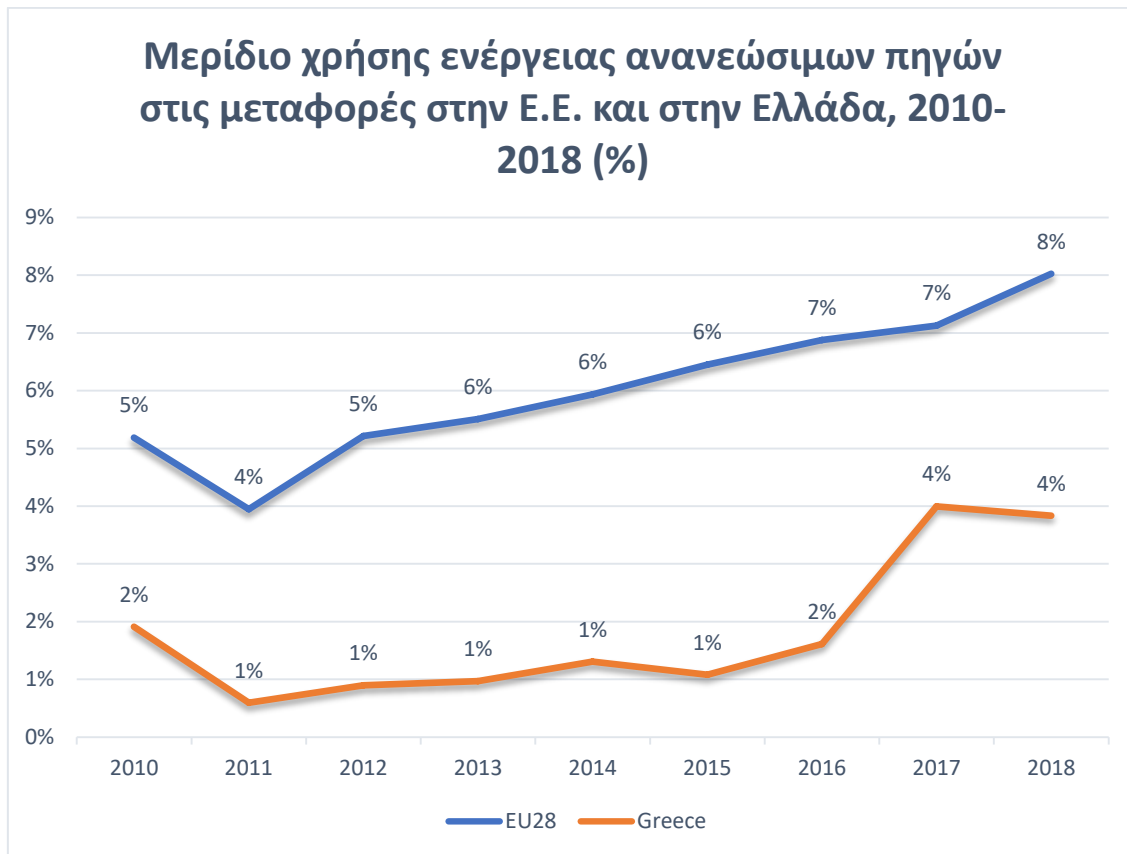
Σχήμα 3: Μερίδιο κατανάλωσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών στην Ε.Ε. και στην Ελλάδα για θέρμανση και ψύξη, 2010-2018 (%) [24]

Το 8,3% της ενέργειας που χρησιμοποιήθηκε για μεταφορικές δραστηριότητες το 2018 προερχόταν από ανανεώσιμες πηγές. Η ΕΕ συμφώνησε να θέσει κοινό στόχο 10% για το μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (συμπεριλαμβανομένων των υγρών βιοκαυσίμων, του υδρογόνου, του βιομεθανίου, της «πράσινης» ηλεκτρικής ενέργειας κ.λπ.) για τις μεταφορές.-



Σχήμα 4: Μερίδιο χρήσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών στις μεταφορές στην Ε.Ε., 2018 (%)^[25]

Το μέσο μερίδιο ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στις μεταφορές αυξήθηκε από 1,5% το 2004 σε 8,3% το 2018. Μεταξύ των κρατών μελών της ΕΕ το σχετικό μερίδιο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην κατανάλωση καυσίμων στις μεταφορές κυμάνθηκε από υψηλά επίπεδα, 29,7 % στη Σουηδία, 14,9 % στη Φινλανδία και 9,8 % στην Αυστρία σε λιγότερο από 4,0 % στην Κύπρο, την Κροατία, την Ελλάδα και την Εσθονία.



Σχήμα 5: Μερίδιο χρήσης ενέργειας ανανεώσιμων πηγών στις μεταφορές στην Ε.Ε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο: ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΚΑΥΣΙΜΟ ΣΕ ΟΧΗΜΑΤΑ

2.1 Εισαγωγή

Η πρόκληση της υιοθέτησης τεχνολογιών που βασίζονται στο υδρογόνο και στις κυψέλες καυσίμου έχει προστεθεί στην ατζέντα των μεγαλύτερων κατασκευαστών αυτοκινήτων στον κόσμο. Η ανάπτυξη υβριδικών αυτοκινήτων που μπορούν να ελαχιστοποιήσουν το χρόνο μεταξύ δύο διαδοχικών διαδικασιών ανεφοδιασμού είναι ένας πιθανός τρόπος για να αμβλυνθούν πολλά από τα συχνά αναφερόμενα μειονεκτήματα. Η προσθήκη ενός δεύτερου φορέα αποθήκευσης ενέργειας σε ένα όχημα, ο οποίος επιτρέπει τη φόρτιση της μπαταρίας κατά την οδήγηση, παρατείνει το χρονικό διάστημα μεταξύ των ανεφοδιασμών, ενώ παράλληλα βελτιώνει την αυτονομία του ταξιδιού [26]. Η κυψέλη καυσίμου υδρογόνου και μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι ένα παράδειγμα υβριδικής διάταξης. Η κυψέλη καυσίμου με βάση το υδρογόνο έχει αποδείξει την ικανότητά της να αποθηκεύει και να μετατρέπει τη χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και να προσφέρει διάφορα άλλα οφέλη [26].

Παρά τις δεσμευτικές προσπάθειες που έχουν γίνει μέχρι σήμερα, απαιτείται πρόσθετη και πιο εμπειριστατωμένη μελέτη για την ανάπτυξη και εφαρμογή κυψελών καυσίμου με βάση το υδρογόνο για ηλεκτρικά αυτοκίνητα καθώς και για οχήματα με υδρογόνο [26]. Ο στόχος της επιλογής του καυσίμου υδρογόνου είναι η καθαρή του ενέργεια και υψηλή ικανότητα μεταφοράς ενέργειας. Το όχημα με βάση το καύσιμο υδρογόνο σε σύγκριση με το ηλεκτρικό όχημα παρουσιάζει πλεονεκτήματα όσον αφορά το χρόνο και το κόστος ανεφοδιασμού, τα οποία μπορούν να προσελκύσουν μεγάλο αριθμό καταναλωτών [27,28].

Πρόσφατα, οι υψηλές τιμές, η περιορισμένη πυκνότητα ισχύος και η έλλειψη υποδομών υδρογόνου αποτέλεσαν πρωταρχικά εμπόδια για την ευρεία υιοθέτηση αυτών των αυτοκινήτων. Το σημαντικότερο εμπόδιο είναι αναμφισβήτητα η έλλειψη υποδομών παραγωγής και διανομής υδρογόνου, καθώς και η δυσκολία να δημιουργηθούν γρήγορα και γρήγορα. Βραχυπρόθεσμα και μεσοπρόθεσμα, ένας ενσωματωμένος επεξεργαστής

καυσίμου που θα επιτρέπει την άμεση μεταφορά υδρογόνου από καύσιμα υδρογονανθράκων μέσα στο όχημα είναι επομένως ο μόνος τρόπος για να μπορέσουν τα κινούμενα με υδρογόνο οχήματα να αποκτήσουν ένα αποδεκτό μερίδιο αγοράς. Η ιδέα αυτή είναι ιδιαίτερα ελκυστική για λόγους ασφαλείας: Ολόκληρο το σύστημα καταλαμβάνει λιγότερο χώρο από μια δεξαμενή συμπιεσμένου υδρογόνου και διευκολύνει τον ανεφοδιασμό χρησιμοποιώντας την υπάρχουσα υποδομή. Περαιτέρω, σε αντίθεση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, οι οποίοι περιορίζονται στη λειτουργία με δύο καύσιμα, ο ίδιος αναμορφωτής μπορεί να τροφοδοτείται από μια ποικιλία καυσίμων, απαιτώντας μόνο μικρές προσαρμογές στις συνθήκες λειτουργίας, διατηρώντας παράλληλα την ακεραιότητα του επεξεργαστή.

Το υδρογόνο έχει αναγνωριστεί εδώ και καιρό ως ένα πιθανό καύσιμο μεταφορών με χαμηλές εκπομπές άνθρακα, αλλά είναι δύσκολο να ενσωματωθεί στο μείγμα καυσίμων μεταφορών.

Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν άμεσα τη χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια, με μοναδικό παραπροϊόν καθαρό νερό και πιθανώς χρήσιμη θερμότητα [29]. Οι κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν με υδρογόνο δεν είναι μόνο απαλλαγμένες από ρύπους, αλλά μπορούν επίσης να έχουν δύο έως τρεις φορές μεγαλύτερη απόδοση από τις παραδοσιακές τεχνολογίες καύσης. Μια συμβατική

μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με καύση παράγει συνήθως ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση 33-35%, ενώ τα συστήματα κυψελών καυσίμου μπορούν να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια με απόδοση έως και 60% (ακόμη υψηλότερη με συμπαράγωγή) [29].

Ο βενζινοκινητήρας σε ένα συμβατικό αυτοκίνητο είναι λιγότερο από 20% αποδοτικός στη μετατροπή της χημικής ενέργειας της βενζίνης σε ισχύ που κινεί το όχημα υπό κανονικές συνθήκες οδήγησης. Τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου

υδρογόνου, που χρησιμοποιούν ηλεκτροκινητήρες, είναι πολύ πιο αποδοτικά και χρησιμοποιούν το 40-60% της ενέργειας του καυσίμου, που αντιστοιχεί σε μείωση της κατανάλωσης καυσίμου πάνω από 50%, σε σύγκριση με ένα συμβατικό όχημα με βενζινοκινητήρα εσωτερικής καύσης [29].

Επιπλέον, οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν αθόρυβα, έχουν λιγότερα κινούμενα μέρη και είναι κατάλληλες για μια ποικιλία εφαρμογών. Τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου (FCEV) αποτελούσαν ένα σχετικά μικρό κλάσμα του παγκόσμιου αποθέματος του συνόλου των αυτοκινήτων το 2020 και η κατανάλωση υδρογόνου στη βιομηχανία περιορίστηκε σε λιγότερο από 0,01% της χρησιμοποιούμενης ενέργειας, όπως και τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα (0,3%). Ωστόσο, ως αποτέλεσμα των γεγονότων στην Ασία και τις Ηνωμένες Πολιτείες, η αγορά των FCEV αρχίζει να απογειώνεται. Μέχρι το τέλος Ιουνίου 2021, περισσότερα από 40.000 FCEV κυκλοφορούσαν στους δρόμους σε όλο τον κόσμο. Από το 2017 έως το 2020, τα αποθέματα επεκτείνονταν κατά μέσο όρο κατά 70% κάθε χρόνο, αλλά το 2020, η αύξηση των αποθεμάτων επιβραδύνθηκε στο 40% και οι νέες ταξινομήσεις αυτοκινήτων κυψελών καυσίμου έπεσαν κατά 15%, ταιριάζοντας με την ευρύτερη ύφεση της αγοράς αυτοκινήτων που προκλήθηκε από την πανδημία COVID-19. Ωστόσο, το 2021 είναι υποψήφιο να αποτελέσει νέα χρονιά ρεκόρ, με πάνω από 8.000 αυτοκίνητα FCEV να έχουν πωληθεί το πρώτο εξάμηνο του έτους και τις μηνιαίες πωλήσεις στην Καλιφόρνια να φτάνουν σε νέα υψηλά επίπεδα [30].

