



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

Το Θεσμικό Πλαίσιο Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από Υδρογόνο και το Πλαίσιο Επενδυτικών Κινήτρων.

*Διπλωματική του:
Δημοσθένη Ανδρικόπουλου*

*Υπεύθυνη Διπλωματικής:
Ευγενία Τζαννίνη*

Απρίλιος 2024



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Το Θεσμικό Πλαίσιο Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας από Υδρογόνο και το Πλαίσιο Επενδυτικών Κινήτρων.

Διπλωματική του:
Δημοσθένη Ανδρικόπουλου

Υπεύθυνη Καθηγήτρια:
Ευγενία Τζαννίνη

Τριμελή Επιτροπή:

Ευγενία Τζαννίνη

Κωνσταντίνος
Θεολόγου

Στέλιος Σπυρίδων

Αθήνα, Απρίλιος 2024

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα διπλωματική εργασία, επιθυμώ να ευχαριστήσω όλους όσους με άμεσο ή έμμεσο τρόπο βοήθησαν και με στήριξαν στην πραγματοποίησή της.

Ξεκινώντας, θα ήθελα να εκφράσω τη βαθύτατη εκτίμηση μου και ευχαριστίες στην επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου, κα Ευγενία Τζαννίνη. Είναι η καθηγήτρια που κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο με ενέπνευσε να μελετήσω και να επιλέξω ένα θέμα που διασυνδέει περιβαλλοντικά και ενεργειακά ζητήματα. Η βοήθεια και οι συμβουλές της με οδήγησαν σε όλα τα στάδια συγγραφής της διπλωματικής εργασίας. Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω τους καθηγητές που αποτέλεσαν μέλη της τριμελούς επιτροπής, κκ Κωνσταντίνο Θεολόγου και Στέλιο Σπυριδων , αλλά και την κα Εύη Μακρή, καθώς συνέβαλαν στη διαμόρφωση του τελικού κειμένου. Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τους φίλους μου Πολίνα, Γεράσιμο και Λάζαρο για την πολύτιμη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια όλων αυτών των ετών. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, τους γονείς μου Βασίλη και Ελένη αλλά και τον αδερφό μου Φίλιππο, που με συντρόφεψαν με αμέριστη κατανόηση και στήριξη σε αυτή τη μακροχρόνια προσπάθεια.

Περίληψη

Η παγκόσμια προσπάθεια μετάβασης σε κλιματικά ουδέτερες οικονομίες και αντιμετώπισης της κλιματικής αλλαγής απαιτεί την ανάπτυξη και εισαγωγή νέων καινοτόμων τεχνολογιών και βιώσιμων ενεργειακών μέσων. Τις τελευταίες δεκαετίες σημειώνονται σημαντικές προσπάθειες για την απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα και των επιμέρους πτυχών του, με το υδρογόνο να αποκτά σημαντική δυναμική ως μέσο για την επίτευξη των παραπάνω στόχων. Η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης υδροοικονομίας αναμένεται να συμβάλει στην επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας αλλά και να προσφέρει λύση στο σημαντικό ζήτημα της αποθήκευσης ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές. Παρ' όλα τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει το υδρογόνο, απαιτείται η ανάπτυξη πολιτικών, κανόνων αλλά και καινοτόμων τεχνολογιών.

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελείται από τρία κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο επισημαίνεται η ανάγκη ύπαρξης ενός ολοκληρωμένου θεσμικού πλαισίου για την εισαγωγή και αξιοποίηση του υδρογόνου, ενώ αναλύονται οι διαφορές που εμποδίζουν την εφαρμογή των ίδιων πολιτικών και κανονισμών που διέπουν τις ανανεώσιμες πηγές. Παράλληλα, αναλύονται οι θεσμικές πρωτοβουλίες στις σημαντικότερες οικονομίες παγκοσμίως και εξετάζεται πώς επηρεάζουν την εισαγωγή και ανάπτυξη του.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας γίνεται αναφορά στις μεθόδους παραγωγής υδρογόνου, στις τεχνολογίες που το αξιοποιούν αλλά και στην πληθώρα εφαρμογών που παρουσιάζουν στον ενεργειακό τομέα. Αναλύονται εκτενώς οι μέθοδοι παραγωγής και το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα, επεξηγείται η κατηγοριοποίησή του σε χρώματα και παρουσιάζεται αναλυτικά η λειτουργία και τα χαρακτηριστικά των διαφορετικών ειδών κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, σκιαγραφούνται οι ευκαιρίες που παρουσιάζονται για την εφαρμογή των κυψελών σε διάφορες πτυχές του ενεργειακού τομέα καθώς και τα προτερήματά τους σε σχέση με τις συμβατικές μεθόδους παραγωγής ενέργειας.

Στο τρίτο και τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας, γίνεται αναφορά στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα καθώς και στις προοπτικές που παρουσιάζει η ανάπτυξη μιας εγχώριας υδροοικονομίας. Εξετάζονται αναλυτικά οι ευκαιρίες που δημιουργούνται για την εισαγωγή του υδρογόνου σε διάφορες πτυχές του εγχώριου ενεργειακού τομέα, ενώ αναλύεται το τρέχον θεσμικό κλίμα και παρατίθενται προτάσεις για την περαιτέρω ανάπτυξή του. Τέλος, γίνεται αναφορά στα σημαντικότερα έργα υποδομών που έχουν δρομολογηθεί για τα επόμενα χρόνια αλλά και γενικότερα στις επενδυτικές ευκαιρίες που δύναται προκύπτουν.

Abstract

Hydrogen and its technologies are emerging as important tools for a sustainable transition to a carbon neutral economy and combating climate change. However, the world's major economies have not yet developed the corresponding legislative framework for its adoption and deployment. Recent years have seen significant initiatives in several countries, such as South Korea and Germany, highlighting the commitment to its potential.

Numerous hydrogen production methods with different environmental impacts exist and new sustainable ones are constantly being developed. At the same time, the existence of several types of fuel cells makes them suitable for both large and small-scale applications in the energy sector. Furthermore, hydrogen can provide a solution to the problem of energy storage for renewable energy sources. However, further technological development is needed to fully exploit their potential.

Finally, the development of an integrated hydro-economy can be particularly beneficial for Greece, a country with significant potential in renewable energy sources. Hydrogen can be introduced and exploited in various energy sectors in the country. However, there is no institutional framework to support it, making it imperative for the country to keep up with European energy and environmental objectives.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	5
Περίληψη.....	6
Abstract	7
Περιεχόμενα.....	8
Ευρετήριο Εικόνων	12
1. ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	15
1.1. Εισαγωγή	15
1.2. Η Έννοια του Θεσμικού Πλαισίου	18
1.3. Το Θεσμικό Πλαίσιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	19
1.4. Ευρωπαϊκή Ένωση	20
1.4.1. Εισαγωγή	20
1.4.2. Ευρωπαϊκή Νομοθετική Διαδικασία	21
1.4.3. Ευρωπαϊκή Ένωση και Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.....	21
1.4.4. Ενεργειακές Πολιτικές	22
1.4.5. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	24
1.4.6. Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπής.....	27
1.4.7. Άλλοι Παράγοντες	28
1.4.7.1. Φορολογία.....	28
1.4.7.2. Ηλεκτρική Ενέργεια	28
1.4.7.3. Περιφερειακή Ευρωπαϊκή Πολιτική.....	28
1.4.7.4. Βιοκαύσιμα.....	29
1.4.8. Συμπεράσματα	29
1.5. Γερμανία	30
1.5.1. Εισαγωγή	30
1.5.2. Νομοθετική Διαδικασία	31
1.5.3. Θεσμικό Πλαίσιο για το Υδρογόνο στην Γερμανία.....	31
1.5.4.1. Ενεργειακή Πολιτική: Ενέργεια στην Βιομηχανία - EnWG	32
1.5.5.1. Ενεργειακή Πολιτική: Νόμος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – EEG 2023	34
1.5.6. Θεσμικό Πλαίσιο για τις Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου στην Γερμανία	35
1.5.7. Συμπεράσματα	35
1.6. Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής.....	37
1.6.1. Εισαγωγή	37
1.6.2. Ομοσπονδιακή Νομοθετική Διαδικασία	37
1.6.3. Ομοσπονδιακό Θεσμικό Πλαίσιο για το Υδρογόνο	38

1.6.4. Θεσμικό Πλαίσιο για τις Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου στις ΗΠΑ.....	40
1.6.5. Θεσμικό Πλαίσιο για το Υδρογόνο και τις Κυψέλες Καυσίμου στην Καλιφόρνια.	41
1.6.6. Συμπεράσματα	42
1.7. Κίνα.....	43
1.7.1. Εισαγωγή.....	43
1.7.2. Νομοθετική Διαδικασία	43
1.7.3. Θεσμικό Πλαίσιο για το Υδρογόνο στην Κίνα.....	44
1.7.4. Συμπεράσματα	46
1.8. Νότια Κορέα	47
1.8.1. Εισαγωγή.....	47
1.8.2. Νομοθετική Διαδικασία	47
1.8.3. Θεσμικό Πλαίσιο για το Υδρογόνο στην Νότια Κορέα	48
1.8.4. Θεσμικό Πλαίσιο για τις Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου στην Νότια Κορέα	49
1.8.5. Συμπεράσματα	50
2. ΤΕΧΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	51
2.1. Παραγωγή Υδρογόνου	51
2.1.1. Υδρογόνο από Συμβατικές Μεθόδους – Ορυκτά Καύσιμα.....	53
2.1.1.1. Αναμόρφωση με Ατμό.....	53
2.1.1.2. Μερική Οξειδωση.....	56
2.1.1.3. Αυτόθερμη αναμόρφωση	59
2.1.1.4. Πυρόλυση	60
2.1.2. Υδρογόνο από Ανανεώσιμες Πηγές	62
2.1.2.1. Υδρογόνο από Βιομάζα	62
2.1.2.1.1. Βιολογικές Διεργασίες.....	62
2.1.2.1.2. Θερμοχημικές Διεργασίες	65
2.1.3. Υδρογόνο από Διάσπαση Νερού.....	67
2.1.3.1. Ηλεκτρόλυση	67
2.1.3.2. Φωτο-ηλεκτρόλυση.....	69
2.1.3.3. Θερμόλυση	70
2.1.4. Συμπεράσματα	71
2.2. Τα Χρώματα του Υδρογόνου	74
2.2.1. Το Ουράνιο Τόξο του Υδρογόνου	74
2.2.2. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	78
2.3. Αποθήκευση και Μεταφορά Υδρογόνου	80
2.4. Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου.....	82
2.4.1. Εισαγωγή.....	82

2.4.2. Περιγραφή και Λειτουργία μιας Βασικής Κυψέλης Καυσίμου	83
2.4.3. Απόδοση Κυψέλης Καυσίμου.....	85
2.4.4. Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου	86
2.4.5. Περιφερειακά Συστήματα	87
2.4.6. Τεχνολογίες Κυψελών Υδρογόνου	88
2.4.6.1. Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου (AFC).....	88
2.4.6.2. Κυψέλη Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC).....	89
2.4.6.3. Κυψέλη Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFC).....	91
2.4.6.4. Κυψέλη Καυσίμου Λιωμένου Ανθρακικού Άλατος (MCFC)	92
2.4.6.5. Κυψέλη Καυσίμου Πολυμερούς Ηλεκτρολυτικής Μembrάνης (PEMFC)	93
2.4.6.6. Κυψέλη Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (DMFC)	95
2.5. Σύγκριση Τεχνολογιών Κυψελών Καυσίμου	96
2.6. Εφαρμογές στον Ενεργειακό Τομέα	99
2.6.1. Εισαγωγή	99
2.6.2. Αποκεντρωμένη Παραγωγή Ενέργειας	100
2.6.3. Φορητή Ενέργεια.....	101
2.6.4. Υδρογόνο και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	103
2.6.4.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	103
2.6.4.2. Φαινόμενο της Καμπύλης Πάπιας (Duck Curve).....	103
2.6.4.3. Αποθήκευση Ενέργειας με Υδρογόνο	106
2.6.5. Συμπεράσματα	107
3. ΕΛΛΑΔΑ.....	108
3.1. Εισαγωγή	108
3.2. Ελληνικός Ενεργειακός Τομέας και Υδρογόνο	108
3.2.1. Εισαγωγή	108
3.2.2 Ενεργειακά Μεγέθη.....	109
3.2.3. Ενεργειακός Τομέας στην Ελλάδα	110
3.2.4. Ευκαιρίες Εισαγωγής Υδρογόνου στο Ενεργειακό Σύστημα.....	114
3.2.4.1. Ηλεκτροπαραγωγή	114
3.2.4.2. Θέρμανση	114
3.2.4.3. Μεταφορές.....	115
3.2.4.4. Βιομηχανία	116
3.2.5. Συμπεράσματα	117
3.3. Θεσμικό Πλαίσιο.....	118
3.3.1. Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα	118
3.3.2. Εθνική Στρατηγική Για το Υδρογόνο.....	119

3.3.3. Ανάπτυξη Εγχώριου Θεσμικού Πλαισίου	120
3.4. Επενδυτικά Κίνητρα.....	123
3.4.1. Σημαντικά Έργα Κοινού Ευρωπαϊκού Ενδιαφέροντος (Important Projects of Common European Interest - IPCEI).....	123
3.4.2. Ανάπτυξη Απαραίτητης Υποδομής.....	124
4. Συζήτηση.....	126
Βιβλιογραφία.....	130

