



**ΤΜΗΜΑ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΜΑΤΙΚΩΝ ΥΠΗΡΕΣΙΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Είναι το υδρογόνο οικονομικά και περιβαλλοντικά
βιώσιμο καύσιμο στη ναυτιλία»**

ΟΝΟΜΑ ΦΟΙΤΗΤΗ: ΕΥΘΥΜΙΟΣ ΣΤΡΙΓΚΟΣ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΜΗΤΡΩΟΥ: 2222018183

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΔΑΓΚΙΝΗΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΧΙΟΣ 2023

Πίνακας περιεχομένων

Εισαγωγή	3
Κεφάλαιο 1. Παρούσα ενεργειακή υποδομή και τα προβλήματά της: οικονομική και περιβαλλοντική άποψη	5
1.1. Περιβαλλοντική επίπτωση.....	6
1.2. Οικονομική σκοπιμότητα	9
Κεφάλαιο 2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως λύση προβλημάτων που σχετίζονται με συμβατικές πηγές ενέργειας	10
Κεφάλαιο 3. Το υδρογόνο ως μελλοντικός φορέας ενέργειας	14
3.1. Παραγωγή Υδρογόνου	18
3.1.1. Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου με βάση τους Υδρογονάνθρακες	19
3.1.2. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται σε μη υδρογονάνθρακες.....	21
3.1.3. Περιβαλλοντικές όψεις των μεθόδων παραγωγής.....	24
3.1.4. Οικονομικές όψεις των μεθόδων παραγωγής.....	29
3.2. Αποθήκευση Υδρογόνου	31
3.2.1. Φυσική αποθήκευση.....	32
3.2.2. Αποθήκευση Χημικών.....	33
3.2.3. Περιβαλλοντικές πτυχές	36
3.2.4. Οικονομικές πτυχές	36
3.3. Αξιοποίηση Υδρογόνου.....	38
3.3.1. Κυψέλη καυσίμου υδρογόνου στην αγορά αυτοκινήτων, τις βιομηχανίες μεταφορών και τα θέματα υποδομής τους.....	40
3.3.2. Περιβαλλοντικές πτυχές	42
3.3.3. Οικονομικές πτυχές	44
3.4. Εμπορικές Εφαρμογές Υδρογόνου.....	46
3.5. Ασφάλεια υδρογόνου	47
Συμπεράσματα.....	48
Βιβλιογραφία.....	51

Εισαγωγή

Οι βιώσιμες και επεκτάσιμες πηγές ενέργειας που παρέχουν υψηλή ενεργειακή πυκνότητα χρειάζονται επειγόντως ως εναλλακτικές λύσεις για την εξασφάλιση του ενεργειακού εφοδιασμού και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των σημερινών σύγχρονων μη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας [1, 2, 3]. Αυτή η πρόκληση είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη ναυτιλιακή βιομηχανία, η οποία αντιπροσωπεύει το 7-8% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Το 2018, ο Διεθνής Ναυτιλιακός Οργανισμός (IMO) υιοθέτησε την αρχική στρατηγική του IMO για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από τη διεθνή ναυτιλία σύμφωνα με τη Συμφωνία του Παρισιού (COP 21). Οι στόχοι είναι αρκετά φιλόδοξοι με μια έκκληση για μείωση των εκπομπών άνθρακα κατά τουλάχιστον 40% έως το 2030 («Στόχος 2030»), ενώ στοχεύουν σε 70% έως το 2050 σε σχέση με τις εκπομπές του 2008. Μεταξύ των πιθανών εναλλακτικών πηγών ενέργειας, Το υδρογόνο θεωρείται πολλά υποσχόμενο καύσιμο, ειδικά λόγω των περιβαλλοντικών του επιπτώσεων. Όταν καίγεται έχει μηδενικές εκπομπές άνθρακα και ανάλογα με την οδό παραγωγής του, η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα μπορεί να μειωθεί δραστικά [4, 5, 6]. Η παγκόσμια αγορά υδρογόνου αναμένεται να αυξηθεί από 70 εκατομμύρια τόνους το 2019 σε 120 εκατομμύρια τόνους το 2024 [7,8]. Ανάλογα με τις πρώτες ύλες και την οδό παραγωγής, το υδρογόνο ταξινομείται σε γκρι, μπλε και πράσινο. Το γκριζο υδρογόνο λαμβάνεται μέσω της αναμόρφωσης των ορυκτών καυσίμων [9,10]. Πάνω από το 95% του παγκόσμιου υδρογόνου παράγεται μέσω αναμόρφωσης ορυκτών πηγών με περίπου το ήμισυ αυτής της ποσότητας να προέρχεται από την αναμόρφωση με ατμό φυσικού ή σχιστολιθικού αερίου [7,11,12]. Όταν οι εκπομπές άνθρακα δεσμεύονται, αποθηκεύονται ή χρησιμοποιούνται (π.χ. ξηρή αναμόρφωση [13]), το υδρογόνο χαρακτηρίζεται ως μπλε. Τελικά, Το πράσινο υδρογόνο αντιστοιχεί στη χρήση μιας ανανεώσιμης πρώτης ύλης και μιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας για τη μετατροπή των πρώτων υλών και τη λειτουργία της μονάδας επεξεργασίας. Για την παραγωγή γκρι και μπλε υδρογόνου, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι σημαντικά υψηλές και το CO₂ οι εκπομπές είναι περίπου 830 εκατομμύρια τόνοι CO₂ ισοδύναμα ανά έτος παγκοσμίως [12,14]. Από την άλλη πλευρά, υπάρχουν αρκετές ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου όπως ο άνεμος, η ηλιακή, η πυρηνική, η

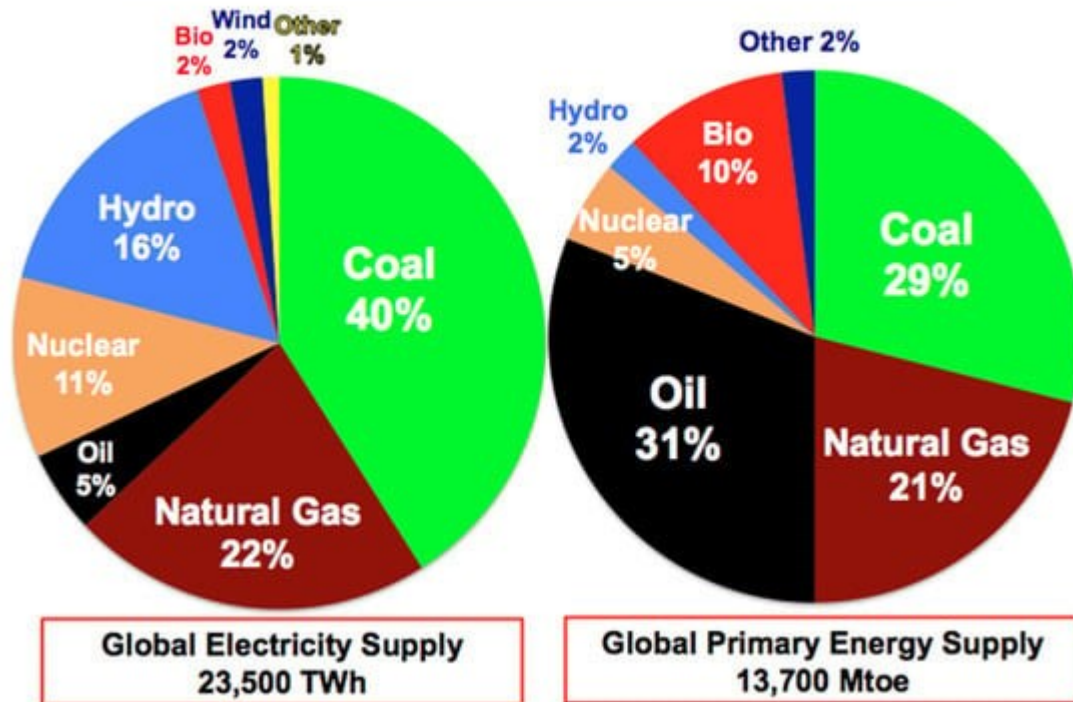
υδροηλεκτρική ενέργεια, η γεωθερμία και η βιομάζα [3]. Μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών που θεωρείται ότι παράγουν υδρογόνο, η αιολική και η ηλιακή ενέργεια χρησιμοποιούνται συχνότερα για την παραγωγή υδρογόνου μέχρι σήμερα [15,16]. Οι περισσότερες από τις μεθόδους για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου εξετάζουν τη λήψη υδρογόνου είτε μέσω αντιδράσεων διάσπασης νερού (π.χ. ηλεκτρόλυση νερού, θερμόλυση νερού, φωτοκαταλυτική διάσπαση νερού και θερμοχημική διάσπαση νερού) είτε μέσω αφυδρογόνωσης μορίων φορέα υδρογόνου [17]. Η μεγαλύτερη πράσινη μονάδα υδρογόνου στον κόσμο έχει προγραμματιστεί να κατασκευαστεί για να λειτουργεί με δυναμικότητα 650 τόνων/ημέρα παραγωγής υδρογόνου με χρήση ηλεκτρόλυσης και 4 GW ανανεώσιμης ενέργειας από ηλιακή, αιολική, και αποθήκευση το 2025 [18,19]. Σε αυτό το έγγραφο, οι περιβαλλοντικές και τεχνοοικονομικές επιπτώσεις των τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και ενέργειας που βασίζονται σε ορυκτά έχουν συγκριθεί με τη συγκεκριμένη εστίαση στη χρήση αυτών των πηγών καυσίμου στη ναυτιλιακή βιομηχανία. Επιπλέον, έχουν επίσης ληφθεί υπόψη διαφορετικοί τύποι καυσίμων και τα επικίνδυνα/ασφαλή χαρακτηριστικά τους.

Κεφάλαιο 1. Παρούσα ενεργειακή υποδομή και τα προβλήματά της: οικονομική και περιβαλλοντική άποψη

Η ενέργεια είναι μια από τις θεμελιώδεις ανάγκες της καθημερινής ζωής, χωρίς την οποία θα επηρεάζονταν η δομή και τα πρότυπα της κοινωνίας. Η ζήτηση ενέργειας αναφέρεται στη συνολική ποσότητα της χρησιμοποιούμενης ενέργειας, συμπεριλαμβανομένης της ηλεκτρικής ενέργειας και των καυσίμων. Η ζήτηση ενέργειας σε όλο τον κόσμο αυξάνεται συνεχώς με την αύξηση του πληθυσμού και την οικονομική ανάπτυξη. Κατά τη διάρκεια του 20ου αιώνα, ο ανθρώπινος πληθυσμός αυξήθηκε έξι φορές, ενώ η κατανάλωση ενέργειας αυξήθηκε κατά 80 φορές [1 , 2]. Η αποδοτικότητα των πηγών ενέργειας είναι ο κύριος παράγοντας που επηρεάζεται από την τεχνολογία των πόρων. Εάν υπάρξει βελτίωση στην τεχνολογία των πόρων, θα ενισχύσει την αποδοτικότητα των πόρων που τελικά αυξάνει τη συνολική κατανάλωση αυτού του πόρου με δύο τρόπους: η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης καθιστά την ενέργεια φθηνότερη και αυξάνει την οικονομική ανάπτυξη.

Στην αρχαιότητα, μέχρι τον 18ο αιώνα, η ενέργεια χρησιμοποιούταν με τη μορφή φωτιάς, μυϊκής δύναμης από ζώα και ατμομηχανών που κινούνταν με φωτιά από ξύλο και άνθρακα. Ακολούθησε η χρήση λαδιού καθώς ήταν εύκολο να αποθηκευτεί, να αποσταλεί και να καεί. Στην παρούσα κατάσταση, σχεδόν το 80% της συνολικής παροχής ενέργειας και σχεδόν το 65% της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο και φυσικό αέριο), όπως φαίνεται στο **Σχήμα 1** [3]. Ωστόσο, η ενεργειακή υποδομή που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα έχει αρκετές περιβαλλοντικές και οικονομικές πτυχές που είναι οι ακόλουθες.

Fossil Fuels Dominate the World's Energy Complex

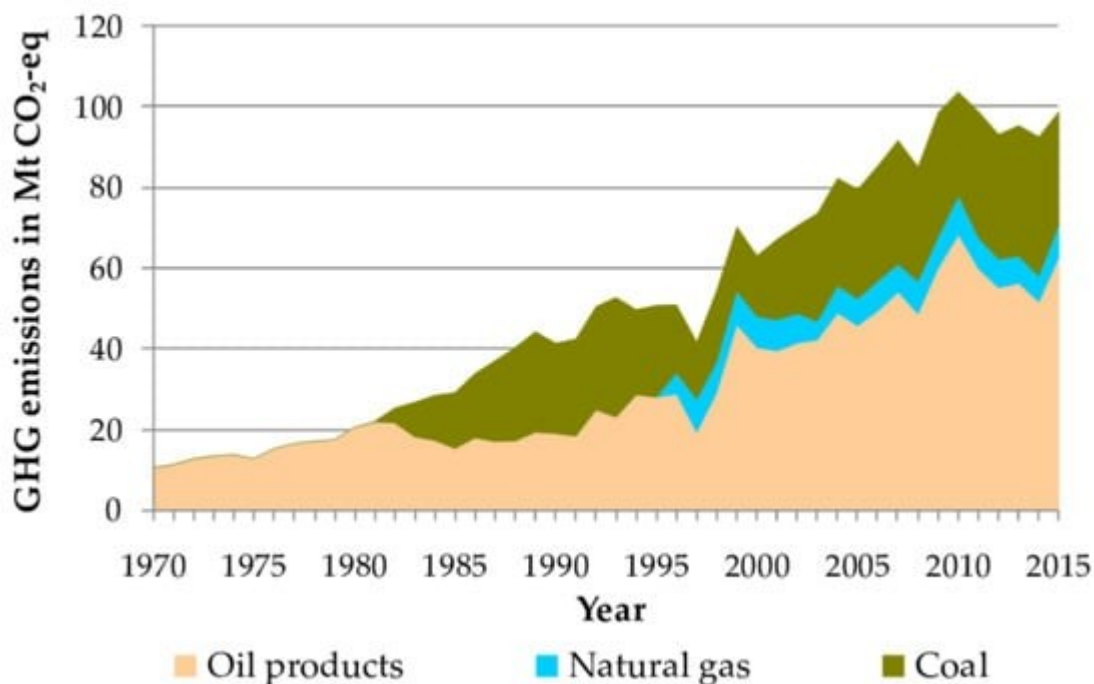


Σχήμα 1. Τα ορυκτά καύσιμα κυριαρχούν στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα, που αναπαράγονται από την αναφορά.

1.1. Περιβαλλοντική επίπτωση

Υπάρχουν πολλά προβλήματα που σχετίζονται με την τρέχουσα ενεργειακή υποδομή (ενεργειακό σύστημα με βάση τα ορυκτά καύσιμα) από περιβαλλοντική άποψη, όπως η εκπομπή CO₂ και αερίων του θερμοκηπίου, η ατμοσφαιρική ρύπανση, η υπερθέρμανση του πλανήτη από την καύση ορυκτών καυσίμων, η εξάντληση και η εξάντληση ενέργειας πηγές, όξινες βροχές και υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Καθώς ο πληθυσμός αυξάνεται, οι ενεργειακές απαιτήσεις θα αυξηθούν επίσης στο εγγύς μέλλον. Αυτό θα αυξήσει περαιτέρω την εξάρτησή μας από τα ορυκτά καύσιμα, τα οποία είναι μη ανανεώσιμα στη φύση και διαθέσιμα για πεπερασμένο χρόνο. Επιπλέον, αυτά τα ορυκτά καύσιμα, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου, του άνθρακα και του πετρελαίου, τα οποία, όταν καίγονται, απελευθερώνουν CO₂ και άλλα αέρια του θερμοκηπίου και προκαλούν ατμοσφαιρική ρύπανση και υποβαθμίζουν το περιβάλλον. Η υπερθέρμανση του πλανήτη μπορεί να προκαλέσει

αύξηση της παγκόσμιας θερμοκρασίας κατά 1,4–5,8 °C στο χρονικό διάστημα από το 1990 έως το 2100. Αυτό θα έχει αποτελέσματα όπως άνοδο της στάθμης της θάλασσας, ξηρασίες, πλημμύρες και κύματα καύσωνα. Ως εκ τούτου, η υπερβολική χρήση ορυκτών καυσίμων προκαλεί την υποβάθμιση του περιβάλλοντος. Το σχήμα 2 δείχνει ότι οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου αυξάνονται συνεχώς μέσω της χρήσης διαφορετικών ορυκτών καυσίμων από το 1970 [4]. Σύμφωνα με την έκθεση του IEA (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας) για το 2019, η ζήτηση πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα αυξήθηκε σε σχεδόν 1,4 εκατομμύρια βαρέλια/ημέρα, 196 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα και 1,4% αντίστοιχα. Για αυτήν την κατανάλωση που βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, οι ΗΠΑ, η Ινδία και η Κίνα είναι οι κύριοι καταναλωτές και καταγράφηκε ετήσια αύξηση 2% των παγκόσμιων εκπομπών CO₂, με σχεδόν 33.890,8 εκατομμύρια τόνους, το 2018. Κατά τη διάρκεια μιας περιόδου επτά ετών, η ο ρυθμός εκπομπής άνθρακα έχει αυξηθεί δραστικά [5]. Η έκθεση BPSTATS 2019 ανέφερε ότι οι εκπομπές άνθρακα είναι ευθέως ανάλογες με τον ρυθμό αύξησης της κατανάλωσης ενέργειας [6]. Το 2018, παρατηρήθηκε αύξηση σχεδόν 13–14% στην κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Ο κυριότερος λόγος πίσω από αυτό είναι η αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που είναι 8-9% της συνολικής ποσότητας. Ορισμένες χώρες, για παράδειγμα, η Κίνα, έχουν ήδη αναλάβει πολυάριθμες πρωτοβουλίες για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές με 32 Mtoe. Στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας έχει χρησιμοποιηθεί ανανεώσιμη ενέργεια που αποτελεί το 15% της συνολικής ανάπτυξής του. Ωστόσο, στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας, ο άνθρακας εξακολουθεί να είναι ένα σημαντικό συστατικό που συμβάλλει στο 38% της συνολικής ανάπτυξής του [7].



Σχήμα 2. Εκπομπές αερίων θερμοκηπίου από ορυκτά καύσιμα, που αναπαράγονται από την αναφορά.

Λόγω αυτού του σοβαρού προβλήματος που σχετίζεται με τα συμβατικά καύσιμα, πρέπει να στραφούμε σε μια νέα υποδομή που δεν περιέχει άνθρακα και μπορεί να θεωρηθεί υπό αειφόρο ανάπτυξη. Οι τρέχουσες ενεργειακές ανάγκες πρέπει να καλυφθούν χωρίς διαπραγματεύσεις για την ποιότητα ζωής μέσω της αειφόρου ανάπτυξης. Για την επίτευξη της βιώσιμης ανάπτυξης υπάρχουν πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη, εκ των οποίων η αναζήτηση καθαρών πόρων ενέργειας είναι πρωταρχική προϋπόθεση [8 , 9 , 10]. Σε αυτό το πλαίσιο, προκύπτει η σχέση μεταξύ των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της αειφόρου ανάπτυξης. Εάν θέλουμε να επιτύχουμε ένα καθαρό και βιώσιμο μέλλον με ελάχιστα περιβαλλοντικά προβλήματα, αυτά τα προβλήματα που σχετίζονται με τα συμβατικά καύσιμα πρέπει να ληφθούν υπόψη και να προχωρήσουμε προς την υιοθέτηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν επανειλημμένα. Έτσι, υπάρχει συνεχής αναζήτηση για την εύρεση εναλλακτικών καυσίμων που λύνουν αυτή την έλλειψη και το πρόβλημα της υποβάθμισης του περιβάλλοντος. Ειδικά, το πρόβλημα της περιβαλλοντικής υποβάθμισης ελκύει την έλξη για καθαρές πηγές ενέργειας, για παράδειγμα, την ηλιακή ενέργεια, την αιολική ενέργεια, την ενέργεια των ωκεανών, τη γεωθερμική ενέργεια και την ενέργεια υδρογόνου.