Τα FCEV συγκρίνονται σήμερα σε μεγάλο βαθμό με τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEV) [31]. Η σχετική βιβλιογραφία αποκαλύπτει σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο τεχνολογιών [32,33]. Τα BEV είναι προτιμότερα λόγω του φθηνότερου κόστους επένδυσης σε υποδομές και του χαμηλότερου κόστους του οχήματος [34]. Παρά ταύτα, η σχετικά χαμηλή αυτονομία καθιστά τα BEV κυρίως κατάλληλα για ταξίδια μικρών αποστάσεων, όπως η αστική χρήση, η οποία αποτελεί ένα μεγάλο τμήμα της οδικής αγοράς. Οι εξελίξεις και η αύξηση της

αποδοτικότητας στην τεχνολογία των μπαταριών σε συνδυασμό με τις επιδοτήσεις για δημόσιους σταθμούς φόρτισης αναμένεται να διευκολύνουν την ανάπτυξη των BEV [34]. Τα FCEV βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης λόγω του υψηλότερου κόστους επένδυσης σε υποδομές και του υψηλότερου κόστους του οχήματος. Η σχετικά υψηλή αυτονομία σε συνδυασμό με τον γρήγορο ανεφοδιασμό καθιστούν τα FCEV κυρίως κατάλληλα για μεγάλες αποστάσεις και υπεραστική χρήση. Όσον αφορά την απόδοση, η συνολική απόδοση του BEV είναι πολύ υψηλότερη από εκείνη του FCEV λόγω των απωλειών ενέργειας του FCEV σε όλες τις φάσεις της διαδικασίας [35].

2.2 Ζητήματα και προβληματισμοί σχετικά με τα καύσιμα των σημερινών οχημάτων

Σήμερα, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα φιλικά προς το κλίμα μέσα μεταφοράς και τα ορυκτά καύσιμα είναι ασύμβατα, πολλές χώρες ευνοούν τη μετάβαση από τα συμβατικά καύσιμα οχήματα σε οχήματα χαμηλών εκπομπών για την αντιμετώπιση των προβλημάτων ρύπανσης του περιβάλλοντος. Ειδικότερα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει καθορίσει ένα πρόγραμμα κινητικότητας που βασίζεται σε βιώσιμους στόχους που πρέπει να επιτευχθούν έως το 2030 [35] στην Ευρώπη. Μεταξύ των στόχων της ατζέντας, το 2025 αναμένεται ότι οι μέσες εκπομπές CO₂ των νέων βαρέων φορτηγών θα μειωθούν κατά περίπου 15% σε σχέση με τις εκπομπές του 2019. Επιπλέον, αναμένεται να επιτευχθεί μείωση των εκπομπών CO₂ κατά περίπου 30% σε σχέση με το 2019 έως το 2030. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει αναλάβει φιλόδοξες πρωτοβουλίες για τη μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα έως το 2030, με στόχο την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και την προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης. Οι προσπάθειες που καταβάλλονται περιλαμβάνουν τα εξής:

Πρώτον, η ΕΕ προωθεί την αύξηση της παραγωγής και χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια. Επιδιώκεται η αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος για ανανεώσιμες πηγές και η προώθηση της έρευνας και ανάπτυξης σε αυτούς τους τομείς.

Δεύτερον, η ΕΕ επιδιώκει τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης σε διάφορους τομείς, όπως το κτιριακό στοκ, η βιομηχανία και ο τομέας των μεταφορών. Προωθούνται πιο αποδοτικές τεχνολογίες και ενθαρρύνεται η ενεργειακή ανακαίνιση και η χρήση έξυπνων συστημάτων διαχείρισης ενέργειας.

Τρίτον, η ΕΕ επιδιώκει τη μείωση της χρήσης ορυκτών καυσίμων, όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Συνολικά, υπάρχει στόχος για τη σταδιακή απόσυρση των θερμοηλεκτρικών εργοστασίων που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα και την προώθηση της μετάβασης σε εναλλακτικές, καθαρές πηγές ενέργειας.

Τέταρτον, η ΕΕ προωθεί την ηλεκτροκίνηση στον τομέα των μεταφορών. Αυτό περιλαμβάνει την προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων και την ανάπτυξη της υποδομής φόρτισης. Επίσης, γίνεται έρευνα και ανάπτυξη για αεροπλάνα με μηδενικές εκπομπές καυσαερίων και γίνεται προώθηση των βιώσιμων καυσίμων στους αερολιμένες.

Τέλος, η ΕΕ επεκτείνει τους μηχανισμούς του εμπορίου εκπομπών, που επιβάλλουν οικονομικές κυρώσεις στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, προκειμένου να ενθαρρύνει τις εταιρείες να μειώσουν τις εκπομπές τους.

Οι στόχοι αυτοί συνάδουν με τις δεσμεύσεις της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο πλαίσιο της Συμφωνίας του Παρισιού και, εκτός από τα περιβαλλοντικά οφέλη, θα επιτρέψουν στις εταιρείες μεταφορών να επιτύχουν σημαντική εξοικονόμηση χάρη στη χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμων [35]. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει θέσει σε εφαρμογή διάφορες νομοθετικές, ερευνητικές και καινοτόμες πρωτοβουλίες για την οδική κινητικότητα

και τις μεταφορές [34]. Ιδιαίτερη προσοχή δίνεται στην ενίσχυση της πιο διαδεδομένης χρήσης οχημάτων νέας γενιάς, όπως τα ηλεκτρικά και τα αυτοματοποιημένα οχήματα. Έχει αποδειχθεί ότι η ευρεία χρήση ηλεκτρικών οχημάτων αντί των συμβατικών οχημάτων μπορεί να εξοικονομήσει περίπου 60% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στις περισσότερες χώρες της ΕΕ [36]. Ειδικότερα, η χρήση των ηλεκτροκίνητων οχημάτων (EV) οδηγεί σε μέση εξοικονόμηση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά περίπου 50% σε σύγκριση με το ντίζελ στην Ευρώπη [37]. Παρά τα σημαντικά αυτά οφέλη, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος των ηλεκτροκίνητων οχημάτων με μπαταρία (BEV) δεν είναι μηδενικός για τους ακόλουθους λόγους: (1) στις περισσότερες περιπτώσεις, οι μπαταρίες των ηλεκτροκίνητων οχημάτων φορτίζονται με τη χρήση μη πράσινης ενέργειας και (2) ολόκληρος ο κύκλος ζωής του ηλεκτροκίνητου οχήματος είναι υπεύθυνος για ορισμένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, λαμβάνοντας επίσης υπόψη ότι οι μπαταρίες πρέπει να διατεθούν στο τέλος της ζωής τους. Ωστόσο, υπάρχουν μελέτες που συγκρίνουν τις επιπτώσεις του κύκλου ζωής των BEV με τις επιπτώσεις των συμβατικών οχημάτων στο περιβάλλον, οι οποίες δείχνουν ότι τα BEV μπορούν ωστόσο να οδηγήσουν σε συνολικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που είναι χαμηλότερες από εκείνες των παραδοσιακών οχημάτων (ICE) [38]. Επιπλέον, εάν χρησιμοποιούνται ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για τη φόρτιση της μπαταρίας, τα πλεονεκτήματα και τα οφέλη για το περιβάλλον από τη χρήση των BEV είναι ακόμη πιο εμφανή. Ωστόσο, παρόλο που τα BEV εξαπλώνονται στην Ευρώπη και στον υπόλοιπο κόσμο, απέχουμε ακόμη πολύ από τον στόχο της οριστικής αντικατάστασης των συμβατικών αυτοκινήτων, μοτοσικλετών, λεωφορείων και βαρέων φορτηγών με τέτοια οχήματα. Απαιτούνται περαιτέρω ενέργειες τόσο από τις κυβερνήσεις όσο και από τους παρόχους τεχνολογίας, προκειμένου να ξεπεραστούν οι κοινωνικοοικονομικοί και τεχνολογικοί περιορισμοί.

Όσον αφορά τις κοινωνικοοικονομικές και πολιτικές πτυχές και τις δράσεις που πρέπει να αναληφθούν για την προώθηση των ηλεκτρικών οχημάτων, η συμμετοχή του κοινού είναι σημαντική για τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και τη διαχείριση της μετάβασης σε βιώσιμες τεχνολογίες μεταφορών. Οδηγίες εθνικής πολιτικής, όπως κατευθυντήριες γραμμές για τη χρήση σε δημόσιους δρόμους και χώρους στάθμευσης, κίνητρα για τη στάθμευση και την αγορά νέων μέσων κινητικότητας μπορούν να συμβάλουν στη διάδοση αυτών των βιώσιμων τεχνολογιών. Σε αυτό το πλαίσιο, το ποσοστό υιοθέτησης των ηλεκτρικών οχημάτων επηρεάζεται έντονα από τα τοπικά μέσα πολιτικής των δημόσιων υποδομών φόρτισης που είναι υψηλότερα στους αστικούς δήμους από ό,τι στις προαστιακές και αγροτικές πόλεις. Επιπλέον, ως φυσικό επακόλουθο, η διάδοση των EV είναι ταχύτερη εκεί όπου η επέκταση της δημόσιας υποδομής φόρτισης είναι υψηλότερη. Συνεπώς, εξακολουθούν να υπάρχουν σημαντικές διαφορές μεταξύ των πόλεων όσον αφορά τις επενδύσεις σε υποδομές φόρτισης που μπορούν να περιορίσουν τη διάδοση των EV σε τοπικό επίπεδο [39].

Επιπλέον, μια ποιοτική συγκριτική ανάλυση διεξήχθη σε 15 ευρωπαϊκές πόλεις [40], συγκρίνοντας τις τοπικές πολιτικές και τις κοινωνικοοικονομικές επιπτώσεις τους, προκειμένου να προσδιοριστούν οι βέλτιστες διαμορφώσεις για την προώθηση της επέκτασης των EV [40]. Επισημαίνεται ότι η μεμονωμένη δράση δεν θα επιτύχει, διότι η έρευνα δείχνει ότι η μετάβαση προς τη βιώσιμη κινητικότητα μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο μέσω διαφόρων, ειδικών για κάθε τόπο διαμορφώσεων μέτρων.