Ευρετήριο Εικόνων

Εικόνα 1: Εθνικά Σχέδια, Στρατηγικές και Οδικό χάρτες Υδρογόνου που θα κυκλοφορήσουν μέχρι το τέλος του 2021. Πηγή: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922033900	16
Εικόνα 2: Εθνικά Σχέδια, Στρατηγικές και Οδικό χάρτες Υδρογόνου που θα κυκλοφορήσουν μέχρι το τέλος του 2022. Πηγή: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423006404#t0005	17
Εικόνα 3: Συνολικό Μερίδιο Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές στην ΕΕ. Πηγή: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/product/-/asset_publisher/VWJkHuaYvLIN/content/id/12103800/pop_up	25
Εικόνα 4: Συμβατικοί Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου.	52
Εικόνα 5: Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου από Ανανεώσιμες Πηγές.	52
Εικόνα 6: Πρώτες Ύλες για την Παραγωγή Υδρογόνου σε Παγκόσμια Κλίμακα.	53
Εικόνα 7: Διάγραμμα της Διαδικασίας Αναμόρφωσης Μεθανίου με Ατμό.	55
Εικόνα 8: Διάγραμμα της Διαδικασίας Αναμόρφωσης Ατμού Μεθανίου με Ενσωματωμένη Μεμβράνη.	56
Εικόνα 9: Διαδικασία Μερικής Οξειδωσης του Μεθανίου. Πηγή: https://globalsyngas.org/syngas-technology/syngas-production/partial-oxidation/	58
Εικόνα 10: Διάγραμμα της Διαδικασίας Αεριοποίησης του Άνθρακα.	58
Εικόνα 11: Διαδικασία της Αεριοποίησης Texaco. Πηγή: https://clu-in.org/products/site/complete/democomp/texaco.htm	59
Εικόνα 12: Διαδικασία Αυτόθερμης Αναμόρφωσης. Πηγή: https://globalsyngas.org/syngas-technology/syngas-production/partial-oxidation/	60
Εικόνα 13: Διάγραμμα της Διαδικασίας Πυρόλυσης Μεθανίου.	61
Εικόνα 14: Διάγραμμα της Διαδικασίας Άμεση Βιοφωτόλυσης	63
Εικόνα 15: Διάγραμμα Διαδικασίας της Σκοτεινής Ζύμωσης.	64
Εικόνα 16: Διάγραμμα Διαδικασίας της Φωτοζύμωσης.	64
Εικόνα 17: Διάγραμμα Διαδικασίας της Πυρόλυσης Βιομάζας.	66
Εικόνα 18: Αλκαλική Ηλεκτρόλυση. Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-alkaline-electrolysis-cell-34_fig4_327179309	68
Εικόνα 19: Ηλεκτρόλυση σε Κυψέλες Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEM). Πηγή: https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis	68
Εικόνα 20: Διάγραμμα Διαδικασίας της Φωτο-ηλεκτρόλυσης.	70
Εικόνα 21: Διατάξεις για Παραγωγή Υδρογόνου με Θερμόλυση. Πηγή: https://www.nstda.or.th/home/wp-content/uploads/2023/10/2.%E0%B8%94%E0%B8%A3.%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%A8%E0%B8%B2%E0%B8%A5-H2-and-fuel-cell.pdf	71
Εικόνα 22: Χρώματα που Αναφέρονται στο Εθνικό Σχέδιο, τη Στρατηγική ή τον Οδικό Χάρτη για το Υδρογόνο κάθε Χώρα. Πηγή: J. Incer-Valverde, et al., 2023	75
Εικόνα 23: Παραγωγή Πράσινου Υδρογόνου. Πηγή: https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen	75
Εικόνα 24: Παραγωγή Γκρι Υδρογόνου. Πηγή: https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen	76
Εικόνα 25: Παραγωγή Μπλε Υδρογόνου. Πηγή: https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen	76
Εικόνα 26: Παραγωγή Τιρκουάζ Υδρογόνου. Πηγή: https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen	77
Εικόνα 27: Ορισμοί των Χρωμάτων Υδρογόνου	78
Εικόνα 28: Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα των Χρωμάτων Υδρογόνου. Πηγή: J. Incer-Valverde, et al., 2023	79

Εικόνα 29: Μονάδα Αποθήκευσης Υγρού Υδρογόνου. Πηγή: https://energyresearch.ucf.edu/research/hydrogen/liquid-hydrogen-storage/	81
Εικόνα 30: Το πείραμα Grove. Πηγή: https://americanhistory.si.edu/fuelcells/origins/origins.htm	82
Εικόνα 31: Μετατροπή Ενέργειας σε Μηχανή Εσωτερικής Καύσης και Κυψέλη Καυσίμου.	83
Εικόνα 32: Διάταξη Βασικής Κυψέλης Καυσίμου. Πηγή: https://www.britannica.com/technology/fuel-cell	84
Εικόνα 33: Αρχή Λειτουργίας μιας Κυψέλης Καυσίμου. Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012	85
Εικόνα 34: Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου PEM. Πηγή: Xiao-Zi Yuan, et al., 2006	87
Εικόνα 35: Διπολική Πλάκα Συστοιχίας PEMFC. Πηγή: Salwan S. Dhrab, et al., 2008.	87
Εικόνα 36: Λειτουργία Αλκαλικής Κυψέλης Καυσίμου (AFC). Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012	89
Εικόνα 37: Λειτουργία Κυψέλης Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC). Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012	90
Εικόνα 38: Λειτουργία Κυψέλης Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFC). Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012	91
Εικόνα 39: Λειτουργία Κυψέλης Καυσίμου Λιωμένου Ανθρακικού Άλατος (MCFC). Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012	93
Εικόνα 40: Λειτουργία Κυψέλης Καυσίμου Πολυμερούς Ηλεκτρολυτικής Μεμβράνης (PEMFC). Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012	94
Εικόνα 41: Λειτουργία Κυψέλης Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (DMFC). Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012	95
Εικόνα 42: Συγκεντρωτική Απεικόνιση Λειτουργίας Διαφορετικών Τύπων Κυψελών Καυσίμου. Πηγή: https://dias.library.tuc.gr/view/25781?locale=en	98
Εικόνα 43: Συγκεντρωτική Απεικόνιση Θερμοκρασιών Λειτουργίας Ορισμένων Τύπων Κυψελών. Πηγή: https://fuelcellcollaborative.org/Fuel_Cell_Technologies.html	98
Εικόνα 44: Καύσιμα και Πιθανές Εφαρμογές των Κυψελών Καυσίμου. Πηγή: A. Abougarair, 2013	98
Εικόνα 45: Εφαρμογές Κυψελών Καυσίμου για την Παραγωγή Ενέργειας. Πηγή: https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=982f97445a8a928f11e2c3e5bfbc593c073537	99
Εικόνα 46: Κατανεμημένη – Αποκεντρωμένη Μονάδα Συμπαγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Ballard 250kW. Πηγή: B. Cook, 2002	101
Εικόνα 47: Πιθανή Χρήση Φορητών Κυψελών Καυσίμου για Στρατιωτικές Εφαρμογές. Πηγή: https://fuelcellworks.com/knowledge/applications/portable/	101
Εικόνα 48: PowerUp Φορητή Γεννήτρια Κυψελών Υδρογόνου 1 kW. Πηγή: https://powerup-tech.com/product/up1k/	102
Εικόνα 49: Χρήση Φορητών Κυψελών για την Φόρτιση Μικρών Συσκευών. Πηγή: https://dias.library.tuc.gr/view/25781?locale=en	102
Εικόνα 50: Καμπύλη Πάπιας (Duck Curve). Πηγή: https://www.mdpi.com/2075-5309/12/3/371	104
Εικόνα 51: Ο Όρος «Καμπύλη Πάπιας» Δημιουργήθηκε καθώς το Γράφημα Μοιάζει με Καθιστή Πάπια. Πηγή: https://samueli.ucla.edu/ucla-expert-warns-impact-of-extreme-heat-wave-on-californias-energy-grid/	105
Εικόνα 52: Ακαθάριστη Εγχώρια Ενεργειακή Κατανάλωση ανά τα Έτη Πηγή: https://www.iene.gr/page.asp?pid=5875&lng=1	110
Εικόνα 53: Συμμετοχή Επιμέρους Τομέων στην Τελική Εγχώρια Ενεργειακή Κατανάλωση. Πηγή: https://www.iene.gr/page.asp?pid=5875&lng=1	111
Εικόνα 54: Συμμετοχή Καυσίμων στην Τελική Ενεργειακή Κατανάλωση στην Ελλάδα το 2021. Πηγή: https://www.iene.gr/page.asp?pid=5875&lng=1	111

Εικόνα 55: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά Πηγή το 2023. Πηγή: https://www.statista.com/statistics/1235419/greece-distribution-of-electricity-production-by-source/	112
Εικόνα 56: Συμμετοχή Επιμέρους Τομέα στην Παραγωγή CO ₂ . Πηγή: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=GRC&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySource	113
Εικόνα 57: Συμμετοχή Επιμέρους Καυσίμου στην Παραγωγή CO ₂ . Πηγή: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=GRC&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySource	113

1. ΘΕΣΜΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

1.1. Εισαγωγή

Το μεγαλύτερο μέρος των ανθρωπογενών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου προέρχονται από τον παγκόσμιο ενεργειακό τομέα, θέτοντας επιτακτικής ανάγκης το ζήτημα της βελτιστοποίησης για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής (Moura João, 2023). Παράλληλα, με την εφαρμογή ποικίλων βιώσιμων στρατηγικών και καινοτομιών, η ενσωμάτωση των τεχνολογιών που αξιοποιούν το υδρογόνο για την παραγωγή ενέργειας φαίνεται να αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση. Γενικά, το υδρογόνο παρουσιάζει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, σχετικά μικρή μάζα αλλά και ευκολία στην ηλεκτροχημική επεξεργασία και μεταφορά. Επιπλέον, εκτός από την καινοτομία στις βιώσιμες τεχνικές παραγωγής ενέργειας, δύναται να αποτελέσει λύση στο πρόβλημα αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές, αποτελώντας επιπλέον πλεονέκτημα για την χρήση του στην προσπάθεια απανθρακοποίησης της παγκόσμιας οικονομίας.

Το υδρογόνο αναμένεται να διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο, τα επόμενα χρόνια, στον ενεργειακό τομέα. Ωστόσο, για να επιτευχθεί το παραπάνω εγχείρημα, απαιτείται να προσδιοριστεί ο ρόλος των δημόσιων πολιτικών, με απώτερο σκοπό την τόνωση και ανάπτυξη του τομέα. Οι δημόσιες πολιτικές, είτε στην μορφή νομοθετικών και κανονιστικών πλαισίων, είτε με την εφαρμογή προτύπων, αποτελούν βασικό εργαλείο στα χέρια της πολιτείας. Το περιβάλλον και η ενέργεια είναι στενά συνδεδεμένοι όροι στις περισσότερες σύγχρονες κοινωνίες, θέτοντας την ενεργειακή μετάβαση να αποτελεί εκτός από τεχνολογικό μετασχηματισμό και πολιτιστικό, αφού εκτείνεται στην συμπεριφορά του κοινού απέναντι στις νέες τεχνολογίες (Sam Fankhauser F. J., 2018). Συνεπώς, η αποδοχή καινοτόμων ενεργειακών τεχνολογιών ενδέχεται να παρεμποδιστεί ή και να σταματήσει αν δεν υφίσταται δημόσια υποστήριξη (Shree Om Bade, 2024). Ως εκ τούτου, οι πολιτικές από τα κράτη που δεσμεύονται να προχωρήσουν στην ενεργειακή μετάβαση, πρέπει να λαμβάνουν υπόψιν τις αντιλήψεις του κοινού και να εμπλέκονται σε ένα ενιαίο ολιστικό πλαίσιο πολιτικής¹. Η ανάγκη για την άμεση παροχή δημόσιων πολιτικών για την καθιέρωση και εξάπλωση των τεχνολογιών υδρογόνου στο τομέα της ενέργειας αντικατοπτρίζεται από τους στόχους που έχουν θέσει ο Οργανισμός Ηνωμένων Εθνών (ΟΗΕ)², η Ευρωπαϊκή Επιτροπή³ αλλά και από άλλες πρωτοβουλίες και στρατηγικές εθνικών κυβερνήσεων.

Τα ενεργειακά συστήματα αποτελούνται από πλήθος αλληλένδετων και διακριτών στοιχείων, πολλές φορές στερούμενα κεντρικής αρχής, παρουσιάζοντας απρόβλεπτη οργανωτική συμπεριφορά (Bale et.al., 2010). Το χαρακτηριστικό αυτό, δημιουργεί σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά την ανάπτυξη και εφαρμογή πολιτικών για την προώθηση της αποδοτικότητας και της ασφαλούς οικονομικής ανάπτυξης. Μια από τις σημαντικότερες πρωτοβουλίες για την προστασία του περιβάλλοντος, αποτελεί η Συμφωνία των Παρισίων. Στην Συμφωνία, τέθηκε ως κοινός στόχος ο περιορισμός της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας κάτω από τους 2°C παράλληλα με σημαντικές προσπάθειες για την διατήρηση στους 1.5°C. Ωστόσο, σύμφωνα με το Διακυβερνητικό Συμβούλιο Κλιματικής

¹ IRENA. World Energy Transitions Outlook 2022: 1.5°C Pathway, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi."

² UNECE. Hydrogen, <https://unece.org/hydrogen>

³ European Commission. Hydrogen, https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en

Αλλαγής (IPCC), για να επιτευχθεί ο στόχος των 1.5°C είναι αναγκαίοι οι παγκόσμιες εκπομπές να φτάσουν σε μηδενικά επίπεδα μέχρι το μέσο του 21^{ου} αιώνα⁴.