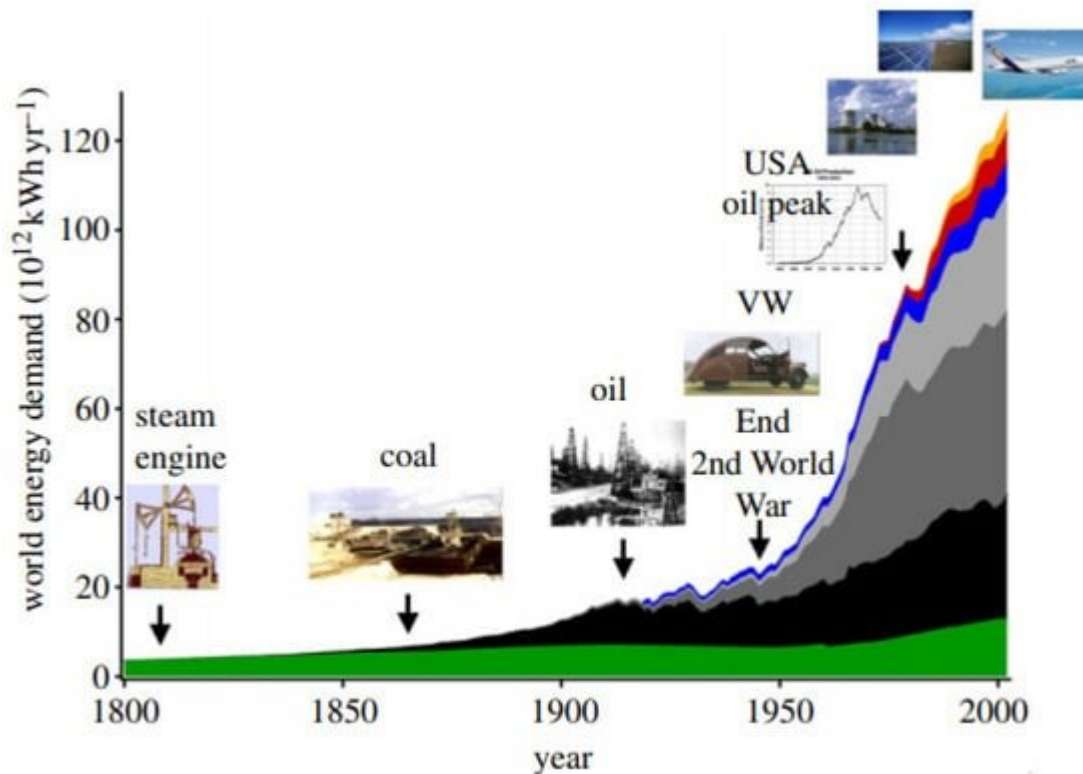
1.2. Οικονομική σκοπιμότητα

Η ζήτηση για ορυκτά καύσιμα είχε μεγάλο αντίκτυπο στην οικονομική ανάπτυξη της χώρας, στο βιοτικό επίπεδο και στην ανάπτυξη της κοινωνίας. Το συνολικό ποσό ανάπτυξης του εθνικού προϊόντος εξαρτάται από τη μέση ποσότητα ενέργειας που δαπανάται κατά κεφαλήν. Η οικονομική ανάπτυξη του κόσμου εξαρτάται από την κατανάλωση ενέργειας και τη διαθεσιμότητα ορυκτών καυσίμων. Ως εκ τούτου, προκύπτει ένα πρόβλημα επειδή τα ορυκτά καύσιμα είναι περιορισμένα στη γη και συγκεντρώνονται σε ορισμένες συγκεκριμένες τοποθεσίες. Η ανομοιόμορφη κατανομή αυτών των πηγών δημιουργεί μεγάλη επιβάρυνση στην οικονομία των χωρών εκείνων που δεν διαθέτουν τα φυσικά αποθέματα αυτών των συμβατικών καυσίμων. Αρκετοί άλλοι παράγοντες επηρεάζουν επίσης την τιμή αυτών των ορυκτών καυσίμων και έτσι η καθημερινά αυξανόμενη τιμή του πετρελαίου δημιουργεί ενεργειακή κρίση παγκοσμίως.¹¹]

Έτσι, η σημερινή ενεργειακή υποδομή έχει δύο βασικά σοβαρά ζητήματα, τα οποία πρέπει να αντιμετωπιστούν επείγοντως. Η υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας θα μπορούσε να αποτελέσει λύση για περιβαλλοντικά και οικονομικά ζητήματα των συμβατικών καυσίμων, όπως περιγράφεται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

Κεφάλαιο 2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ως λύση προβλημάτων που σχετίζονται με συμβατικές πηγές ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, στην παρούσα εποχή, σχεδόν το 80% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης μπορεί να καλυφθεί από ορυκτά καύσιμα και το υπόλοιπο 20% επιτυγχάνεται από άλλες πηγές, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Όπως έχουμε συζητήσει, η καύση ορυκτών καυσίμων προκαλεί περιβαλλοντική υποβάθμιση και πολλά παγκόσμια προβλήματα. Αυτά τα παγκόσμια προβλήματα μπορούν να επιλυθούν μόνο με την αντικατάσταση της σημερινής ενεργειακής υποδομής με ένα σύστημα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που μπορεί να προσφέρει μια λύση χωρίς ρύπανση. Αυτός ο τύπος μετάβασης εμπνέεται από πολλές πτυχές όπως οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι οικονομικές πτυχές και οι περιορισμοί στην προσφορά ορυκτών καυσίμων. Η έρευνα για τις χρήσεις των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ξεκίνησε γύρω στη δεκαετία του 1980. Το γράφημα της ζήτησης ενέργειας [12] για τα τελευταία 200 χρόνια φαίνεται στο Σχήμα 3, το οποίο περιγράφει την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση με την πάροδο του χρόνου. Η αυξανόμενη ζήτηση ενέργειας τις τελευταίες δεκαετίες μας ανάγκασε να στραφούμε προς την αυξημένη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Δεδομένου ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξαρτώνται από το χρόνο, τις καιρικές συνθήκες και γεωγραφικές τοποθεσίες, προκύπτουν αρκετές προκλήσεις με την αυξανόμενη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που απαιτούν μεγάλες εκτάσεις, το κόστος τους από άλλες πηγές ενέργειας και η ανάγκη αποθήκευσης της ενέργειας που λαμβάνεται από ανανεώσιμες πηγές. Ως εκ τούτου, τις τελευταίες δεκαετίες, πολλές τεχνικές έχουν εφαρμοστεί για τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και αποθήκευσης για την επίτευξη ενεργειακής βιωσιμότητας [13].



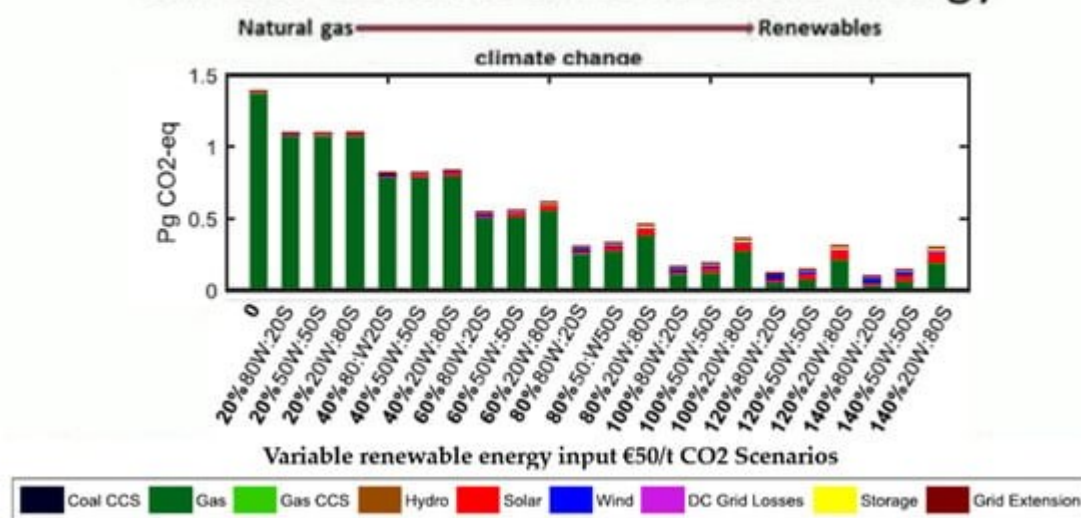
Σχήμα 3. Απαίτηση ενέργειας τα τελευταία 200 χρόνια. Ανατρέξτε: Πράσινο—βιομάζα. μαύρο — κάρβουνο; σκούρο γκρι—ακατέργαστο πετρέλαιο. γκρι—φυσικό αέριο. μπλε — υδροηλεκτρική ενέργεια. κόκκινο — πυρηνική σχάση. Πορτοκαλί — ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Οι μη συμβατικές πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η ενέργεια των ωκεανών, η γεωθερμική ενέργεια και η ενέργεια υδρογόνου είναι απεριόριστες στη γη και μπορούν να εξαχθούν απευθείας από φυσικούς πόρους. Ωστόσο, η διαθεσιμότητα των περισσότερων μη συμβατικών πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή ενέργεια και η αιολική ενέργεια, ποικίλλει ανάλογα με το χρόνο, τον καιρό και την τοποθεσία. Ορισμένες γεωγραφικές περιοχές του πλανήτη είναι συμβατές για συγκεκριμένες μορφές ανανεώσιμης ενέργειας, ενώ άλλες τοποθεσίες μπορεί να λείπουν. Για παράδειγμα, η διαθεσιμότητα συνθηκών για ηλιακή ενέργεια είναι υψηλότερη στη βόρεια Αφρική, τις νοτιοδυτικές Ηνωμένες Πολιτείες, την Αυστραλία και τη Νότια Αμερική. Ομοίως, οι καλύτερες περιοχές για αιολική ενέργεια είναι το νότιο άκρο της Νότιας Αμερικής και η Βόρεια Ευρώπη. Χώρες όπως οι Φιλιππίνες και η Ισλανδία είναι πλούσιες σε γεωθερμική

ενέργεια. Κάθε περιοχή του κόσμου έχει ορισμένες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, αλλά το κόστος και η διαθεσιμότητά τους μπορεί να διαφέρουν. Ως εκ τούτου, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι διαθέσιμες σε όλη την υδρόγειο συλλογικά, δηλαδή, τουλάχιστον μία ανανεώσιμη πηγή ενέργειας είναι διαθέσιμη σε κάθε περιοχή του πλανήτη, έτσι μπορεί να προσφέρει σε κάθε περιοχή/χώρα σε αυτή τη γη οικονομική ανεξαρτησία.

Σύμφωνα με έκθεση του IEA (Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας) για το 2017, σημειώθηκε ταχεία εξέλιξη για τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας λόγω της μείωσης του κόστους της αιολικής και ηλιακής ενέργειας. Λόγω αυτής της ανάπτυξης, το έτος 2022, το κόστος παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές εκτιμάται ότι θα αυξηθεί σχεδόν κατά 33% [14]. Σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας προκαλεί σχεδόν 90-99% λιγότερα αέρια θερμοκηπίου και 70-90% λιγότερη ρύπανση. Από το Σχήμα 4 , μπορεί να φανεί ότι όταν απομακρύνουμε τα ορυκτά καύσιμα προς ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, οι επιπτώσεις των κλιματικών αλλαγών μειώνονται. Ο αντίκτυπος στην κλιματική αλλαγή μειώνεται με την αυξανόμενη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Από το σχήμα 4, είναι σαφές ότι η μεγάλη χρήση ηλιακής ενέργειας έχει υψηλότερο αντίκτυπο και μικρότερη επίδραση στην κλιματική αλλαγή από άλλες πηγές. Οι χαμηλότερες επιπτώσεις παρατηρούνται και για τα σενάρια 50 €/τόνο και 150 €/τόνο, όπου το 99% των παραγωγών προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [15]. Μια ομάδα δεδομένων από το 2000 έως το 2016 από σχεδόν 25 αναπτυσσόμενες ασιατικές χώρες αναλύθηκε μέσω HTR (Hausman Taylor Regression) και ισχυρής προσέγγισης RE (Τυχαία επίδραση).

Climate Benefits of Renewable Energy



Εικόνα 4. Κλιματικά οφέλη από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Αυτή η μελέτη βρίσκει μια προοδευτική σχέση μεταξύ της υποβάθμισης του περιβάλλοντος, της κατανάλωσης ενέργειας και της οικονομικής ανάπτυξης και πρότείνει ότι εάν υπάρξει αύξηση 1% στην κατανάλωση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τότε οι εκπομπές άνθρακα μπορούν να μειωθούν σχεδόν κατά 0,193%. Έτσι, αυτή η μελέτη προσελκύει τις οικονομίες των αναπτυσσόμενων ασιατικών χωρών που έχουν δυνατότητες να σώσουν το περιβάλλον με τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και πολλές περιβαλλοντικές πολιτικές για τη βελτίωση της υποδομής ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (RE) και τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου [5]. Έτσι, είναι σαφές ότι οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα μπορούσαν να αποτελέσουν λύση στα περιβαλλοντικά και οικονομικά ζητήματα των συμβατικών καυσίμων. Ωστόσο, ο καιρός, ο χρόνος και η περιφερειακή εξάρτηση αυτών των ανανεώσιμων πηγών δικαιολογούν την αποτελεσματική αποθήκευσή τους σε δευτερεύουσες πηγές ενέργειας/φορείς. Για το σκοπό αυτό, μεταξύ όλων των διαθέσιμων επιλογών, το υδρογόνο θεωρείται πολλά υποσχόμενος φορέας ενέργειας όσον αφορά τα 3 Es: (i) φιλικό προς το περιβάλλον, (ii) ενεργειακή ασφάλεια και (iii) οικονομική προσιτότητα. Στην επόμενη ενότητα, το υδρογόνο θα εισαχθεί ως φορέας ενέργειας.

Κεφάλαιο 3. Το υδρογόνο ως μελλοντικός φορέας ενέργειας

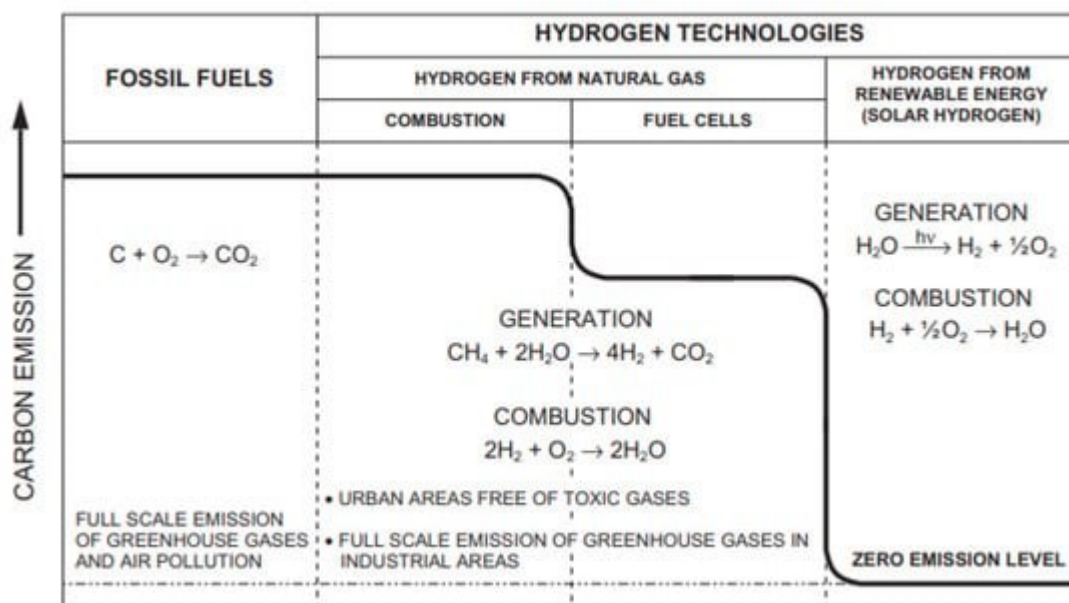
Όπως έχουμε συζητήσει νωρίτερα, οι εναλλακτικές πηγές ενέργειας δεν ρυπαίνουν το περιβάλλον. Ωστόσο, τα περισσότερα από αυτά εξαρτώνται είτε από τον χρόνο, τον καιρό ή την τοποθεσία, γεγονός που δημιουργεί ένα χάσμα μεταξύ της ζήτησης και της προσφοράς ενέργειας. Το υδρογόνο, το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως φορέας ενέργειας και μπορεί να καλύψει το κενό προσφοράς και ζήτησης. Στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το υδρογόνο έχει προταθεί ως πολλά υποσχόμενος φορέας ενέργειας, ικανός να αντικαταστήσει την τρέχουσα ενεργειακή υποδομή [16 , 17]. Είναι ένας «αειφόρος φορέας ενέργειας» που δεν εξαντλείται από τη συνεχή χρήση, δεν περιέχει περιβαλλοντικά ζητήματα, ρύπους ή προκαλεί προβλήματα υγείας [18 .]. Το υδρογόνο είναι το πιο άφθονο και ελαφρύτερο στοιχείο, διαθέσιμο σε σύνθετη μορφή αλλά όχι σε ελεύθερη μορφή. Μπορεί να αποθηκευτεί, να μεταφερθεί και να παραχθεί εύκολα από το νερό. Σε σύγκριση με άλλα καύσιμα, είναι πλούσιο σε ενέργεια ανά μονάδα μάζας. Είναι φορέας ενέργειας, όχι πρωτογενής πηγή, που μπορεί να παραχθεί από άλλες πηγές όπως το νερό, η βιομάζα και τα ορυκτά καύσιμα. Σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, το βαρυμετρικό του ενεργειακό περιεχόμενο είναι 2 έως 3 φορές υψηλότερο από τις παραδοσιακές πηγές, αλλά έχει χαμηλή ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας [19]. Είναι χρήσιμο, για παράδειγμα, σε βιομηχανίες υδρογόνου, χωριά υδρογόνου και αεριωθούμενα αεροπλάνα. Μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια και είναι χρήσιμο για όλες τις ενεργειακές απαιτήσεις των νοικοκυριών. Με τη χρήση κυψελών καυσίμου, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκεύσει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας.

Πίνακας 1. Μερικές ιδιότητες του H₂ σε συνθήκες περιβάλλοντος [20].

Ατομικός αριθμός	1
Ατομική μάζα	1,00784 αμν
Μοριακή μάζα	2,01568 αμν
Ενεργειακή πυκνότητα	10,05 MJ/m ³

Ογκομετρική πυκνότητα	0,08376 kg/m ³
Σημείο βρασμού	-252,87 °C
Σημείο τήξης	-259 °C
Κρίσιμο σημείο	-240,2 °C στις 12,7 atm
Τριπλό σημείο	-259,3 °C σε 0,07 atm
Υψηλότερη θερμαντική αξία	141,86 MJ/kg
Χαμηλότερη θερμαντική αξία	119,93 MJ/kg

Το υδρογόνο έχει προβληθεί ως μελλοντική ενεργειακή λύση. Ως πηγή ενέργειας, έχει τη δυνατότητα να εκπληρώσει τις ενεργειακές απαιτήσεις και να μειώσει τις εκπομπές CO₂. Όταν καίγονται στον αέρα, τα ορυκτά καύσιμα εκπέμπουν αέρια θερμοκηπίου, ενώ το υδρογόνο παράγει μια καθαρή μορφή ενέργειας με το νερό ως υποπροϊόν. Η σύγκριση τεχνολογιών υδρογόνου και ορυκτών καυσίμων φαίνεται στο Σχήμα 5. Η χρήση υδρογόνου που παράγεται από συμβατικές μεθόδους μπορεί να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα κατά σχεδόν 20% όταν χρησιμοποιείται σε κυψέλες καυσίμου. Μια σημαντική μείωση των εκπομπών άνθρακα, δηλαδή, ένα επίπεδο μηδενικών εκπομπών μπορεί να επιτευχθεί με την παραγωγή υδρογόνου χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας [21]. Έτσι, το υδρογόνο μπορεί να είναι ένας καθαρός φορέας ενέργειας εάν οι τεχνολογίες που συνδέονται με αυτό είναι καθαρές. Οι τρέχουσες τεχνολογίες που σχετίζονται με την παραγωγή υδρογόνου και άλλες πτυχές είναι συμβατικές και, ως εκ τούτου, το υδρογόνο δεν μπορεί να θεωρηθεί ως εντελώς καθαρό καύσιμο.



Σχήμα 5. Σύγκριση ορυκτών καυσίμων και καύσης υδρογόνου στις εκπομπές άνθρακα.

Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για να γίνει το υδρογόνο εξέχον υποψήφιο ως εναλλακτική επιλογή για τα ορυκτά καύσιμα. Ο κύριος λόγος είναι η φιλικότητα προς το περιβάλλον, πράγμα που σημαίνει ότι η εκμετάλλευση του υδρογόνου δεν έχει καμία περιβαλλοντική επίπτωση, επειδή παράγει μόνο νερό ως προϊόν όταν καίγεται στον αέρα. Μεταφέρεται εύκολα. Μπορεί να μεταφερθεί σε μεγάλες αποστάσεις μέσω αγωγών και μπορεί να μεταφερθεί μέσω γραμμών μεταφοράς με τη μορφή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο άλλος λόγος είναι η ανακυκλωσιμότητά του. οξειδώνεται σε νερό και το διασπά στο συστατικό του για να παράγει υδρογόνο. Ένας άλλος λόγος σχετίζεται με το λογικό κόστος του σε σχέση με την ενεργειακή του πυκνότητα. Σε διαφορετικές περιοχές, το κόστος του H₂ ποικίλλει ευρέως στην περιοχή από 0,8 έως 4 USD/kg ανάλογα με το κόστος τεχνολογίας και πρώτων υλών [22]. Το Συμβούλιο Υδρογόνου 2020 δήλωσε ότι, το έτος 2020, η ενέργεια H₂ χρησιμοποιήθηκε σημαντικά και έχει τη δυνατότητα να λύσει σχεδόν το 8% της GED (παγκόσμια ζήτηση ενέργειας) και το κόστος παραγωγής είναι περίπου 2,50 USD/kg. Μέχρι το έτος 2030, το κόστος παραγωγής H₂ προβλέπεται να μειωθεί σε περίπου 1,80 USD/kg και να λύσει το πρόβλημα της παγκόσμιας ζήτησης ενέργειας κατά περίπου 15%. Το Συμβούλιο Υδρογόνου δήλωσε ότι η ζήτηση και η προσφορά H₂ θα είναι 10 EJ ετησίως μέχρι το τέλος του έτους 2050 και στη συνέχεια, η ζήτηση θα αυξάνεται περίπου 5-10% κάθε χρόνο. Επιπλέον, H₂ θα είναι σε θέση να καλύψει το

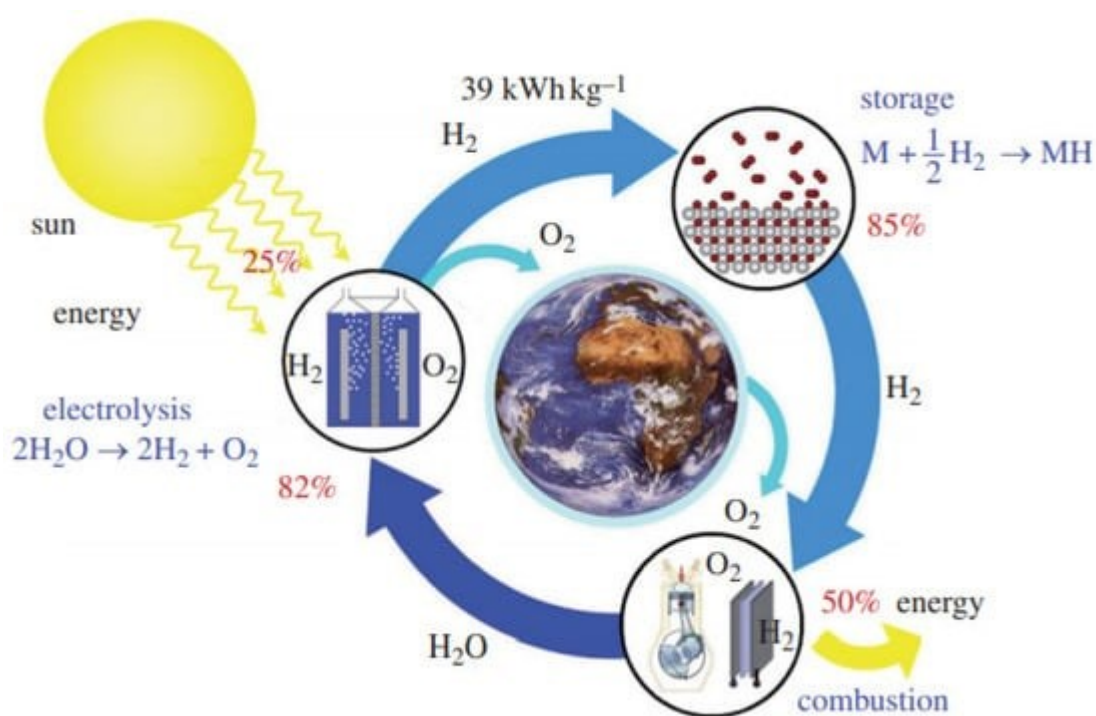
18% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης το έτος 2050. Έτσι, είναι σαφές ότι στο μέλλον, το Η₂ θα γίνει ελκυστικός υποψήφιος στο ενεργειακό σύστημα, λόγω του χαμηλού κόστους παραγωγής, της ενεργειακής πυκνότητας και των χαμηλών εκπομπών άνθρακα εκπομπή [23].