Κατ' αναλογία, οι Wang et al. [41] πραγματοποίησαν ανάλυση συσχέτισης και αναλύσεις πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης για να αξιολογήσουν τη σχέση μεταξύ πολιτικών κινήτρων και κοινωνικοοικονομικών παραγόντων για την υιοθέτηση ηλεκτρικών οχημάτων σε 30 χώρες το 2015. Από την ανάλυση που πραγματοποιήθηκε, οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα πώς η πρώτη δράση των κυβερνήσεων θα πρέπει να είναι η επέκταση των υποδομών

φόρτισης και η παροχή οδικής προτεραιότητας για τα ηλεκτρικά οχήματα. Επιπλέον, οι κυβερνήσεις θα μπορούσαν να αυξήσουν τη φορολογία καυσίμων για να αποθαρρύνουν τη χρήση συμβατικών οχημάτων και να διατηρήσουν φορολογικές ελαφρύνσεις, απαλλαγές από τέλη (π.χ. στάθμευσης, διοδίων και πορθμείων) και μείωση του κόστους προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας για τα ηλεκτρικά οχήματα.

Επιπλέον, από τη μία πλευρά, τα BEV εξακολουθούν να είναι ακριβά σε σχέση με τα οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, παρόλο που, πιο πρόσφατα, πολλές χώρες, όπως η Ιταλία, παρέχουν κίνητρα για την εξομάλυνση του τελικού κόστους για τους χρήστες. Από την άλλη πλευρά, παρόλο που υπάρχουν σήμερα διαθέσιμες λύσεις γρήγορης και πολύ γρήγορης φόρτισης, δεν έχουν διαδοθεί επαρκώς σε όλες τις χώρες, εν μέρει λόγω των χρονοβόρων διαδικασιών έγκρισης, ώστε να επιλύσουν το πρόβλημα των χρόνων φόρτισης των BEV που εξακολουθούν να είναι σημαντικά μεγαλύτεροι από τους χρόνους ανεφοδιασμού [42]. Επιπλέον, σε έναν διακρατικό διάδρομο που μπορεί να εγγυηθεί την προσβασιμότητα όλων των EV, η εφαρμογή της φόρτισης με συνεχές ρεύμα μπορεί να είναι επιθυμητή αλλά απέχει πολύ από την εφαρμογή της. Επιπλέον, σήμερα εισάγονται στην αγορά άλλες λύσεις, όπως η ανταλλαγή μπαταριών. Αυτή συνίσταται στην ανταλλαγή σε πραγματικό χρόνο της αποφορτισμένης/χαμηλά φορτισμένης μπαταρίας με μια πλήρως φορτισμένη συμβατή μπαταρία σε ειδικούς σταθμούς. Αυτή μπορεί να είναι μια αποτελεσματική τεχνική για την αντιμετώπιση του προβλήματος του χρόνου φόρτισης, αλλά η αποτελεσματικότητά της και η μακροπρόθεσμη βιώσιμη χρήση της δεν έχουν ακόμη διερευνηθεί και αποδειχθεί επαρκώς. Εξετάζοντας την εμπειρία του οδηγού, η οδήγηση ενός ηλεκτρικού αυτοκινήτου εξακολουθεί να προκαλεί άγχος εμβέλειας στους χρήστες που μπορεί να φοβούνται ότι τα οχήματά τους δεν έχουν αρκετή αυτονομία για να φτάσουν στο επόμενο σημείο φόρτισης [42]. Αυτό οφείλεται κυρίως στη χαμηλή αυτονομία εμβέλειας που

επηρεάζει γενικά τα περισσότερα τρέχοντα BEV στην αγορά και στις περιορισμένες διαθέσιμες υποδομές φόρτισης σε πολλές χώρες [43].

2.3 Κίνητρα για την υιοθέτηση της ενέργειας υδρογόνου

Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα ζητήματα που συζητήθηκαν σχετικά με τα BEV, ιδίως τα τεχνολογικά, έχει διερευνηθεί η χρήση κυψελών καυσίμου για την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδρογόνο θεωρείται καθαρός και αποδοτικός φορέας ενέργειας που μπορεί να εξασφαλίσει την ενεργειακή ασφάλεια και τη βιωσιμότητα [44]. Τρεις διαστάσεις πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την προώθηση του υδρογόνου σύμφωνα με το [45]:

(1) Απαιτήσεις της αγοράς: η τιμή πρέπει να είναι ανταγωνιστική σε σύγκριση με άλλους φιλικούς προς το περιβάλλον ενεργειακούς φορείς, όπως οι μπαταρίες- η υποδομή ανεφοδιασμού πρέπει να επιτρέπει το εύρος αυτονομίας που απαιτείται από τους χρήστες- απαιτούνται γρήγορες και εύκολες διαδικασίες αποθήκευσης για να είναι δυνατή η μεγάλη αυτονομία της κινητικότητας- απαιτούνται επίπεδα ασφάλειας ίσα ή καλύτερα από τις πηγές ενέργειας που βασίζονται στον άνθρακα. **(2) Απαιτήσεις βιωσιμότητας και κλίματος:** η ενέργεια υδρογόνου πρέπει να συμμορφώνεται με τους στόχους των κυβερνήσεων- τα αυτοκίνητα υδρογόνου πρέπει επίσης να συμμορφώνονται με τις υφιστάμενες νομικές απαιτήσεις για την πρόληψη και τον περιορισμό των αποβλήτων από τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους και τα εξαρτήματά τους, διασφαλίζοντας ότι, όπου είναι δυνατόν, αυτά επαναχρησιμοποιούνται, ανακυκλώνονται ή ανακτώνται.

(3) Απαιτήσεις τεχνολογίας υδρογόνου: για να επιτευχθεί η μαζική αγορά της κινητικότητας με υδρογόνο, υπάρχει η ανάγκη να μειωθεί το κόστος των αυτοκινήτων και των σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου.

Η ανάπτυξη της τεχνολογίας αποσκοπεί στη μείωση ή την αντικατάσταση της χρήσης ακριβών υλικών, όπως η πλατίνα, στις κυψέλες καυσίμου και στους ηλεκτρολύτες και στην επίτευξη υψηλότερων πυκνοτήτων αποθήκευσης (μεγαλύτερο εύρος αυτονομίας των αυτοκινήτων) με ταυτόχρονη μείωση των πιέσεων αποθήκευσης.

Από τεχνολογική άποψη, η κυψέλη καυσίμου (FC) είναι μια συσκευή μετατροπής ενέργειας που μπορεί να συλλάβει και να χρησιμοποιήσει αποτελεσματικά την ενέργεια του υδρογόνου [40]. Η κυψέλη καυσίμου παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω μιας ηλεκτροχημικής αντίδρασης κατά την οποία το υδρογόνο και το οξυγόνο συνδυάζονται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, θερμότητας και νερού. Η κυψέλη καυσίμου αποτελείται από μια άνοδο, μια κάθοδο και μια μεμβράνη ηλεκτρολύτη [46]. Σε γενικές γραμμές, το υδρογόνο εισέρχεται στην κυψέλη καυσίμου μέσω της ανόδου, όπου διασπάται σε ηλεκτρόνια και πρωτόνια. Τα ιόντα υδρογόνου διέρχονται από τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος αναγκάζει τα ηλεκτρόνια να περάσουν από ένα κύκλωμα, δημιουργώντας ηλεκτρικό ρεύμα και περίσσεια θερμότητας.

Το οξυγόνο που εισέρχεται στην κάθοδο συνδυάζεται με τα ηλεκτρόνια από το ηλεκτρικό κύκλωμα και τα ιόντα υδρογόνου που πέρασαν μέσω του ηλεκτρολύτη από την άνοδο, δημιουργώντας νερό [46]. Αυτή η ένωση είναι μια εξώθερμη αντίδραση, παράγοντας θερμότητα που μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκτός της κυψέλης καυσίμου.

Οι σταθερές FC μπορούν να χρησιμοποιηθούν για εφεδρική ενέργεια, ενέργεια για απομακρυσμένες τοποθεσίες, κατανομημένη παραγωγή ενέργειας και συμπαραγωγή (στην οποία η πλεονάζουσα θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιείται για άλλες εφαρμογές). Οι FC μπορούν να τροφοδοτήσουν σχεδόν κάθε φορητή εφαρμογή που συνήθως χρησιμοποιεί μπαταρίες, από φορητές συσκευές μέχρι φορητές γεννήτριες, και μπορούν επίσης να τροφοδοτήσουν τις μεταφορές μας,

συμπεριλαμβανομένων των προσωπικών οχημάτων, των φορτηγών, των λεωφορείων και των θαλάσσιων σκαφών, καθώς και να παρέχουν βοηθητική ενέργεια στις παραδοσιακές τεχνολογίες μεταφορών.

Στο πλαίσιο αυτό, το υδρογόνο μπορεί να διαδραματίσει ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στο μέλλον, αντικαθιστώντας το εισαγόμενο πετρέλαιο που χρησιμοποιούμε σήμερα στα αυτοκίνητα και τα φορτηγά [46].

Ειδικότερα, η τεχνολογία του υδρογόνου εκπέμπει στο περιβάλλον μόνο υδρατμούς, με αποτέλεσμα να έχει το πλεονέκτημα να έχει μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά τη χρήση [46]. Ωστόσο, από την άλλη πλευρά, για την παραγωγή υδρογόνου απαιτείται περισσότερη ενέργεια από άλλες τεχνολογίες, καθώς πρόκειται για ένα στοιχείο που δεν υπάρχει στη φυσική του κατάσταση.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την παραγωγή υδρογόνου, όπως η αναμόρφωση με ατμό και η αεριοποίηση της βιομάζας, αλλά μια σπάνια χρησιμοποιούμενη διαδικασία στην Ευρώπη είναι η ηλεκτρόλυση. Η μέθοδος της ηλεκτρόλυσης συνίσταται στη διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος από το νερό και στη δημιουργία μιας μη αυθόρμητης χημικής διεργασίας που έχει ως αποτέλεσμα την απελευθέρωση υδρογόνου με τη μορφή αερίου. Πρόκειται για μια επαναστατική τεχνολογία που σε συνδυασμό με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορεί να κάνει την κινητικότητα ακόμη πιο πράσινη [47].

2.4 Ηλεκτροκίνητα αυτοκίνητα με μπαταρία σε σύγκριση με υβριδικά ηλεκτροκίνητα που χρησιμοποιούν υδρογόνο

Ένα BEV χρησιμοποιεί μια ενσωματωμένη συστοιχία μπαταριών για την τροφοδοσία του κινητήρα του οχήματος, η οποία περιλαμβάνει ποικίλες

διαμορφώσεις κυψελών μπαταριών. Παρά τα περιβαλλοντικά και αποδοτικά πλεονεκτήματα των ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία, οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν μόνο περίπου το 1% της ενεργειακής πυκνότητας της βενζίνης ή του ντίζελ [38]. Για το λόγο αυτό, τα μικρότερα και ελαφρύτερα οχήματα φαίνεται να είναι οι καλύτεροι υποψήφιοι για ηλεκτρικά συστήματα κίνησης με μπαταρία. Καθώς τα οχήματα αυξάνονται σε μέγεθος, το μέγεθος και το βάρος της συστοιχίας μπαταριών που απαιτείται για την τροφοδοσία του οχήματος, καθώς και η διαθέσιμη εμβέλεια, αρχίζουν να καθιστούν την χρήση μπαταρίας λιγότερο ελκυστική επιλογή [48].