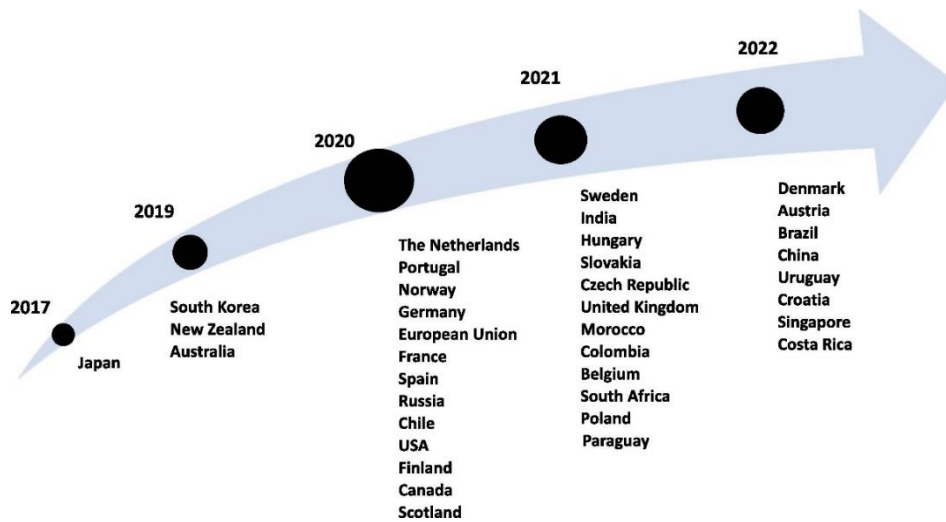
Όσον αφορά την οικονομική πτυχή του εγχειρήματος της μετάβασης, η επιλογή του θεσμικού πλαισίου και των δημόσιων πολιτικών μπορούν να επηρεάσουν ενεργά την χρηματοδότηση, δημόσια και ιδιωτική. Παράλληλα, δύναται να βελτιώσουν την επενδυτική ελκυστικότητα του τομέα σε εταιρίες και θεσμικούς επενδυτές. Επομένως, οι πολιτικές επηρεάζουν άμεσα την διάχυσή και εμπορευματοποίηση καινοτόμων τεχνολογιών (Kanita Surana, 2015). Γενικότερα, όσον αφορά τις επενδύσεις φαίνεται πως οι επενδυτές είναι απρόθυμοι να επενδύσουν σε εγχειρήματα πράσινης ενέργειας, οπότε, η μείωση του κινδύνου αγοράς μέσω πολιτικών καθίσταται ζωτικής σημασίας (Moura João, 2023).

Λόγω του πρώιμου σταδίου των τεχνολογιών που αξιοποιούν υδρογόνο και της περιορισμένης εφαρμογής τους στο ενεργειακό σύστημα, η διεξαγωγή μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης των πολιτικών και μέτρων αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση, ενώ είναι σχετικά νωρίς να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα κάθε πολιτικής.



Εικόνα 1: Εθνικά Σχέδια, Στρατηγικές και Οδικοί χάρτες Υδρογόνου που θα κυκλοφορήσουν μέχρι το τέλος του 2021. Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922033900>

⁴ IPCC (2018). "Global Warming of 1.5 °C."



Εικόνα 2: Εθνικά Σχέδια, Στρατηγικές και Οδική χάρτες Υδρογόνου που θα κυκλοφορήσουν μέχρι το τέλος του 2022. Πηγή: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423006404#t0005>

1.2. Η Έννοια του Θεσμικού Πλαισίου

Το θεσμικό πλαίσιο είναι ένας όρος που συχνά χρησιμοποιείται για να περιγράψει το σύνολο των νομικών διεργασιών που ρυθμίζουν την δομή ενός τομέα, μιας χώρας ή οργάνωσης. Στο παρακάτω τμήμα γίνεται ανάλυση των νομικών όρων που εμφανίζονται συχνά στο κεφάλαιο με σκοπό την αποφυγή σύγχυσης των εννοιών⁷.

Ο παραπάνω όρος αναφέρεται στο σύνολο των νόμων, κανονισμών, προτύπων, προδιαγραφών και δικαστικών αποφάσεων που διέπουν μια περιοχή, χώρα ή οργανισμό. Εξειδικεύεται σε διάφορους τομείς και ορίζει με γνώμονα τον νόμο την λειτουργία ενός είδους δραστηριότητας, όπως η βιομηχανική. Το νομοθετικό πλαίσιο αποτελεί υποσύνολο και αναφέρεται συγκεκριμένα στο σύστημα των νόμων, κανονισμών και καταστατικών που έχουν δημιουργηθεί από ένα όργανο με νομοθετική ισχύ, όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση⁷.

Από την άλλη, υπάρχει και το ρυθμιστικό πλαίσιο, που περιλαμβάνει τους κανόνες και διατάξεις που θεσπίζονται από τα διοικητικά και ρυθμιστικά όργανα με σκοπό την εποπτεία της λειτουργίας ποικίλων τομέων, όπως ο βιομηχανικός. Συνοπτικά το ρυθμιστικό εστιάζει στην δημιουργία λεπτομερών κανόνων και προτύπων για την ρύθμιση δραστηριοτήτων εντός ενός ευρύτερου νομοθετικού πλαισίου⁷.

Όσον αφορά τους κανονισμούς και τα πρότυπα, σε γενικά πλαίσια έχουν διαφορετικές λειτουργίες και εφαρμογές. Οι κανονισμοί αποτελούν ένα καταστατικό κείμενο, δηλαδή ένα νομικό έγγραφο που έχει ισχύ σε τοπικό, εθνικό, περιφερειακό ή διεθνές επίπεδο. Αντικατοπτρίζουν τους νομικούς περιορισμούς καθιστώντας τους υποχρεωτικούς. Θεσπίζονται από νομοθετικά όργανα, όπως κυβερνήσεις. Στην περίπτωση της Ευρωπαϊκής Ένωσης, η Επιτροπή δημοσιεύει κάποιες οδηγίες που προσφέρουν κατευθυντήριες γραμμές ώστε τα κράτη μέλη να δημιουργήσουν τους αντίστοιχους κανονισμούς. Στον βιομηχανικό τομέα, συνήθως, δηλώνουν τις ελάχιστες νομικές απαιτήσεις που αποσκοπούν για την διασφάλισή της ανθρώπινης υγείας και ασφάλειας, την ασφάλεια του περιβάλλοντος αλλά και της ιδιοκτησίας από τα παραγόμενα προϊόντα και τις τεχνικές ή συστήματα παραγωγής⁷.

Τα πρότυπα ή βιομηχανικά πρότυπα είναι έγγραφα που καθορίζουν τα τεχνικά μέσα και οδηγίες στον αντίστοιχο τομέα. Συντάσσονται από αναγνωρισμένους, συχνά μη κυβερνητικούς, οργανισμούς τυποποίησης όπως ISO⁵ ή CEN⁶ και άλλα. Θέτουν κατευθυντήριες γραμμές για την επίτευξη του βέλτιστου βαθμού ασφάλειας στον αντίστοιχο βιομηχανικό τομέα ή προϊόν. Τα διεθνή πρότυπα είναι πιο ισχυρά, σε μεγάλο βαθμό λόγω της παγκοσμιοποίησης της οικονομίας, από τα εθνικά και νομοθετούνται πιο συχνά. Να σημειωθεί ότι τα πρότυπα, είτε εθνικά είτε διεθνή, δεν περιέχουν νομική εξουσία. Η εφαρμογή τους συνιστάται χωρίς να έχει υποχρεωτικό χαρακτήρα εκτός αν κάποιος κανονισμός αναφέρεται ρητά σε κάποιο πρότυπο. Γενικά, η εισαγωγή προτύπων στο βιομηχανικό τομέα συμβάλλει θετικά στην ασφαλή εισαγωγή και ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών, όπως οι κυψέλες καυσίμων στο τομέα της ενέργειας. Ενώ λοιπόν οι κανονισμοί και τα πρότυπα αναφέρονται συχνά μαζί, πρόκειται για θεμελιωδώς διαφορετικές έννοιες, με την σημαντικότερη διαφορά να έγκειται στην νομική τους ισχύ. Τα πρότυπα διευκολύνουν το εμπόριο και αναπτύσσονται σε βιομηχανικούς τομείς ενώ χρησιμοποιούνται, επί το πλείστον, με οργανισμούς που ασχολούνται με την τυποποιημένη

⁵ ISO. Global standards for trusted goods and services, <https://www.iso.org/home.html>

⁶ CEN. Cen-cenelec, <https://www.cencenelec.eu/>

τεχνολογία. Η διασύνδεση με τους κανονισμούς συχνά εμφανίζεται σε ζητήματα ασφαλείας⁷.

Τέλος, σημαντικά νομοθετικά εργαλεία για την αποτελεσματική και ευέλικτη προσαρμογή της νομοθεσίας στις εκάστοτε ανάγκες αλλά και για την σωστή εφαρμογή και εκτέλεση, αποτελούν οι κατ' εξουσιοδότηση πράξεις και οι εκτελεστικές πράξεις, αντίστοιχα. Οι κατ' εξουσιοδότηση πράξεις αναφέρονται σε αποφάσεις που λαμβάνονται από τα θεσμικά όργανα, όπως το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης και την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Συγκεκριμένα, οι κατ' εξουσιοδότηση πράξεις είναι μέρος της νομοθετικής διαδικασίας και μπορούν να εκδίδονται μόνο εάν υπάρχει εξουσιοδότηση που περιέχεται σε νομοθετική πράξη, συμπληρώνοντας ή τροποποιώντας ορισμένα μη ουσιώδη στοιχεία της εν λόγω νομοθετικής πράξης. Αυτό, επιτρέπει στην Επιτροπή να λαμβάνει μέτρα που διασφαλίζουν τη συμμόρφωση με την νομοθεσία χωρίς να απαιτείται προηγούμενη έγκριση για κάθε μεμονωμένη απόφαση. Παράλληλα, οι εκτελεστικές πράξεις αναφέρονται σε πράξεις που εκδίδονται από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και έχουν ως στόχο την εφαρμογή ή την εκτέλεση της νομοθεσίας συμπληρώνοντας τη γενική νομοθεσία που εγκρίνεται από τα άλλα θεσμικά όργανα, όπως το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η Επιτροπή χρησιμοποιεί τις εκτελεστικές πράξεις για να καθορίσει τις λεπτομέρειες ή τους κανόνες που απαιτούνται για την εφαρμογή μιας νομοθετικής πράξης, επιτρέποντάς της να αντιμετωπίζει ευέλικτα τις πρακτικές πτυχές της νομοθεσίας^{7 8}.

1.3. Το Θεσμικό Πλαίσιο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Στον ενεργειακό τομέα δίνεται το εγχείρημα πως οι καινοτόμες τεχνολογίες, στις πρώτες φάσεις επιχειρηματικής ανάπτυξης και εισαγωγής στην αγορά, χρειάζονται πολιτικές και προγράμματα στήριξης (Arthur W. Brian, 1989). Χωρίς αυτά, ελλοχεύει ο κίνδυνος «κλειδώματος» της αγοράς από ήδη υπάρχουσες και δοκιμασμένες τεχνολογίες, μειώνοντας τα κίνητρα για ανάπτυξη και καινοτομία. Χαρακτηριστικό παράδειγμα, στο πρόσφατο παρελθόν, αποτελεί η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό μείγμα. Στα πρώτα στάδια εφαρμογής και εισαγωγής εμφανίστηκαν αρκετά προβλήματα στην παράγωγή, την ασφάλεια, την ευελιξία, στο λειτουργικό και επενδυτικό κόστος. Έτσι, παρουσιάστηκαν δυσκολίες στην μετάβαση και την σταθερότητα του δικτύου. Τα προβλήματα αυτά, μείωσαν την φιλοδοξία απέναντι στην βιωσιμότητα των εφαρμογών, γεγονός που αντικατοπτριζόταν και από τις αλλαγές στους στόχους των κρατών. Οι πολιτικές υποστήριξης, ειδικά αυτές που αφορούν την καινοτόμα τεχνολογία, διαδραμάτισαν καθοριστικό ρόλο στην αποφυγή του «κλειδώματος» της αγοράς (M.E. Ros, 2007).

Συνεπώς, φαίνεται περίεργο που δεν εφαρμόζονται οι ίδιες στρατηγικές ανάπτυξης και πολιτικές, που είναι ήδη δοκιμασμένες, στις τεχνολογίες υδρογόνου. Το υδρογόνο έχει τρία διακριτά χαρακτηριστικά σε σχέση με τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που καθιστούν την διαδικασία δημιουργίας πολιτικών και κανονισμών πιο περίπλοκη. Αρχικά, το υδρογόνο αποτελεί φορέα ενέργειας και όχι πηγή ενέργειας όπως ο ήλιος ή ο άνεμος. Συνεπώς εκτός από υποδομές παραγωγής και αξιοποίησης, αναγκαίες είναι και οι υποδομές

⁷ European Union. FUEL CELLS AND HYDROGEN 2 JOINT UNDERTAKING (FCH 2 JU), https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/clean-hydrogen-joint-undertaking_en

⁸ Συμβούλιο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Εκτελεστικές και κατ' εξουσιοδότηση πράξεις, <https://www.consilium.europa.eu/el/council-eu/decision-making/implementing-and-delegated-acts/>

διανομής, απαιτώντας την ανάπτυξη επιπλέον προτύπων και κανονισμών. Επιπρόσθετα, σε αντίθεση με άλλες βιώσιμες καινοτομίες, όπως τα βιοκαύσιμα, το υδρογόνο δεν έχει την δυνατότητα να αναμειχθεί με τα συμβατικά καύσιμα που χρησιμοποιούνται εκτενώς στον ενεργειακό τομέα. Επομένως, απαιτούνται πολιτικές και στρατηγικές ώστε να αναπτυχθεί το δίκτυο και να καταστεί συμβατό με την υπάρχουσα ενεργειακή υποδομή. Τέλος, η ενεργειακή απόδοση των τεχνολογικών μέσων που αξιοποιούν το υδρογόνο βασίζεται σε άλλες τεχνολογίες, όπως αυτή της αποθήκευσης, που απαιτούν περεταίρω ανάπτυξη. Χάρη σε αυτά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα υφιστάμενα πλαίσια και πολιτικές που εφαρμόζονται στις ανανεώσιμες πηγές δεν μπορούν να τροποποιηθούν με ευκολία και να επιτύχουν και στο τομέα του υδρογόνου (M.E. Ros, 2007).