Ο επόμενος λόγος σχετίζεται με τη μεγάλη ποικιλία επιλογών αποθήκευσης: το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί με διαφορετικούς τρόπους (αν και υπάρχουν πολλά ζητήματα που σχετίζονται με την αποτελεσματική αποθήκευσή του στο παρόν σενάριο, αυτά μπορούν να προσαρμοστούν για τη βελτίωση των μέσων αποθήκευσης στο εγγύς μέλλον). Επιπλέον, μπορεί να παραχθεί με καθαρό τρόπο: μπορεί να παραχθεί από νερό που είναι άφθονο στη φύση. Η χρησιμότητά του σε πολλές βιομηχανίες ως χημικό καύσιμο είναι ένα άλλο πλεονέκτημα. Συμπερασματικά, αν συγκριθεί με τα ορυκτά καύσιμα, το υδρογόνο έχει πολλά πλεονεκτήματα, επομένως μπορεί να θεωρηθεί ενεργειακό καύσιμο στο μέλλον [24]. Ο Διεθνής Οργανισμός Ενέργειας (IEA) δήλωσε ότι το πράσινο υδρογόνο θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές άνθρακα, αλλά μόνο εάν ξεπεραστούν οι κύριες προκλήσεις, όπως το κόστος των μεθόδων παραγωγής, η υποδομή και η ασφάλεια. Όταν το υδρογόνο παράγεται με συμβατικές μεθόδους, είναι υπεύθυνο για τις παγκόσμιες εκπομπές CO₂, δηλαδή περίπου 843 μετρικούς τόνους ετησίως, που ισοδυναμεί με τις συνολικές εκπομπές του Ηνωμένου Βασιλείου και της Ινδονησίας μαζί. Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ζήτηση υδρογόνου αναμένεται να αυξηθεί από 70 σε 120 εκατομμύρια τόνους την περίοδο 2019 έως 2024. Από αυτή την άποψη, η ανάπτυξη του υδρογόνου θα πρέπει να είναι σε θέση να ικανοποιήσει τον έβδομο στόχο των Ηνωμένων Εθνών, δηλαδή, «καθαρό και προσιτό ενέργεια» [25 , 26]. Ως εκ τούτου, προβλέπεται ότι το έτος 2025, θα κατασκευαστεί το μεγαλύτερο εργοστάσιο πράσινης υδρογόνου παγκοσμίως, με δυναμικότητα 237.250 τόνων ετησίως με χρήση ηλεκτρόλυσης και θα είναι σε θέση να επιτύχει 4 γιγαβάτ ανανεώσιμης ενέργειας από ηλιακή και αιολική ενέργεια [27].

Σε αυτή την ανασκόπηση, συζητούνται οι διάφορες πτυχές του υδρογόνου ως καυσίμου, οι σχετικές τεχνικές και οι περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις.

Η χρήση του υδρογόνου για ενεργειακές ανάγκες περιλαμβάνει τρία κύρια στάδια: (i) παραγωγή. (ii) αποθήκευση• και (iii) εφαρμογή μέσω καύσης. Αυτά τα τρία κύρια βήματα συνιστούν έναν κλειστό κύκλο υδρογόνου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 6 . Σε

αυτήν την ενότητα, κάθε βήμα, με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του, θα συζητηθεί λεπτομερώς:

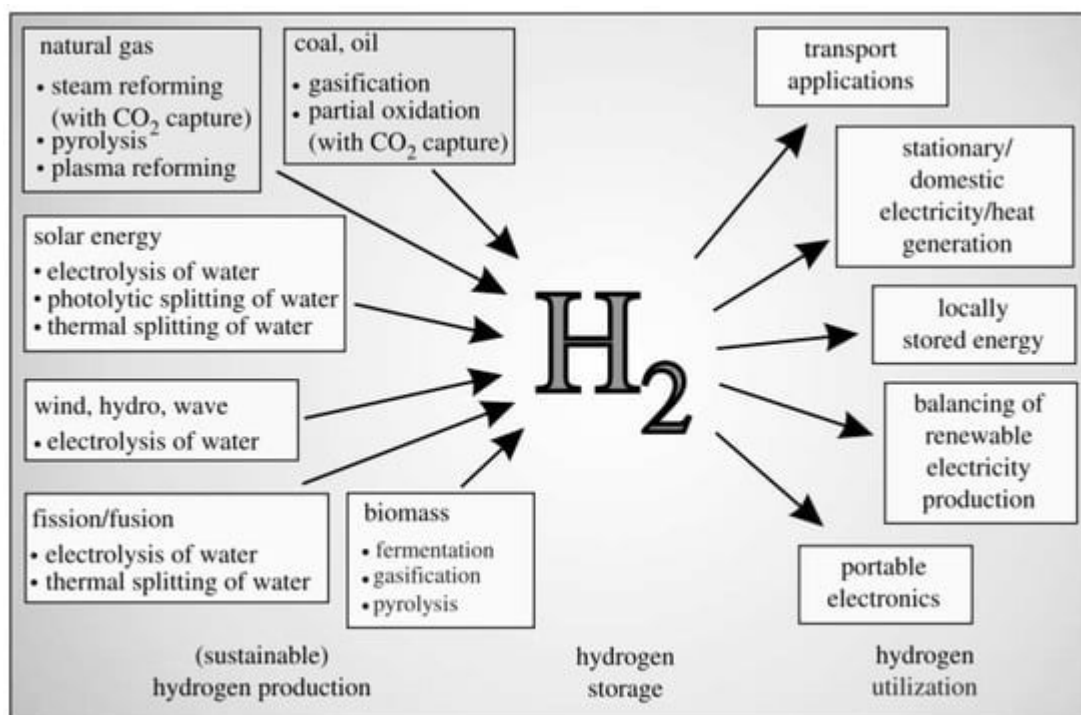


Εικόνα 6. Ο κύκλος του υδρογόνου.

3.1. Παραγωγή Υδρογόνου

Με βάση τις εφαρμοζόμενες πηγές ενέργειας για την παραγωγή υδρογόνου, υπάρχουν διάφορες μέθοδοι, όπως η συμβατική μέθοδος ορυκτών καυσίμων, η ηλεκτρόλυση, η μέθοδος ηλιακής ενέργειας, η βιοπαραγωγή υδρογόνου και η θερμοχημική μέθοδος. Ένας αριθμός λεπτομερών ανασκοπήσεων είναι διαθέσιμες για τις τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου [28 , 29 , 30 , 31 , 32]. Οι μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου μπορούν γενικά να χωριστούν σε δύο κατηγορίες: (i) Μέθοδοι με βάση τους υδρογονάνθρακες και (ii) μεθόδους που δεν βασίζονται σε υδρογονάνθρακες. Οι διαθέσιμες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα είναι η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό [33 , 34 , 35 , 36 , 37], μερική οξείδωση υδρογονανθράκων [38 , 39 , 40 , 41], αεριοποίηση άνθρακα [42], αεριοποίηση βιομάζας [43 , 44 , 45 , 46 , 47 , 48 , 49], παραγωγή πυρόλυσης, σχ. 7 . από διαφορετικές μεθόδους παρουσιάζονται [50]. Τα ορυκτά καύσιμα ήταν οι κύριες πρώτες ύλες για την

παραγωγή υδρογόνου: εκτιμάται ότι το 95% της παραγωγής υδρογόνου εξαρτάται από τα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, για να διατηρηθεί η καθαρότητα του καυσίμου υδρογόνου, είναι απαραίτητο να περάσουμε από αυτή την κατηγορία στην άλλη κατηγορία μεθόδων παραγωγής υδρογόνου. Στην επόμενη υποενότητα συζητούνται όλες οι μέθοδοι παραγωγής.



Εικόνα 7. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου. Αναπαράγεται από την αναφ. [50] με άδεια της Βασιλικής Εταιρείας του Λονδίνου.

3.1.1. Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου με βάση τους Υδρογονάνθρακες

Στην εποχή των ορυκτών καυσίμων, το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής υδρογόνου γίνεται από ορυκτά καύσιμα. Η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό, η αεριοποίηση άνθρακα και η μερική οξείδωση των υδρογονανθράκων είναι οι κύριες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου με βάση τους υδρογονάνθρακες.

Η μέθοδος αναμόρφωσης με ατμό παράγει ένα μείγμα CO και υδρογόνου στο πρώτο βήμα. Τα κύρια βήματα που υιοθετούνται σε αυτή τη μέθοδο είναι η αναμόρφωση, η μετατροπή μετατόπισης, ο καθαρισμός αερίου και η μεθανοποίηση. Σε αυτή τη

μέθοδο, το παραγόμενο υδρογόνο περιέχει επίσης μια μικρή ποσότητα μονοξειδίου του άνθρακα, υδρόθειο και διοξείδιο του άνθρακα ως ακαθαρσίες. Για την απομάκρυνση αυτών των ακαθαρσιών, έχουν υιοθετηθεί ορισμένες μέθοδοι καθαρισμού. Αυτή η μέθοδος SMR (αναμόρφωση με ατμό μεθανίου) έχει απόδοση της τάξης του 65–75%.

Καθώς πολλά αέρια είναι το υποπροϊόν αυτής της μεθόδου, συμβάλλει σημαντικά στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος από την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Το ποσοστό κόστους του συνολικού κόστους παραγωγής H₂ για την αναμόρφωση μεθανίου ατμού (SMR) είναι 60,7% πρώτη ύλη, 29,1% επένδυση κεφαλαίου και το υπόλοιπο προέρχεται από άλλους [51]. Αυτό δείχνει ότι, ανάλογα με την ικανότητα σχεδιασμού, το κόστος παραγωγής υδρογόνου είναι 379.387 kg/ημέρα, με συντελεστή χωρητικότητας σχεδόν 90%, και το κόστος ενός φυσικού αερίου είναι 10,00 \$ / MMBtu . Ως προς αυτό, η ικανότητα δέσμευσης άνθρακα (με και χωρίς) είναι 2,27 \$ /kg και 2,08 \$ /kg, αντίστοιχα [52].

Μια άλλη μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου είναι η μερική οξείδωση των υδρογονανθράκων, η οποία υιοθετείται γενικά όπου το βαρύ πετρέλαιο είναι διαθέσιμο με χαμηλό κόστος. Ωστόσο, αυτή η μέθοδος έχει χαμηλότερη απόδοση σχεδόν 50%. Η κατανομή του κόστους υδρογόνου για μερική οξείδωση είναι 54,6% επένδυση κεφαλαίου, 25,8% πρώτη ύλη και τα υπόλοιπα προέρχονται από άλλα συστατικά [51]. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για δέσμευση άνθρακα με και χωρίς παραγωγή υδρογόνου έδειξαν 276.900 kg/ημέρα και 255.400 kg/ημέρα, αντίστοιχα, και το κόστος υδρογόνου τους ήταν 1,63 \$ / kg και 1,34 \$ /kg, αντίστοιχα [52]. Η αεριοποίηση άνθρακα είναι μια άλλη σημαντική τεχνολογία για την παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα που έχουν την ικανότητα να παράγουν 97% καθαρό υδρογόνο [53 , 54, 55 , 56].

Η αεριοποίηση βιομάζας είναι η μέθοδος παραγωγής, η οποία μοιάζει πολύ με την αεριοποίηση άνθρακα. Ωστόσο, η βιομάζα έχει συγκριτικά χαμηλή θερμογόνο δύναμη σε σύγκριση με τον άνθρακα, επομένως απαιτεί μεγαλύτερη μονάδα από τον άνθρακα. Αυτές οι μέθοδοι είναι συμφέρουσες καθώς είναι φθηνότερες και έχουν καθιερώσει τεχνικές για την παραγωγή υδρογόνου μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, ταυτόχρονα, όλα παράγουν προϊόντα με βάση τον άνθρακα, γεγονός που τα καθιστά μη βιώσιμα για μια οικονομία υδρογόνου. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου της

αεριοποίησης βιομάζας, το οποίο εξαρτάται από τον τύπο βιομάζας και το μέγεθος της εγκατάστασης, εκτιμάται ότι κυμαίνεται από 1,25 \$ /kg έως 2,20 \$ /kg. Υπολογίζεται ότι η παραγωγή υδρογόνου είναι 139.700 kg/ημέρα από βιομάζα και το κόστος κυμαίνεται από 1,77–2,05 \$ /kg [57].

Για να επιτύχουμε τα πλεονεκτήματα μιας βιώσιμης ενεργειακής οικονομίας υδρογόνου, πρέπει να παράγουμε υδρογόνο μέσω τεχνολογιών που δεν βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα [50].

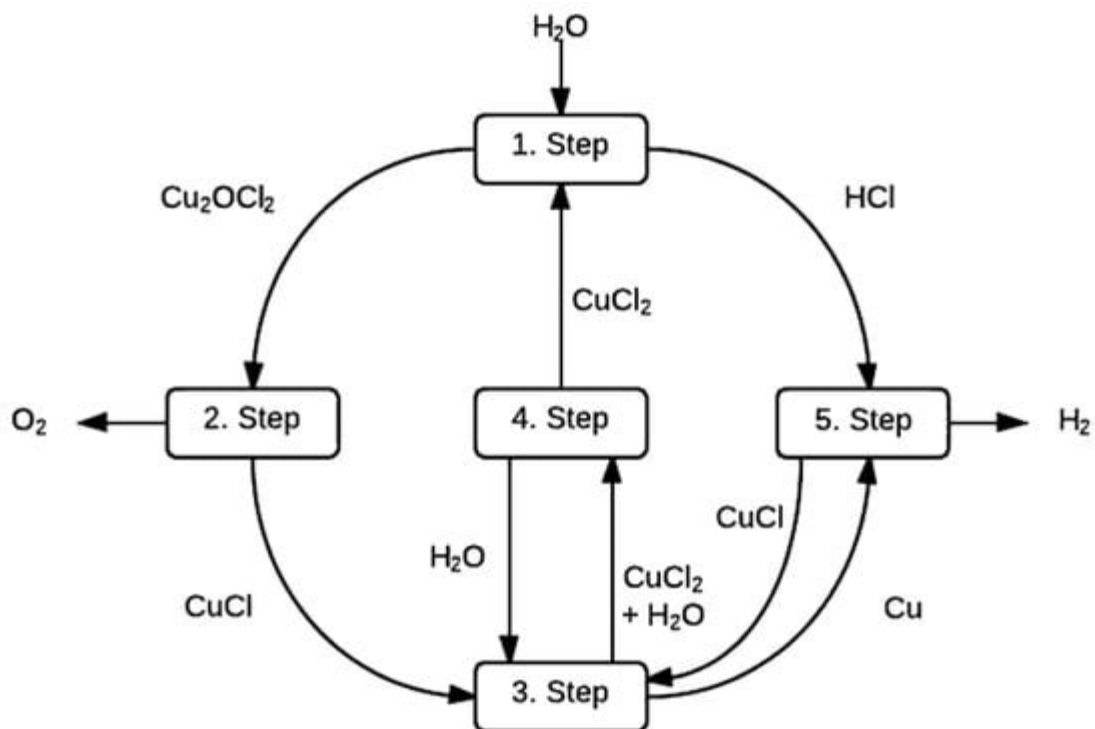
3.1.2. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται σε μη υδρογονάνθρακες

Η παραγωγή υδρογόνου από μεθόδους που δεν βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα με χρήση νερού μπορεί να διευκολύνει την επίλυση περιβαλλοντικών προβλημάτων, καθιστώντας έτσι το υδρογόνο καθαρό καύσιμο με πραγματική έννοια. Υπάρχουν πολλές μέθοδοι που δεν βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, όπως η ηλεκτρόλυση, η μέθοδος ηλιακής ενέργειας, η παραγωγή βιο υδρογόνου και η θερμοχημική μέθοδος, για τις οποίες η απόδοση μπορεί να κυμαίνεται από 70 έως 90% [58 , 59] .

Η ηλεκτρόλυση είναι η μέθοδος παραγωγής υδρογόνου που διασπά το νερό σε οξυγόνο και υδρογόνο μέσω ηλεκτρικού ρεύματος. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου σε μικρή κλίμακα [60] λόγω του κόστους του. Είναι μια προηγμένη τεχνολογία με απόδοση σχεδόν 71% και παράγει καθαρό υδρογόνο από νερό χωρίς εκπομπή κανενός είδους αερίων του θερμοκηπίου [61 , 62 , 63]. Η ηλεκτρόλυση σε υψηλή θερμοκρασία που εκμεταλλεύεται το νερό σε ατμό βρίσκεται υπό ανάπτυξη [64 , 65 , 66 , 67]. Σε αυτή την τεχνική, η ενέργεια που είναι απαραίτητη για την ηλεκτρόλυση παρέχεται με τη μορφή θερμότητας και όχι ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία είναι ακριβή. Η ηλεκτρόλυση του νερού είναι μια οικονομικά αποδοτική και βιώσιμη επιλογή. Οι ηλεκτρολύτες μπορούν να παράγουν σχεδόν 380.000 kg H₂ ετησίως με κατανάλωση ενέργειας 53,4 kWh/kg H₂ και η απόδοση είναι σχεδόν ίση με 73% [68]. Αυτή η μέθοδος παραγωγής υδρογόνου περιορίζεται επί του παρόντος σε επίπεδο έρευνας και ανάπτυξης.

Η θερμοχημική διάσπαση νερού είναι μια μέθοδος αποσύνθεσης νερού που χρησιμοποιείται για μεγάλης κλίμακας παραγωγή υδρογόνου [69 , 70 , 71]. Η

αναποτελεσματικότητά του οφείλεται στη μετατροπή της θερμότητας σε ηλεκτρική ενέργεια που μπορεί να διευθετηθεί μέσω θερμοχημικών κύκλων. Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι ότι επιτρέπει στο νερό να αποσυντίθεται σε χαμηλές θερμοκρασίες (850–1000 °C). Έχουν προβλεφθεί πολυάριθμες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου με επίκεντρο τη θερμοχημική μέθοδο [72 , 73 , 74]. Το ενδιαφέρον για τους κύκλους θερμοχημικής διάσπασης του νερού αναπτύχθηκε τη δεκαετία του 1970 και οι περισσότεροι από τους κύκλους προβλήθηκαν με μια πρωτογενή πυρηνική πηγή ενέργειας. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί μέσω θερμοχημικών κύκλων διάσπασης νερού χρησιμοποιώντας πυρηνικούς αντιδραστήρες. Αυτοί οι κύκλοι απαιτούν θερμοκρασίες 500 °C, ή ακόμα περισσότερες, οι οποίες μπορούν να επιτευχθούν από αντιδραστήρες ελαφρού νερού. Η θερμοκρασία λειτουργίας του αντιδραστήρα είναι μια σημαντική πτυχή γιατί οι υψηλές θερμοκρασίες επιτρέπουν γρήγορες αντιδράσεις και επίσης έχουν μεγαλύτερη απόδοση. Αυτοί οι θερμοχημικοί κύκλοι διάσπασης νερού με υψηλές θερμοκρασίες έχουν τη δυνατότητα να εκτελούν κατάλληλους, αποτελεσματικούς κύκλους. Υπάρχουν περισσότεροι από 100 διαθέσιμοι θερμοχημικοί κύκλοι που θα μπορούσαν να εκτελέσουν αντίδραση διάσπασης νερού σε αντιδραστήρες υψηλής θερμοκρασίας. Μεταξύ των πιο υποσχόμενων κύκλων υψηλής θερμοκρασίας είναι οι κύκλοι θείου-ιωδίου ή S-I και βρωμιούχου ασβεστίου-οξειδίου του σιδήρου. Εκτός από τους κύκλους υψηλής θερμοκρασίας, ο κύκλος Cu-Cl ή χαλκού-χλωρίου είναι ένας σημαντικός κύκλος χαμηλότερης θερμοκρασίας που θα μπορούσε να παράγει υδρογόνο με θερμότητα από ένα ρεύμα [74]. Αυτός ο κύκλος Cu-Cl έχει απόδοση σχεδόν 40% σε θερμοκρασία λειτουργίας 550 °C. Το Σχήμα 8 δείχνει την παραγωγή υδρογόνου από έναν θερμοχημικό κύκλο χαλκού-χλωρίου 5 σταδίων. Αυτοί οι τύποι θερμοχημικού κύκλου είναι οικονομικά χρήσιμοι για διάρκειες ζωής [75]. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου για τον κύκλο S-I και τον κύκλο Cu-Cl εκτιμάται ότι είναι 2,63 \$ /kg και 2,17 \$ /kg, αντίστοιχα, και ο ρυθμός παραγωγής είναι 800.000 και 7000 kg ανά ημέρα, αντίστοιχα [76].



Εικόνα 8. Θερμοχημικός κύκλος Cu-Cl για παραγωγή υδρογόνου.

Στη μέθοδο της ηλιακής ενέργειας, υιοθετείται η φωτοηλεκτροχημική μέθοδος διάσπασης νερού στην οποία η ηλιακή ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια μέσα σε ένα στοιχείο και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια να χρησιμοποιηθεί για ηλεκτρόλυση. Σε αυτή τη μέθοδο, η ηλιακή ακτινοβολία προσπίπτει σε ημιαγωγούς και λειτουργεί ως φωτοκαταλύτης [77]. Η επέκταση των φωτοκαταλυτών πέτυχε ένα ευρύ φάσμα ορατού φωτός για την επίτευξη υψηλής παραγωγής υδρογόνου [78]. Ως εκ τούτου, αυτή η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεγάλης κλίμακας παραγωγή υδρογόνου και, σύμφωνα με την πρόβλεψη, θα απαιτηθούν σχεδόν 10000 φωτοηλεκτροχημικές μονάδες (PEC) μέχρι το τέλος του έτους 2050, οι οποίες θα ικανοποιήσουν το ένα τρίτο της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης [79]. Στις ΗΠΑ τα έτη 2013 έως 2014, το κόστος για τις φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις ήταν περίπου $2,3 \$ W p^{-1}$, και μόνο η Κίνα και ορισμένες χώρες στην Ευρώπη είχαν χαμηλότερο κόστος σε περίπου $1,6 \$ W p^{-1}$ και $1,9 \$ W p^{-1}$ αντίστοιχα. Αυτές οι διαφορές κόστους είχαν υψηλότερη χωρητικότητα στις ΗΠΑ, γεγονός που υποδηλώνει διαφορές κόστους ανάλογα με την τοποθεσία [57].