Τα FCEV υδρογόνου έχουν πολύ μεγαλύτερη πυκνότητα αποθήκευσης ενέργειας από τις μπαταρίες ιόντων λιθίου, προσφέροντας ένα σημαντικό πλεονέκτημα για τα ηλεκτρικά οχήματα όσον αφορά την εμβέλεια, ενώ παράλληλα είναι ελαφρύτερα και απαιτούν λιγότερο χώρο. Τα FCEV μπορούν επίσης να ανεφοδιαστούν σε λίγα λεπτά, ενώ η φόρτιση των BEV απαιτεί πολύ μεγαλύτερο χρόνο αναμονής [48].

Ως εκ τούτου, η τεχνολογία FC μπορεί να οδηγήσει στο πλεονέκτημα της υπέρβασης αρνητικών πτυχών, όπως το άγχος για την εμβέλεια, επειδή τα ηλεκτρικά οχήματα που είναι εξοπλισμένα με κυψέλες καυσίμου (FCEV) παρουσιάζουν μεγαλύτερη αυτονομία και μικρότερο χρόνο φόρτισης από τα ηλεκτρικά οχήματα [49].

Επιπλέον, υπάρχουν και οικονομικά πλεονεκτήματα από τη χρήση των FCEV, καθώς εκτιμάται ότι η φόρτιση/εκφόρτιση της μπαταρίας ιόντων λιθίου σε θερμοκρασία 1 C (1 ώρα) έχει κόστος περίπου 130 USD/kW όσον αφορά την παραγόμενη ισχύ. Αντίθετα, οι δεξαμενές συμπιεσμένου υδρογόνου και οι στοίβες κυψελών καυσίμου κοστίζουν αντίστοιχα περίπου 15 USD/kWh και 53 USD/kW [48]. Επιπλέον, εκτιμάται επίσης ότι οι τιμές του υδρογόνου στην αντλία μειώνονται σε 8 USD/kg, που ισοδυναμεί με 0,24 USD/kWh [50]. Ακόμη και αν η τεχνολογία και το κόστος ανεφοδιασμού είναι ανταγωνιστικά με τα BEV, το

κόστος αγοράς των FCEV παραμένει γενικά υψηλό και η υποδομή ανεφοδιασμού δεν είναι τόσο διαδεδομένη. Όσον αφορά τη χρήση, τα FCEV έχουν γενικά καλύτερες επιδόσεις από τα BEV αν χρησιμοποιούνται κυρίως για ταξίδια μεγάλων αποστάσεων.

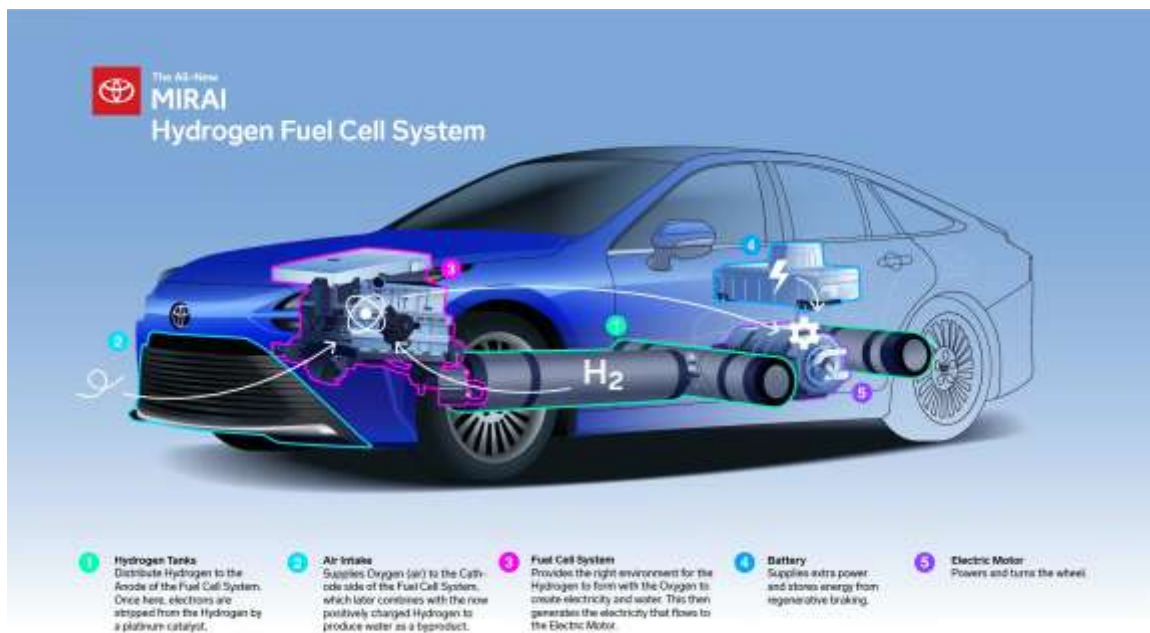
2.5 Το υδρογόνο ως καύσιμο για μεταφορικά μέσα

Το υδρογόνο είναι η απλούστερη μορφή όλων των μορίων, έχει το χαμηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο κατ' όγκο, αλλά έχει το υψηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο από όλα τα καύσιμα κατά βάρος. Είναι διαθέσιμο στην ατμόσφαιρα ως αέριο και στο νερό ως υγρό. Λόγω του υψηλού ενεργειακού περιεχομένου του υδρογόνου, χρησιμοποιείται ως καύσιμο σε εφαρμογές όπως οι κινητήρες και οι πύραυλοι. Το υδρογόνο δημιουργεί μηδενικές εκπομπές σε ρύπους, που είναι ένα από τα σημαντικότερα μειονεκτήματα των ορυκτών καυσίμων, ενώ η θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου είναι τρεις φορές υψηλότερη από εκείνη του πετρελαίου. Το κόστος παραγωγής του υδρογόνου είναι βαρύ, δεδομένου ότι πρόκειται για ένα τεχνητό καύσιμο, και κοστίζει περίπου τρεις φορές περισσότερο από τη διύλιση του πετρελαίου [57]. Ένας σημαντικός αριθμός ερευνών αφιερώνονται στη δημιουργία ενός αποτελεσματικού και βιώσιμου τρόπου παραγωγής υδρογόνου και εφαρμογές του υδρογόνου σε κινητήρες. Οι κατασκευαστές αυτοκινήτων, όπως η Honda, η Toyota και η Hyundai, έχουν αρχίσει να κατασκευάζουν οχήματα με κυψέλες καυσίμου (FCV) με καύσιμο το υδρογόνο. Αυτά τα FCV είναι σήμερα διαθέσιμα στη Βόρεια Αμερική, την Ασία και την Ευρώπη. Οι σημερινοί καταναλωτές είναι κυρίως άτομα με υψηλό μορφωτικό επίπεδο, οικογένειες με υψηλό εισόδημα, άτομα με μεγαλύτερες οικιακές μονάδες, άτομα που είναι πρόθυμα να αλλάξουν τον τρόπο ζωής τους και άτομα με άλλα παρόμοια χαρακτηριστικά [58]. Μέχρι τον Ιούνιο του 2018, έχουν πωληθεί σε καταναλωτές πάνω από 6500 FCV. Η Καλιφόρνια είναι η

κορυφαία αγορά για τα FCV, με σχεδόν 3000 FCV να έχουν παραδοθεί εκεί από τα 5233 οχήματα που έχουν πωληθεί παγκοσμίως, λόγω του ότι η πολιτεία στεγάζει το μεγαλύτερο δίκτυο σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου στον κόσμο και οι αυτοκινητοβιομηχανίες πωλούν τα οχήματα εκεί. Επί του παρόντος, αρκετές αυτοκινητοβιομηχανίες προωθούν τα FCV στους καταναλωτές, τα οποία συχνά συγκρίνονται με τα BEV. Τόσο τα BEV όσο και τα FCV προσφέρουν μηδενικές εκπομπές καυσαερίων, τη δυνατότητα να τροφοδοτούνται με καύσιμα από ανανεώσιμες και βιώσιμες πηγές ενέργειας και χρησιμοποιούν ηλεκτροκινητήρες. Οι πιο αξιοσημείωτες διαφορές μεταξύ των FCV και των BEV είναι η αυτονομία οδήγησης και ο τρόπος ανεφοδιασμού. Τα FCV έχουν αυτονομία οδήγησης άνω των 300 μιλίων και μπορούν να ανεφοδιαστούν σε λιγότερο από 10 λεπτά σε ένα σταθμό ανεφοδιασμού υδρογόνου, κάτι που είναι πιο συγκρίσιμο με ένα παραδοσιακό όχημα που κινείται με ορυκτά καύσιμα. Το υδρογόνο έχει μεγαλύτερες δυνατότητες χρήσης ως καύσιμο στο μέλλον. Εκτιμάται ότι, έως το έτος 2030, το κόστος των κυψελών καυσίμου θα είναι ανταγωνιστικό σε σχέση με τα οχήματα εσωτερικής καύσης με βάση τις τεχνολογικές βελτιώσεις που γίνονται και την αυξημένη διαθεσιμότητα. Ένα από τα κύρια εμπόδια που αντιμετωπίζει η μαζική χρήση του υδρογόνου είναι η αποτελεσματικότερη αποθήκευση. Λόγω της χαμηλής πυκνότητας του υδρογόνου, δεν μπορεί να αποθηκευτεί τόσο εύκολα όσο τα παραδοσιακά ορυκτά καύσιμα. Το υδρογόνο απαιτεί συμπίεση, ψύξη ή συνδυασμό αυτών. Η πιο ευνοϊκή μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου είναι η φυσική συγκράτηση, συγκεκριμένα σε δεξαμενές συμπίεσης, επειδή είναι άμεσα διαθέσιμες. Ο χρόνος πλήρωσης αυτών των δεξαμενών είναι ανταγωνιστικός με τα ορυκτά καύσιμα όταν το υδρογόνο είναι προψυγμένο. Το κόστος είναι το κύριο εμπόδιο για την ευρεία χρήση των δεξαμενών συμπιεσμένου υδρογόνου, επειδή το υλικό και η τοποθέτηση είναι ακριβά.