1.4. Ευρωπαϊκή Ένωση

1.4.1. Εισαγωγή

Τα αδιαμφισβήτητα ευρήματα της κλιματολογίας υποδεικνύουν, με υψηλό βαθμό ακρίβειας, πως η υπερθέρμανση του πλανήτη συνδέεται άμεσα με το συνολικό όγκο διοξειδίου του άνθρακα που απελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα από τις ανθρώπινες δραστηριότητες (H Damon Matthews, 2018). Ως εκ τούτου, η επίτευξη της σταθεροποίησης του κλίματος απαιτεί τη σταδιακή μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα μέχρι την πλήρη απεξάρτηση.

Η καταπολέμηση του πολυδιάστατου προβλήματος αποτελεί φλέγον ζήτημα τόσο για την παγκόσμια κοινότητα όσο και για την Ευρωπαϊκή Ένωση που ως πρωτοπόρος στον αγώνα για την προστασία του περιβάλλοντος συμμετέχει ενεργά στην προσπάθεια. Ωστόσο, η Ένωση αποτελεί τον μεγαλύτερο εισαγωγέα ορυκτών καυσίμων παγκοσμίως. Έτσι, οι τεχνολογίες που εκμεταλλεύονται το υδρογόνο, φαίνεται να αποτελούν την καλύτερη λύση όσον αφορά την μετάβαση σε μια ουδέτερη οικονομία και την απεξάρτηση από ορυκτά καύσιμα.

Η στροφή προς τις τεχνολογίες υδρογόνου δεν πρόκειται για απλή διαδικασία. Η αλλαγή και εισαγωγή νέων μέσων σε θεμελιώδης οικονομικούς τομείς, όπως αυτός της ενέργειας, είναι ιδιαίτερης σημασίας καθώς η διακοπή της ομαλής λειτουργίας τους μπορεί να επιφέρει καταστροφικές συνέπειες στην οικονομία και την καθημερινότητα των πολιτών. Για τους παραπάνω λόγους, ιστορικά, οι παραπάνω κλάδοι εποπτεύονται και ρυθμίζονται με ιδιαίτερη προσοχή από τα αντίστοιχα κράτη.

Οι ρυθμιστικοί μηχανισμοί στο ενεργειακό τομέα, είτε κυβερνητική είτε ανεξάρτητοι οργανισμοί, θέτουν τα δεδομένα και τις διαδικασίες επηρεάζοντας κάθε πτυχή του. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση μηχανισμοί αυτοί έχουν συγκροτηθεί στο πλαίσιο του κράτους μέλους με μορφή κρατικών επιχειρήσεων. Κύρια εργαλεία της νομοθετικής διαδικασίας αποτελούν οι Οδηγίες, όπου πρόκειται για νομικά κείμενα με δεσμευτικό χαρακτήρα ως προς τους επιδιωκόμενους στόχους που θέτουν. Τα κράτη μέλη, που απευθύνονται, έχουν την δυνατότητα επιλογής των μεθόδων που θα εφαρμόσουν για την εκπλήρωσή τους. Γενικά η ευρωπαϊκή νομοθεσία υπερिशύει των εθνικών νόμων των κρατών μελών. Ενώ λοιπόν οι κανονισμοί και οι ρυθμίσεις θέτονται από τις κυβερνήσεις, οι ιδιωτικές επιχειρήσεις και οι πολίτες επηρεάζονται περισσότερο. Καθώς λοιπόν η Ευρωπαϊκή Ένωση αποτελεί μια ένωση κρατών με πληθώρα χαρακτηριστικών και μοναδικών πολιτιστικών ταυτοτήτων, τίθεται το ερώτημα αν το ευρωπαϊκό ρυθμιστικό κράτος μπορεί να ανταπεξέλθει στις προκλήσεις που εμφανίζονται στην προσπάθεια μετάβασης σε νέες τεχνολογίες καθαρής ενέργειας (Sudi Araf, 2012).

1.4.2. Ευρωπαϊκή Νομοθετική Διαδικασία

Η Ευρωπαϊκή νομοθετική διαδικασία αποτελεί ένα σύνθετο σύστημα για την διαμόρφωση των νόμων και των Οδηγιών της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η διαδικασία ξεκινά με τη νομοθετική πρωτοβουλία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η οποία προτείνει νέους κανόνες, Οδηγίες και νομοθετικές πρωτοβουλίες. Η Επιτροπή αποτελεί το μοναδικό θεσμικό όργανο της Ευρωπαϊκής Ένωσης με δικαίωμα να θέτει σε κίνηση τη διαδικασία για έκδοση νομικών πράξεων. Η υποβολή αυτών, γίνεται είτε με πρωτοβουλία της ίδιας, είτε κατόπιν αιτήματος άλλων θεσμικών οργάνων ή κατόπιν πρωτοβουλίας πολιτών. Στην συνέχεια, ακολουθεί η διαδικασία έγκρισης, κατά την οποία το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης διαπραγματεύονται και εγκρίνουν τις προτάσεις. Τα δύο αυτά θεσμικά όργανα αντιπροσωπεύουν τους πολίτες και τα κράτη μέλη στη λήψη αποφάσεων⁹.

Η διαδικασία έγκρισης αποτελείται από την πρώτη και δεύτερη ανάγνωση. Εάν το Συμβούλιο δεν εγκρίνει όλες τις τροπολογίες του Κοινοβουλίου, στην δεύτερη ανάγνωση, συγκαλείται επιτροπή συνδιαλλαγής με σκοπό την διαμόρφωση ενός κειμένου που να μπορεί να γίνει δεκτό από τα δύο θεσμικά όργανα. Αν υπάρξει συμφωνία για κοινό κείμενο, διαβιβάζεται στο Κοινοβούλιο και το Συμβούλιο, για τρίτη ανάγνωση, και προκύπτει νομοθετικό ψήφισμα. Εάν το κοινό κείμενο εγκριθεί και από τα δύο θεσμικά όργανα, η νομοθετική πράξη δημοσιεύεται ως Οδηγία, Κανονισμός ή Απόφαση. Αντιθέτως, η πρόταση δεν εγκρίνεται και η διαδικασία τερματίζεται. Τέλος, τα κράτη μέλη ενσωματώνουν τους νέους κανόνες στο εθνικό τους δίκαιο⁹.

1.4.3. Ευρωπαϊκή Ένωση και Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

Η Ευρωπαϊκή Ένωση συνιστά μοναδική οικονομική και πολιτική ένωση μεταξύ 27 ευρωπαϊκών χωρών. Από την άλλη, οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής αποτελούν ένα ομοσπονδιακό σύστημα συνιστάμενο από 50 πολιτείες. Η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει κάποια ομοσπονδιακά χαρακτηριστικά, όπως τα κεντρικά και κύρια θεσμικά όργανα λήψης αποφάσεων και διοίκησης, δηλαδή το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο, το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή και το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης¹⁰. Παρόλα τα κάποια κοινά χαρακτηριστικά, σε αντίθεση με τις ΗΠΑ, δεν υφίσταται κοινό επίσημο σύνταγμα και τα κράτη μέλη παραμένουν υπεύθυνα για τους περισσότερους τομείς πολιτικών.

Στις ΗΠΑ κύρια νομοθετικά εργαλεία αποτελούν οι ομοσπονδιακοί νόμοι και κανονισμοί. Οι ομοσπονδιακοί νόμοι είναι νομοσχέδια που εγκρίνονται από το Κογκρέσο, που αποτελεί το νομοθετικό σώμα της ομοσπονδιακής κυβέρνησης των ΗΠΑ, ενώ οι κανονισμοί εκδίδονται από άλλα εκτελεστικά τμήματα και υπηρεσίες. Οι νόμοι θεσπίζουν απαιτήσεις ή απαγορεύσεις ενώ οι κανονισμοί διευκρινίζουν και θέτουν τα πλαίσια εφαρμογής και επιλογής των προηγούμενων. Καθώς λοιπόν οι κανονισμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης ισχύουν για όλα τα κράτη μέλη, οι ομοσπονδιακοί κανονισμοί συνυπάρχουν με τους πολιτειακούς και αρκετές φορές διαφέρουν σε αυστηρότητα¹¹.

⁹Συμβούλιο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Συνήθης Νομοθετική Διαδικασία.

<https://www.consilium.europa.eu/el/council-eu/decision-making/ordinary-legislative-procedure/>

¹⁰ Ευρωπαϊκή Ένωση. Είδη θεσμικών και λοιπών οργάνων και οργανισμών. https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/types-institutions-and-bodies_el
https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/types-institutions-and-bodies_el

Όσον αφορά την περιβαλλοντολογική πολιτική, που σχετίζεται σε μεγάλο βαθμό με την προώθηση του πράσινου υδρογόνου και των τεχνολογιών που το εκμεταλλεύονται, παρατηρούνται αρκετές διαφορές. Οι ομοσπονδιακοί νόμοι και κανονισμοί λειτουργούν ως πρότυπο, θέτοντας τις ελάχιστες απαιτήσεις της πολιτικής. Οι εκάστοτε πολιτείες έχουν την δυνατότητα να υιοθετήσουν, αν επιθυμούν, πιο αυστηρούς κανόνες και νόμους¹¹. Η έννοια του συνεταρικού φεντεραλισμού συνιστά μια κατευθυντήρια αρχή όπου η ομοσπονδιακή κυβέρνηση θέτει τα πλαίσια, ώστε, οι νόμοι και κανονισμοί των πολιτειών να είναι τουλάχιστον εξίσου αυστηροί με τους ομοσπονδιακούς. Αντίθετα, οι περιβαλλοντολογική πολιτική στην Ένωση χωρίζεται σε εθνικό και ευρωπαϊκό επίπεδο. Τα κράτη μέλη ενθαρρύνονται να υιοθετούν εθνικούς στόχους, σύμφωνα με αυτά που ορίζουν οι Οδηγίες της Επιτροπής, έχοντας την δυνατότητα επιλογής των μέσων για την επίτευξή τους (R. Daniel Kelemen, 2016).

Παράλληλα, οι θέσεις για το περιβάλλον της Ευρωπαϊκής Ένωσης και των ΗΠΑ στην διεθνή πολιτική σκηνή, αντικατοπτρίζουν διαφορετικές φιλοσοφίες. Οι ΗΠΑ τα τελευταία χρόνια έχουν αρνηθεί την επικύρωση σημαντικών περιβαλλοντολογικών συνθηκών, όπως το Πρωτόκολλο του Κιότο, με σκοπό την προστασία του εμπορίου και της οικονομίας. Αντίθετα, η Ένωση πρωτοστατεί και υποστηρίζει επανειλημμένα σημαντικές περιβαλλοντολογικές πρωτοβουλίες, προβαίνοντας αρκετές φορές σε θέσπιση αυστηρότερων μέτρων και μονομερών ενεργειών, όπως το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπής, με σκοπό την επικύρωση των απαιτούμενων στόχων (R. Daniel Kelemen, 2016).

Τέλος, σχετικά με την αντιμετώπιση του υδρογόνου, ενώ καμία από τις δυο οικονομίες δεν έχει ενιαίο και ολοκληρωμένο πλαίσιο, διακρίνονται διαφορετικές προσεγγίσεις για την ανάπτυξή του. Η Ευρωπαϊκή Ένωση, αλλά και κάποιες χώρες μέλη, πιέζει για την ανάπτυξη ανανεώσιμου υδρογόνου ενώ προτείνει πολύ πιο αυστηρό ρυθμιστικό πλαίσιο που εστιάζει σε μια ευρεία στρατηγική πολιτική. Από την άλλη, οι ΗΠΑ στοχεύουν στην παραγωγή υδρογόνου από πυρηνική ενέργεια με ιδιαίτερη σημασία στην ανάπτυξη της γραμμής παραγωγής και ανεφοδιασμού για την εφαρμογή στο τομέα της θερμότητας και του ηλεκτρισμού (Moura João, 2023).

1.4.4. Ενεργειακές Πολιτικές

Παρά την επιτακτικότητα του ζητήματος της κλιματικής κρίσης, η Ένωση δεν έχει αναπτύξει ουσιαστικά κάποιο ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο, ούτε έχει εφαρμόσει πολιτικές που να αναφέρονται συγκεκριμένα στο υδρογόνο και τις τεχνολογίες του, παρά μόνο στρατηγικές και αναφορές σε αυτά. Βέβαια, οι ποικίλες ενεργειακές πολιτικές που έχουν συνταχθεί και εφαρμοστεί ανά τα έτη πιθανόν να έχουν άμεσο αντίκτυπο στην ομαλή εισαγωγή και υιοθέτηση του υδρογόνου και των τεχνολογιών του. Ήδη από τις αρχές του 2000, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει θεσπίσει αρκετά μέτρα στο τομέα της ηλεκτροπαραγωγής με σημαντικότερα αυτά της ενεργειακής απόδοσης. Οι κανονισμοί ενεργειακής απόδοσης εισάγονται σε διάφορους τομείς, των επιμέρους οικονομιών, με σκοπό την ελαχιστοποίηση της ενεργειακής έντασης, δηλαδή της ποσότητας ενέργειας ανά μονάδα ΑΕΠ. Επομένως, δημιουργείτε εύφορο έδαφος για καινοτόμες τεχνολογίες υψηλής ενεργειακής απόδοσης, όπως οι κυψέλες υδρογόνου (Bleischwitz Raimund, 2010).

Στις αρχές του 2015, η Ευρωπαϊκή Ένωση ξεκίνησε μια πρωτοβουλία γνωστή ως Ενεργειακή Ένωση με στόχο την ίδρυση ενός ενιαίου και αποδοτικού ενεργειακού συστήματος για

¹¹ enhesa.com (2023). "Ποια είναι η διαφορά μεταξύ ενός κανονισμού των ΗΠΑ και μιας οδηγίας ή κανονισμού της ΕΕ.". enhesa.com.