Ομοίως, η μέθοδος παραγωγής βιο-υδρογόνου χρησιμοποιεί βιοκαύσιμα ως πηγή ενέργειας, όπου μικροοργανισμοί χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου με τη μέθοδο της ζύμωσης και της φωτόλυσης. Η ζύμωση μπορεί να λάβει χώρα ως φωτοζύμωση (παρουσία φωτός) και σκοτεινή ζύμωση (απουσία φωτός) μέσω βακτηρίων. Η βιοφωτόλυση περιλαμβάνει άμεση και έμμεση φωτόλυση μέσω μικροφυκών και κυανών βακτηρίων. Αυτή η μέθοδος είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για εμπορική παραγωγή υδρογόνου με ελάχιστα υποστρώματα στο μέλλον, με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Το κόστος του υδρογόνου προβλέπεται να είναι 2,13 \$ ανά kg H₂ που παράγονται. Έτσι, μια αύξηση περίπου 20% στο κόστος υποδηλώνει 33,33% υψηλότερο κόστος παραγωγής. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου με σκοτάδι και φωτοζύμωση αναμένεται να είναι 2,57 \$ /kg και 2,83 \$ /kg, αντίστοιχα [32].

Σήμερα, η τεχνική της πυρηνικής σχάσης χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή υδρογόνου. Για το σκοπό αυτό, δημιουργούνται πυρηνικοί αντιδραστήρες που εκτελούν ηλεκτρόλυση νερού σε υψηλές θερμοκρασίες. Αυτή η μέθοδος θα μπορούσε να έχει μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

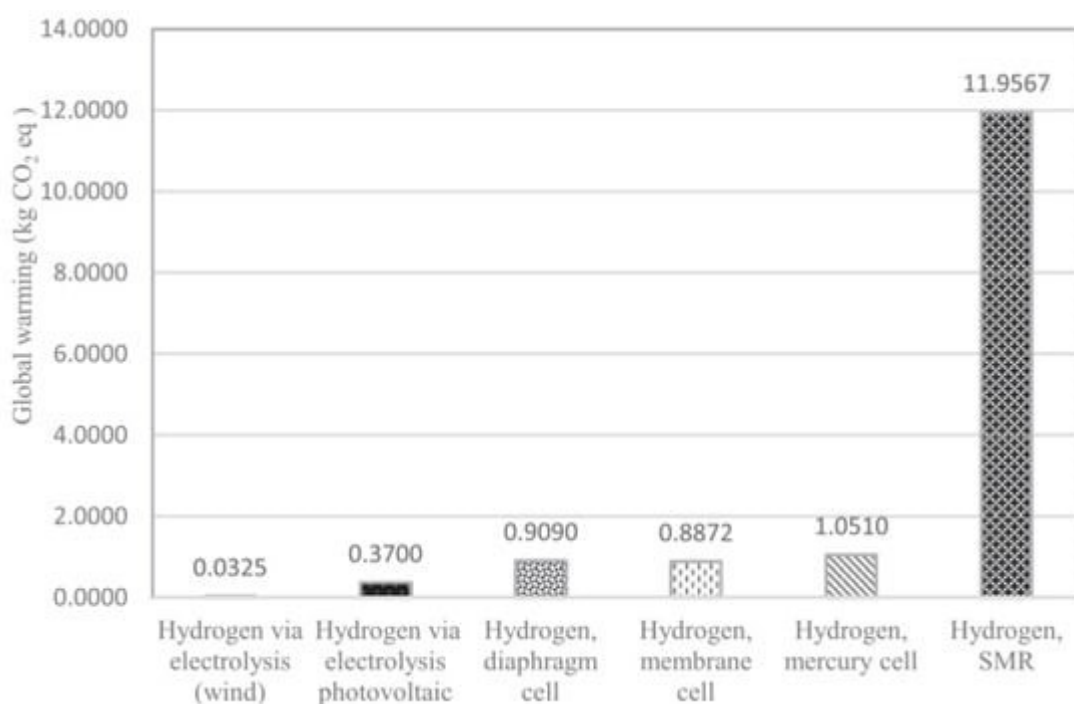
Ωστόσο, όλες αυτές οι διαδικασίες έχουν αρκετά εμπόδια που περιορίζουν τις εφαρμογές τους. Πολλές διαδικασίες βρίσκονται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης. Ως εκ τούτου, η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας δεν είναι επί του παρόντος οικονομικά εφικτή και αυτές πρέπει να συνοδεύονται από πηγές ενέργειας χωρίς υδρογονάνθρακες [80 , 81 , 82 , 83].

3.1.3. Περιβαλλοντικές όψεις των μεθόδων παραγωγής

Το υδρογόνο που παράγεται από ορυκτά καύσιμα συμβάλλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη μέσω της άμεσης καύσης ορυκτών καυσίμων, ενώ το υδρογόνο που παράγεται από εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως ηλιακά συστήματα ενέργειας υδρογόνου και ηλεκτρόλυση παρέχει μόνιμη, καθαρή, απαλλαγμένη από ρύπανση και φιλική προς το περιβάλλον ενέργεια λόγω της δυνατότητας ανακύκλωσής του. παραγωγή και καύση. Για τις διαθέσιμες μεθόδους παραγωγής υδρογόνου, αν συγκρίνουμε το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη (Εικόνα 9), είναι σαφές ότι η

παραγωγή υδρογόνου από τη μέθοδο αναμόρφωσης ατμού (με βάση τα ορυκτά καύσιμα) έχει υψηλότερο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, δηλαδή σχεδόν 11,9567 ανά kg υδρογόνου, το οποίο ακολουθείται από κυψέλη υδραργύρου υδρογόνου, κυψέλη διαφράγματος υδρογόνου και κυψέλη μεμβράνης με δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη 1,0510, 0,9090 και 0,8872 ανά kg υδρογόνου, αντίστοιχα. Η τιμή είναι αρκετά χαμηλή για την παραγωγή υδρογόνου από ηλεκτρόλυση (που δεν βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα), δηλαδή 0,0325 ανά kg υδρογόνου, σε σύγκριση με την παραγωγή υδρογόνου από εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Η υψηλότερη τιμή του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη για τη μέθοδο αναμόρφωσης μεθανίου ατμού σχετίζεται με την πρώτη ύλη που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μέθοδο. Η χρήση του μεθανίου προκαλεί άμεσα την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου. Η χαμηλότερη τιμή του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη για άλλες μεθόδους σχετίζεται περισσότερο με τις μεθόδους προ της χρήσης αλλά όχι λόγω της πρώτης ύλης ή της διαδικασίας άμεσης χρήσης. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν την κατασκευή και τη διανομή των εξαρτημάτων που απαιτούνται για αυτές τις μεθόδους. Για παράδειγμα, μια κυψέλη υδραργύρου υδρογόνου παρέχει έναν εξαιρετικό τρόπο παραγωγής υδρογόνου. Ωστόσο, η χρήση του ίδιου του υδραργύρου είναι ανεπιθύμητη λόγω της υψηλής τοξικότητάς του και των δυσμενών επιπτώσεων εάν διαρρεύσει στο περιβάλλον. Οι άλλες μέθοδοι, όπως το υδρογόνο μέσω υδρόλυσης με χρήση φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών, δημιουργούν το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη λόγω της διαδικασίας κατασκευής στροβίλων ή φωτοβολταϊκών κυψελών, επομένως έχουν πολύ χαμηλή αξία. Το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη είναι ένας σημαντικός παράγοντας για την κατανόηση των δυσμενών επιπτώσεων στην ανθρώπινη υγεία και τη σχετική απόρριψη αερίων του θερμοκηπίου. Τα συστήματα συνθετικών ορυκτών καυσίμων και ηλιακών συστημάτων υδρογόνου είναι οι σημαντικότερες αντικαταστάσεις των υφιστάμενων ενεργειακών συστημάτων ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, δεν είναι συγκρίσιμα από περιβαλλοντική άποψη. Αν και τα συνθετικά ορυκτά καύσιμα είναι κατάλληλες μέθοδοι παραγωγής, εντούτοις παρέχουν μεγαλύτερη ρύπανση σε σύγκριση με τα ορυκτά καύσιμα. Αντίθετα, τα ηλιακά ενεργειακά συστήματα υδρογόνου προτείνουν ένα καθαρό, διαχρονικό ενεργειακό σύστημα που είναι συμβατό με το περιβάλλον. Έτσι, λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα τρία ενεργειακά συστήματα από περιβαλλοντική άποψη, παράγοντες όπως η παραγωγή ατμών, η ρύπανση και η περιβαλλοντική υποβάθμιση είναι πολύ μειωμένοι

για τα ηλιακά συστήματα ενέργειας σε σύγκριση με τα άλλα, τα οποία συνοψίζονται στον Πίνακα 2. Σε αυτόν τον πίνακα, τα μειονεκτήματα του συνθετικού καυσίμου και τα οφέλη του ηλιακού συστήματος υδρογόνου είναι ορατά. Οι εκπομπές ρύπων όπως CO₂, CO, SO₂, NO_x και HC είναι πολύ υψηλές για ενεργειακά συστήματα που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, ενώ είναι αρκετά χαμηλές, δηλαδή σχεδόν 0% για ένα ηλιακό ενεργειακό σύστημα υδρογόνου. Δεδομένου ότι η ποσότητα των ρύπων είναι αρκετά υψηλή σε συστήματα που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα, προκαλούν διάφορα κλιματικά ζητήματα όπως η όξινη βροχή και η καταστροφή του στρώματος του όζοντος. Αυτό μπορεί να γίνει κατανοητό από την αναλογία περιβαλλοντικής ζημίας που είναι πολύ υψηλότερη (περίπου 18 και 23) για τα ορυκτά καύσιμα και τα συνθετικά καύσιμα, όπως αναφέρεται στον Πίνακα 2. Αυτή η αναλογία είναι αμελητέα για συστήματα ηλιακής ενέργειας υδρογόνου λόγω της απουσίας συστατικών με βάση τον άνθρακα, το θείο ή το άζωτο.



Εικόνα 9. Δυνατότητα υπερθέρμανσης του πλανήτη για διαφορετικές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου.

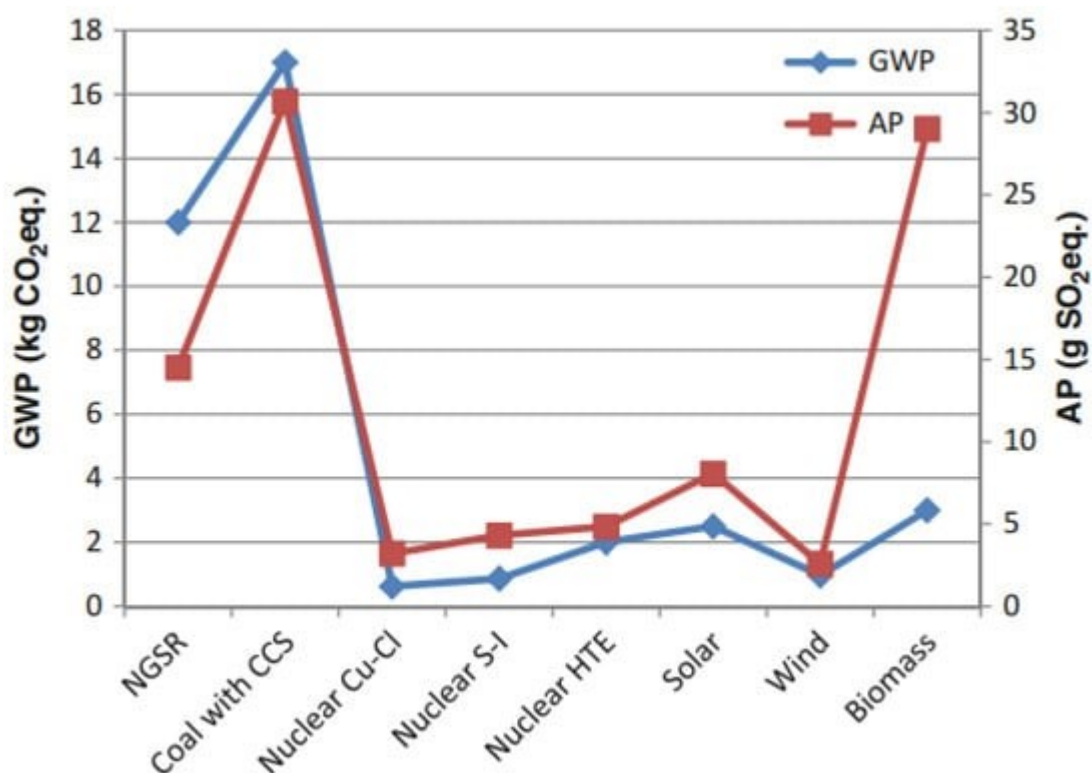
Πίνακας 2. Περιβαλλοντικές ιδιότητες των κύριων ενεργειακών συστημάτων.

Ενεργειακό Σύστημα	Ρύποι (kg/GJ)						Παραγωγή ατμών			Αναλογία περιβαλλοντικής βλάβης ^γ	Συντελεστής Περιβαλλοντικής Συμβατότητας
	CO ₂	C O	SO ₂	OXI x	H C	MM a	Ενεργειακό Σύστημα	Υπερθέρμανση του πλανήτη	(%) ^β		
Ορυκτών καυσίμων	72,4 0	0,8 0	0,3 8	0,34	0,2 0	0,09	8.9	3900	0,782	18.24	0,055
Άνθρακας/Συνθετικά ορυκτά καύσιμα	100	0,6 5	0,5 0	0,32	0,1 2	0,14	9.3	3900	0,782	22,62	0,044
Ηλιακή-Υδρογόνο Ενέργεια	0,00	0,0 0	0,0 0	0,00	0,1 0	0,00	6.0	0,0	0,001	1.0	1.00

^a σωματίδιο. ^β Όσον αφορά την ετήσια παραγωγή ατμών λόγω ηλιακής θέρμανσης (5×10^{17} kg/έτος). ^γ (Ζημιά λόγω καυσίμου)/(Ζημιά λόγω ηλιακού υδρογόνου).

Η εκπομπή CO₂ προκάλεσε αύξηση της θερμοκρασίας της επιφάνειας της υδρογείου κατά σχεδόν 0,6 °C κατά τον 20ο αιώνα. Εάν οι εκπομπές CO₂ δεν μειωθούν, η θερμοκρασία της επιφάνειας της Γης αναμένεται να αυξηθεί κατά 1,4 έως 5,8 °C μέχρι το τέλος του 21ου αιώνα, οδηγώντας σε άνοδο της στάθμης της θάλασσας κατά 0,5 m. Έτσι, για την επιβράδυνση της διαδικασίας, υπάρχει άμεση ανάγκη μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 60-80%, κάτι που είναι δυνατό μόνο με την αντικατάσταση του ενεργειακού συστήματος από ενέργεια χωρίς άνθρακα.

Η παραγωγή υδρογόνου από θερμοχημικούς κύκλους διάσπασης νερού είναι επίσης φιλική προς το περιβάλλον όσον αφορά τις εκπομπές CO₂, την όξινη βροχή και την παροχή βιώσιμων καυσίμων. Αυτό μπορεί να συνοψιστεί στον «λειτουργικό οδηγό για τα πρότυπα ISO» που περιγράφηκε το 2001 από το CML (Centre of Environmental Science of Leiden University). Το Σχήμα 10 περιγράφει τα αποτελέσματα με βάση τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις με τη μορφή AP (δυναμικό οξύτητας) και GWP (δυναμικό θέρμανσης του πλανήτη) για συγκεκριμένες μεθόδους παραγωγής υδρογόνου. Από το σχήμα, το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη και το δυναμικό οξίνισης είναι χαμηλότερα για την παραγωγή υδρογόνου μέσω θερμοχημικών κύκλων, ενώ αυτές οι τιμές είναι υψηλότερες για τον άνθρακα [75].



Εικόνα 10. GWP και AP συγκεκριμένων μεθόδων παραγωγής υδρογόνου.

Έτσι, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι μόλις η παραγωγή υδρογόνου βασιστεί πλήρως σε ενεργειακά συστήματα μη ορυκτών καυσίμων, θα γίνει βιώσιμο καύσιμο [85]. Πολλές δραστηριότητες για την υποστήριξη και την ανάφλεξη αυτού του τύπου αλλαγής βρίσκονται σε εξέλιξη, όπως η πρώτη Παγκόσμια Διάσκεψη για το Κλίμα, που πραγματοποιήθηκε με θέμα την κλιματική αλλαγή το 1979. Ο κύριος στόχος αυτής της διάσκεψης ήταν να επιστήσει την προσοχή του κοινού στις δυσμενείς

επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και να διαπιστωθεί ότι η μακροχρόνια χρήση ορυκτών καυσίμων είχε ως αποτέλεσμα CO₂ συσσώρευση στην ατμόσφαιρα, που οδηγεί σε διαφορές στο κλίμα. Τον Ιούνιο του 1992, η σύμβαση-πλαίσιο του ΟΗΕ για την κλιματική αλλαγή ήταν μια από τις πιο αξιόλογες προσπάθειες για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο. Έτσι, αυτού του είδους οι δραστηριότητες ξεκίνησαν την αντίληψη της βιώσιμης ανάπτυξης [86].

3.1.4. Οικονομικές όψεις των μεθόδων παραγωγής

Τα οικονομικά των ενεργειακών συστημάτων υδρογόνου μπορούν να εκτιμηθούν μέσω του κόστους αποθήκευσης, παραγωγής, χρήσης και μεταφοράς υδρογόνου [87 , 88]. Επί του παρόντος, μεταξύ αυτών των παραγόντων, η παραγωγή H₂ είναι ένας κυρίαρχος παράγοντας και εξαρτάται από το κόστος των πρωτογενών πηγών ενέργειας [61]. Λαμβάνοντας υπόψη την οικονομική πτυχή, οι νέες τεχνολογίες παραγωγής υδρογόνου που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι επί του παρόντος δαπανηρές σε σύγκριση με τις μεθόδους παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Το κόστος παραγωγής υδρογόνου από πηγές που δεν βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα επηρεάζεται από το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας. Η πιο σημαντική μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου από πηγές μη ορυκτών καυσίμων είναι η ηλεκτρόλυση, αλλά το κόστος της ηλεκτρόλυσης επηρεάζεται από το κόστος του ηλεκτρολύτη και τη χρήση του. Έτσι, η παραγωγή υδρογόνου από την ηλεκτρόλυση είναι ανταγωνιστική σε σχέση με άλλες πορείες παραγωγής υδρογόνου με την απουσία CO₂, ως εκ τούτου παρέχει πράσινη ηλεκτρική ενέργεια. Αντίστοιχα, το κόστος παραγωγής υδρογόνου με βάση τα ορυκτά καύσιμα εξαρτάται από το κόστος τους. Για παράδειγμα, ως συγκριτική άποψη, τα κύρια εμπόδια στις θερμοχημικές μεθόδους είναι η ύπαρξη απορρόφησης αιώρησης πίεσης, μέθοδοι καθαρισμού H₂ και το κόστος καταλύτη: όλοι αυτοί οι παράγοντες αυξάνουν το κόστος παραγωγής H₂. Ωστόσο, μειώνει το κόστος βιομάζας και αυξάνει την απόδοση [89]. Η διαδικασία ηλεκτρόλυσης νερού είναι μια εφικτή δυνατότητα για μικρής κλίμακας παραγωγή υδρογόνου από οικονομική άποψη. Εν τω μεταξύ, για μεγάλης κλίμακας παραγωγή, το κόστος αυξάνεται σε περίπου 5% για τον ηλεκτρολύτη λόγω της υψηλής χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας. Το H₂ Το κόστος παραγωγής για τις μεθόδους σκοτεινής και φωτοζύμωσης αναμενόταν να είναι 2,5

έως 2,8 USD ανά kg [57]. Το 2017, οι Sharma και Kaushik δήλωσαν ότι το κόστος παραγωγής H₂ για τις μεθόδους σκοτεινής και φωτοζύμωσης ήταν περίπου 3,70 και 18,70 USD, αντίστοιχα [90]. Πρόσφατα, για την Αυστραλία, αναφέρθηκε ότι για την αναμόρφωση μεθανίου ατμού και για την παραγωγή αεριοποίησης άνθρακα το κόστος του υδρογόνου στην Αυστραλία είναι περίπου 1,88 \$ έως 2,30 \$ ανά kg H₂ και 2,02 \$ έως 2,47 \$ ανά kg H₂ , αντίστοιχα. Στις μεθόδους ηλεκτρόλυσης, το κόστος για την αλκαλική ηλεκτρόλυση και για τη μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων είναι \$4,78 έως 5,84 \$ /kg H₂ και 6,08 \$ έως 7,43 \$ / kg H₂ , αντίστοιχα. Το κόστος παραγωγής για μερική οξειδωση μεθανίου μέσω αερίου σύνθεσης είναι 1,33 ευρώ/kg H₂ [27]. Σε μια άλλη μελέτη, οι Hay et al. ανέφερε ότι η παραγωγή H₂ από φυσικό αέριο και άνθρακα περιέχει 2,48 έως 3,15 USD ανά kg και 0,37 έως 1,82 USD ανά kg, αντίστοιχα. Παρόλο που, για την ηλιακή και την αιολική ενέργεια, το κόστος παρατηρήθηκε υψηλό κατά τα έτη 2011 έως 2016, με το ποσοστό να αυξάνεται έως και 5,6% ετησίως, και διαπιστώθηκε ότι η αγορά H₂ θα συγκεντρώσει περίπου 87,3 έως 118 δισεκατομμύρια δολάρια ΗΠΑ την περίοδο από το 2011 έως το 2016 κατά 6,21% [91]. Ο Καλαμάρα κατέληξε ότι η SMR είναι μια φθηνή και ευνοϊκή μέθοδος για την παραγωγή H₂ , με την τιμή του H₂ να είναι περίπου 7 USD/GJ και η τιμή του H₂ για την πυρόλυση και την αεριοποίηση βιομάζας αναμένεται στην περιοχή 8,91-5,51 \$ ανά GJ και 10 έως 14 \$ ανά GJ [92].