Ένα άλλο πιθανό εμπόδιο είναι η ανησυχία του κοινού για τη χρήση τέτοιων δεξαμενών αποθήκευσης υψηλής πίεσης (70 MPa) σε οχήματα [59]. Μια

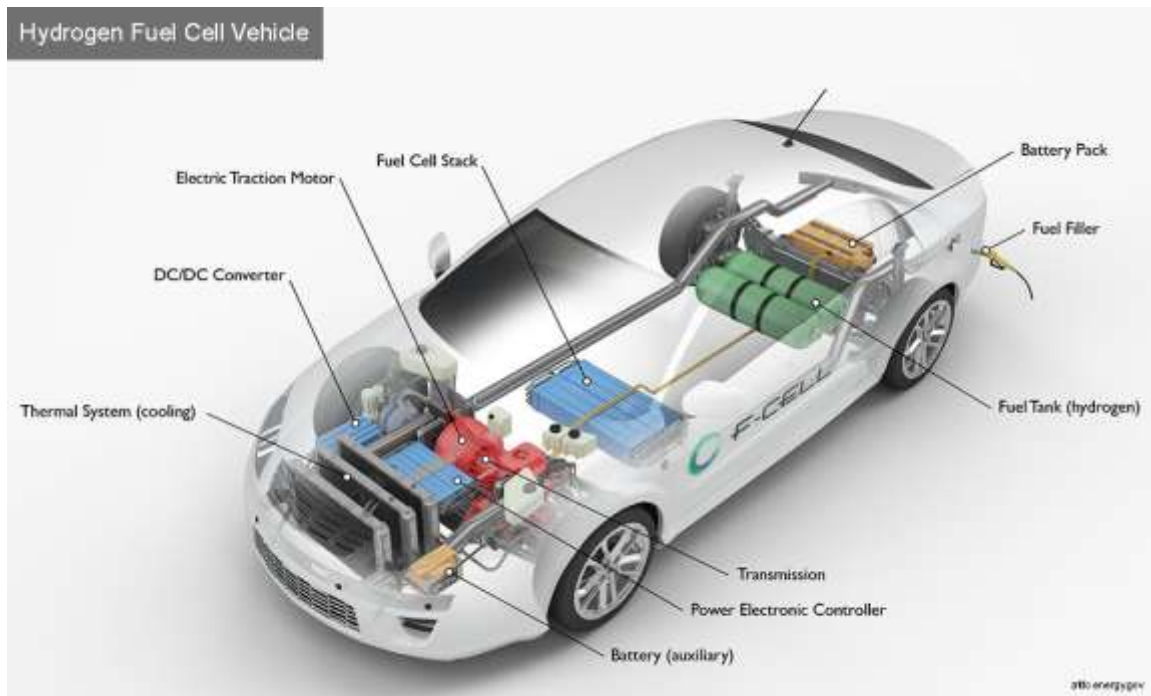
εναλλακτική λύση για τις παραδοσιακές δεξαμενές, η οποία εξακολουθεί να ερευνάται, είναι μια δεξαμενή με εσωτερικό σκελετό, η οποία είναι μια πολύπλοκη κατασκευή από δοκούς που βρίσκονται υπό τάση εντός της δεξαμενής για να αντιστέκονται στις δυνάμεις του συμπιεσμένου αερίου. Η αποθήκευση υγρού υδρογόνου (LH₂) έχει βελτιωθεί σημαντικά, επιτυγχάνοντας την καλύτερη ειδική μάζα (15%) από οποιοδήποτε άλλο σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου για αυτοκίνητα [60]. Η ενεργειακή απόδοση μειώνεται όταν χρησιμοποιείται υγρό υδρογόνο.



Εικόνα 4: Ενσωμάτωση κυψελών υδρογόνου σε όχημα (Πηγή: afdc.energy.gov)

Ένας πολλά υποσχόμενος εναλλακτικός σχεδιασμός είναι μια δεξαμενή στην οποία το υδρογόνο συμπιέζεται σε μεγάλο βαθμό σε κρυογονικές θερμοκρασίες. Πρέπει να γίνουν περισσότερες μελέτες για τη μέθοδο αυτή ώστε να

προσδιοριστεί η μακροπρόθεσμη αντοχή και η αποδοχή του συστήματος από το κοινό. Τα συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου απαιτούν σημαντική έρευνα και πρόοδο για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις για χρήση σε μεγάλη κλίμακα. Το πιο καλά μελετημένο υδρίδιο είναι το NaAlH_4 , αλλά δεν έχει την απαιτούμενη χωρητικότητα για εφαρμογή σε αυτοκίνητα. Με βάση τα αποτελέσματα των λίγων υφιστάμενων μελετών, αναφέρεται ότι θα μπορούσαν να κατασκευαστούν δεξαμενές χωρίς εσωτερικά στοιχεία μεταφοράς θερμότητας με βάση τη μέτρια θερμότητα απορρόφησης του υδρογόνου στις επιφάνειες [61]. Αν και η παρουσία υδρογόνου είναι άφθονη στην ατμόσφαιρα, δεν είναι στην πιο καθαρή μορφή. Το υδρογόνο μπορεί να εξαχθεί από το νερό, τα καύσιμα υδρογονανθράκων, το υδρόθειο και άλλα χημικά στοιχεία [62]. Η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου από τα σχετικά στοιχεία απαιτεί εξωτερική ενέργεια, όπως θερμική, ηλεκτρική, φωτονική και βιοχημική ενέργεια. Το υδρογόνο μπορεί να εξαχθεί είτε από μη ανανεώσιμες είτε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.



Εικόνα 5: Όχημα με κυψέλες υδρογόνου (Πηγή: www.toyota.com)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΜΕΛΛΟΝ ΓΙΑ ΤΙΣ ΚΥΨΕΛΕΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΣΤΙΣ ΜΕΤΑΦΟΡΕΣ

3.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια αποτελεί παράγοντα που καθορίζει την οικονομία, τις υποδομές, τις μεταφορές και το βιοτικό επίπεδο μιας χώρας. Το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται σε παγκόσμιο επίπεδο είναι η δυσαναλογία μεταξύ της κατανάλωσης και της διαθεσιμότητας της ενέργειας. Όλα τα έθνη εξαρτώνται επί του παρόντος από τα

ορυκτά καύσιμα για την παραγωγή ενέργειας και αυτά τα ορυκτά καύσιμα δεν είναι βιώσιμες πηγές. Για να καλυφθούν οι ενεργειακές ανάγκες του ταχύτερα αυξανόμενου παγκόσμιου πληθυσμού, είναι απαραίτητη η αναβάθμιση σε μια εναλλακτική, βιώσιμη πηγή ενέργειας που δεν επηρεάζει αρνητικά το περιβάλλον [51]. Τις τελευταίες δεκαετίες, πολλές χώρες έχουν δώσει έμφαση στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του τομέα των μεταφορών και στη μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο. Η εξάντληση των μη ανανεώσιμων συμβατικών καυσίμων είναι ένα από τα κύρια ζητήματα του σύγχρονου ενεργειακού σεναρίου, το οποίο καθιστά την κατάσταση της ενεργειακής βιομηχανίας μη βιώσιμη και προκαλεί επίσης περιβαλλοντικά προβλήματα, όπως το φαινόμενο του θερμοκηπίου [52]. Σήμερα, το ποσοστό της χρήσης ορυκτών καυσίμων εξακολουθεί να είναι υψηλό και προβλέπεται ότι θα αντιπροσωπεύει περίπου το 75% της παραγωγής ενέργειας ως το 2050 [53]. Συνολικά, το σημερινό ενεργειακό σενάριο έχει πολλά μειονεκτήματα. Ωστόσο, υπάρχουν πολλές βιώσιμες πηγές ενέργειας, και αν αυξηθεί η χρήση τους, το σενάριο θα είναι πολύ πιο αισιόδοξο για τις μελλοντικές γενιές. Προβλέπεται από τους περιβαλλοντολόγους ότι το χειρότερο σενάριο της υπερθέρμανσης του πλανήτη και των επιπτώσεών της δεν θα επιτευχθεί λόγω διαφόρων πρωτοβουλιών. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες, τα οχήματα έχουν γίνει πιο αποδοτικά ως προς την κατανάλωση καυσίμων και τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα γίνονται όλο και πιο διαδεδομένα. Μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες εναλλακτικές μορφές ενέργειας στα οχήματα είναι η ηλεκτρική ενέργεια. Όπως συμβαίνει και με τις συμβατικές πηγές ενέργειας, όπως το πετρέλαιο και ο άνθρακας, η ηλεκτρική ενέργεια δεν αποτελεί πρωτογενή πηγή ενέργειας. Μια πλήρως φορτισμένη μπαταρία είναι ένας φορέας ενέργειας. Τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία (BEV) είναι εξαιρετικά αποτελεσματικά στη μετατροπή της ενέργειας από το δίκτυο σε ελκτική δύναμη και μπορούν να ανακτούν ενέργεια κατά τη διάρκεια των οδηγιών χρησιμοποιώντας την αναγεννητική πέδηση. Ένα σημαντικό μειονέκτημα των BEV είναι ότι έχουν συνήθως περιορισμένη εμβέλεια λόγω του μεγέθους και του

κόστους των μπαταριών που απαιτούνται για την ισχύ και τις ενεργειακές απαιτήσεις του οχήματος. Ο ανεφοδιασμός των συστημάτων μπαταριών μπορεί επίσης να διαρκέσει αρκετές ώρες, αντί για λίγα λεπτά με ένα συμβατικό όχημα (CV). Για να χρησιμοποιηθούν τα πλεονεκτήματα τόσο των ηλεκτρικών όσο και των συμβατικών οχημάτων και να γεφυρωθεί το χάσμα μεταξύ των CV και των BEV, εξετάζεται μια εναλλακτική λύση. Το υδρογόνο είναι ένας χημικός φορέας ενέργειας που έχει τη δυνατότητα να παράγει ηλεκτρική ενέργεια έως και 39,39 kWh/kg, η οποία ξεπερνά την ενεργειακή πυκνότητα των περισσότερων μπαταριών. Μια κυψέλη καυσίμου (FC) έχει άμεση αναλογία με μια μηχανή εσωτερικής καύσης (MEK). Μια MEK μετατρέπει τη χημική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο καύσιμο που παρέχεται στον κινητήρα για την παραγωγή μηχανικής ενέργειας περιστροφής [54]. Η παραγόμενη περιστροφική ενέργεια χρησιμοποιείται στη συνέχεια είτε για την κίνηση ενός οχήματος είτε εστιάζεται μέσω μιας γεννήτριας και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Μια MEK λειτουργεί με τον ίδιο τρόπο όπως μια MEK, καθώς η χημική ενέργεια μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια στην MEK, αλλά με μια διαδικασία φιλική προς το περιβάλλον [55]. Σε αντίθεση με μια μπαταρία που αδειάζει ενώ χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία ηλεκτρικών εξαρτημάτων, οι κινητήρες εσωτερικής καύσης και οι κυψέλες καυσίμου λειτουργούν ως συνεχώς λειτουργικές πηγές ενέργειας όσο τους παρέχεται καύσιμο [56].

Ως εκ τούτου, προβλέπεται ότι η κυψέλη καυσίμου υδρογόνου μπορεί να ξεπεράσει τα μειονεκτήματα των BEV, καθιστώντας το υδρογόνο το καύσιμο μεταφοράς του μέλλοντος.

3.2 Μορφές αποθήκευσης υδρογόνου

3.2.1 Αποθήκευση υδρογόνου σε FCV

Η αποθήκευση υδρογόνου είναι ένα από τα σημαντικότερα ερευνητικά ζητήματα στην ανάπτυξη των FCVs. Τα συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου βρίσκονται υπό ανάπτυξη για την εισαγωγή νέων μεθόδων για την κάλυψη των αναγκών των πελατών. Λόγω της χαμηλής ενεργειακής πυκνότητας του υδρογόνου, είναι δύσκολο να αποθηκευτεί αρκετή ποσότητα σε ένα όχημα ώστε να επιτευχθεί επαρκής εμβέλεια οδήγησης χωρίς το δοχείο αποθήκευσης να είναι πολύ μεγάλο ή πολύ βαρύ.

3.2.2 Αποθήκευση σε δεξαμενή υπό πίεση

Οι δεξαμενές υπό πίεση με αρκετή αντοχή -που συνεπάγεται αντοχή στην κρούση για ασφάλεια σε συγκρούσεις- κατασκευάζονται από κυλίνδρους τυλιγμένους με ανθρακονήματα. Το συμπιεσμένο υδρογόνο σε τέτοιες δεξαμενές έχει απεικονιστεί σε πίεση 34 MPa με μάζα 32,5 kg και όγκο 186 L, ο οποίος είναι επαρκής για εμβέλεια 500 km. Ο όγκος της δεξαμενής είναι περίπου το 90% ενός βαρελιού 55 γαλονιών, το οποίο είναι μεγάλο για μεμονωμένα αυτοκίνητα. Ενώ ο στόχος του 6 wt% μπορεί να επιτευχθεί, ο όγκος της δεξαμενής είναι προβληματικός. Έχουν επιτευχθεί πιέσεις 70 MPa και το 2002 στη Γερμανία πιστοποιήθηκε η δεξαμενή αποθήκευσης 10.000 psi (68 MPa) της Quantum Technology [63].