εξασφάλιση οικονομικής, ασφαλής και βιώσιμης ενέργειας για τους ευρωπαίους πολίτες. Η παραπάνω πολιτική στηρίζεται σε πέντε βασικούς πυλώνες – στόχους που έχουν θέσει τα κράτη μέλη¹²:

- Την διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας, προωθώντας την ενεργειακή ασφάλεια. Ως εκ τούτου, υποδηλώνεται η ανάγκη για καινοτόμες προσεγγίσεις, με το υδρογόνο να αναδύεται ως καθοριστικό στοιχείο για τη μελλοντική ενεργειακή αναμόρφωση.
- Την διασφάλιση λειτουργίας ολοκληρωμένης εσωτερικής αγοράς ενέργειας, παρέχοντας το χώρο και το κίνητρο για την ανάπτυξη εκτεταμένων υποδομών και τεχνολογιών υδρογόνου που θα ενισχύσουν την οικονομία.
- Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης και απεξάρτηση από εισαγωγές ενέργειας με παράλληλη μείωση των εκπομπών, ωθώντας προς την κατεύθυνση των καθαρών τεχνολογιών, όπως του υδρογόνου, που αποτελούν βασικό συστατικό για μια βιώσιμη ενεργειακή παραγωγή.
- Την απαλλαγή από άνθρακα και μεταβίβαση σε οικονομία χαμηλών και μηδενικών εκπομπών. Έτσι, ενισχύεται η θέση των τεχνολογιών υδρογόνου ως καθοριστικών παραγόντων για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής.
- Τέλος, προώθηση της έρευνας, της τεχνολογίας χαμηλών εκπομπών άνθρακα και της καινοτομίας για ενεργειακή μετάβαση και βελτίωση της ανταγωνιστικότητας. Έτσι, ανοίγει ο δρόμος για ανάπτυξη προηγμένων ενεργειακών λύσεων, όπως το υδρογόνο, ενισχύοντας παράλληλα την ανταγωνιστικότητα στον ενεργειακό τομέα.

Τον Ιούνιο του 2019, εκδίδεται η Οδηγία 2019/944 σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και την τροποποίηση προηγούμενης Οδηγίας. Πιο αναλυτικά, στο άρθρο 2 του κειμένου δίνεται ο ορισμός της αποθήκευσης ενέργειας. Σύμφωνα με το παραπάνω ορισμό του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου, οι τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου, ως χημικοί μέθοδοι αποθήκευσης, δύναται να αναγνωριστούν ως κατάλληλες και διαθέσιμες τεχνολογίες αποθήκευσης¹³.

Το 2021 εισάγεται η δέσμη «Fit For 55» που αποσκοπεί στην ευθυγράμμιση όλων των στόχων για κλιματική ουδετερότητα. Αυτό ισχύει, ιδίως, για την Οδηγία που αφορά την Ενεργειακή Απόδοση, την Οδηγία για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπής (ΣΕΔΕ). Συγκεντρώνει τα κατάλληλα μέσα πολιτικής που έχουν την δυναμική να συμβάλλουν στην επίτευξη του στόχου μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 55% έως το 2030. Στο πλαίσιο αυτό, προβλέπεται η αναθεώρηση όλων των πράξεων της Ένωσης για το κλίμα, αναδεικνύοντας το υδρογόνο ως σημαντικό εκπρόσωπο της καθαρής και βιώσιμης ενέργειας¹⁴. Πιο αναλυτικά, περιλαμβάνονται πλήθος κανονισμών, προτάσεων αλλά και αναθεωρήσεων που πιθανόν να συμβάλλουν στην ανάπτυξη της ευρωπαϊκής υδροοικονομίας, όπως οι στόχοι των κρατών μελών για μείωση των εκπομπών, η εισαγωγή προτύπων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα για τα αυτοκίνητα και τα ημιφορτηγά, οι προτάσεις μείωσης των εκπομπών μεθανίου στον ενεργειακό τομέα, η εισαγωγή βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων, οι στόχοι για καύσιμα

¹² Συμβούλιο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ενεργειακή Ένωση, <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/energy-union/>

¹³ EUR-Lex. Οδηγία 2019/944, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX:32019L0944>

¹⁴ Συμβούλιο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Fit For 55, <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών για τη ναυτιλία και κυρίως ο στόχος για την ανάπτυξη υποδομών εναλλακτικών καυσίμων και η πρόταση αναθεώρησης της Οδηγίας για την Ενέργεια από Ανανεώσιμες Πηγές.

Τα πρακτικά των διαβουλεύσεων COM/2021/558¹⁵ για την ενεργειακή απόδοση, COM/2021/563¹⁶ για την φορολογία της ενέργειας αναφέρουν το ανανεώσιμο υδρογόνο θέτοντας βάσεις για την ευρύτερη αναγνώριση του στο ενεργειακό σύμπλεγμα. Παράλληλα, στην διαβούλευση COM/2021/562¹⁷ γίνεται αναφορά στην χρήση ανανεώσιμων καυσίμων στις θαλάσσιες μεταφορές, προωθώντας νέες αγορές αερίων όπως αυτή του υδρογόνου. Το κείμενο επικεντρώνεται κυρίως στην χρήση υδρογόνου στις θαλάσσιες μεταφορές και την αποθήκευσή του. Παρόλο που δεν γίνεται άμεση αναφορά σε τεχνολογίες που το αξιοποιούν, η εξάπλωση και υιοθέτησή του ως αέριο καύσιμο έχει ως επακόλουθο τις επενδύσεις στις δομές παραγωγής, επεξεργασίας, μεταφοράς και αποθήκευσής του, θέτοντας τα θεμέλια για περαιτέρω έρευνα, επενδύσεις και ανάπτυξη στις τεχνολογίες που το εκμεταλλεύονται (M. Latarjet, et al., 2023).

1.4.5. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Το υδρογόνο δύναται να χαρακτηριστεί βιώσιμο και ανανεώσιμο αν και μόνο αν οι ενεργειακές πηγές που χρησιμοποιούνται για τις ανάγκες της αντίστοιχης διαδικασίας παραγωγής είναι ανανεώσιμες και βιώσιμες. Μερικές από τις πιο διαδεδομένες βιομηχανικές διαδικασίες παραγωγής είναι αυτές της ηλεκτρόλυσης και της αναμόρφωσης αερίου¹⁸. Οι παραπάνω είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρες, επομένως, η διείσδυση ανανεώσιμων και βιώσιμων πηγών στο ευρωπαϊκό ενεργειακό μείγμα αποτελούν αναγκαία προϋπόθεση για την αιεφόρο χρήση του υδρογόνου και την προώθησή του, ως εργαλείο, για την επίτευξη των ενεργειακών στόχων. Συνεπώς, η ενίσχυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αναδεικνύεται ως σημαντική για την ανάπτυξη και αποτελεσματικότητα των τεχνολογιών υδρογόνου (Bleischwitz Raimund, 2010).

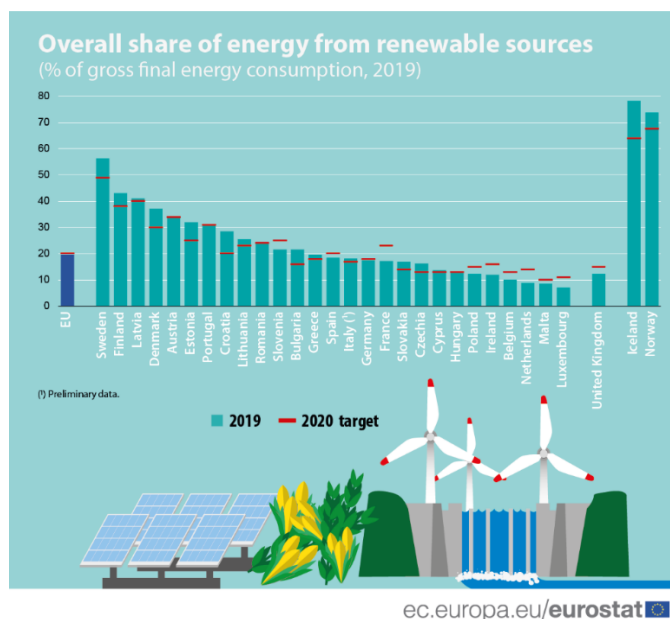
Η Ευρωπαϊκή Ένωση από την αρχή της δεκαετίας έχει θεσπίσει πολυάριθμα θεσμικά κείμενα, θέτοντας στόχους για το ποσοστό ενέργειας που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Ενδεικτικά, το 2001 ο στόχος τέθηκε στο 21% με την Οδηγία ΕΚ/77/2001. Αντίστοιχα, το 2009 με την Οδηγία ΕΚ/28/2009, γνωστή και ως «Renewable Energy Directive» ή «RED I», τέθηκαν νέοι δεσμευτικοί εθνικοί στόχοι συνεπείς με το 20 % έως το 2020. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται πως οι περισσότερες χώρες μέλη πέτυχαν το απαιτούμενο ποσοστό, καταδεικνύοντας πως υφίστανται τα θεμέλια για την στήριξη παραγωγής βιώσιμου υδρογόνου.

¹⁵ EUR-Lex. COM/2021/558 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0558>

¹⁶ EUR-Lex. COM/2021/563 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0563>

¹⁷ EUR-Lex. COM/2021/562 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0562>

¹⁸ Energy.gov. Hydrogen Fuel Basics, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-fuel-basics>



Εικόνα 3: Συνολικό Μεριδίο Ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές στην ΕΕ.
 Πηγή: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/product/-/asset_publisher/VWJkHuaYvLIN/content/id/12103800/pop_up

Η πολιτική ως προς τις ανανεώσιμες πηγές μετά την λήξη των παραπάνω Οδηγιών παρέμεινε φιλόδοξη. Το 2018 εισάγεται το πρόγραμμα «Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους»¹⁹, που αποτελεί ουσιαστικά μια σειρά πρωτοβουλιών και μέτρων. Παράλληλα, θέτει σε ισχύ την αναθεωρημένη Οδηγία 2008/2001 με σκοπό την διατήρηση της Ένωσης στην πρώτη θέση παγκοσμίως για το υψηλότερο ποσοστό ενσωμάτωσης ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό μείγμα. Βασικός στόχος αποτελεί η συνολική ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών της τάξης του 32%, μέχρι το τέλος της δεκαετίας. Επιπρόσθετα στην αναδιατύπωση της παραπάνω Οδηγίας, συγκεκριμένα στο Άρθρο 7, γίνεται ονομαστική αναφορά στο υδρογόνο ως αέριο που μπορεί να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές.

Τον Ιούλιο του 2021, στο πλαίσιο του προγράμματος «Fit for 55»²⁰, η Επιτροπή υπέβαλε μια πρόταση τροποποίησης της Οδηγίας ΕΚ/28/2009, «RED II», με σκοπό να συντονίσει τους στόχους της με τις νέες κλιματικές φιλοδοξίες. Στην τροποποιημένη Οδηγία αναφέρεται πως το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να παρέχει ανανεώσιμη ηλεκτρική ενέργεια σε εγκαταστάσεις ηλεκτρόλυσης, σκιαγραφώντας τις συνθήκες με τις οποίες το υδρογόνο μπορεί να αναγνωριστεί ως ανανεώσιμο καύσιμο μη βιολογικής προέλευσης²¹.

¹⁹ Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Καθαρή ενέργεια για όλους τους Ευρωπαίους – Ελευθερώνοντας το αναπτυξιακό δυναμικό της Ευρώπης,

https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/el/IP_16_4009

²⁰ European Council Council of the European Union. Fit for 55,

<https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

²¹ Fortum. Hydrogen legis-lation needs to acknowledge regional differ-ences,

<https://www.fortum.com/about-us/forthedoers-blog/hydrogen-legislation-needs-acknowledge-regional-differences>

Επιπλέον, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή πρότεινε την αύξηση του υποχρεωτικού στόχου για τις ανανεώσιμες πηγές στο ενεργειακό μείγμα της Ένωσης στο 40% έως το 2030 αλλά την υιοθέτηση ανανεώσιμων καυσίμων, όπως το υδρογόνο, στη βιομηχανία και τις μεταφορές²².

Ο Ρώσο-ουκρανικός πόλεμος που ξέσπασε τον Μάιο του 2021 προκάλεσε σημαντικές διαταραχές στο παγκόσμιο ενεργειακό σύστημα και αποκάλυψε την υπερβολική εξάρτηση των κρατών μελών από τις εισαγωγές αερίων και ορυκτών καυσίμων. Με σκοπό την ταχεία απεξάρτηση της Ένωσης από τα εισαγόμενα καύσιμα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε το σχέδιο «REPowerEU» τον Μάρτιο του 2022. Το σχέδιο προβλέπει την ταχύρρυθμη και αποτελεσματική απεξάρτηση από τα ρωσικά καύσιμα και την προώθηση καθαρών μορφών ενέργειας²³. Στα πλαίσια του σχεδίου, τον Μάιο του 2022, αναθεωρήθηκε και τροποποιήθηκε η ΕΚ/28/2009, γνωστή και ως «RED III». Μια από τις αναθεωρημένες προτάσεις αφορούσε την εισαγωγή ανανεώσιμου υδρογόνου και την αύξηση του στόχου των ανανεώσιμων πηγών στο 45% μέχρι το τέλος της δεκαετίας. Στα τέλη του ίδιου έτους, προτάθηκε μια δεύτερη τροποποίηση, «RED IV», με σκοπό την επιτάχυνση της εφαρμογής τεχνολογιών ανανεώσιμης ενέργειας. Σύμφωνα με την πρόταση, οι εγκαταστάσεις ανανεώσιμης ενέργειας θα θεωρούνται δημοσίου συμφέροντος, επιτυγχάνοντας την ταχύτερη έγκριση ανανεώσιμων έργων με ειδικές εξαιρέσεις από την περιβαλλοντική νομοθεσία της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Μέσω αυτής της πρωτοβουλίας, αναπτύσσεται ένα ευνοϊκό πλαίσιο για την εξάπλωση και την υιοθέτηση των τεχνολογιών υδρογόνου, δημιουργώντας παράλληλα ένα περιβάλλον που ευνοεί την έρευνα, την ανάπτυξη και την υιοθέτησή του (Ankica Kovač, 2021).