Στον Πίνακα 3 , παρουσιάζεται το κόστος πολλών τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου. Το κόστος της αναμόρφωσης μεθανίου με ατμό είναι πολύ χαμηλότερο (0,75 \$ /kg) από τις άλλες μεθόδους παραγωγής υδρογόνου. Η ηλιακή ηλεκτρόλυση προτείνει το υψηλότερο κόστος (5,0 \$ /kg) παραγωγής υδρογόνου αυτή τη στιγμή. Ωστόσο, με την ανάπτυξη των τεχνολογιών, το κόστος μπορεί να μειωθεί και θα μπορούσε να είναι η καλύτερη επιλογή στο μέλλον από περιβαλλοντική άποψη.

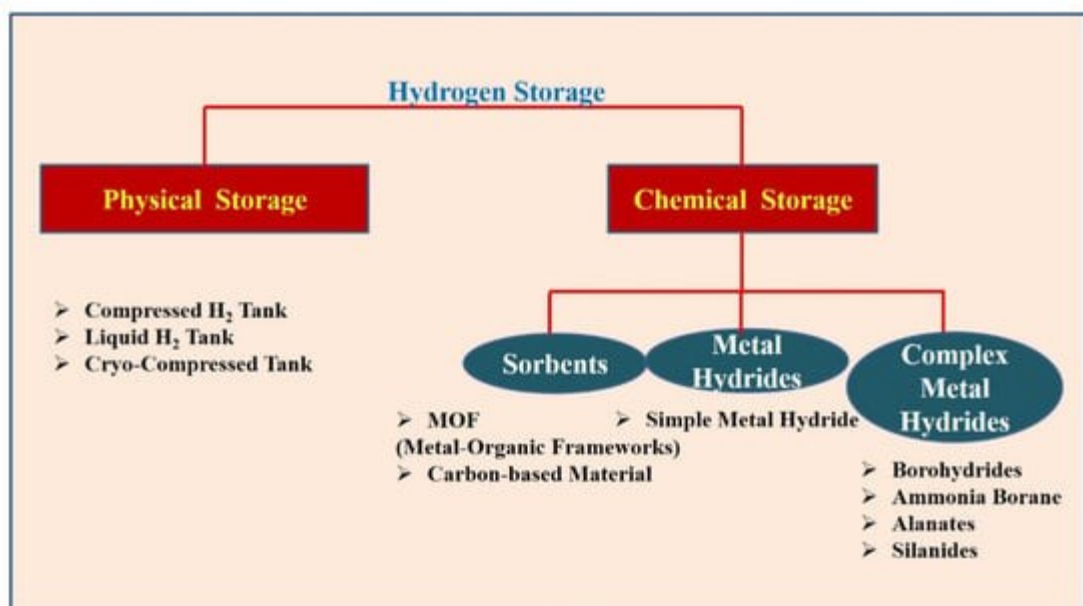
Πίνακας 3. Κόστος τεχνολογιών παραγωγής υδρογόνου.

Πηγή	Τεχνολογία	Κόστος Παραγωγής (\$ /kg)
Μεθάνιο	Αναμόρφωση ατμού	0,75
Κάρβουνο	Αεριοποίηση χωρίς δέσμευση CO ₂	0,92
Πυρηνικός	Ηλεκτρόλυση	2,6–3,0
	Διάσπαση νερού	1,4–2,3
Βιομάζα	Κεντρική αεριοποίηση βιομάζας	1,2–2,4
Ηλιακός	Φωτοκαταλυτική διάσπαση νερού	5.0

Ως εκ τούτου, η εμπορική ανάπτυξη αυτών των μεθόδων με την πάροδο του χρόνου και, σύμφωνα με τις αμελητέες περιβαλλοντικές επιπτώσεις τους, το κόστος παραγωγής H₂ αναμένεται να είναι μικρότερο ή συγκρίσιμο με αυτό των συμβατικών μεθόδων που χρησιμοποιούν ορυκτά καύσιμα [86].

3.2. Αποθήκευση Υδρογόνου

Το υδρογόνο έχει αποδειχθεί ότι είναι φορέας ενέργειας αντί για πηγή ενέργειας, που σημαίνει ότι μπορεί να παρέχει και να αποθηκεύει ενέργεια σε χρήσιμη μορφή [93]. Ωστόσο, επειδή είναι ελαφρύ, η αποθήκευσή του είναι μια από τις πτυχές που χρειάζονται σοβαρή προσοχή. Μπορεί να αποθηκευτεί με διάφορους τρόπους είτε σε φυσική είτε σε χημική μορφή. Το Σχήμα 11 συνοψίζει όλες τις μεθόδους αποθήκευσης υδρογόνου.



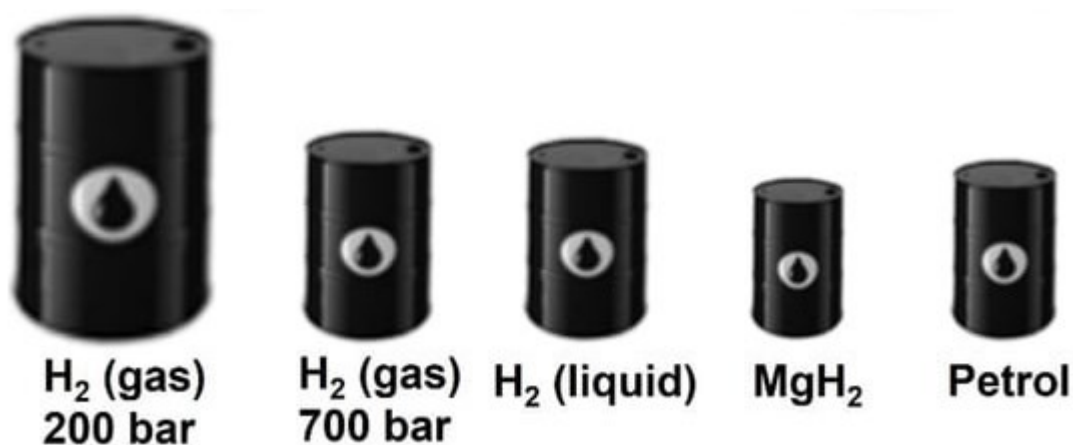
Εικόνα 11. Τύποι αποθήκευσης υδρογόνου.

3.2.1. Φυσική αποθήκευση

Η φυσική αποθήκευση σημαίνει αποθήκευση υδρογόνου στη μοριακή του μορφή. Οι επιλογές αποθήκευσης υδρογόνου σε μοριακή μορφή είναι δεξαμενές υγρού υδρογόνου και δεξαμενές συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου. Σε υγρή κατάσταση, το υδρογόνο χρειάζεται σχεδόν διπλάσιο χώρο σε σύγκριση με τη βενζίνη. Το υγρό υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί μέσω μιας διαδικασίας συμπίεσης και ψύξης σε κρυογονικές δεξαμενές. η απαιτούμενη εργασία είναι προβλέψιμη σε 15,2 kWh/kg, επιτυγχάνοντας ογκομετρική πυκνότητα 70,8 kg/m³ και η βαρυμετρική πυκνότητα επηρεάζεται από το μέγεθος της δεξαμενής. Σε συμπιεσμένη κατάσταση, αυτή η ποσότητα αυξάνεται 3–5 φορές, με δεξαμενές 5000 και 10.000 psi. Η αποθήκευση αερίου υδρογόνου υψηλής πίεσης επιτυγχάνει υψηλές πιέσεις έως και 77 MPa με τη χρήση μηχανικών συμπιεστών τύπου εμβόλου και η εργασία που απαιτείται για τη συμπίεση είναι μεγαλύτερη από 2,21 kWh/kg, η οποία παρέχει ογκομετρική και βαρυμετρική πυκνότητα 40 kg/m³ και 13 wt%, αντίστοιχα [27]. Υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα για την αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή μορφή και η αέρια κατάσταση απαιτεί μεγάλο φυσικό όγκο, με υψηλό κόστος, υψηλή κατανάλωση

ενέργειας, υψηλή πίεση, πολύ χαμηλή θερμοκρασία και κυρίως ζητήματα ασφάλειας, που τα καθιστούν αδύνατη για εμπορική εφαρμογή.

Ως εκ τούτου, λόγω πολλών προβλημάτων αποθήκευσης υδρογόνου σε υγρή και αέρια κατάσταση, η τρίτη μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου σε χημική μορφή έχει προσελκύσει την προσοχή των επιστημόνων καθώς μειώνει την ουσιαστική πίεση αποθήκευσης και αυξάνει την ογκομετρική χωρητικότητα. Μια σύγκριση του απαιτούμενου χώρου καταδείχθηκε από τους Edwards et al. [50] και σκιαγραφείται εδώ στο Σχήμα 12 . Τέσσερα κιλά υδρογόνου χρειάζονται ογκώδεις δεξαμενές για την υγρή και αέρια κατάσταση του, ενώ όσο μεγαλύτερη ποσότητα υδρογόνου σε χημική μορφή χρειάζεται πολύ λιγότερο όγκο.



Εικόνα 12. Η αποθήκευση υδρογόνου με διαφορετικούς τρόπους.

3.2.2. Αποθήκευση Χημικών

Στη μέθοδο χημικής αποθήκευσης, το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε υλικά στερεάς κατάστασης. Τις τελευταίες δεκαετίες τα υλικά στερεάς κατάστασης έχουν γίνει αντικείμενο πολυάριθμων μελετών. Πολλά υλικά έχουν διερευνηθεί σε αναζήτηση κατάλληλου υλικού που πληροί τις απαιτήσεις σύμφωνα με το US-DOE, για παράδειγμα, χωρητικότητα αποθήκευσης μεγαλύτερη από 8 wt% και θερμοκρασία λειτουργίας 40–85 °C [94 , 95] . Υπάρχουν πολυάριθμα υλικά όπως ροφητές, υδρίδια ελαφρών μετάλλων και σύνθετα υδρίδια μετάλλων. Στα συστήματα ροφητών το υδρογόνο συνδέεται με την επιφάνεια μέσω φυσικοπροσρόφησης όπως

υλικά με βάση το C και MOFs (Metal Organic Framework). Αυτά τα συστήματα χρειάζονται πολύ χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας η οποία δεν είναι πρακτικά δυνατή και η χωρητικότητα αποθήκευσης τους δεν είναι τόσο καλή [96], επομένως τα υδρίδια ελαφρών μετάλλων και τα σύνθετα υδρίδια μετάλλων είναι εξέχουσες μέθοδοι καθώς απαιτούν συγκριτικά εφικτές θερμοκρασίες εργασίας και έχουν καλή ικανότητα αποθήκευσης υδρογόνου σύμφωνα με τους στόχους των US-DOE [97] .

Για να σχηματιστούν υδρίδια ελαφρών μετάλλων, το υδρογόνο αλληλεπιδρά με μέταλλα μέσω διαφορετικών δεσμών. Αυτά κατηγοριοποιούνται επίσης σε δύο τύπους: διάμεση υδρίδια, όπως τα LaNi 5 και FeTi, τα οποία δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν εμπορικά για δυναμικές/ενοχικές ανάγκες λόγω της χαμηλής χωρητικότητας αποθήκευσης υδρογόνου [98], και ιοντικά ή ομοιοπολικά υδρίδια, όπως το LiH [99] και MgH 2 [100], τα οποία είναι αρκετά κατάλληλα για αποθήκευση υδρογόνου λόγω της υψηλής χωρητικότητας αποθήκευσης υδρογόνου, αλλά απαιτούν πολύ υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας. Έχουν γίνει πολλές έρευνες σε αυτά τα υλικά, αλλά εξακολουθεί να απαιτείται υψηλή θερμοκρασία [101]. Στα χημικά υδρίδια, το υδρογόνο συνδέεται μέσω ομοιοπολικών δεσμών με υψηλή ικανότητα αποθήκευσης, αλλά αυτά τα υδρίδια είναι μη αναστρέψιμα [102 , 103] .

Μια άλλη υποκατηγορία υδριδίων μετάλλων είναι τα σύνθετα υδρίδια μετάλλων [104]. Μεταξύ όλων των υδριδίων, τα σύνθετα υδρίδια μετάλλων είναι τα πιο πολλά υποσχόμενα λόγω της υψηλής ικανότητας αποθήκευσης τους. Διατηρούν επίσης δύο θέματα. Αυτά περιλαμβάνουν θερμοδυναμικά και κινητικά ζητήματα, εξαιτίας των οποίων αυτά τα υλικά κάνουν σταθερά υδρίδια και απαιτούν υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας: μεγαλύτερη από 200 °C. Αυτά τα ζητήματα μπορούν να λυθούν με τη μείωση του μεγέθους των σωματιδίων και τη χρήση καταλυτών. Έτσι, η αποθήκευση σε στερεά κατάσταση είναι η κύρια μέθοδος αποθήκευσης μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου σε πίεση και θερμοκρασία περιβάλλοντος. Οι νανοσωλήνες άνθρακα (CNT) είναι σε θέση να αποθηκεύουν H 2 σε επαρκώς χαμηλές θερμοκρασίες (196,15 °C) και πιέσεις (6 MPa) και παρέχουν βαρυμετρική πυκνότητα 10,8 wt% και ογκομετρική πυκνότητα 41 kg/m 3 [27] . Τα νανοϋλικά προσφέρουν πολλά πλεονεκτήματα στα μέσα αποθήκευσης υδρογόνου που ξεπερνούν τον ρυθμό κινητικής προσρόφησης, τα εμπόδια χύδην υλικών και τη θερμοκρασία απελευθέρωσης. Στο Πανεπιστήμιο της Νότιας Φλόριντα, η έρευνα του ερευνητικού

κέντρου καθαρής ενέργειας έδειξε ότι η βελτίωση της ικανότητας αποθήκευσης και της κινητικής προσρόφησης μπορεί να βελτιωθεί μέσω του ντόπινγκ καταλυτών που βασίζεται σε νανοϋλικά. Αυτό οφείλεται στη μικρή απόσταση διάχυσης σε σύγκριση με τα χύδην υλικά [27].

Η συγκριτική μελέτη όλων αυτών των υδριδίων μετάλλων με βάση την ικανότητα αποθήκευσης και τη θερμοκρασία λειτουργίας συνοψίζεται στον Πίνακα 4 [97]. Ως εκ τούτου, συνεχίζεται η έρευνα σε αυτά τα υδρίδια μετάλλων για να διερευνηθούν οι ιδιότητές τους.

Πίνακας 4. Συγκριτικά συστήματα αποθήκευσης υδρογόνου σε στερεά κατάσταση.

Υλικά Αποθήκευσης Υδρογόνου	Ικανότητα αποθήκευσης υδρογόνου	Θερμοκρασία λειτουργίας
Ροφητικά Π.χ.-υλικά με βάση το C, MOFs	Συστήματα 2~7% κ.β.	~ 77 K
Συμβατικά υδρίδια μετάλλων Διάμεση υδρίδια π.χ.—LaNi ₅ , FeTi κ.λπ. Ιονικό/ομοιοπολικό υδρίδιο Παράλ.—LiH, MgH ₂ κ.	1~4 wt% >7 wt%	RT >600 K
Χημικά Παράδειγμα — NH ₃ , NH ₃ BH ₃ κ.λπ.	Υδρίδια 17,8~20% κ.β.	373~>773 K
Σύνθετα υδρίδια Αλανικά Π.χ. — LiAlH ₄ , NaAlH ₄ , Mg (AlH ₄) ₂ κ.λπ. NH ₂) ₂ κ.λπ. Silanides Ex.—KSiH ₃ , RbSiH ₃ , CsSiH ₃	5,8~10,5 wt% 10~18,5 wt% 5~10 wt% 2~4,5 wt%	≥400 K ≥400 K ≥400 K RT~500 K

3.2.3. Περιβαλλοντικές πτυχές

Η αποθήκευση υδρογόνου είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για την αποθήκευση υδρογόνου για μελλοντική χρήση. Είναι ένα από τα θεμελιώδη εμπόδια για την ευρεία χρήση του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας. Οι πιθανές μέθοδοι αποθήκευσης είναι: αποθήκευση υγρού υδρογόνου, αποθήκευση αερίου συμπιεσμένου υδρογόνου, υπόγεια αποθήκευση αερίου υδρογόνου και αποθήκευση υδριδίου μετάλλου. Το ενδιαφέρον για την αποθήκευση υδρογόνου είναι τα οχήματα μηδενικών εκπομπών, τα οποία παρακινούν την ανάπτυξη νέων μεθόδων αποθήκευσης. Η αποθήκευση υδρογόνου παρέχει μια καθαρή και βιώσιμη μορφή ενέργειας και δεν προκαλεί κακές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Παρέχει φιλική προς το περιβάλλον αποθήκευση καυσίμου.

3.2.4. Οικονομικές πτυχές

Το κόστος των διαφορετικών μεθόδων αποθήκευσης υδρογόνου δίνεται στο Σχήμα 13. Το κόστος τροφοδοσίας των δεξαμενών 700 bar είναι πολύ υψηλότερο (1,94 \$ /kg H₂), ενώ είναι 1,23 \$ / kg H₂ για μια δεξαμενή μεταλλικού υδριδίου. χαμηλότερα από τις δεξαμενές των 700 bar. Έτσι, συγκρίνοντας όλες τις τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου, το υδρίδιο μετάλλου και το ηλεκτρικό όχημα κυψελών καυσίμου φαίνεται να είναι οι πιο υποσχόμενες τεχνικές αποθήκευσης μέχρι τώρα [105].

Το κόστος αποθήκευσης υδρογόνου είχε επίσης μελετηθεί από τους Reus et al., οι οποίοι παρατήρησαν στη μελέτη τους ότι για αποθήκευση υδρογόνου σε συμπιεσμένο αέριο, το κόστος είναι υψηλό και απαιτείται ειδική συντήρηση, όπως χαμηλές πιέσεις για αυτές τις δεξαμενές των οποίων το κόστος είναι σχεδόν 850 \$ για αποθήκευση 1 κιλού υδρογόνου. Το κόστος αποθήκευσης Φορέων Υγρού Οργανικού Υδρογόνου αναμένεται στα 50 €/kg H₂, το οποίο είναι πιο οικονομικό σε σύγκριση με τα συστήματα αποθήκευσης σπηλαίων [106]. Το κόστος παροχής υδρογόνου με Υγρούς Οργανικούς Φορείς Υδρογόνου (LOHC) κυμαίνεται από 8–10 €/kg. Σε άλλη μελέτη σχετικά με το κόστος, διευκρινίστηκε ότι για την παραγωγή υδρογόνου το κόστος διανομής ήταν 5 €/kg H₂ και στο εύρος από 6,40 έως 8,10 € / kg H₂ [107].

Σε μια άλλη μελέτη το 2010, το κόστος προτάθηκε από 5 έως 10 \$ ανά κιλό για τη μεταφορά [108]. Ως εκ τούτου, μπορούμε να πούμε ότι για νέες μελέτες αυτό το κόστος έχει μειωθεί. Η μεταφορά και αποθήκευση υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα είναι θέμα ανάπτυξης και κατά συνέπεια υπάρχουν ελλείψεις σε μελέτες που σχετίζονται με το κόστος. Στο μέλλον, θα πρέπει να ερευνηθούν νέοι καταλύτες που θα είναι σε θέση να αυξήσουν τον ρυθμό της κινητικής ρόφησης υδρογόνου.

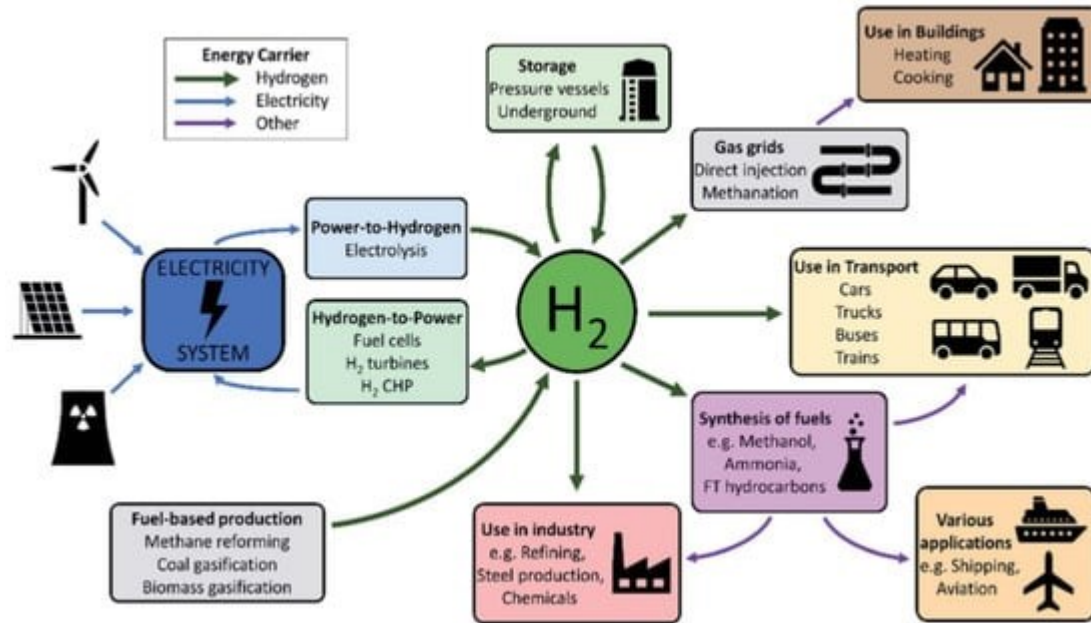
Εκτός από αυτό, για να ληφθούν υπόψη οικονομικές πτυχές, πρέπει να ληφθούν υπόψη δύο τύποι συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου: (i) Εφαρμογές μεταφοράς και (ii) σταθερές εφαρμογές. Αυτές οι εφαρμογές έχουν διαφορετικές ανάγκες και περιορισμούς. Ο τομέας των μεταφορών θα είναι η πιο σημαντική εφαρμογή της οικονομίας υδρογόνου στο εγγύς μέλλον. Οι απαιτήσεις αποθήκευσης υδρογόνου για εφαρμογές μεταφοράς είναι σκληρότερες από αυτές για σταθερές εφαρμογές. Οι απαιτήσεις για τον τομέα των μεταφορών είναι οι εξής: χαμηλότερη θερμοκρασία λειτουργίας, χαμηλή πίεση λειτουργίας, ανάγκη αναστρεψιμότητας πολλαπλών κύκλων πρόσληψης και απελευθέρωσης υδρογόνου, γρήγορη κινητική, υψηλές βαρυμετρικές και ογκομετρικές πυκνότητες υδρογόνου και κόστος αποθήκευσης υδρογόνου που είναι μικρότερο από £15 /κιλό. Επί του παρόντος, δεν υπάρχει διαθέσιμο σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου που θα μπορούσε να ικανοποιήσει όλες αυτές τις προϋποθέσεις. Οι σταθερές εφαρμογές έχουν λιγότερους περιορισμούς για τα υλικά αποθήκευσης υδρογόνου σε σύγκριση με τις εφαρμογές μεταφοράς, όπως αυτές μπορούν να λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις, μπορούν να καταλαμβάνουν μεγάλη περιοχή και μπορούν να έχουν πιο αργή κινητική. Ωστόσο, η αποθήκευση υδρογόνου για σταθερή χρήση έχει επίσης πολλές προκλήσεις. Οι επιλογές αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου και υγρού υδρογόνου δεν μπορούν να πληρούν τις περισσότερες από τις προϋποθέσεις που περιγράφονται παραπάνω. Οι εξελίξεις στα υλικά αποθήκευσης υδρογόνου σε στερεά κατάσταση θα είχαν δραστικό αντίκτυπο στην οικονομία του υδρογόνου. Οι επιλογές αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου και υγρού υδρογόνου δεν μπορούν να πληρούν τις περισσότερες από τις προϋποθέσεις που περιγράφονται παραπάνω. Οι εξελίξεις στα υλικά αποθήκευσης υδρογόνου σε στερεά κατάσταση θα είχαν δραστικό αντίκτυπο στην οικονομία του υδρογόνου. Οι επιλογές αποθήκευσης συμπιεσμένου αερίου και υγρού υδρογόνου δεν μπορούν να πληρούν τις περισσότερες από τις προϋποθέσεις

που περιγράφονται παραπάνω. Οι εξελίξεις στα υλικά αποθήκευσης υδρογόνου σε στερεά κατάσταση θα είχαν δραστικό αντίκτυπο στην οικονομία του υδρογόνου.