3.2.3 Καθήλωση υδρογόνου σε ενώσεις με βάση τα μέταλλα

Η ενυδάτωση μετάλλων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση υδρογόνου κάτω από 3 ή 4 MPa σε θερμοκρασία πάνω από τη θερμοκρασία δωματίου- ωστόσο, τα μέταλλα προκαλούν πολύ μεγάλο πρόσθετο βάρος για τα περισσότερα οχήματα και είναι επίσης ακριβά [64]. Έχει βρεθεί ότι το νιτρίδιο του

λιθίου μπορεί να αποθηκεύσει μεγάλες ποσότητες υδρογόνου. Το υλικό αυτό αποθηκεύει υδρογόνο απρόσμεσα στην περιοχή θερμοκρασιών 100-210 °C και πέτυχε πρόσληψη 9,3 wt% όταν το δείγμα διατηρήθηκε στους 255 °C για 40 λεπτά. Υπό υψηλό κενό (10⁻⁹ MPa, 10⁻⁵ mbar) περίπου τα δύο τρίτα του υδρογόνου απελευθερώθηκαν σε θερμοκρασίες κάτω των 200 °C. Το υπόλοιπο τρίτο του αποθηκευμένου υδρογόνου απαιτούσε θερμοκρασίες άνω των 320 °C για να απελευθερωθεί. Το υδρογόνο απορροφήθηκε από το αμίδιο του αλλιθίου (LiNH₂) και το υδρίδιο του λιθίου (LiH).

3.2.4 Αποθήκευση υγρού υδρογόνου μέσω κρυογονικής

Κατά τη μέθοδο κρυογονικής αποθήκευσης υγρών, το υδρογόνο αποθηκεύεται σε υγρή μορφή με την επίτευξη κρυογονικής θερμοκρασίας -253,2 °C. Το υγρό υδρογόνο (LH₂) έχει χαμηλή πυκνότητα και 1 L υγρού υδρογόνου ζυγίζει μόνο 71,07 X 10⁻³ kg. Ένα λίτρο υδρογόνου μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια 8,52 MJ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΚΥΨΕΛΗ ΚΑΥΣΙΜΟΥ

4.1 Τύποι κυψελών καυσίμου

Υπάρχουν διάφοροι τύποι συστημάτων Κυψέλης Καυσίμου (FC). Ωστόσο, η αρχή της λειτουργίας τους είναι παρόμοια. Για ένα σύστημα κυψέλης καυσίμου απαιτούνται τρεις πυλώνες: μια άνοδος, μια κάθοδος και ένας ηλεκτρολύτης. Τα FC κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τον τύπο του υλικού ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται. Μια FC μπορεί να αποτελείται από εκατοντάδες μεμονωμένες κυψέλες, αλλά κάθε μία έχει τα τρία ίδια θεμελιώδη συστατικά. Στην πιο

συνηθισμένη διάταξη ο ηλεκτρολύτης βρίσκεται μεταξύ της καθόδου και της ανόδου. Αυτός ο τύπος FC είναι επίσης γνωστός ως FC με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων.

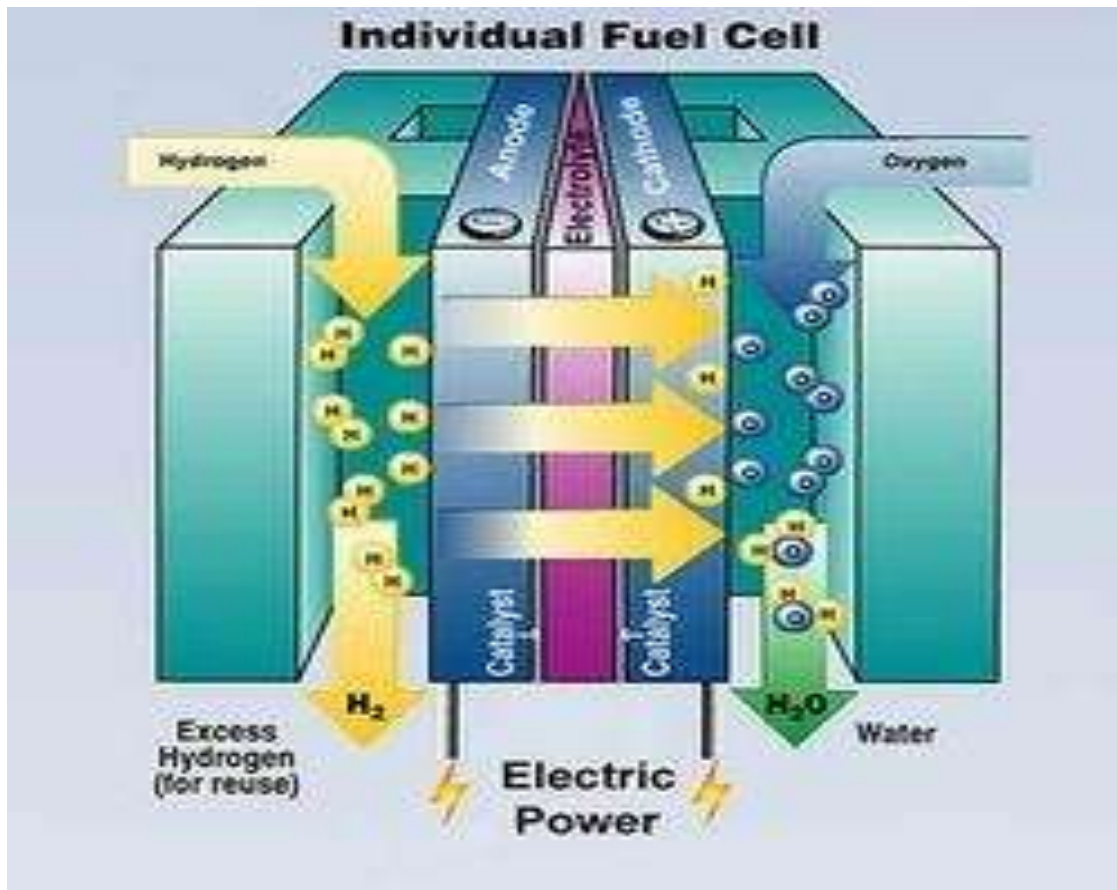
Ενώ το υλικό ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται ποικίλλει ανάλογα με τον τύπο της FC, η γενική λειτουργία της FC είναι η εξής - το καύσιμο (καθαρό υδρογόνο) τροφοδοτείται στο στην άνοδο της κυψέλης καυσίμου, ενώ ο αέρας ή το καθαρό οξυγόνο τροφοδοτείται στην πλευρά της καθόδου της FC. Στην ανοδική πλευρά της κυψέλης, τα ηλεκτρόνια διαχωρίζονται καθώς το αέριο προσπαθεί να διαπεράσει τη μεμβράνη του ηλεκτρολύτη. Η μεμβράνη λειτουργεί ως φίλτρο για το διαχωρισμό των ηλεκτρονίων και των ιόντων υδρογόνου, ενώ επιτρέπει τη διέλευση μόνο των ιόντων υδρογόνου. Στο διαμέρισμα της καθόδου, τα ιόντα υδρογόνου που πέρασαν από τη μεμβράνη συνδυάζονται με τα άτομα οξυγόνου από την παροχή αέρα για να παραχθεί H_2O ως παραπροϊόν- παράγεται επίσης θερμότητα ως παραπροϊόν [65]. Σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, όπου το καύσιμο αναμιγνύεται με τον αέρα και το καύσιμο, σε μια FC υπάρχει διαχωρισμός του καυσίμου και του οξειδωτικού χωρίς καύση του καυσίμου. Επομένως, οι κυψέλες δεν παράγουν τις επιβλαβείς εκπομπές που παράγουν οι μηχανές εσωτερικής καύσης.

Στις αρχές της δεκαετίας του 1970, ο K. Kordesch [71] τροποποίησε ένα αυτοκίνητο ώστε να λειτουργεί με ένα FC 6 kW και μια μπαταρία οξέος μολύβδου. Το αυτοκίνητο κυκλοφόρησε σε δημόσιους δρόμους για περίπου τρία χρόνια. Το 1993, η Ballard λάνσαρε ένα λεωφορείο ελαφρών μεταφορών με κυψέλες καυσίμου που χρησιμοποιούσε σύστημα FC 120 kW, ενώ το 1995 ακολούθησε ένα λεωφορείο βαρέων μεταφορών που χρησιμοποιούσε σύστημα FC 200 kW. Το 1994 και το 1995, η H-Power κατασκεύασε τρία υβριδικά λεωφορεία κυψέλης καυσίμου-μπαταρίας, το καθένα με ένα FC 50 kW και μια μπαταρία νικελίου-καδμίου 100 kW [72]. Η σημασία αυτών των προσπαθειών ήταν να γίνει κατανοητή η τεχνολογία FC στους βασικούς υπεύθυνους λήψης

αποφάσεων στη βιομηχανία και την κυβέρνηση. Αυτά τα λεωφορεία βοήθησαν να αποδειχθεί ότι οι κυψέλες καυσίμου θα λειτουργούσαν στον πραγματικό κόσμο. Οι επιχειρήσεις παραγωγής στρατιωτικών οχημάτων υιοθέτησαν νωρίς την τεχνολογία κυψελών καυσίμου λόγω της ευκολίας του κεντρικού ανεφοδιασμού και της μειωμένης απαίτησης για μεγάλη εμβέλεια μεταξύ των ανεφοδιασμών.

4.2 Κυψέλη καυσίμου στερεών οξειδίων (SOFC)

Μια αρκετά κοινή μορφή FC είναι μια κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου [66]. Οι SOFC διοχετεύουν ιόντα σε μια κεραμική μεμβράνη σε υψηλές θερμοκρασίες. Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, συνήθως γύρω στους 650-800 °C. Ένα πλεονέκτημα των SOFC είναι ότι, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και της μεταφοράς οξειδωτικών ιόντων (O⁻), αυτές οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να αποθηκεύσουν ποικιλία καυσίμων.



Εικόνα 6: Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας μίας κυψέλης υδρογόνου (Πηγή: Μπομπολάκη, 2015)

4.3 Κυψέλη καυσίμου άμεσης μεθανόλης (DMFC)

Η μεθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο στην κυψέλη σε ένα σύστημα DMFC. Η μεθανόλη είναι ένα οργανικό καύσιμο που παράγεται από άνθρακα ή γεωργικά προϊόντα. Στις DMFC, τόσο η κάθοδος όσο και η άνοδος είναι καταλύτες από λευκόχρυσο ή από λευκόχρυσο. Το διάλυμα ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιείται είναι το σουλφονικό οξύ τριφλουρομεθανίου. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου εφαρμόστηκαν αρχικά σε μικρές φορητές ηλεκτρονικές συσκευές, όπως φορητοί υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα [65].