Η ενεργειακή και κλιματική κρίση των τελευταίων ετών ώθησαν την Επιτροπή να αναγνωρίσει την αναγκαιότητα να καθοριστούν άμεσα οι συνθήκες υπό τις οποίες το υδρογόνο μπορεί να θεωρηθεί «ανανεώσιμο». Σκοπός αυτής της ενέργειας είναι η άμεση κλιμάκωση παραγωγής και ανάπτυξης των τεχνολογιών του για την διασφάλισή των ευρωπαϊκών περιβαλλοντολογικών στόχων. Ως εκ τούτου, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε στις αρχές του 2023 δύο κατ' εξουσιοδότηση πράξεις, απαιτούμενες από την Οδηγία 2008/2001, με τις οποίες προσδιορίζονται οι απαιτήσεις, που είναι αναγκαίο να πληρούνται, ώστε να υφίσταται ανανεώσιμο υδρογόνο για την Ευρωπαϊκή Ένωση. Οι πράξεις αυτές δρουν συμπληρωματικά, ενισχύοντας και επεκτείνοντας το κανονιστικό πλαίσιο της Ένωσης για το υδρογόνο. Πιο αναλυτικά, η πρώτη από τις δυο πράξεις επεξηγεί υπό ποιες συνθήκες το υδρογόνο, αλλά και καύσιμα με βάση αυτό, θεωρούνται καύσιμα μη βιολογικής προέλευσης από ανανεώσιμες πηγές, δηλαδή αέρια και υγρά καύσιμα που προέρχονται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και όχι από οργανική ύλη ή βιομάζα. Επιπλέον, σημειώνεται πως η ενέργεια για την παραγωγή των παραπάνω είναι αναγκαίο να προέρχεται από «πρόσθετη», δηλαδή πλεονάζουσα, ηλεκτρική ενέργεια ανανεώσιμων πηγών που παράγεται ταυτόχρονα στον ίδιο χώρο. Η δεύτερη πράξη εστιάζει στις διαδικασίες και την μεθοδολογία υπολογισμού του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των καυσίμων. Οι κατ' εξουσιοδότηση πράξεις έχουν υποβληθεί ως προς έγκριση από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και εξετάζονται προς το παρών. Με την έγκρισή τους ενισχύεται το

²²European Council Council of the European Union .The Green Deal, <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>

²³ Συμβούλιο Ευρωπαϊκής Ένωσης. Το σχέδιο REPowerEU με απλά λόγια, <https://www.consilium.europa.eu/el/infographics/repowereu/>

θεσμικό πλαίσιο για το υδρογόνο και των τεχνολογιών του, ενισχύοντας παράλληλα μια αναδυόμενη αγορά καθώς ο χαρακτηρισμός του υδρογόνου ως «ανανεώσιμο» καύσιμο είναι καθοριστικής σημασίας για την ταχύτερη υιοθέτηση και ανάπτυξη²⁴.

1.4.6. Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπής

Η υιοθέτηση και χρήση καινοτόμων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας από βιώσιμο, αλλά και μη, υδρογόνο δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τις πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και από άλλους υφιστάμενους μηχανισμούς. Το Ευρωπαϊκό Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών (ΣΕΔΕ) θεσπίστηκε το 2005 και αποτελεί το κύριο ρυθμιστικό πλαίσιο για τις εκπομπές αερίων των βιομηχανικών μονάδων των χωρών μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και της Νορβηγίας, Ισλανδίας και Λιχτενστάιν. Η δημιουργία του ανταποκρίνεται στην υποχρέωση εκπλήρωσης των στόχων για την μείωση εκπομπής ρύπων που ευθύνονται και συμβάλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, όπως σημειώνεται στο Πρωτόκολλο του Κιότο που η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει επικυρώσει. Θεωρείται ότι αποτελεί το κεντρικό μηχανισμό της παγκόσμιας αγοράς άνθρακα καθώς σε αυτό υπάγονται όλες οι ευρωπαϊκές εγκαταστάσεις παραγωγής ενέργειας και η πλειοψηφία των βιομηχανικών τομέων²⁵.

Η αναμόρφωση φυσικού αερίου, που αποτελείται κυρίως από αέριο μεθανίου (CH₄), αποτελεί την πιο συνηθισμένη βιομηχανική διαδικασία παραγωγής υδρογόνου παρά το σημαντικό περιβαλλοντικό αντίκτυπό της¹⁸. Παράλληλα, η παραγωγή υδρογόνου εμπίπτει στο βιομηχανικό τομέα και, συνεπώς, υπόκειται στο ΣΕΔΕ. Επομένως, το ΣΕΔΕ ενδέχεται να αυξήσει το κόστος παραγωγής λόγω των υψηλών εκπομπών άνθρακα και ενδεχομένως να παρεμποδίσει την διείσδυση των τεχνολογιών υδρογόνου στο ενεργειακό μείγμα. Επιπλέον, η εφαρμογή του συστήματος στον ενεργειακό τομέα δημιουργεί αβεβαιότητα, αφού η αύξηση κόστους των συμβατικών διαδικασιών παραγωγής ενέργειας ενθαρρύνει την μεταστροφή σε πιο βιώσιμα συστήματα παραγωγής, όπως οι τεχνολογίες υδρογόνου και οι κυψέλες καυσίμων (Bleischwitz Raimund, 2010).

Ως εκ τούτου, φαίνεται πως το ΣΕΔΕ μπορεί να ενθαρρύνει την υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών, επιβραβεύοντας τις επιχειρήσεις που επενδύουν σε πράσινες τεχνολογίες. Ωστόσο, όσον αφορά την παραγωγή μη ανανεώσιμου υδρογόνου, η αύξηση του κόστους ενδέχεται να μειώσει την εξάπλωσή του, αποθαρρύνοντας την μετάβαση και τις μακροπρόθεσμες επενδύσεις. Επομένως, φαίνεται πως το Σύστημα διαδραματίζει διττό χαρακτήρα αφού ενδέχεται να αποτελέσει τροχοπέδη στην εξάπλωση του βιομηχανικά – συμβατικά παραγόμενου υδρογόνου σαν καύσιμο, ενώ παράλληλα ενθαρρύνει τις επενδύσεις σε καινοτόμες πράσινες τεχνολογίες, όπως οι κυψέλες καυσίμου, και την μεταστροφή σε βιώσιμες μεθόδους παραγωγής (Bleischwitz Raimund, 2010).

Επί του παρόντος, δεν υφίστανται κατευθυντήριες γραμμές για τις διαδικασίες παραγωγής υδρογόνου και των κυψελών καυσίμου στο ΣΕΔΕ. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στην διαβούλευση COM/2023/156²⁶, πρότεινε η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης να συμπεριληφθεί στα πλαίσια του συστήματος εμπορίας εκπομπών. Έτσι οι εγκαταστάσεις παραγωγής με χαμηλές

²⁴ Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Ερωτήσεις και απαντήσεις σχετικά με τις κατ' εξουσιοδότηση πράξεις της ΕΕ για το ανανεώσιμο υδρογόνο, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/el/QANDA_23_595

²⁵ EUR-Lex. Το σύστημα εμπορίας εκπομπών της ΕΕ (ΣΕΔΕ). <https://eur-lex.europa.eu/EL/legal-content/glossary/eu-emissions-trading-system-eu-ets.html>

²⁶ EUR-Lex. COM/2023/156 final, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM%3A2023%3A156%3AFIN>

εκπομπές άνθρακα δικαιούνται δωρεάν δικαιώματα, υποδηλώνοντας ενδιαφέρον για την μελλοντική ένταξη του υδρογόνου, των εγκαταστάσεων παραγωγής του και των τεχνολογιών του.

1.4.7. Άλλοι Παράγοντες

Η διάχυση του υδρογόνου στην ευρωπαϊκή αγορά επηρεάζεται και από άλλους παράγοντες όπως ρυθμιστικές πολιτικές, οι τάσεις στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, η περιφερειακή πολιτική της Ένωσης αλλά και άλλες υφιστάμενες τεχνολογίες.

1.4.7.1. Φορολογία

Επίπτωση στην ανάπτυξη και διάχυση του υδρογόνου στην ευρωπαϊκή οικονομία διαδραματίζουν και οι ρυθμιστικές πολιτικές, όπως αυτές της «πράσινης» φορολογίας. Η φορολογία της ενέργειας συνιστά αποτελεσματικό μέσο ρύθμισης, σε συνδυασμό με άλλα μέτρα, της ζήτησης και προσφοράς. Έχει τη δυνατότητα να υποστηρίξει ή να παρεμποδίσει την ανάπτυξη της αγοράς υδρογόνου και των τεχνολογιών του (Berkhout, 2004).

Η Οδηγία 2003/96/EK συνιστά το κύριο νομοθετικό κείμενο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την ενεργειακή φορολογία και την φορολογία των καυσίμων. Στην Οδηγία δεν παρατηρείται άμεση αναφορά στο υδρογόνο, ωστόσο, κάθε κράτος μέλος φαίνεται να έχει αναπτύξει δικό του φορολογικό σύστημα ως προς αυτό. Γενικά, στα κράτη που εφαρμόζεται φορολογία, υποδεικνύεται πως επιβάλλονται χαμηλοί συντελεστές, δεδομένου ότι παράγεται με ενεργοβόρες συμβατικές βιομηχανικές μεθόδους (Chernyavs'ka, 2006). Συνεπώς, το υδρογόνο πιθανόν να βρίσκεται σε μια ευνοϊκή φορολογικά θέση δημιουργώντας εύφορο έδαφος για την προώθησή του.

1.4.7.2. Ηλεκτρική Ενέργεια

Η ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί σημαντική ενεργειακή προϋπόθεση για την παραγωγή υδρογόνου, καθώς δεν έχουν υιοθετηθεί, ακόμα, σε μεγάλη κλίμακα τεχνικές που αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές. Συνεπώς, οι μεταβολές στην τιμή και την διάθεση της ηλεκτρικής ενέργειας έχουν άμεσο αντίκτυπο στις τιμές του υδρογόνου (Lena Maria Ringsgwandl, 2022). Οποιαδήποτε εξέλιξη, με ευνοϊκό πλαίσιο πολιτικής, στον τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να θεωρηθεί κίνητρο για τη χρήση υδρογόνου στην υφιστάμενη κατάσταση του συστήματος. Η Οδηγία 2019/944 περιέχει κανόνες και ρυθμιστικά πλαίσια, κυρίως, για τη χονδρική αγορά και λειτουργία του δικτύου. Το κείμενο εστιάζει σε θέματα όπως τα δικαιώματα των χρηστών, οδηγίες χρέωσης αλλά και την πρόσβαση σε δεδομένα. Χάρη στα σαφή πλαίσια που διέπουν την διαδικασία παραγωγής, προσφέρονται εγγυήσεις σε μια σημαντική ενεργειακή πηγή του τομέα παραγωγής υδρογόνου, διευκολύνοντας την σε έναν μικρό, αλλά όχι ασήμαντο, βαθμό και ενθαρρύνοντας τα μακροπρόθεσμα σχέδια ανάπτυξης (Bleischwitz Raimund, 2010).

1.4.7.3. Περιφερειακή Ευρωπαϊκή Πολιτική

Ένας ακόμα παράγοντας που πιθανόν να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη του υδρογόνου, αποτελεί η περιφερειακή ευρωπαϊκή πολιτική και πιο συγκεκριμένα οι επενδύσεις. Η Ευρωπαϊκή Ένωση διοχετεύει μεγάλα χρηματικά ποσά στις ευρωπαϊκές περιφέρειες με σημαντικό μερίδιο αυτών να καταλήγει στην καινοτομία. Ενδεικτικά, προγράμματα όπως το «Ορίζοντας 2020» χορήγησε 5,9 δισεκατομμύρια ευρώ για ενεργειακά έργα (Οδηγός Χρηματοδοτήσεων της ΕΕ 2014-2020)²⁷. Ως εκ τούτου, είναι

²⁷ Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (2017). "ΟΔΗΓΟΣ ΧΡΗΜΑΤΟΔΟΤΗΣΕΩΝ ΤΗΣ ΕΕ 2014-2020." https://www.europarl.europa.eu/EPRS/Funding_Guide_EL.pdf

πιθανόν να δημιουργούνται ευνοϊκοί όροι για την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών όπως αυτές του υδρογόνου (Riccardo Crescenzi, *The territorial dynamics of innovation: a Europe–United States comparative analysis*, 2007).

Ωστόσο, είναι εξαιρετικά δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν τα αποτελέσματα συναρτήσει των χρημάτων που χορηγήθηκαν, μέσω των παραπάνω πρωτοβουλιών, αφού οι δαπάνες δεν ορίζονται αυστηρώς από την Επιτροπή. Συγκεκριμένα, δαπάνες στην καινοτομία χαρακτηρίζονται αυτές στην έρευνα και τεχνολογική ανάπτυξη, στην επιχειρηματικότητα, το ανθρώπινο κεφάλαιο και στις ενέργειες επικοινωνίας και ενημέρωσης. Οι αυξημένες δαπάνες για καινοτομία μπορούν να θεωρηθούν θετικές όσον αφορά την ανάπτυξη του υδρογόνου, ωστόσο, είναι αμφίβολο αν τα χρήματα δαπανώνται με τον πιο αποτελεσματικό τρόπο. Παράλληλα, ένας από τους βασικούς πυλώνες του προγράμματος της περιφερειακής πολιτικής συνιστά τη βελτίωση του περιβάλλοντος μέσω σημαντικών επενδύσεων. Συνεπώς, είναι συνετή η υπόθεση πως κάποιοι πόροι κατευθύνονται στις τεχνολογικές καινοτομίες που αφορούν το υδρογόνο (Bleischwitz Raimund, 2010). Γενικά, η περιφερειακή πολιτική της Ένωσης, όπως έχει ασκηθεί στο παρελθόν, μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για την διάχυση των τεχνολογιών υδρογόνου σε όλες τις οικονομίες των κρατών μελών.