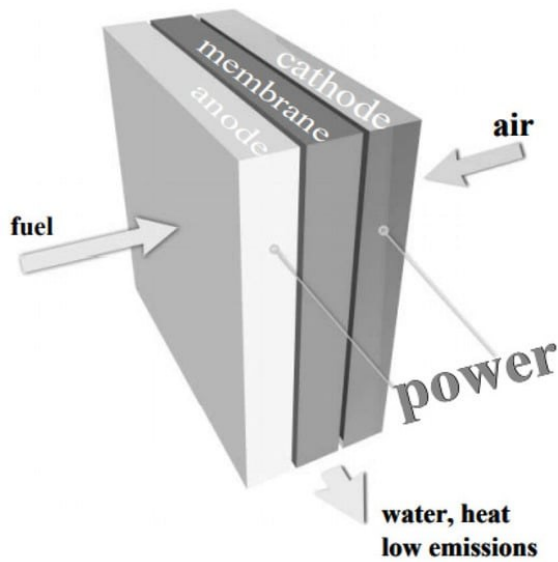
3.3. Αξιοποίηση Υδρογόνου

Η χρήση του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας εξαρτάται ευρέως από την προσβασιμότητα των τεχνικών και τη μετατροπή του σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα. Το σχήμα 14 δείχνει τη χρήση του υδρογόνου σε διάφορα πεδία [109]. Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ταχεία υιοθέτηση του υδρογόνου ως φορέα ενέργειας σε όλο τον κόσμο θα εξαρτηθεί από τη μετατροπή του υδρογόνου σε ηλεκτρική ενέργεια. Οι κυψέλες καυσίμου αναδεικνύονται ως μια εξέχουσα τεχνολογία για την αντικατάσταση των ενεργειακών συστημάτων που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Οι HFC (κυψέλες καυσίμου υδρογόνου) απελευθερώνουν μόνο νερό και κανένα επικίνδυνο ρύπο, όπως συμβαίνει με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν προβληθεί και υλοποιηθεί με επιτυχία ως η πιο ικανή συσκευή μετατροπής. Η κυψέλη καυσίμου είναι μια συσκευή που παράγει ηλεκτρική ενέργεια από την αντίδραση οξυγόνου από αέρα και υδρογόνο, παρόμοια με μια μπαταρία. Η διαφορά μεταξύ μιας κυψέλης καυσίμου και μιας μπαταρίας είναι ότι οι μπαταρίες αποθηκεύουν ενέργεια, ενώ οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρισμό. Το σχήμα της κυψέλης καυσίμου φαίνεται στο Σχήμα 15. Μια κυψέλη καυσίμου αποτελείται από μια άνοδο και μια κάθοδο που χωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη. Το υδρογόνο τροφοδοτείται στην άνοδο και το οξυγόνο στην κάθοδο της κυψέλης καυσίμου και οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα σε αυτά τα ηλεκτρόδια. Τα ιόντα που μεταφέρονται μέσω του ηλεκτρολύτη μεταξύ των ηλεκτροδίων και τα πλεονάζοντα ηλεκτρόνια παρέχουν ηλεκτρικό ρεύμα και ρέουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος. Εάν συγκρίνουμε τις αποδόσεις ενός βενζινοκίνητου αυτοκινήτου και κινητήρων κυψελών καυσίμου υδρογόνου, οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου οδηγούν τον αγώνα με απόδοση 65%, που είναι υπερδιπλάσια από αυτή των βενζινοκινητήρων (~25%). Η απόδοση ενισχύεται περαιτέρω έως και 85% όταν χρησιμοποιείται κυψέλη καυσίμου σε συστήματα ΣΗΘ (συνδυασμένης θερμότητας και ισχύος) [110 , 111]. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά την κυψέλη καυσίμου ιδανική για μια σειρά εφαρμογών όπως οχήματα, μπαταρίες κινητών τηλεφώνων και

παραγωγή ενέργειας. Η παρουσία των κυψελών καυσίμου στην αγορά αυτοκινήτων, οι υποδομές, οι περιβαλλοντικές και οικονομικές πτυχές τους συζητούνται σε αυτήν την ενότητα.



Σχήμα 14. Χρήση υδρογόνου



Εικόνα 15. Σχηματική κυψέλη καυσίμου.

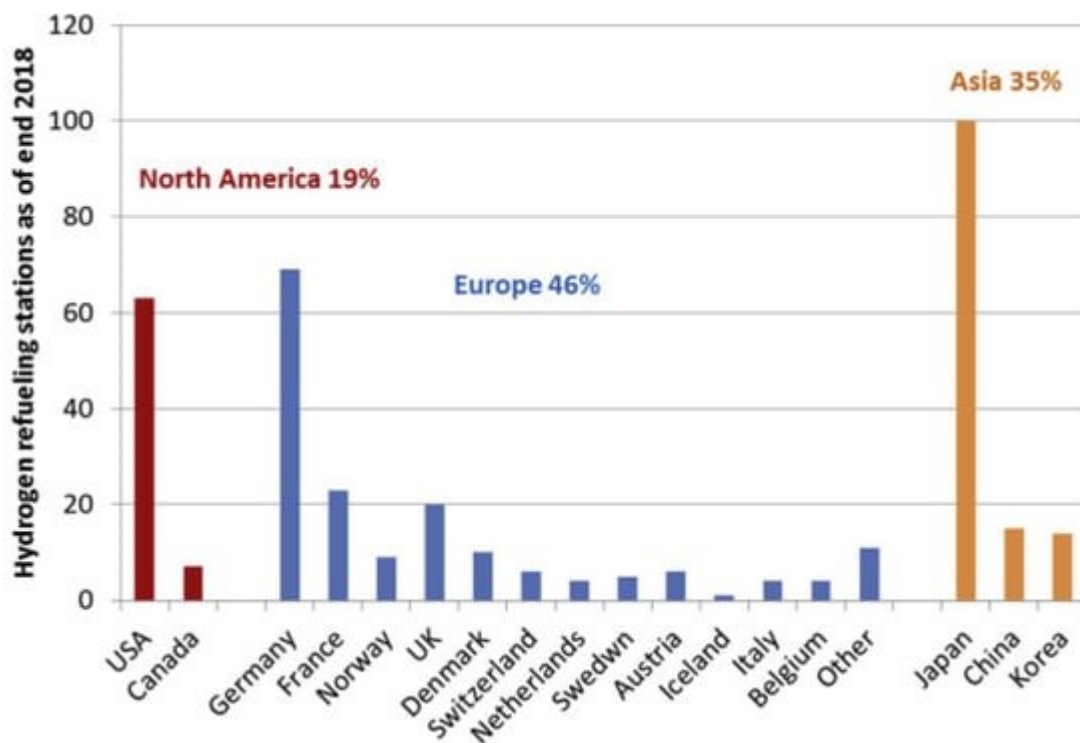
3.3.1. Κυψέλη καυσίμου υδρογόνου στην αγορά αυτοκινήτων, τις βιομηχανίες μεταφορών και τα θέματα υποδομής τους

Η αγορά κυψελών καυσίμου αυτοκινήτου ιδρύθηκε από την Toyota Motor Corporation (Toyota, Ιαπωνία), την Ballard Power Systems (Burnaby, BC, Καναδάς), τον Όμιλο Hyundai (Σεούλ, Κορέα) και άλλους. Αυτές οι εταιρείες παρέχουν προϊόντα και λύσεις για τη βιομηχανία κυψελών καυσίμου αυτοκινήτων και τα δίκτυα διανομής σε παγκόσμιο επίπεδο για την ανάπτυξη νέων προϊόντων. Τα πρώτα αυτοκίνητα με βάση το υδρογόνο εισήχθησαν από τη Honda, την Toyota και τη Hyundai σχεδόν ταυτόχρονα, και τώρα ακολουθούνται από άλλες μάρκες για την απαλλαγή από τον άνθρακα στον τομέα των μεταφορών. Το 2018, η αγοραία αξία των οχημάτων κυψελών καυσίμου υδρογόνου είναι \$651,9 εκατ. και προβλέπεται να αυξηθεί κατά 66,9% την περίοδο 2019 έως 2026. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την ανάπτυξη της καθολικής αγοράς είναι, από περιβαλλοντική άποψη, οι μελλοντικές δυνατότητες, οι υψηλές επενδύσεις και η ανάπτυξη σε υποδομές κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Όλοι αυτοί οι παράγοντες έχουν κάποια επίδραση στην αγορά του οχήματος κυψελών καυσίμου υδρογόνου [112]. Τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου (FCEV) μπορούν να εξασφαλίσουν ισχυρή ισχύ στην αγορά μεταφορών. Επί του παρόντος, η Ευρώπη αναδεικνύεται σε μια ήπειρο που διαθέτει ένα ευρύ φάσμα λεωφορείων υδρογόνου, μεταξύ των οποίων πολλά κυκλοφορούν σε κινεζικές πόλεις. Οι ευρωπαϊκές χώρες έχουν στόχο την απόκτηση περισσότερων από 1000 λεωφορείων με υδρογόνο μέχρι το έτος 2023. Για ιδανική εφαρμογή κυψελών καυσίμου, αυτή η αγορά αυτοκινήτων έχει χαρακτηριστικά όπως μεγαλύτερη αυτονομία, υψηλότερη απόδοση καυσίμου και γρήγορο ανεφοδιασμό κυψελών καυσίμου [105] .

Η χρήση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών, ως καύσιμο σε οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου για την τροφοδοσία ηλεκτρικών κινητήρων, έχει τη δυνατότητα να μειώσει τις εκπομπές. Δεν παράγουν εκπομπές αερίων θερμοκηπίου όπως παράγονται από βενζινοκίνητα και πετρελαιοκίνητα οχήματα.

Στην υιοθέτηση των FCEV το κύριο εμπόδιο είναι η νέα και ακριβή υποδομή του. Σύμφωνα με μια έκθεση, υπήρχαν σχεδόν 376 σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου (HRS) παγκοσμίως το 2018, όπως φαίνεται στο Σχήμα 16 . Επί του παρόντος, αυτά τα HRS εξυπηρετούν με χωρητικότητα 10–90 FCV ανά σταθμό. Στο μέλλον

αναμένεται να αυξηθούν σε 2500–3500 FCEV ανά σταθμό. Ως εκ τούτου, η τρέχουσα υποδομή είναι περιορισμένη και ανεπαρκής. Σε αυτό το στάδιο ανάπτυξης, υπάρχει ανάγκη να δημιουργηθούν υποδομές για FCEV, όπως αυτοκίνητα, λεωφορεία και φορτηγά, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιούν μια κεντρική τοποθεσία για ανεφοδιασμό καυσίμων. Μέσω αυτής της σπονδυλοποίησης, το κόστος της υποδομής θα μπορούσε να μειωθεί σημαντικά [110]. Οι κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο έχουν οργανώσει πολλές πολιτικές που παρέχουν περιβαλλοντικές συνθήκες. Για παράδειγμα, η Καλιφόρνια (ΗΠΑ) αφιέρωσε κεφάλαια για τη βελτίωση περισσότερων από 100 σταθμών ανεφοδιασμού υδρογόνου για να εκπληρώσει τον στόχο της για 1,5 εκατομμύρια οχήματα με μηδενικές εκπομπές έως το έτος 2025, αυξάνοντας την ανάπτυξη της αγοράς του οχήματος κυψελών καυσίμου υδρογόνου [112]. Η βελτίωση της υποδομής του υδρογόνου αποτελεί σημαντικό εμπόδιο στην εκτεταμένη απορρόφηση τεχνικών κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Η οικονομία του υδρογόνου πρέπει να εδραιωθεί με το τεράστιο κόστος και την αναπαραγωγή των υποδομών του σημερινού ενεργειακού συστήματος. Η ανάπτυξη μιας οικονομικά αποδοτικής υποδομής είναι μια σημαντική πρόκληση. Υπάρχουν πολλά επαγγελματικά οχήματα στον τομέα των μεταφορών, όπως επιβατικά οχήματα κυψελών καυσίμου, ηλεκτρικά λεωφορεία κυψελών καυσίμου, ελαφρά και μεσαίου τύπου φορτηγά κυψελών καυσίμου και βαρέα φορτηγά κυψελών καυσίμου που προσφέρουν λύσεις για μηδενικές εκπομπές σε σύγκριση με το ICE και το ντίζελ μηχανοκίνητα οχήματα. Τα οχήματα με κυψέλες καυσίμου έχουν σύντομο χρόνο ανεφοδιασμού, δηλαδή χρειάζονται μόνο 3–5 λεπτά για να ανεφοδιαστούν και μπορούν επίσης να ταξιδέψουν με ένα μόνο ρεζερβουάρ για 250 έως 350 μίλια σε σύγκριση με τα οχήματα που κινούνται με ICE και ντίζελ. Έτσι, Τα FCEV μπορούν να ικανοποιούν τις κατευθυντήριες γραμμές για το θόρυβο και τις περιβαλλοντικές συνθήκες, γεγονός που εμπνέει την κυβέρνηση να επισπεύσει την εφαρμογή τους, αλλά το κύριο εμπόδιο είναι η έλλειψη εκτεταμένης υποδομής υδρογόνου. Εάν στο μέλλον αυξηθούν οι υποδομές υδρογόνου, εκτιμάται ότι θα αυξηθεί και η ιδιωτική κατανάλωση.

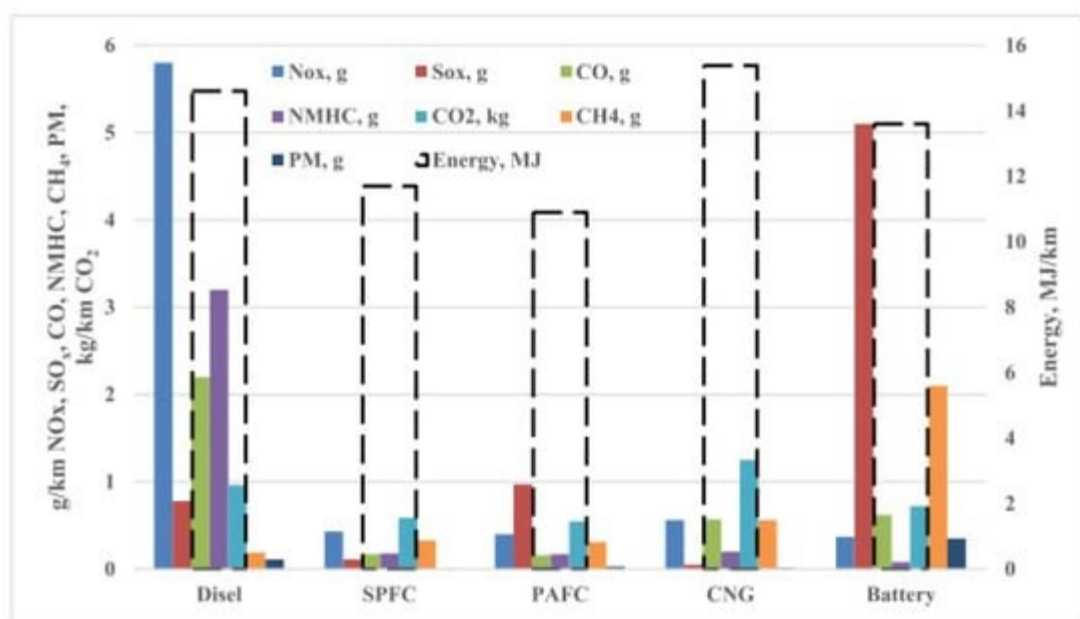


Εικόνα 16. Σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου στο τέλος του 2018.

3.3.2. Περιβαλλοντικές πτυχές

Επί του παρόντος, ο τομέας των μεταφορών εξαρτάται κυρίως από τα ορυκτά καύσιμα και είναι υπεύθυνος για μεγάλη ποσότητα εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Για τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, αυτός ο τομέας πρέπει να προχωρήσει προς τη χρήση του υδρογόνου ως καυσίμου για οχήματα. Έχουν προταθεί πολυάριθμες ευκαιρίες για εφαρμογές αυτοκινήτων για την αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων με υδρογόνο, για τα οποία τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου φαίνεται να είναι μια δυνατότητα για μελλοντική μεταφορά επειδή δεν προκαλούν σημαντική ρύπανση [24]. Στην αγορά αναπτύσσονται διάφορες τεχνικές για την υποστήριξη φιλικών προς το περιβάλλον και βιώσιμων προϊόντων για την αντιμετώπιση της υποβάθμισης του περιβάλλοντος και της εξάντλησης των φυσικών πόρων. Μεταξύ αυτών, τα οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου είναι κορυφαία τεχνολογία καθώς είναι φιλικά προς το περιβάλλον σε σύγκριση με άλλα συμβατικά οχήματα.

Μια κυψέλη καυσίμου δεν εκπέμπει κανενός είδους εκπομπές ρύπων επειδή εκπέμπει μόνο νερό όταν λειτουργεί σε κανονικό εύρος θερμοκρασίας. Τα οχήματα κυψελών καυσίμου που κινούνται με υδρογόνο παράγουν μηδενικές εκπομπές [113]. Οι κυψέλες καυσίμου που βασίζονται σε καύσιμο υδρογονάνθρακα παρέχουν επίσης συγκριτικά καθαρότερη, αποδοτική ενέργεια, η οποία συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η περιβαλλοντική πτυχή σχετίζεται άμεσα με την εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου τόσο για την κυψέλη καυσίμου όσο και για τη συμβατική παραγωγή ενέργειας. Και οι δύο χρησιμοποιούν καύσιμο για την εξαγωγή ενέργειας. Εάν συγκρίνουμε κυψέλες καυσίμου στερεού πολυμερούς (SPFC) και κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος PAFC (τύποι κυψελών καυσίμου) με τις συμβατικές τεχνολογίες για διαφορετικές εφαρμογές όπως η μεταφορά και η εμπορική παραγωγή ενέργειας (Εικόνα 18), είναι σαφές ότι οι SPFC και οι PAFC εκπέμπουν λιγότερο από 1 g/km αερίων του θερμοκηπίου και έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλότερες εκπομπές. Έτσι, αυτά είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τα συμβατικά οχήματα που παρέχουν τις υψηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου στην περιοχή από 3–5,95 g/km. Η μείωση της ποσότητας ενέργειας που χρησιμοποιείται από μια κυψέλη καυσίμου είναι σχεδόν 26–97,4% σε σύγκριση με άλλες (CNG και μπαταρίες) [115].