4.4 Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)

Οι PAFC βασίζονται σε έναν όξινο ηλεκτρολύτη, για την παραγωγή ιόντων υδρογόνου. Το φωσφορικό οξύ (H_3PO_4) είναι ένα παχύρρευστο υγρό που περιέχεται με τριχοειδείς κυψέλες στο FC σε μια πορώδη μήτρα καρβιδίου του πυριτίου. Οι PAFC είναι κυψέλες καυσίμου μέσης θερμοκρασίας που διοχετεύουν ιόντα υδρογόνου, επομένως δεν είναι τόσο ευέλικτες ως προς το καύσιμο όσο οι κυψέλες καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας που διοχετεύουν οξειδωτικά ιόντα (π.χ. O^- , CO^-).

4.5 Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολύτη (PEMFC)

Οι μεμβράνες στερεών πολυμερών χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρολύτης στις PEMFC. Η πολυμερική μεμβράνη είναι το υπερφθοροσουλφονικό οξύ που αναφέρεται ως Nafion. Αυτή η πολυμερική μεμβράνη είναι όξινη- ως εκ τούτου, τα ιόντα που μεταφέρονται είναι ιόντα υδρογόνου ή πρωτόνια. Το PEMFC τροφοδοτείται με καθαρό υδρογόνο και το οξειδωτικό είναι αέρας ή καθαρό οξυγόνο. Οι PEMFC είναι κυψέλες καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας που διοχετεύουν ιόντα υδρογόνου (H^+).

4.6 Μοναδιαία αναστρέψιμη κυψέλη καυσίμου

Μια μοναδιαία αναστρέψιμη κυψέλη καυσίμου (URFC) είναι μια συσκευή αποθήκευσης ενέργειας που λειτουργεί σε λειτουργία ηλεκτρόλυσης νερού (λειτουργία EC) για την παραγωγή υδρογόνου και λειτουργεί σε λειτουργία FC για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Κατά την εναλλαγή λειτουργίας της

URFC, λαμβάνει χώρα μια αντιστρεπτή ηλεκτροχημική αντίδραση που προκαλεί την αλλαγή της θερμοκρασίας [68]. Η συσσώρευση νερού στις URFC είναι ένα σημαντικό πρόβλημα, καθώς μειώνει τον ρυθμό ροής μάζας των αντιδρώντων στη λειτουργία των FC.

Για την απομάκρυνση του νερού στη μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων στο τέλος της λειτουργίας FC έχει χρησιμοποιηθεί καθαρισμός με αέριο [69]. Ο χρόνος καθαρισμού με αέριο αυξάνεται με τη μείωση της θερμοκρασίας της κυψέλης. Ο ρυθμός ροής καθαρισμού αερίου πρέπει να είναι μεγαλύτερος από το χρόνο καθαρισμού. Λόγω των υψηλών ρυθμών ροής, τα σταγονίδια νερού μπορούν να απομακρυνθούν από αυτήν. Στη λειτουργία FC, ο ρυθμός ροής μάζας των αντιδρώντων επηρεάζεται από την περιεκτικότητα σε νερό στην κυψέλη. Για να γίνει η επιτυχής διαδικασία εναλλαγής λειτουργίας από τη λειτουργία ηλεκτρόλυσης στη λειτουργία κυψέλης καυσίμου, θα πρέπει να παρέχεται αρκετός χρόνος. Η παροχή επαρκούς χρόνου για τον καθαρισμό των αερίων ενισχύει τον ρυθμό ροής μάζας, γεγονός που βοηθά στην εκκίνηση της FC. Το νερό στο κανάλι ωθείται από το αέριο οξυγόνο, αλλά το νερό στην πλευρά του οξυγόνου εξακολουθεί να υπάρχει λόγω του αυξημένου χρόνου που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση του νερού. Η εναλλαγή προ αντιδρώντων είναι η μέθοδος κατά την οποία τα αντιδρώντα αέρια (οξυγόνο και υδρογόνο) ενεργοποιούνται πριν από τη μετάβαση στη λειτουργία FC.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ

Η ανάπτυξη μιας σημαντικής πτυχής του οχήματος κυψελών καυσίμου - του ηλεκτροκινητήρα - χρονολογείται από τις αρχές του 19ου αιώνα. Αν και τα ηλεκτρικά οχήματα ήταν ισχυρός διεκδικητής στις αρχές του 20ού αιώνα για να γίνουν μια κύρια μέθοδος μεταφοράς, το όχημα εσωτερικής καύσης τελικά επικράτησε λόγω της μικρής εμβέλειας και του υψηλού κόστους των ηλεκτρικών οχημάτων. Επιπλέον, η ανακάλυψη του πετρελαίου του Τέξας μείωσε την τιμή της βενζίνης, με αποτέλεσμα να γίνει προσιτή στον μέσο καταναλωτή, γεγονός που οδήγησε τα κυψέλες καυσίμου και τα ηλεκτρικά οχήματα να περάσουν σε δεύτερη μοίρα έναντι του οχήματος εσωτερικής καύσης για το μεγαλύτερο μέρος των τελευταίων 100 ετών. Το πετρελαϊκό εμπάργκο του 1973 έδωσε το έναυσμα για ένα νέο ενδιαφέρον για την ενέργεια FC για εφαρμογές προσωπικών μεταφορών, καθώς οι κυβερνήσεις προσπαθούσαν να μετριάσουν την εξάρτησή τους από τις εισαγωγές πετρελαίου.

Παρά τις βελτιώσεις, πρέπει να ξεπεραστούν πολλά εμπόδια πριν τα οχήματα με κυψέλες υδρογόνου γίνουν μια συνηθισμένη μορφή μεταφορικού μέσου. Ένα προφανές ζήτημα είναι η ανάγκη για υποδομές παροχής υδρογόνου που θα επιτρέψει τον ανεφοδιασμό των οχημάτων. Σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου υπάρχουν σήμερα σε πολλές χώρες σε όλο τον κόσμο, όπως ο Καναδάς, οι ΗΠΑ, η Ισλανδία, η Ιαπωνία, η Σιγκαπούρη και η Γερμανία. Αν και οι σταθμοί αυτοί δεν είναι προς το παρόν αρκετά διαδεδομένοι ώστε να επιτρέψουν σε μεγάλο αριθμό ανθρώπων να αρχίσουν να οδηγούν FCV, αναμένεται ότι θα δημιουργηθούν περισσότερες υποδομές υδρογόνου καθώς περισσότερα FCV θα γίνονται εμπορικά διαθέσιμα. Τα FCV υδρογόνου έχουν εξελιχθεί σημαντικά-σήμερα μπορούν να διανύσουν από 311 έως 597 μίλια με πλήρες ρεζερβουάρ. Η ανάπτυξη αυτών των οχημάτων αυξάνεται, αλλά εξακολουθούν να απαιτούν σημαντικές βελτιώσεις.

Οι κυψέλες υδρογόνου έχουν τη δυνατότητα να αποτελέσουν σημαντική λύση για το μέλλον των καυσίμων, καθώς παρέχουν ανανεώσιμη ενέργεια με ελάχιστες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Οι παρακάτω παρατηρήσεις αντικατοπτρίζουν τις τάσεις και τις προοπτικές για το μέλλον των κυψελών υδρογόνου ως καυσίμου:

Αναπτύξεις στην τεχνολογία: Η τεχνολογία των κυψελών υδρογόνου έχει σημειώσει σημαντικές πρόόδους τα τελευταία χρόνια. Οι βελτιώσεις στην απόδοση, τη διάρκεια ζωής και την κόστος παραγωγής των κυψελών υδρογόνου καθιστούν την τεχνολογία πιο ανταγωνιστική και προσιτή.

Υποδομές υδρογόνου: Οι υποδομές για την παραγωγή, αποθήκευση και διανομή υδρογόνου αναπτύσσονται σε παγκόσμιο επίπεδο. Η κατασκευή υδρογονανθράκων και οι εγκαταστάσεις αποθήκευσης επιτρέπουν την εξάπλωση της υδρογονοοικονομίας και τη χρήση κυψελών υδρογόνου σε διάφορους τομείς.

Μεταφορικός τομέας: Ο τομέας των οχημάτων με κυψέλες υδρογόνου έχει μεγάλη δυναμική ανάπτυξης. Η τεχνολογία των κυψελών υδρογόνου μπορεί να παρέχει μακροχρόνια αυτονομία, γρήγορη ανεφοδιαστικότητα και μηδενικές εκπομπές καυσαερίων, καθιστώντας τα υδρογονοκίνητα οχήματα μια ελκυστική επιλογή για την κινητικότητα του μέλλοντος.

Ενεργειακή αποθήκευση: Οι κυψέλες υδρογόνου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αποθήκευση περιορισμένης και ανανεώσιμης ενέργειας. Με τη χρήση υδρογόνου ως καυσίμου, μπορεί να εξισορροπηθεί η αστάθεια στην παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια.

Προκλήσεις: Παρά τις προοπτικές των κυψελών υδρογόνου, υπάρχουν προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν. Οι πιο σημαντικές περιλαμβάνουν τη μείωση του κόστους παραγωγής, την ανάπτυξη επαρκών υποδομών και την ασφαλή αποθήκευση και χειρισμό του υδρογόνου. Επιπλέον, η παραγωγή

υδρογόνου με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πρέπει να επιταχυνθεί προκειμένου να μειωθεί η εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.

Συνολικά, το μέλλον των κυψελών υδρογόνου ως καυσίμου φαίνεται ελπιδοφόρο. Οι τεχνολογικές πρόοδοι και οι επενδύσεις στις υποδομές υδρογόνου ενισχύουν την αποδοχή και την εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής. Ωστόσο, πρέπει να αντιμετωπιστούν οι προκλήσεις για να επιτευχθεί η πλήρης ενσωμάτωση των κυψελών υδρογόνου στο ενεργειακό μας σύστημα και να επιτευχθούν οι αναμενόμενα οφέλη σε βιώσιμη κινητικότητα και ενεργειακή αποθήκευση.

Βιβλιογραφικές αναφορές

- [1]. Cline, W. R. (1992). The Economics of Global Warming. Washington D. C: Publisher Name, pp. 45-55.
- [2]. Popular Mechanics Magazine. (2005). Title of the Article. Popular Mechanics Magazine, September, pp. 10-12.
- [3]. Fanchi, J. (2005). Energy in the twenty-first century. World Scientific, pp. 73-74.
- [4]. EU Photovoltaic Technology Platform. (2011). "Photovoltaic Development." [Online] Available at: www.eupvplatform.org/pv-development.html. .
- [5]. Title of the Report. (2011). Renewable Energy: Markets and Prospects by Technology. [Online] Available at: www.iea.org/papers/2011/Renew_Tech.pdf. .
- [6]. Solar Star TM. (n.d.). "Difference between monocrystalline polycrystalline and amorphous thin film solar cell." [Online] Available at: www.pvsolarchina.com/difference-between-monocrystalline-polycrystalline-and-amorphous-thin-film-solar-cell.html. .
- [7]. European Photovoltaic Industry Association. (n.d.). "PV Technologies: Cells and modules." [Online] Available at: www.epia.org/solar-pv/pv-technologies-cells-and-modules.html. .
- [8]. European Photovoltaic Industry Association. (n.d.). "Environmental impact." [Online] Available at: www.epia.org/solar-pv/environmental-impact.html. .
- [9]. Engineering.com. (n.d.). "Photovoltaics." [Online] Available at: www.engineering.com/SustainableEngineering/RenewableEnergyEngineering/SolarEnergyEngineering/Photovoltaics/tabid/3890/Default.aspx. .