1.4.7.4. Βιοκαύσιμα

Τα βιοκαύσιμα αναφέρονται συχνά ως βιώσιμη εναλλακτική λύση, κυρίως στις μεταφορές, και επομένως, ενδέχεται να ανταγωνιστούν με το ανανεώσιμο υδρογόνο στα μελλοντικά μερίδια της ευρωπαϊκής ενεργειακής αγοράς (Bleischwitz Raimund, 2010).

Από τις αρχές του 2000, προωθούνται ως πιθανές λύσεις στις ενεργειακές περιβαλλοντικές πολιτικές και στρατηγικές της Ένωσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Οδηγία 2003/30/ΕΚ η οποία θέτει κοινό στόχο την αύξηση του μεριδίου των βιοκαυσίμων στις μεταφορές στο 5,75% μέχρι το 2010. Ακόμα, στα πλαίσια της «Κοινής Γεωργικής Πολιτικής»²⁸ καθιερώθηκαν τα οικονομικά κίνητρα για την παραγωγή τους. Επομένως, η λύση των βιοκαυσίμων εξετάζεται αρκετά χρόνια από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενώ, πλέον, αρκετές ενεργειακές Οδηγίες και στρατηγικές που εξετάζουν το υδρογόνο αναφέρονται και σε αυτά, όπως οι 2008/2001 και 2009/28/ΕΚ.

Παρόλο που οι εφαρμογές των βιοκαυσίμων εστιάζουν στις μεταφορές και όχι στην παραγωγή ενέργειας, η εξάπλωση τους ενδέχεται να καθυστερήσει την υιοθέτηση των τεχνολογιών υδρογόνου στον ενεργειακό τομέα. Η χρήση του υδρογόνου στις μεταφορές είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού δύναται να επιταχύνει την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης υδροοικονομίας (Gene D. Berry, 1996). Λόγω των παραπάνω, τα βιοκαύσιμα φαίνεται να ανταγωνίζονται το υδρογόνο στο τομέα των μεταφορών, έστω μεσοπρόθεσμα. Βέβαια, παρουσιάζονται αρκετές ανησυχίες για την ουσιαστική βιωσιμότητά τους και την ικανότητά τους για κάλυψη των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών. Επομένως, παρά τις προσπάθειες για προώθηση των βιοκαυσίμων, φαίνεται να μην έχουν τη δυναμική ώστε να καθυστερήσουν σημαντικά την πρόοδο των τεχνολογιών υδρογόνου (Bleischwitz Raimund, 2010).

1.4.8. Συμπεράσματα

Οι υφιστάμενες ενεργειακές πολιτικές φαίνεται να ευνοούν και να προωθούν τη χρήση υδρογόνου στον ενεργειακό τομέα. Το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών, οι

²⁸ Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Κοινή γεωργική πολιτική, <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/cap-introduction/>

προσπάθειες για προώθηση της ενεργειακής απόδοσης αλλά και η ενίσχυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχουν θετικό αντίκτυπο, αφού θέτουν τα πλαίσια για ανάπτυξη και καινοτομία στον τομέα της αειφόρου ενέργειας. Επιπλέον, το υδρογόνο ωφελείται σημαντικά από το φορολογικό καθεστώς στα περισσότερα κράτη μέλη, καθώς φορολογείται με χαμηλούς, σχετικά, συντελεστές ή και καθόλου. Από την άλλη, τα μέτρα της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας πιθανόν να μην συμβάλλουν στην προώθηση του υδρογόνου αλλά ενδέχεται να λειτουργήσουν ευνοϊκά στην είσοδο των κυψελών καυσίμου στην ενεργειακή αγορά.

Ολοκληρώνοντας, η περιφερειακή πολιτική για την προώθηση βιώσιμων τεχνολογιών και υποδομών δίνει την εντύπωση, εκ πρώτης όψευς, πως αποτελεί δυναμικό ισχυρό μέσο για την εξάπλωση του υδρογόνου στον ενεργειακό τομέα. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην χρηματοδότηση για ανάπτυξη υποδομών και έρευνας. Ωστόσο, δεν είναι γνωστό αν η περιφερειακή χρηματοδότηση αξιοποιείται πλήρως. Επομένως, λόγω της αδυναμίας αξιολόγησης και ποσοτικοποίησης των αποτελεσμάτων τα προηγούμενα έτη, η περιφερειακή χρηματοδότηση πιθανόν να παρουσιάσει μικτά αποτελέσματα.

1.5. Γερμανία

1.5.1. Εισαγωγή

Η Γερμανία αναδεικνύεται ως μια από τις πιο αναπτυγμένες οικονομίες στην Ευρώπη παρουσιάζοντας έντονη βιομηχανική και εμπορική δραστηριότητα. Η έντονη αυτή δραστηριότητα έχει ως επακόλουθο προκλήσεις όσον αφορά τους ρύπους. Ωστόσο, η γερμανική κυβέρνηση είναι γνωστή για τις περιβαλλοντικές δράσεις και πρωτοβουλίες. Ανά τα έτη, έχουν υιοθετηθεί αυστηρά πρότυπα περιβαλλοντικής προστασίας, ενώ έχουν προωθηθεί πρωτοποριακές ενέργειες για τη βιωσιμότητα. Στο επίκεντρο αυτών των προσπαθειών σημαντική δυναμική αποκτά το υδρογόνο και οι τεχνολογίες του²⁹.

Η Γερμανία, ως πρωτοπόρος σε περιβαλλοντικά ζητήματα, εξετάζει την βιωσιμότητα των ενεργειακών λύσεων που προσφέρει το υδρογόνο. Ως εκ τούτου, μέσω νόμων και ρυθμίσεων, το υδρογόνο διαδραματίζει ολοένα και πιο κομβικό ρόλο στην προσπάθεια για ενεργειακή μετάβαση. Αυτό αντικατοπτρίζεται από την δρομολόγηση πολυάριθμων έργων για την εγκαθίδρυση και ανάπτυξη της υδροοικονομίας, όπως το GET H2, που περιλαμβάνει έργα για την παραγωγή και μεταφορά πράσινου υδρογόνου ή το H2 Mobility, που στοχεύει στην δημιουργία ενός εθνικού δικτύου σταθμών ανεφοδιασμού²⁹. Συνεπώς, ο μετασχηματισμός του γερμανικού ενεργειακού συστήματος αναμένεται με την εκτεταμένη χρήση πράσινου υδρογόνου σε αρκετούς τομείς, όπως αυτός της ενέργειας (Lena Maria Ringsgwandl, 2022).

Το ισχύον νομοθετικό πλαίσιο φαίνεται ατελές, ενώ είναι ασαφές αν δύναται να υποστηρίξει την μετάβαση. Μέχρι πρόσφατα, η έλλειψη νομικών και κανονιστικών πλαισίων σε συνδυασμό με τα υψηλά κόστη τεχνολογίας λειτουργούσαν ως τροχοπέδη στην εξέλιξη του τομέα. Παρόλα αυτά, το 2021, το ενεργειακό και περιβαλλοντικό θεσμικό πλαίσιο επανεξετάστηκε και αναθεωρήθηκε. Πλέον, γίνεται αναφορά στο υδρογόνο και τις τεχνολογίες του, παρέχοντας μεγαλύτερη αξιοπιστία και αισιοδοξία για την ανάπτυξή του (Lena Maria Ringsgwandl, 2022).

²⁹ F. Burchard. HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN GERMANY, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/germany>

1.5.2. Νομοθετική Διαδικασία

Η θέσπιση νόμων σε μια κοινοβουλευτική δημοκρατία, όπως της Γερμανίας, είναι ευθύνη του νομοθετικού κλάδου. Η νομοθετική διαδικασία συνήθως ξεκινά από την Ομοσπονδιακή Κυβέρνηση (Bundesregierung). Στην συνέχεια, οι ομοσπονδιακοί νόμοι ψηφίζονται και εγκρίνονται από το Ομοσπονδιακό Κοινοβούλιο (Bundestag). Παράλληλα το Ομοσπονδιακό Συμβούλιο (Bundesrat), που εκπροσωπεί τις 16 ομοσπονδιακές κυβερνήσεις των κρατών, συμμετέχει στην διαδικασία αν απαιτείται συνταγματικά η συναίνεσή του για να μετατραπεί ο νόμος σε νομοσχέδιο³⁰. Σε πολλές περιπτώσεις η συμμετοχή του είναι αναγκαία, όπως σε σημαντικές ενεργειακές και περιβαλλοντικές πολιτικές. Η συνεργασία του Ομοσπονδιακού Κοινοβουλίου και Συμβουλίου εξασφαλίζει ότι οι αποφάσεις λαμβάνουν υπόψη τα συμφέροντα των ομοσπονδιακών κρατών. Η ώθηση για τις περισσότερες νέες ή μεταρρυθμισμένες νομοθεσίες προέρχεται από κυβερνητικά προγράμματα στην αρχή μιας νομοθετικής περιόδου ή από εξελίξεις και αλλαγές σε αντίστοιχους Ευρωπαϊκούς κανονισμούς³¹.

Σε μεγάλο βαθμό, το γερμανικό θεσμικό πλαίσιο για την ενέργεια διαμορφώνεται κυρίως από το ευρωπαϊκό δίκαιο. Το ευρωπαϊκό ενεργειακό δίκαιο διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της γερμανικής νομοθεσίας και στην ερμηνεία του γερμανικού ενεργειακού νόμου. Ενώ οι Οδηγίες και οι κανονισμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχουν καθοριστική σημασία για τη θέσπιση βασικών κανόνων για μια ενιαία ευρωπαϊκή αγορά ενέργειας, είναι επιπλέον κρίσιμα για την επίτευξη ενιαίας ρύθμισης μεταξύ των κρατών μελών. Οι Οδηγίες είναι δεσμευτικές και οφείλουν να ενσωματώνονται στο εθνικό δίκαιο, ωστόσο δεσμεύουν μόνο ως προς το αποτέλεσμα. Αντίθετα, οι κανονισμοί έχουν άμεση ισχύ για τα κράτη μέλη και τους πολίτες, όπως και οι εθνικοί νόμοι (Lena Maria Ringsgwandl, 2022).

1.5.3. Θεσμικό Πλαίσιο για το Υδρογόνο στην Γερμανία

Κατόπιν πρόσφατων τροποποιήσεων στην Γερμανική νομοθεσία, το 2021, το υδρογόνο αναφέρεται σε αρκετά διαφορετικά νομοθετικά κείμενα. Οι δυο βασικοί ενεργειακοί νόμοι που αποσκοπούν την ανάπτυξη του πράσινου υδρογόνου είναι ο νόμος για την Βιομηχανική Ενέργεια (EnWG) και ο νόμος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (EEG 2023)³². Ο νόμος EnWG ανταποκρίνεται στην Οδηγία 2003/54/ΕΚ, του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, σχετικά με τους κοινούς κανόνες για την εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας³³. Περιέχει ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για μια λειτουργική και ανταγωνιστική ενεργειακή αγορά, ενώ καλύπτει ευρεία θεματολογία όπως η πρόσβαση στο δίκτυο, είτε ηλεκτρικό είτε αερίου, τον ρόλο των ρυθμιστικών αρχών και αρκετά ακόμα σημαντικά θέματα που επηρεάζουν άμεσα τους φορείς εκμετάλλευσης υδρογόνου και επενδυτές. Από την άλλη, ο νόμος EEG 2023 επικεντρώνεται στην προώθηση της ηλεκτρικής ενέργειας από

³⁰ Federal Ministry of the Interior and Community. Legislation, <https://www.bmi.bund.de/EN/topics/constitution/legislation/legislation-node.html>

³¹ CLEAN ENERGY WIRE. From ideas to laws – how Energiewende policy is shaped, <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/ideas-laws-how-energiewende-policy-shaped>

³²Die Bundesregierung. We're tripling the speed of the expansion of renewable energies, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/amendment-of-the-renewables-act-2060448>

³³Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Rückenwind für den Energiewechsel (Translated), <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Dossier/eeg.html>

ανανεώσιμες πηγές, ενώ παράλληλα καθιερώνει διάφορους μηχανισμούς υποστήριξης και παροχής κινήτρων με σκοπό την ενεργειακή μετάβαση³³ (Lena Maria Ringsgwandl, 2022).

1.5.4.1. Ενεργειακή Πολιτική: Ενέργεια στην Βιομηχανία - EnWG

Ο τροποποιημένος νόμος EnWG εγκρίθηκε το 2021, ενισχύοντας σημαντικά το ατελές θεσμικό πλαίσιο για το υδρογόνο στο γερμανικό ενεργειακό σύστημα. Στο 14^ο άρθρο της 3^{ης} ενότητας του κειμένου, το υδρογόνο αναφέρεται ως τύπος ενέργειας με την προϋπόθεση ότι χρησιμοποιείται για παροχή ενέργειας απευθείας στο δίκτυο. Παράλληλα, με τροποποίηση των ορισμών, το υδρογόνο εμπίπτει στους ορισμούς του φυσικού αερίου και του βιοαερίου, υπό την προϋπόθεση ότι παράγεται από ηλεκτρόλυση και διοχετεύεται στο δίκτυο φυσικού αερίου, διευκολύνοντας τη νομική του ρύθμιση και συνεπώς την παραγωγή του (Lena Maria Ringsgwandl, 2022).