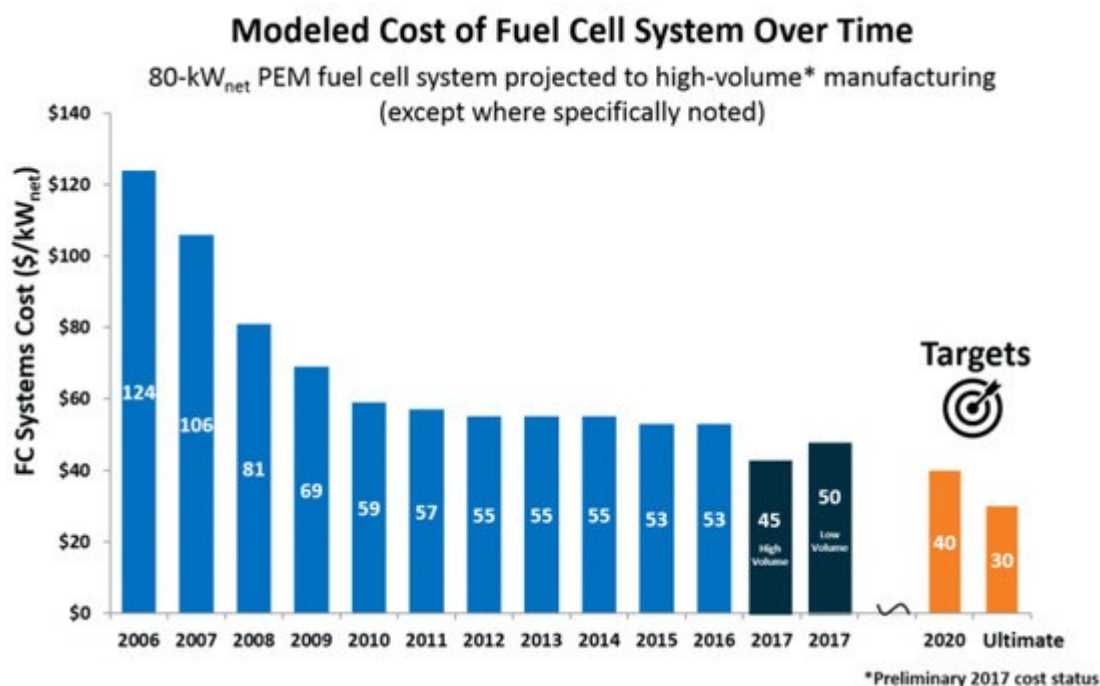


Εικόνα 18. Οι αέριες εκπομπές και η ενέργεια του FC και των μπαταριών σε σχέση με τη συμβατική τεχνολογία διαύλου ντίζελ. (SPFC = κυψέλη καυσίμου στερεού

πολυμερούς, PAFC = κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος, CNG = συμπιεσμένο φυσικό αέριο)

3.3.3. Οικονομικές πτυχές

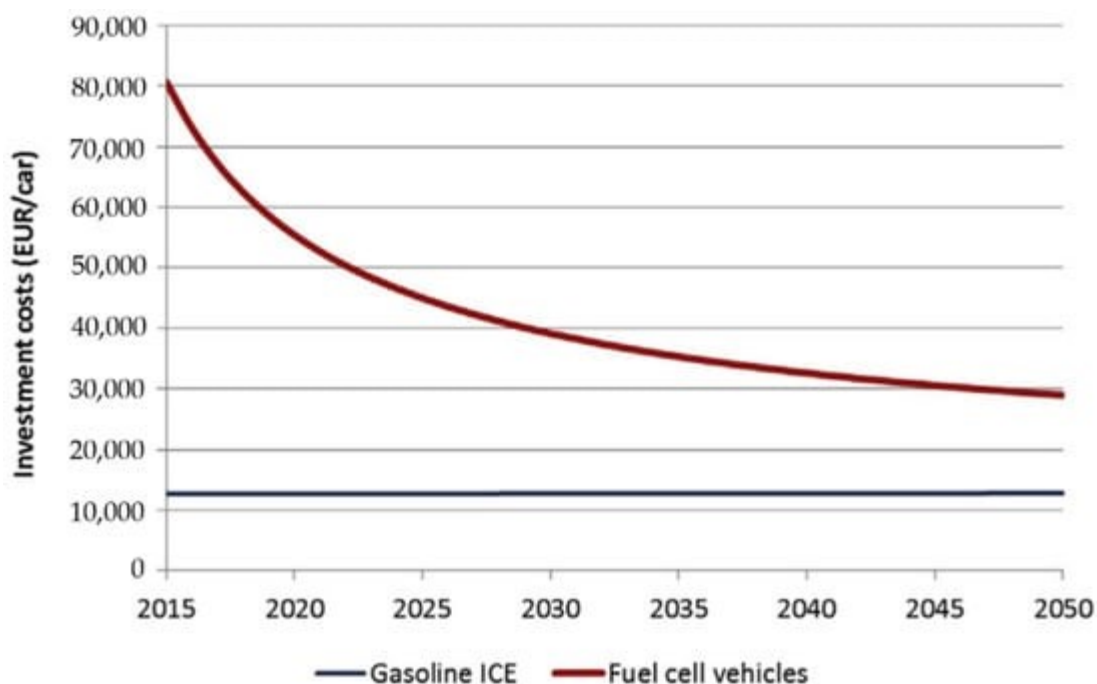
Σε αυτήν την ενότητα, θα εξεταστεί το κόστος των κυψελών καυσίμου και οι προκλήσεις που σχετίζονται με αυτό. Αν και οι κυψέλες καυσίμου έχουν απόδοση σχεδόν 60–70% (υψηλότερη από τους συμβατικούς κινητήρες), το κόστος των κυψελών καυσίμου εξακολουθεί να είναι υψηλότερο. Η υψηλότερη θερμική απόδοση της κυψέλης καυσίμου μειώνει σημαντικά τον συνολικό λογαριασμό καυσίμου, εξαλείφοντας έτσι το πρόβλημα των δαπανηρών κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, το 2006 το κόστος των κυψελών καυσίμου είχε ήδη μειωθεί κατά 60% (Εικόνα 19), το οποίο αναμένεται να μειωθεί περισσότερο με την περαιτέρω ανάπτυξη της τεχνολογίας. Επιπλέον, το 2006 η αντοχή της κυψέλης καυσίμου είχε επίσης αυξηθεί της τάξης των 4 και τώρα είναι ίση με 120.000 μίλια.



Εικόνα 19. Κόστος συστήματος κυψελών καυσίμου [116].

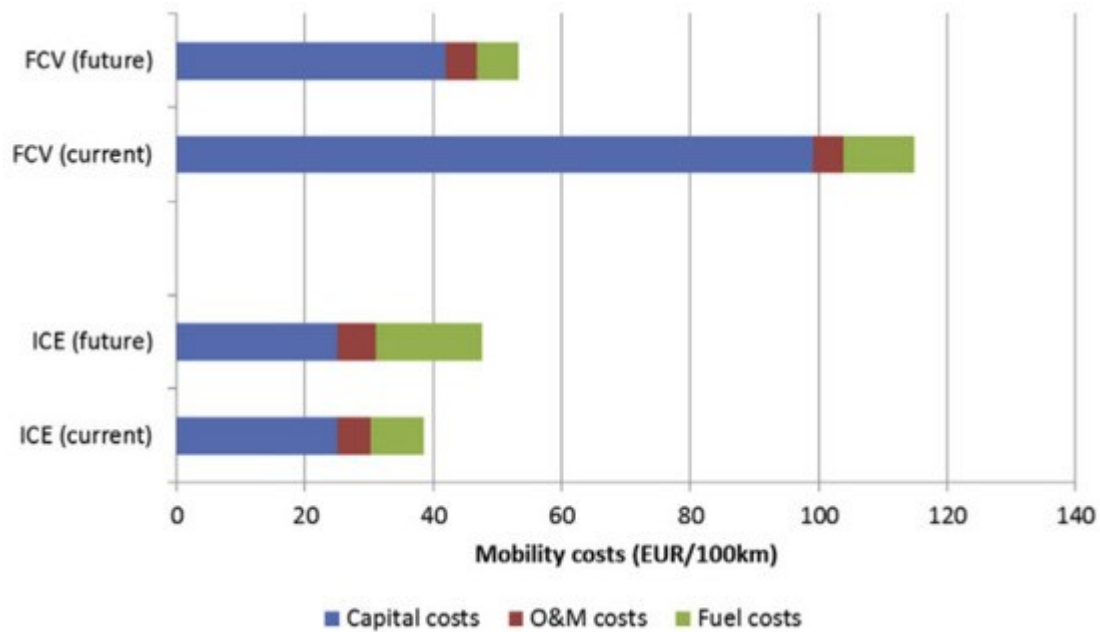
Για ευρύτερη χρήση των FCEV, το κύριο εμπόδιο είναι η προσιτή τιμή τους. Η χρήση FCEV και υδρογόνου εξακολουθεί να είναι πολύ ακριβή σε σύγκριση με τα

συμβατικά αυτοκίνητα και τις μπαταρίες. Ως εκ τούτου, για την εμπορευματοποίηση των FCEV, η κύρια παράμετρος είναι η μείωση του επενδυτικού κόστους. Για τα συμβατικά αυτοκίνητα, οι τιμές είναι σταθερές εδώ και αρκετά χρόνια. Ωστόσο, αν δούμε τις διαφορές τιμών μεταξύ των οχημάτων ICE και των FCEV, αυτές μειώνονται συνεχώς με την πάροδο του χρόνου, κάτι που φαίνεται στο Σχήμα 20.



Εικόνα 20. Εξέλιξη του επενδυτικού κόστους των οχημάτων.

Το συνολικό κόστος κινητικότητας των FCEV εξαρτάται από την τιμή αγοράς των οχημάτων. Το Σχήμα 21 δείχνει το συνολικό κόστος κινητικότητας για τα σημερινά και μελλοντικά FCEV σε σύγκριση με τα συμβατικά οχήματα ICE. Σε αυτό, η αυτονομία οδήγησης για 7 χρόνια υποτίθεται ότι είναι 12.000 km ετησίως. Στο σχήμα φαίνεται ότι στην τρέχουσα κατάσταση, το συνολικό κόστος κινητικότητας των FCEV είναι υψηλότερο από τα συμβατικά οχήματα ICE, αλλά το κόστος των FCEV μειώνεται σε σύγκριση με τα οχήματα ICE στο μέλλον. Από την άλλη πλευρά, τα FCEV έχουν μηδενικές εκπομπές στο σημείο χρήσης. Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι στο μέλλον είναι καλύτερη επιλογή να χρησιμοποιείτε FCEV σε σύγκριση με οχήματα ICE.



Σχήμα 21. Συνολικό κόστος κινητικότητας με FCV σε σύγκριση με οχήματα ICE.

Έτσι, συνοπτικά, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι κυψέλες καυσίμου έχουν τη δυνατότητα να αλλάξουν το παρόν ενεργειακό σενάριο με βάση τα καύσιμα υδρογονανθράκων και θα προσφέρουν καύσιμο υψηλής απόδοσης στο μέλλον, δηλαδή υδρογόνο. Η κύρια πρόκληση με τις κυψέλες καυσίμου είναι το υψηλό κόστος τους, το οποίο πρέπει να μειωθεί στο εγγύς μέλλον [50].

3.4. Εμπορικές Εφαρμογές Υδρογόνου

Ως εναλλακτική λύση, το υδρογόνο έχει γίνει ένα πολλά υποσχόμενο καύσιμο. Το υδρογόνο έχει πολλές εφαρμογές, αλλά λιγότερο από το 10% χρησιμοποιείται για την παγκόσμια κατανάλωση υδρογόνου. Για τις προηγούμενες δεκαετίες και στην εποχή των ορυκτών καυσίμων, το υδρογόνο έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως από τη βιομηχανία διύλισης πετρελαίου, στην παραγωγή πετροχημικών, στη γεωργική βιομηχανία και στη χημική βιομηχανία. Εκτός από τις βιομηχανικές του χρήσεις, έχει χρησιμοποιηθεί για πράγματα όπως η συγκόλληση, η κατασκευή ηλεκτρονικών ειδών, η παραγωγή επίπεδου γυαλιού, η επεξεργασία μετάλλων. Άλλες εμπορικές εφαρμογές του υδρογόνου περιλαμβάνουν την εξερεύνηση του διαστήματος, τις δημόσιες και προσωπικές μεταφορές, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και την αεροπορία όπου

χρησιμοποιείται ως εναλλακτικό καύσιμο καύσιμο. Η κυψέλη καυσίμου είναι μια από τις ευοίωνες εμπορευματοποιημένες εφαρμογές που ανοίγουν νέες ευκαιρίες στον τομέα των μεταφορών και της ενέργειας. Στη μεταβατική εποχή, [117], για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από κυψέλες καυσίμου [118, 119, 120], την κατασκευή συνθετικών καυσίμων, αεροσκαφών, μηχανοκίνητων οχημάτων κ.λπ. Το υδρογόνο θα χρησιμοποιηθεί στην εποχή του υδρογόνου ως κύριο καύσιμο σε ενεργειακά συστήματα, κυρίως στον τομέα των μεταφορών. Πολλές χώρες βλέπουν αναδυόμενες τεχνικές που θα χρησιμοποιούν υδρογόνο σε μεγάλη κλίμακα στο μέλλον [60].

3.5. Ασφάλεια υδρογόνου

Μία από τις κεντρικές και πιο σημαντικές πτυχές του υδρογόνου είναι η ανησυχία για την ασφάλεια. Ήταν θέμα συζήτησης για το πόσο με ασφάλεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Καθώς ανατρέχουμε στη βιβλιογραφία, πολυάριθμες έρευνες σχετικά με την ασφάλεια επισήμαναν ότι το υδρογόνο δεν φαίνεται τόσο επικίνδυνο όσο τα ορυκτά καύσιμα. Στην πραγματικότητα, είναι πιο ασφαλές από τη βενζίνη και το μεθάνιο. Λόγω της μη τοξικής φύσης του, η διαρροή υδρογόνου δεν προκαλεί καμία περιβαλλοντική ζημιά. Το υδρογόνο έχει χαμηλή πυκνότητα και για το σκοπό αυτό διασκορπίζεται γρήγορα καθώς ανεβαίνει, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα πυρκαγιάς [121] μέχρι ένα ορισμένο όριο. Ωστόσο, όταν η συγκέντρωση του υδρογόνου φτάσει πάνω από 4% στην ατμόσφαιρα, μπορεί να προκαλέσει σοβαρή πυρκαγιά ή ακόμα και έκρηξη [122]. Το υδρογόνο πρέπει να μετράται με ασφάλεια εάν γίνει αποδεκτό από την κοινότητα. Για να αντιμετωπιστεί αυτή η ανησυχία, αναπτύχθηκαν πολλά υλικά αποθήκευσης υδρογόνου σε στερεά κατάσταση (υδρίδια μετάλλων) όπως συζητήθηκε παραπάνω. Αυτά μειώνουν την πίεση χειρισμού του αερίου υδρογόνου και είναι συγκριτικά ασφαλή για αποθήκευση υδρογόνου. Η εμπιστοσύνη είναι απαραίτητη για την αύξηση της χρήσης της κυψέλης καυσίμου και άλλης τεχνολογίας που βασίζεται στο υδρογόνο. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό στην ενθάρρυνση της εμπιστοσύνης της κοινότητας θα είναι η βελτίωση της δημοσιότητας των προϊόντων, των εκπαιδευτικών έργων και του μάρκετινγκ που παρέχουν την αποδοχή του υδρογόνου ως καυσίμου [123].

Συμπεράσματα

Η παγκόσμια ενεργειακή ζήτηση, η οποία εξαρτάται από το ενεργειακό σύστημα που βασίζεται σε ορυκτά καύσιμα, όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, γίνεται δύσκολο να εκπληρωθεί και προκαλεί επίσης πολλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Σταδιακά, τα ορυκτά καύσιμα θα πρέπει να αντικατασταθούν από εναλλακτικές πηγές ενέργειας όπως η ενέργεια του υδρογόνου, ο άνεμος, η πυρηνική και η ηλιακή ενέργεια. Το υδρογόνο έχει ιδανικά οικονομικά και περιβαλλοντικά χαρακτηριστικά για να γίνει ένας μελλοντικός φορέας ενέργειας, καθώς μπορεί να είναι ένας καθαρός, ασφαλής και βιώσιμος φορέας ενέργειας με αναπτυσσόμενες τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης και χρήσης. Οι χρήσεις του υδρογόνου εξαπλώνονται σε διάφορους κλάδους, όπως οι μεταφορές και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και βρίσκονται υπό ανάπτυξη για πολλές άλλες εφαρμογές. Υπάρχουν πολλές εμπορικές μέθοδοι για το H₂ παραγωγή όπως αναμόρφωση μεθανίου ατμού, μερική οξείδωση υδρογονανθράκων, αεριοποίηση άνθρακα, αεριοποίηση βιομάζας, πυρόλυση, ηλεκτρόλυση και η θερμοχημική μέθοδος. Οι μέθοδοι ηλεκτρόλυσης και ηλιακής ενέργειας θα είναι οι κύριες μέθοδοι στο μέλλον σύμφωνα με περιβαλλοντική άποψη. Οι μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου πρέπει να υποβληθούν σε περισσότερη έρευνα και ανάπτυξη. Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε αέρια, υγρή και στερεή χημική μορφή. Από αυτές τις μεθόδους, η αποθήκευση σε στερεά κατάσταση δείχνει πολλά υποσχόμενη και έχει τη δυνατότητα να γίνει ευρέως αποδεκτή. Από οικονομική άποψη, το κόστος παραγωγής υδρογόνου είναι ο πιο σημαντικός παράγοντας και άλλοι παράγοντες όπως το κόστος χρήσης και αποθήκευσης είναι συγκριτικά μικροί [124].

Οι πληροφορίες που παρουσιάζονται σε αυτήν την ανασκόπηση βασίζονται στο παρόν ενεργειακό σύστημα που βασίζεται στις ανανεώσιμες πηγές και στην εφαρμογή του στην αυτοκινητοβιομηχανία, το οποίο δίνει έμφαση στις τάσεις στην παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας και στην ανάπτυξη μείωσης της εξάρτησης από μια ενεργειακή υποδομή βασισμένη σε ορυκτά καύσιμα. Στις συνολικές παγκόσμιες εκπομπές, συμβάλλουν πολλές πηγές καυσίμων, μεταξύ των οποίων πολλά ενεργειακά συστήματα, και η αυτοκινητοβιομηχανία είναι ο κύριος συντελεστής.

Τα FCEV μπορούν να θεωρηθούν ως ένας εξέχων διεκδικητής για τη μετατροπή του σημερινού συστήματος μεταφορών, το οποίο βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, σε ένα βιώσιμο σύστημα. Ο τομέας των μεταφορών παρουσίασε αρκετές διαβαθμίσεις και υποβαθμίσεις σε σχέση με το χρόνο. Στον τομέα των μεταφορών, τα FCEV θα μπορούσαν να είναι καλύτερη επιλογή από τα συμβατικά οχήματα ICE. Στο μέλλον, υπάρχουν ορισμένες προκλήσεις που πρέπει να επιλυθούν, όπως η μείωση του κόστους των αυτοκινήτων και η ανάπτυξη υποδομών. Αυτή η ανασκόπηση παρέχει κατεύθυνση για την ανάπτυξη οχημάτων με κυψέλες καυσίμου με στόχο τη μείωση της παγκόσμιας περιβαλλοντικής ρύπανσης. Στο μέλλον, τα προβλήματα στην ανάπτυξη FCEV μπορούν να μελετηθούν για την εφαρμογή τους. Ωστόσο, το κόστος των οχημάτων κυψελών καυσίμου είναι υψηλότερο από αυτό των ηλεκτρικών οχημάτων με μπαταρία, αλλά οι πρακτικές τους εφαρμογές μπορούν να επιτευχθούν την περίοδο 2025 έως 2030. Επιπλέον, η έρευνα και η ανάπτυξη για την επίλυση των διαφόρων ζητημάτων στα FCEV θα τοποθετήσουν τα FCEV στο μέλλον. Επιπλέον, στο μέλλον, η αυτοκινητοβιομηχανία θα τροφοδοτείται από υβριδικά συστήματα που έχουν την ικανότητα να αξιοποιούν τα οφέλη και των δύο ενεργειακών συστημάτων, δηλαδή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των ενεργειακών συστημάτων που βασίζονται σε κυψέλες καυσίμου. Εκτός από αυτό, το καύσιμο υδρογόνου με τη μορφή κυψελών καυσίμου θα είναι η αλλαγή παιχνιδιού στα φορητά τροφοδοτικά στο μέλλον. Ως εκ τούτου, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι οι κυψέλες καυσίμου με βάση το υδρογόνο θα συμβάλουν σίγουρα παγκοσμίως στη βελτίωση μιας βιώσιμης ανθρωπότητας. η αυτοκινητοβιομηχανία θα τροφοδοτείται από υβριδικά συστήματα που έχουν την ικανότητα να αξιοποιούν τα οφέλη τόσο των ενεργειακών συστημάτων, δηλαδή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και των ενεργειακών συστημάτων που βασίζονται σε κυψέλες καυσίμου. Εκτός από αυτό, το καύσιμο υδρογόνου με τη μορφή κυψελών καυσίμου θα είναι η αλλαγή παιχνιδιού στα φορητά τροφοδοτικά στο μέλλον. Ως εκ τούτου, μπορεί να συναχθεί το

συμπέρασμα ότι οι κυψέλες καυσίμου με βάση το υδρογόνο θα συμβάλουν σίγουρα παγκοσμίως στη βελτίωση μιας βιώσιμης ανθρωπότητας.

Έτσι, μπορούμε να πούμε ότι επιλέγοντας τις πιο εξέχουσες και βιώσιμες μεθόδους παραγωγής και αποθήκευσης και βελτιώνοντας τις εφαρμογές της αυτοκινητοβιομηχανίας όπως τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλες καυσίμου, ο κυρίαρχος ρόλος των ορυκτών καυσίμων στα ενεργειακά συστήματα θα μπορούσε να μειωθεί και δεν θα τόσο καιρό μέχρι ο κόσμος να μπει στην «εποχή του υδρογόνου».

Βιβλιογραφία

- [1] Apostolou, D.; Xydis, G. A literature review on hydrogen refueling stations and infrastructure, Current status and future prospectus. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2019, 113, 109292.
- [2] Dincer, I.; Acar, C. Smart energy solutions with hydrogen options. *Int. J. Hydrogen Energy* 2018, 43, 8579–8599.
- [3] Khan, N.; Kalair, E.; Abas, N.; Kalair, A. Energy transition from molecules to atoms and photons. *Eng. Sci. Technol. Int. J.* 2019, 22, 185–214.
- [4] To, W.-M.; Lee, P.K.C. Energy Consumption and Economic Development in Hong Kong, China. *Energies* 2017, 10, 1883.
- [5] Mohsin, M.; Kamran, H.W.; Nawaz, M.A.; Hussain, M.S.; Dahri, A.S. Assessing the impact of transition from non-renewable to renewable energy consumption on economic growth-environmental nexus from developing Asian economies. *J. Environ. Manag.* 2021, 284, 111999.
- [6] BPSTATS. BP Statistical Review of World Energy Statistical Review of World, 68th ed.; Heriot-Watt University: Edinburgh, UK, 2019.
- [7] Enerdata. Enerdata: Global Energy Statistical Yearbook 2018. Global Energy Trends. 2018. Available online: <https://energydata.info/dataset/key-world-energy-statistics-enerdata/resource/dcda6530-8d2c-436e-9d1d-1e2809ad303e>.
- [8] Norton, R. An Overview of a Sustainable City Strategy. Report Prepared for the Global Energy Assessment Planning for Cities and Municipalities. Montreal, QC, Canada, 1991.
- [9] Dincer, I.; Rosen, M.A. A worldwide perspective on energy, environment and sustainable development. *Int. J. Energy Res.* 1998, 22, 1305–1321.
- [10] Rosen, M. The role of energy efficiency in sustainable development. In *Proceedings of the 1995 Interdisciplinary Conference: Knowledge Tools for a Sustainable Civilization, Fourth Canadian Conference on Foundations and Applications of General Science Theory*, Toronto, ON, Canada, 8–10 June 1995.
- [11] Solomon, B.D.; Banerjee, A. A global survey of hydrogen energy research, development and policy. *Energy Policy* 2006, 34, 781–792.