- [10]. Markvart, T., & Castaner, L. (2005). Solar Cells: Materials, manufacture and operation. Elsevier Advanced Technology, pp. 79-80, 84-85.
- [11]. Title of the Report. (n.d.). Renewable Energy: Markets and Prospects by Technology. [Online] Available at: www.iea.org/papers/2010/pv_roarmap.pdf. .
- [12]. Luque, A., & Hegedus, S. (2004). Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. John Wiley & Sons.
- [13]. Bahaj, A. S. (2002). Meanw of enchancing and promoting the use of solar energy. Renewable Energy, 27, pp. 97-105.
- [14]. Malkivia-pyh, G., & Pyh, Y. A. (2002). Sustainable energy Resources, Technology and Planning. Boston: WIT Press, pp. 24-29.
- [15]. Tieten, T., & Lewise, L. (2000). Environmetal and Natural Resources conomics. 8th edition, pp. 59-62.
- [16]. Booth, D. E. (1998). The Environmental Consequences of Growth. London and New York: Publisher Name, pp. 88-90.
- [17]. Ashokverghese. (1998). "New and Renewable Energy Resources." In Proceedings of International conference on Alternate Energy resources, Asian Institute of Technology, Thailand, pp. 403-410.
- [18]. Time Magazine. (2005). Title of the Article. Time Magazine, August, pp. 32-33.
- [19]. Journal of Innovations in Renewable Energy. (2005). Title of the Article. Journal of Innovations in Renewable Energy, 2(2), pp. 24-25.
- [20]. Ntanos, S., Ziatas, T., & Merkouri, A. (2015). Renewable energy consumption, carbon dioxide emissions and economic growth: Evidence from Europe and Greece. In Proceedings of the e-RA 10 International Scientific Conference, Piraeus, Greece, 23-25 September 2015, pp. 46-56.
- [21]. Papageorgiou, A., Skordoulis, M., Trichias, C., Georgakellos, D., & Koniordos, M. (2015). Emissions trading scheme: Evidence from the European Union countries. In Communications in Computer and Information Science (Eds.), Kravets, A., Shcherbakov, M., Kultsova, M., Shabalina, O. (Eds.), Springer International Publishing: Cham, Switzerland, pp. 222-233.
- [22]. Svenfelt, A., Engstrom, R., & Svane, O. (2011). Decreasing energy use in buildings by 50% by 2050—A backcasting study using stakeholder groups. Technol. Forecast. Soc. Chang., 78, 785-796.
- [23]. Eurostat data. (n.d.). Renewable energy data. Available at: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Renewable_energy_statistics
- [24]. OECD data. (n.d.). Renewable energy data. Available at: <https://data.oecd.org/energy/renewable-energy.htm>
- [25]. Piela, P., & Mitzel, J. (2015). Polymer electrolyte membrane fuel cell efficiency at the stack level. J. Power Sources, 292, 95-103.
- [26]. Pavelka, M., & Marsik, F. (2013). Detailed thermodynamic analysis of polymer electrolyte membrane fuel cell efficiency. Int. J. Hydrogen Energy, 38, 7102-7113.

- [27]. Hwang, J.-J. (2013). Effect of hydrogen delivery schemes on fuel cell efficiency. *J. Power Sources*, 239, 54-63.
- [28]. Fuel Cells. Available online: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells> .
- [29]. Larminie, J., & Lowry, J. (2012). Front matter. In *Electric Vehicle Technology Explained*, 2nd ed. John Wiley & Sons, Ltd.: Chichester, UK.
- [30]. Bowers, B.J., Zhao, J.L., Ruffo, M., Khan, R., Dattatraya, D., Dushman, N., Beziat, J.C., & Boudjemaa, F. (2007). Onboard fuel processor for PEM fuel cell vehicles. *Int. J. Hydrogen Energy*, 32, 1437-1442.
- [31]. Global Hydrogen Review. (2021). Available online: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2021> .
- [32]. Li, M., Zhang, X., & Li, G. (2016). A comparative assessment of battery and fuel cell electric vehicles using a well-to-wheel analysis. *Energy*, 94, 693-704.
- [33]. Brunet, J., Kotelnikova, A., & Ponssard, J.P. (n.d.). The deployment of BEV and FCEV in 2015. Available online: https://www.researchgate.net/profile/Jean-Ponssard/publication/282865470_The_deployment_of_BEV_and_FCEV_in_2015/links/5bbf165692851c4efd5651dd/The-deployment-of-BEV-and-FCEV-in-2015.pdf .
- [34]. Hydrogen or Battery? A Clear Case, Until Further Notice (2019). Volkswagen Website. Available online: <https://www.volkswagenag.com/en/news/stories/2019/08/hydrogen-or-battery--that-is-the-question.html> .
- [35]. Cano, Z.P., Banham, D., Ye, S., Hintennach, A., Lu, J., Fowler, M., & Chen, Z. (2018). Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets. *Nat. Energy*, 3, 279-289.
- [36]. Van Mierlo, J., & Maggetto, G. (2007). Fuel cell or battery: Electric cars are the future. *Fuel Cells*, 7, 165-173.
- [37]. Chen, Y., & Melaina, M. (2019). Model-based techno-economic evaluation of fuel cell vehicles considering technology uncertainties. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 74, 234-244.
- [38]. Hasan, M.K., Mahmud, M., Habib, A.A., Motakabber, S.M.A., & Islam, S. (2021). Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges. *J. Energy Storage*, 41, 102940.
- [39]. Mongird, K., Viswanathan, V., Alam, J., Vartanian, C., Sprenkle, V., & Baxter, R. (2020). 2020 Grid Energy Storage Technology Cost and Performance Assessment. *Energy*. Available online: https://esmap.org/sites/default/files/resources-document/final-esgc-cost-performance-report-12-11-2020_0.pdf .
- [40]. Battery Electric, vs. Hydrogen—Which Is the Future for Electric Vehicles? Available online: <https://www.lexology.com/library/detail.aspx?g=1bf1cbf0-ac2f-4b39-a3de-2df77a9a515e> .
- [41]. Gnann, T., Plotz, P., Kuhn, A., & Wietschel, M. (2017). How to decarbonise heavy road transport. In *Proceedings of the ECEEE 2017 Summer Study, Hyeres*

- [42]. Chakraborty, S., Kumar, N. M., Jayakumar, A., Dash, S. K., Elangovan, D. (2021). "Selected Aspects of Sustainable Mobility Reveals Implementable Approaches and Conceivable Actions." *Sustainability*, 13, 12918. [CrossRef]
- [43]. Dash, S. K., Ray, P. K. (2019). "Photovoltaic tied unified power quality conditioner topology based on a novel notch filter utilized control algorithm for power quality improvement." *Trans. Inst. Meas. Control*, 41, 1912-1922. [CrossRef]
- [44]. Ala, G., Castiglia, V., Di Filippo, G., Miceli, R., Romano, P., Viola, F. (2020). "From electric mobility to hydrogen mobility: Current state and possible future expansions." In *Proceedings of the 2020 IEEE 20th Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON)*, Palermo, Italy, 16-18 June 2020; IEEE: Piscataway, NJ, USA; pp. 1-6.
- [45]. Fuel Cell Technologies Office. (2015). "Fuel Cells." Available online: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/fcto_fuel_cells_fact_sheet.pdf (accessed on 22 February 2022).
- [46]. European Commission, Press Release Database. (2018). Available online: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_18_3708.
- [47]. Moro, A., Lonza, L. (2018). "Electricity carbon intensity in European Member States: Impacts on GHG emissions of electric vehicles." *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, 64, 5-14. [CrossRef]
- [48]. Harrison, G., Vilchez, J. J. G., Thiel, C. (2018). "Industry strategies for the promotion of E-mobility under alternative policy and economic scenarios." *Eur. Transp. Res. Rev.*, 10, 19. [CrossRef]
- [49]. Hosseini, S. E., Andwari, A. M., Wahid, M. A., Bagheri, G. (2013). "A review on green energy potentials in Iran." *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 27, 533-545. [CrossRef]
- [50]. Derbeli, M., Barambones, O., Sbita, L. (2018). "A Robust Maximum Power Point Tracking Control Method for a PEM Fuel Cell Power System." *Appl. Sci.*, 8, 2449. [CrossRef]
- [51]. Eriksson, E. L. V., Gray, E. M. A. (2017). "Optimization and integration of hybrid renewable energy hydrogen fuel cell energy systems—A critical review." *Appl. Energy*, 202, 348-364. [CrossRef]
- [52]. Heywood, J. B. (1988). "Internal Combustion Engine Fundamentals." McGraw-Hill Education: New York, NY, USA.
- [53]. Chakraborty, U. K. (2019). "A New Model for Constant Fuel Utilization and Constant Fuel Flow in Fuel Cells." *Appl. Sci.*, 9, 1066. [CrossRef]
- [54]. Giorgi, L., Leccese, F. (2013). "Fuel Cells: Technologies and Applications." *Open Fuel Cells J.*, 6, 1-20. [CrossRef]
- [55]. Offer, G. J., Howey, D., Contestabile, M., Clague, R., Brandon, N. P. (2010). "Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system." *Energy Policy*, 38, 24-29. [CrossRef]
- [56]. Choi, H., Shin, J., Woo, J. (2018). "Effect of electricity generation mix on battery electric vehicle adoption and its environmental impact." *Energy Policy*, 121, 13-24. [CrossRef]

- [57]. Aceves, S. M., Berry, G. D., Weisberg, A. H., Espinosa-Loza, F., Perfect, S. A. (2006). "Advanced concepts for vehicular containment of compressed and cryogenic hydrogen." In Proceedings of the 16th World Hydrogen Energy Conference 2006 (WHEC 2006), Lyon, France, 13-16 June 2006.
- [58]. Michel, F., Fieseler, H., Allidiers, L. (2006). "Liquid Hydrogen Technologies for Mobile Use." In Proceedings of the 16th World Hydrogen Energy Conference 2006 (WHEC 2006), Lyon, France, 13-16 June 2006.
- [59]. Paggiaro, R., Michl, F., Benard, P., Polifke, W. (2010). "Cryo-adsorptive hydrogen storage on activated carbon. II: Investigation of the thermal effects during filling at cryogenic temperatures." *Int. J. Hydrogen Energy*, 35, 648-659. [CrossRef]
- [60]. Hosseini, S. E., Wahid, M. A. (2016). "Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development." *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 57. [CrossRef]
- [61]. Devrim, Y., Devrim, H., Eroglu, I. (2015). "Development of 500 W PEM fuel cell stack for portable power generators." *Int. J. Hydrogen Energy*, 40, 7707-7719. [CrossRef]
- [62]. Das, L. M. (2016). "Hydrogen-fueled internal combustion engines." *Compend. Hydrog. Energy*, 177-217. [CrossRef]
- [63]. O'Hayre, R. P., Cha, S.-W., Colella, W. G., Prinz, F. B. (2016). "Fuel Cell Fundamentals." John Wiley & Sons: Hoboken, NJ, USA.
- [64]. Yang, G., Jung, W., Ahn, S.-J., Lee, D. (2019). "Controlling the Oxygen Electrocatalysis on Perovskite and Layered Oxide Thin Films for Solid Oxide Fuel Cell Cathodes." *Appl. Sci.*, 9, 1030. [CrossRef]
- [65]. Barbir, F. (2013). "PEM Fuel Cells: Theory and Practice, 2nd ed." Academic Press: Cambridge, MA, USA.