- [12] Züttel, A.; Remhof, A.; Borgschulte, A. Hydrogen: The future energy carrier. *Philos. Trans. R. Soc. A* 2010, 368, 3329–3342.
- [13] Rosen, M.A.; Dincer, I.; Kanoglu, M. Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact. *Energy Policy* 2008, 36, 128–137.
- [14] IEA. From Poverty to Prosperity. In *World Energy Outlook Special Report*; OECD Publishing: Paris, France, 2017; Available online: <https://www.oecd.org/publications/energy-access-outlook-2017-9789264285569-en.htm> (accessed on 19 February 2020).
- [15] Berrill, P.; Arvesen, A.; Scholz, Y.; Gils, H.C.; Hertwich, E. Environmental impacts of high penetration renewable energy scenarios for Europe. *Environ. Res. Lett.* 2016, 11, 014012.
- [16] Dunn, S. Hydrogen futures: Toward a sustainable energy system. *Int. J. Hydrogen Energy* 2002, 27, 235–264.
- [17] Dincer, I.; Rosen, M.A. Sustainability aspects of hydrogen and fuel cell systems. *Energy Sustain. Dev.* 2011, 15, 137–146.
- [18] Boyle, G. Renewable energy: Power for a sustainable future. *Renew. Energy* 2004, 19, 456.
- [19] Schlapbach, L.; Züttel, A. Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nat. Cell Biol.* 2001, 414, 353–358.
- [20] Carbon-Based Nanoporous Materials for Hydrogen Storage. Available online: <https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/2214367/AC14528127n01-2017>.
- [21] Nowotny, J.; Veziroglu, T.N. Impact of hydrogen on the environment. *Int. J. Hydrogen Energy* 2011, 36, 13218–13224.
- [22] Hydrogen Council. *Path to Hydrogen Competitiveness a Cost Perspective*; Hydrogen Council: Brussels, Belgium, 2020; pp. 1–88.
- [23] Hydrogen Council. *Hydrogen Scaling up, a Sustainable Pathway for the Global Energy Transition*; Hydrogen Council: Brussels, Belgium, 2017; pp. 1–80.
- [24] Rosen, M.A.; Koochi-Fayegh, S. The prospects for hydrogen as an energy carrier: An overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy Ecol. Environ.* 2016, 1, 10–29.

- [25] Atilhan, S.; Park, S.; El-Halwagi, M.M.; Atilhan, M.; Moore, M.; Nielsen, R.B. Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry. *Curr. Opin. Chem. Eng.* 2021, 31, 100668.
- [26] Global hydrogen market insights, 2020–2024 by production process, end-user, generation system and region. *Focus Catal.* 2020, 5, 2.
- [27] Osman, A.I.; Mehta, N.; Elgarahy, A.M.; Hefny, M.; Al-Hinai, A.; Al-Muhtaseb, A.H.; Rooney, D.W. Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: A review. *Environ. Chem. Lett.* 2021, 1–36.
- [28] Nicoletti, G.; Arcuri, N.; Nicoletti, G.; Bruno, R. A technical and environmental comparison between hydrogen and some fossil fuels. *Energy Convers. Manag.* 2015, 89, 205–213.
- [29] Dincer, I.; Zamfirescu, C. Sustainable hydrogen production options and the role of IAHE. *Int. J. Hydrogen Energy* 2012, 37, 16266–16286.
- [30] Chaubey, R.; Sahu, S.; James, O.O.; Maity, S. A review on development of industrial processes and emerging techniques for production of hydrogen from renewable and sustainable sources. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2013, 23, 443–462.
- [31] Acar, C.; Dincer, I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *Int. J. Hydrogen Energy* 2014, 39, 1–12.
- [32] Dincer, I.; Acar, C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *Int. J. Hydrogen Energy* 2015, 40, 11094–11111.
- [33] Enger, B.C.; Lødeng, R.; Holmen, A. A review of catalytic partial oxidation of methane to synthesis gas with emphasis on reaction mechanisms over transition metal catalysts. *Appl. Catal. A Gen.* 2008, 346, 1–27.
- [34] Agrafiotis, C.; von Storch, H.; Roeb, M.; Sattler, C. Solar thermal reforming of methane feedstocks for hydrogen and syngas production—A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2014, 29, 656–682.
- [35] Barelli, L.; Bidini, G.; Gallorini, F.; Servili, S. Hydrogen production through sorption-enhanced steam methane reforming and membrane technology: A review. *Energy* 2008, 33, 554–570.

- [36] Amin, A.; Croiset, E.; Epling, W. Review of methane catalytic cracking for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy* 2011, 36, 2904–2935.
- [37] Abbas, H.F.; Daud, W.W. Hydrogen production by methane decomposition: A review. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010, 35, 1160–1190.
- [38] Demirci, U.B. The hydrogen cycle with the hydrolysis of sodium borohydride: A statistical approach for highlighting the scientific/technical issues to prioritize in the field. *Int. J. Hydrogen Energy* 2015, 40, 2673–2691.
- [39] Patel, N.; Miotello, A. Progress in Co–B related catalyst for hydrogen production by hydrolysis of boron-hydrides: A review and the perspectives to substitute noble metals. *Int. J. Hydrogen Energy* 2015, 40, 1429–1464.
- [40] Liu, B.H.; Li, Z.P. A review: Hydrogen generation from borohydride hydrolysis reaction. *J. Power Sources* 2009, 187, 527–534.
- [41] Moussa, G.; Moury, R.; Demirci, U.B.; Sener, T.; Miele, P. Boron-based hydrides for chemical hydrogen storage. *Int. J. Energy Res.* 2013, 37, 825–842.
- [42] Rand, D.A.J.; Dell, R.M. Fuels-hydrogen production: Coal gasification. *EncyclElectrochem Power Sources* 2009, 276–292.
- [43] Hallenbeck, P.C.; Abo-Hashesh, M.; Ghosh, D. Strategies for improving biological hydrogen production. *Bioresour. Technol.* 2012, 110, 1–9.
- [44] Eroglu, E.; Melis, A. Photo biological hydrogen production: Recent advances and state of the art. *Bioresour. Technol.* 2011, 102, 8403–8413.
- [45] Lee, H.-S.; Vermaas, W.F.; Rittmann, B.E. Biological hydrogen production: Prospects and challenges. *Trends Biotechnol.* 2010, 28, 262–271.
- [46] Singh, L.; Wahid, Z.A. Methods for enhancing bio-hydrogen production from biological process: A review. *J. Ind. Eng. Chem.* 2015, 21, 70–80.
- [47] Zhang, Q.; Wang, Y.; Zhang, Z.; Lee, D.-J.; Zhou, X.; Jing, Y.; Ge, X.; Jiang, D.; Hu, J.; He, C. Photo-fermentative hydrogen production from crop residue: A mini review. *Bioresour. Technol.* 2017, 229, 222–230.
- [48] Elsharnouby, O.; Hafez, H.; Nakhla, G.; El Naggar, M.H. A critical literature review on biohydrogen production by pure cultures. *Int. J. Hydrogen Energy* 2013, 38, 4945–4966.

- [49] Sivagurunathan, P.; Kumar, G.; Bakonyi, P.; Kim, S.-H.; Kobayashi, T.; Xu, K.; Lakner, G.; Tóth, G.; Nemestothy, N.; Bélafi-Bakó, K. A critical review on issues and overcoming strategies for the enhancement of dark fermentative hydrogen production in continuous systems. *Int. J. Hydrogen Energy* 2016, 41, 3820–3836.
- [50] Edwards, P.P.; Kuznetsov, V.L.; David, W.I.F. Hydrogen energy. *Philos. Trans. R. Soc. A* 2007, 365, 1043–1056.
- [51] Steinberg, M. Modern and prospective technologies for hydrogen production from fossil fuels. *Int. J. Hydrogen Energy* 1989, 14, 797–820.
- [52] Bartels, J.R.; Pate, M.B.; Olson, N.K. An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010, 35, 8371–8384.
- [53] Yan, W.; Hoekman, K. Production of CO₂-free hydrogen from methane dissociation: A review. *Environ. Prog. Sustain. Energy* 2014, 33, 213–219.
- [54] Gaudernack, B.; Lynum, S. Hydrogen from natural gas without release of CO₂ to the atmosphere. *Int. J. Hydrogen Energy* 1998, 23, 1087–1093.
- [55] Ashik, U.P.M.; Daud, W.M.A.W.; Abbas, H.F. Production of greenhouse gas free hydrogen by thermo catalytic decomposition of methane a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 44, 221–256.
- [56] Damen, K.; van Troost, M.; Faaij, A.; Turkenburg, W. A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO₂ capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies. *Prog. Energy Combust. Sci.* 2006, 32, 215–246.
- [57] Nikolaidis, P.; Poullikkas, A. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017, 67, 597–611.
- [58] Bonner, M.; Botts, T.; McBreen, J.; Mezzina, A.; Salzano, F.; Yang, C. Status of advanced electrolytic hydrogen production in the United States and abroad. *Int. J. Hydrogen Energy* 1984, 9, 269–275.
- [59] Carpetis, C. An assessment of electrolytic hydrogen production by means of photovoltaic energy conversion. *Int. J. Hydrogen Energy* 1984, 9, 969–992.
- [60] Johnson, A.C.; Barnstaple, A.G.; Bates, J.G.; Boardman, B.R.; Dewees, D.N.; Fleck, F.C.; Taylor, J.B.; Schofield, L.J.; Soots, V.; Wank, H.

- Hydrogen, a Challenging Opportunity. Report of the Ontario Hydrogen Energy Task Force; Ontario Government Publications Services: Toronto, ON, Canada, 1981.
- [61] Baykara, S.Z.; Bilgen, E. An overall assessment of hydrogen production by solar water thermolysis. *Int. J. Hydrogen Energy* 1989, 14, 881–891.
- [62] Baykara, S. Hydrogen production by direct solar thermal decomposition of water, possibilities for improvement of process efficiency. *Int. J. Hydrogen Energy* 2004, 29, 1451–1458.
- [63] Baykara, S.Z. Experimental solar water thermolysis. *Int. J. Hydrogen Energy* 2004, 29, 1459–1469.
- [64] Bhandari, R.; Trudewind, C.A.; Zapp, P. Life cycle assessment of hydrogen production via Electrolysis—A review. *J. Clean. Prod.* 2014, 85, 151–163.
- [65] Muradov, N.Z.; Veziroglu, T.N. “Green” path from fossil-based to hydrogen economy: An overview of carbon-neutral technologies. *Int. J. Hydrogen Energy* 2008, 33, 6804–6839.
- [66] Turner, J.; Sverdrup, G.; Mann, M.K.; Maness, P.C.; Kroposki, B.; Ghirardi, M.; Evans, R.J.; Blake, D. Renewable hydrogen production. *Int. J. Energy Res.* 2008, 32, 379–407.
- [67] Yildiz, B.; Kazimi, M.S. Efficiency of hydrogen production systems using alternative nuclear energy technologies. *Int. J. Hydrogen Energy* 2006, 31, 77–92.
- [68] Dieguez, P.; Ursúa, A.; Sanchis, P.; Sopena, C.; Guelbenzu, E.; Gandia, L. Thermal performance of a commercial alkaline water electrolyzer: Experimental study and mathematical modeling. *Int. J. Hydrogen Energy* 2008, 33, 7338–7354.
- [69] Funk, J.E. Thermochemical hydrogen production: Past and present. *Int. J. Hydrogen Energy* 2001, 26, 185–190.
- [70] Lewis, M.A.; Masin, J.G. The evaluation of alternative thermochemical cycles—Part II: The down-selection process. *Int. J. Hydrogen Energy* 2009, 34, 4125–4135.

- [71] Andress, R.J.; Huang, X.; Bequette, B.W.; Martin, L.L. A systematic methodology for the evaluation of alternative thermochemical cycles for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy* 2009, 34, 4146–4154.
- [72] Forsberg, C.W.; Peterson, P.F.; Pickard, P.S. Molten-Salt-Cooled Advanced High-Temperature Reactor for Production of Hydrogen and Electricity. *Nucl. Technol.* 2003, 144, 289–302.
- [73] Forsberg, C.W. Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems. *Int. J. Hydrogen Energy* 2007, 32, 431–439.
- [74] Acar, C.; Dincer, I. Comparative Environmental Impact Evaluation of Hydrogen Production Methods from Renewable and Nonrenewable Sources. In *Causes, Impacts and Solutions to Global Warming*; Springer Science and Business Media LLC: Berlin/Heidelberg, Germany, 2013; pp. 493–514.
- [75] Schultz, K.; Herring, S.; Lewis, M.; Summers, W. The hydrogen reaction. *Nucl. Eng. Int.* 2005, 50, 10–19.
- [76] Orhan, M.; Dincer, I.; Naterer, G. Cost analysis of a thermochemical Cu–Cl pilot plant for nuclear-based hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy* 2008, 33, 6006–6020.
- [77] Ursúa, A.; Gandia, L.M.; Sanchis, P. Hydrogen Production from Water Electrolysis: Current Status and Future Trends; IEEE: Piscataway, NJ, USA, 2011; Volume 100, pp. 410–426.
- [78] Srinivasan, N.; Shiga, Y.; Atarashi, D.; Sakai, E.; Miyauchi, M. A PEDOT-coated quantum dot as efficient visible light harvester for photocatalytic hydrogen production. *Appl. Catal. B Environ.* 2015, 179, 113–121.
- [79] Engels, H.; Funk, J.E.; Hesselmann, K.; Knoche, K.F. Thermochemical hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy* 1987, 12, 291–295.
- [80] Bargigli, S.; Raugei, M.; Ulgiati, S. Comparison of thermodynamic and environmental indexes of natural gas, syngas and hydrogen production processes. *Energy* 2004, 29, 2145–2159.
- [81] Chiesa, P.; Consonni, S.; Kreutz, T. Co-production of hydrogen, electricity and CO from coal with commercially ready technology. Part A: Performance and emissions. *Int. J. Hydrogen Energy* 2005, 30, 747–767.

- [82] Cohce, M.; Dincer, I.; Rosen, M. Thermodynamic analysis of hydrogen production from biomass gasification. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010, 35, 4970–4980.
- [83] Sazali, N. Emerging technologies by hydrogen: A review. *Int. J. Hydrogen Energy* 2020, 45, 18753–18771.
- [84] Suleman, F.; Dincer, I.; Agelin-Chaab, M. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. *Int. J. Hydrogen Energy* 2015, 40, 6976–6987.
- [85] Baykara, S.Z. Hydrogen: A brief overview on its sources, production and environmental impact. *Int. J. Hydrogen Energy* 2018, 43, 10605–10614.
- [86] Baykara, S.Z. Hydrogen as fuel: A critical technology? *Int. J. Hydrogen Energy* 2005, 30, 545–553.
- [87] Kothari, R.; Buddhiand, D.; Sawhney, R.L. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2008, 12, 553–563.
- [88] Ajanovic, A. On the economics of hydrogen from renewable energy sources as an alternative fuel in transport sector in Austria. *Int. J. Hydrogen Energy* 2008, 33, 4223–4234.
- [89] Sara, H.R.; Enrico, B.; Mauro, V.; Andrea, D.C.; Vincenzo, N. Techno-economic Analysis of Hydrogen Production Using Biomass Gasification—A Small Scale Power Plant Study. *Energy Procedia* 2016, 101, 806–813.
- [90] Sharma, M.; Kaushik, A. Biohydrogen Economy: Challenges and Prospects for Commercialization. In *Biohydrogen Production: Sustainability of Current Technology and Future Perspective*; Springer Science and Business Media LLC: Berlin/Heidelberg, Germany, 2017; pp. 253–267.
- [91] Hay, J.X.W.; Wu, T.Y.; Juan, J.C.; Jahim, J.M. Biohydrogen production through photo fermentation or dark fermentation using waste as a substrate: Overview, economics, and future prospects of hydrogen usage. *Biofuels Bioprod. Biorefin.* 2013, 7, 334–352.
- [92] Kalamaras, C.; Efstathiou, A.M. Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments. *Conf. Pap. Energy* 2013, 2013, 690627.

- [93] Zuttel, A.; Borgschulte, A.; Schlapbach, L. Hydrogen as a future energy Carrier. *J. Appl. Electrochem.* 2008, 38, 1483.
- [94] Sakintuna, B.; Lamari-Darkrim, F.; Hirscher, M. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. *Int. J. Hydrogen Energy* 2007, 32, 1121–1140.
- [95] Sreedhar, I.; Kamani, K.M.; Kamani, B.M.; Reddy, B.M.; Venugopal, A. A Bird's Eye view on process and engineering aspects of hydrogen storage. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2018, 91, 838–860.
- [96] Suh, M.P.; Park, H.J.; Prasad, T.K.; Lim, D.W. Hydrogen storage in metal–organic frameworks. *Chem. Rev.* 2012, 112, 782–835.
- [97] Jain, A.; Agarwal, S.; Ichikawa, T. Catalytic Tuning of Sorption Kinetics of Lightweight Hydrides: A Review of the Materials and Mechanism. *Catalysts* 2018, 8, 651.
- [98] Yang, J.; Sudik, A.; Wolverton, C.; Siegel, D.J. High capacity hydrogen storage materials: Attributes for automotive applications and techniques for materials discovery. *Chem. Soc. Rev.* 2010, 39, 656–675.
- [99] Jain, A.; Miyaoka, H.; Ichikawa, T. Destabilization of lithium hydride by the substitution of group 14 elements: A review. *Int. J. Hydrogen Energy* 2016, 41, 5969–5978.
- [100] Jain, I.; Lal, C.; Jain, A. Hydrogen storage in Mg: A most promising material. *Int. J. Hydrogen Energy* 2010, 35, 5133–5144.
- [101] Wang, H.; Lin, H.; Cai, W.; Ouyang, L.; Zhu, M. Tuning kinetics and thermodynamics of hydrogen storage in light metal element based systems—A review of recent progress. *J. Alloy. Compd.* 2016, 658, 280–300.
- [102] Hu, M.; Geanangel, R.; Wendlandt, W. The thermal decomposition of ammonia borane. *Thermochim. Acta* 1978, 23, 249–255.
- [103] Klerke, A.; Christensen, C.H.; Nørskov, J.K.; Vegge, T. Ammonia for hydrogen storage: Challenges and opportunities. *J. Mater. Chem.* 2008, 18, 2304–2310.
- [104] Jain, I.P.; Jain, A. Novel hydrogen storage materials: A review of light weight complex hydrides. *J. Alloys Compd.* 2010, 503, 303–339.
- [105] Frank, E.D.; Elgowainy, A.; Khalid, Y.S.; Peng, J.-K.; Reddi, K. Refueling-station costs for metal hydride storage tanks on board hydrogen fuel cell vehicles. *Int. J. Hydrogen Energy* 2019, 44, 29849–29861.

- [106] Reuß, M.; Grube, T.; Robinius, M.; Preuster, P.; Wasserscheid, P.; Stolten, D. Seasonal storage and alternative carriers: A flexible hydrogen supply chain model. *Appl. Energy* 2017, 200, 290–302.
- [107] Raab, M.; Maier, S.; Dietrich, R.-U. Comparative techno-economic assessment of a large-scale hydrogen transport via liquid transport media. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021, 46, 11956–11968.
- [108] Cardella, U.; Decker, L.; Sundberg, J.; Klein, H. Process optimization for large-scale hydrogen liquefaction. *Int. J. Hydrogen Energy* 2017, 42, 12339–12354.
- [109] Quarton, C.J.; Tlili, O.; Welder, L.; Mansilla, C.; Blanco, H.; Heinrichs, H.; Leaver, J.; Samsatli, N.J.; Lucchese, P.; Robinius, M.; et al. The curious case of the conflicting roles of hydrogen in global energy scenarios. *Sustain. Energy Fuels* 2020, 4, 80–95.
- [110] Ajanovic, A.; Haas, R. Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *Int. J. Hydrogen Energy* 2021, 46, 10049–10058.
- [111] Dutton, A.G. *Hydrogen Energy Technology*, Tyndall Working Paper TWP 17; Tyndall Centre for Climate Change: Norwich, UK, 2002; Volume 30.
- [112] Available online: <https://www.alliedmarketresearch.com/hydrogen-fuel-cell-vehicle-market-2021> (accessed on 2 November 2021).
- [113] Winter, M.; Brodd, R.J. What are batteries, fuel cells, and super capacitors? *Chem. Rev.* 2004, 104, 4245–4269.
- [114] Hua, T.; Ahluwalia, R.; Eudy, L.; Singer, G.; Jermer, B.; Asselin-Miller, N.; Wessel, S.; Patterson, T.; Marcinkoski, J. Status of hydrogen fuel cell electric buses worldwide. *J. Power Sources* 2014, 269, 975–993.
- Abdelkareem, M.A.; Elsaid, K.; Wilberforce, T.; Kamil, M.; Sayed, E.T.; Olabi, A. Environmental aspects of fuel cells: A review. *Sci. Total Environ.* 2021, 752, 141803.
- [115] Fact of the Month April 2018: Fuel Cell Cost Decreased by 60% Since 2006. Available online: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fact-month-april-2018-fuel-cell-cost-decreased-60-2006>.
- [116] Lattin, W.; Utgikar, V. Transition to hydrogen economy in the United States: A 2006 status report. *Int. J. Hydrogen Energy* 2007, 32, 3230–3237.

- [117] Ball, M.; Weeda, M. The hydrogen economy: Vision or reality? *Int. J. Hydrogen Energy* 2015, 40, 7903–7919.
- [118] Granovskii, M.; Dincer, I.; Rosen, M.A. Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles. *Int. J. Hydrogen Energy* 2006, 31, 337–352.
- [119] Thomas, C. Fuel cell and battery electric vehicles compared. *Int. J. Hydrogen Energy* 2009, 34, 6005–6020.
- [120] Sharma, S.; Ghoshal, S.K. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, 43, 1151–1158.
- [121] Cox, K.E.; Williamson, K.D. *Hydrogen: Its Technology and Implications*; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 1979.
- [122] Schulte, I.; Hart, D.; van der Vorst, R. Issues affecting the acceptance of hydrogen fuel. *Int. J. Hydrogen Energy* 2004, 29, 677–685.
- [123] Acar, C.; Dincer, I. Review and evaluation of hydrogen production options for better environment. *J. Clean. Prod.* 2019, 218, 835–849.