Η ενεργειακή αγορά της Γερμανίας υπόκειται σε αυστηρό έλεγχο. Υφίστανται κανονισμοί και δεσμεύσεις για την αγοροπωλησία ενέργειας, τη λειτουργία και ιδιοκτησία εγκαταστάσεων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και δικτύων. Συνεπώς, οι κανονισμοί που αφορούν τις εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου είναι κομβικής σημασίας για τους φορείς εκμετάλλευσης, τις μελλοντικές επενδύσεις και την τεχνολογική ανάπτυξη του τομέα. Οι κανονισμοί των ενότητων 6 έως 10 τονίζουν τον διαχωρισμό της λειτουργίας των δικτύων, ηλεκτρισμού και αερίου, από τις εγκαταστάσεις παραγωγής και παροχής ενέργειας (Lena Maria Ringsgwandl, 2022). Απόρροια αυτών των κανονισμών είναι το ερώτημα της κατάταξης των εγκαταστάσεων παραγωγής υδρογόνου σε κάποια νομικά ορισμένη οντότητα αλλά και το πώς επηρεάζονται από αυτή.

Στην 3^η ενότητα, δίνεται ο ορισμός για τις εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας. Πιο αναλυτικά, ορίζονται ως «οι εγκαταστάσεις που καταναλώνουν ηλεκτρική ενέργεια για ηλεκτρική, χημική, μηχανική ή φυσική διακοπτόμενη αποθήκευση και την αναπαράγουν ως ηλεκτρική ενέργεια ή σε άλλη μορφή ενέργειας». Ως εκ τούτου, η παραπάνω διατύπωση περιλαμβάνει τις μονάδες «Power-to-Gas» για την παραγωγή ανανεώσιμου υδρογόνου. Οι εγκαταστάσεις «Power-to-Gas» είναι συστήματα που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε καύσιμο αέριο, όπως ηλεκτρολυτικές εγκαταστάσεις³⁴. Στην συνέχεια, στην 7^η και 8^η ενότητα σημειώνεται ότι οι φορείς εκμετάλλευσης δεν επιτρέπεται να κατέχουν εγκαταστάσεις αποθήκευσης ενέργειας και συνεπώς δεν τους επιτρέπεται η λειτουργία ηλεκτρολυτών. Ωστόσο, στην ενότητα 11, σημειώνονται κάποιες εξαιρέσεις όσον αφορά την ιδιοκτησία ηλεκτρολυτών από φορείς εκμετάλλευσης δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συνθήκες ορίζονται από τα άρθρα 11a και 11b και αφορούν αποκλειστικά εγκαταστάσεις αποθήκευσης που έχουν την δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας³⁵. Αυτό συνεπάγεται πως οι φορείς εκμετάλλευσης του δικτύου μπορούν να έχουν ηλεκτρολύτες αν και μόνο αν, στην συνέχεια, χρησιμοποιούν το υδρογόνο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, πιθανώς ενισχύοντας τη συμμετοχή των εγκαταστάσεων παραγωγής υδρογόνου στην αγορά ενέργειας. Επιπρόσθετα, ο διαχωρισμός των φορέων εκμετάλλευσης από την ιδιοκτησία και χρήση ηλεκτρολυτών, πιθανόν να έχει θετικό αντίκτυπο στην εκκίνηση της αγοράς υδρογόνου (Lena Maria Ringsgwandl, 2022).

³⁴ScienceDirect. Power-to-Gas, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/power-to-gas>

³⁵ Energiewirtschaftsgesetz - EnWG (Translated), https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/BJNR197010005.html

Η χρήση του γερμανικού δικτύου ενέργειας συνοδεύεται από επιβολή τελών στους χρήστες. Η γενική αυτή υποχρέωση αναφέρεται στην ενότητα 21 του EnWG. Η χρήση του δικτύου είτε για παροχή είτε για τροφοδοσία ηλεκτρικού ρεύματος ακολουθείται από την υποχρέωση καταβολής τελών³⁶. Η οικονομική αυτή επιβάρυνση δύναται να λειτουργήσει αρνητικά στην αγορά υδρογόνου και στην περαιτέρω ανάπτυξη των τεχνολογιών του. Ωστόσο, με την πρόσφατη τροποποίηση του νόμου και συγκεκριμένα με την προσθήκη της ενότητας 118, εξαιρούνται όλες οι μονάδες ηλεκτρόλυσης που κατασκευάστηκαν μετά το 2008 και ξεκίνησαν να λειτουργούν στις ή μετά τις 4 Αυγούστου 2011.

Η ενότητα 118 καλύπτει μόνο τα τέλη παροχής ενώ δεν περιλαμβάνει εξαιρέσεις από τα τέλη τροφοδοσίας του δικτύου. Αυτά καλύπτονται από το Διάταγμα Ρύθμισης Δικτύων Ηλεκτρικής Ενέργειας³⁷. Ως εκ τούτου, με τις πρόσφατες τροποποιήσεις, οι εγκαταστάσεις παραγωγής υδρογόνου και ενέργειας από υδρογόνο, απαλλάσσονται από την οικονομική επιβάρυνση των τελών δικτύου ενθαρρύνοντας την δυναμική εκκίνηση της αγοράς (Lena Maria Ringsgwandl, 2022).

Το δίκτυο αγωγών υδρογόνου στη Γερμανία βρίσκεται ακόμα σε πρώιμη κατάσταση³⁸. Ωστόσο, η γερμανική κυβέρνηση στοχεύει για ταχεία ανάπτυξή του, αυξάνοντας την ανάγκη για ολοκληρωμένο νομοθετικό πλαίσιο²⁹. Με την τροποποίηση του νόμου EnWG, εισήχθησαν νέες διατάξεις για τη νομική κάλυψη του υφιστάμενου δικτύου αλλά και για τη μελλοντική δημιουργία υποδομών. Αρχικά, σύμφωνα με την ενότητα 112b, οι διατάξεις που αφορούν το δίκτυο αποτελούν μεταβατική λύση μέχρι να δημιουργηθεί η αντίστοιχη ευρωπαϊκή νομοθεσία. Ο ορισμός του δικτύου δίνεται από το άρθρο 39a, πλαισιώνοντας νομικά τις απαιτούμενες εγκαταστάσεις για την ανάπτυξη της υδροοικονομίας. Όσον αφορά τους φορείς εκμετάλλευσης των δικτύων, στο άρθρο 28j, δίνεται η δυνατότητα επιλογής, αν επιθυμούν να υπόκεινται στις νέες ρυθμίσεις που αφορούν τα δίκτυα υδρογόνου. Η απόφαση αυτή, λειτουργεί ως μεταβατική λύση για τους υφιστάμενους φορείς εκμετάλλευσης των δικτύων φυσικού αερίου, καθώς με την μεταβατική διάταξη 113a αποσκοπείτε η διευκόλυνση της μετατροπής των αγωγών φυσικού αερίου σε δίκτυα υδρογόνου. Τέλος στο άρθρο 28o, προβλέπονται κανόνες για την οικονομική ρύθμιση των δικτύων, που σε μεγάλο βαθμό συμφωνούν με την υφιστάμενη νομική κατάσταση³⁹.

Τελικά, παρατηρείται ότι με την τροποποίηση του EnWG συμπεριλήφθηκαν αρκετοί νέοι κανόνες που αφορούν το υδρογόνο. Παρόλο που η νομοθεσία είναι πρόσφατη και δεν είναι ακόμα διακριτά τα αποτελέσματά της, το γεγονός ύπαρξης νομικού πλαισίου συνιστά θετική εξέλιξη για κάθε εταιρία ή φορέα που σχεδιάζει να επενδύσει στην παραγωγή υδρογόνου (Lena Maria Ringsgwandl, 2022).

³⁶ Energiewirtschaftsgesetz - EnWG (Translated), https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/BJNR197010005.html

³⁷ Stromnetz Berlin. Stromnetzentgeltverordnung – StromNEV, <https://www.stromnetz.berlin/en/about-us/disclosure-requirements/stromnev/>

³⁸ Dr. Friedrich von Burchard. HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN GERMANY, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/germany>

³⁹ Energiewirtschaftsgesetz - EnWG (Translated), https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/BJNR197010005.html

1.5.5.1. Ενεργειακή Πολιτική: Νόμος για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας – EEG 2023

Προτεραιότητα του νόμου EEG 2023 αποτελεί η ταχύτερη και πιο αποδοτική ενσωμάτωση της ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές στο γερμανικό ενεργειακό δίκτυο. Το παραπάνω νομοθετικό κείμενο αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες νομοθετικές τροποποιήσεις στον ενεργειακό τομέα. Εισήχθησαν πλήθος μέτρων στήριξης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ώστε να αυξηθεί το μερίδιο κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, που καλύπτεται από αυτές, τουλάχιστον κατά 80% έως το 2030⁴⁰.

Πριν την τροποποίηση του EEG, με την εισαγωγή του «Πασχαλινού πακέτου» της Ομοσπονδιακής Κυβέρνησης το 2022, κομβικός μηχανισμός στήριξης των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (στα πλαίσια του EEG 2021) συντελούσε η οικονομική επιβάρυνση που επιβαλλόταν, ως πρόσθετο τέλος, στους καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Η πρακτική αυτή, δημιούργησε αμφιβολίες όσον αφορά την προώθηση παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου, καθώς επιβαρύνονταν οικονομικά οι εγκαταστάσεις ηλεκτρόλυσης. Ωστόσο, με την εφαρμογή του EEG 2023 καταργείται οριστικά η εισφορά, απελευθερώνοντας οικονομικά τις εγκαταστάσεις ηλεκτρόλυσης και δημιουργώντας ασφάλεια για μελλοντικές επενδύσεις.

Οι ανανεώσιμες πηγές αποτελούν το κεντρικό πυλώνα της ενεργειακής μετάβασης που προωθείται από το τροποποιημένο νομοσχέδιο. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην ηλιακή αλλά και στην παράκτια και χερσαία αιολική ενέργεια⁴¹. Ωστόσο, δεν παραλείπονται μέτρα προώθησης για το υδρογόνο και την παραγωγή ενέργειας από αυτό. Αρχικά, προβλέπεται οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, από ανανεώσιμο υδρογόνο, να συμμετέχουν σε δημοπρασίες, προσθέτοντας ένα επιπλέον τμήμα υποστήριξης για το υδρογόνο (Lena Maria Ringsgwandl, 2022). Παράλληλα, στα πλαίσια του νόμου προβλέπεται η θέσπιση διαγωνισμών καινοτομίας, παραχωρώντας την δυνατότητα στην Ομοσπονδιακή Κυβέρνηση να παρέχει χρηματοδότηση για την προώθηση των τεχνολογιών που εκμεταλλεύονται το υδρογόνο για την παραγωγή και αποθήκευση ενέργειας⁴². Πιο αναλυτικά, στην ενότητα 39ο προβλέπεται η διοργάνωση διαγωνισμών καινοτομίας για τον συνδυασμό ανανεώσιμων πηγών με τοπική αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας βασισμένη σε υδρογόνο για τη σταθεροποίηση της παραγωγής από ανανεώσιμες πηγές⁴³. Επιπλέον, στην ενότητα 39ρ, προβλέπονται διαγωνισμοί καινοτομίας για τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν υδρογόνο⁴⁴, προωθώντας τη χρήση ανανεώσιμου υδρογόνου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

⁴⁰ Die Bundesregierung. We're tripling the speed of the expansion of renewable energies, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/amendment-of-the-renewables-act-2060448>

⁴¹Die Bundesregierung. We're tripling the speed of the expansion of renewable energies, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/amendment-of-the-renewables-act-2060448>

⁴²Die Bundesregierung. We're tripling the speed of the expansion of renewable energies, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/amendment-of-the-renewables-act-2060448>

⁴³ Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Translated), https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/index.html

⁴⁴ Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien (Translated), https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/index.html

1.5.6. Θεσμικό Πλαίσιο για τις Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου στην Γερμανία

Οι κυψέλες καυσίμου υδρογόνου αποτελούν συσκευές που μετατρέπουν το υδρογόνου και οξυγόνου σε νερό, παράγοντας ταυτόχρονα ηλεκτρισμό και θερμότητα. Αναδεικνύονται ως τεχνολογία που θα πρωταγωνιστήσει στον τομέα της ενέργειας και των μετακινήσεων. Με τη συνεχώς αυξανόμενη εισαγωγή του υδρογόνου στην ενεργειακή αγορά, οι κυψέλες καυσίμου εκπροσωπούν μια προηγμένη και βιώσιμη λύση. Η τεχνολογία αυτή επιτρέπει την παραγωγή ενέργειας με χαμηλές έως μηδενικές εκπομπές, αξιοποιώντας το υδρογόνο ως καθαρό καύσιμο. Καθώς η ανάγκη για αειφόρο ενέργεια αυξάνεται, η ανάπτυξη και η υιοθέτηση των κυψελών καυσίμου αναμένεται να ενισχυθεί, οδηγώντας σε βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση (Sam Fankhauser F. J., 2017).

Όσον αφορά τις κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, δεν υφίσταται ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αρκετές πολιτικές που στηρίζουν την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Σημαντική πρωτοβουλία αποτελεί η εθνική πολιτική Ενεργειακή Αντίληψη (Energy Concept), που προωθεί την μετάβαση σε ανανεώσιμη ενέργεια, στηρίζοντας σημαντικά τις κυψέλες υδρογόνου⁴⁵. Η συγκεκριμένη πολιτική, δεν έχει νομικό περιεχόμενο, ωστόσο, παρέχει καθοδήγηση για την ιεράρχηση των αποφάσεων, προσδιορίζοντας τις κυψέλες ανανεώσιμου υδρογόνου ως σημαντικό μέσο για την ενεργειακή μετάβαση.

Αναφορά στις κυψέλες υδρογόνου γίνεται και στην γερμανική νομοθεσία, συγκεκριμένα, στο νόμο για την Ηλεκτρική Μετακίνηση (Electric Mobility Act 2015)⁴⁶. Η παραπάνω νομοθεσία επιτρέπει την οικονομική υποστήριξη της αγοράς ηλεκτρικών οχημάτων από την κυβέρνηση. Παράλληλα, με την θέσπιση της Εθνικής Στρατηγικής για το Υδρογόνο, ομαδοποιούνται οι στόχοι και καθορίζονται οι κατευθυντήριες γραμμές για την υιοθέτηση του υδρογόνου και των τεχνολογιών του, στηρίζοντας οικονομικά την ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψελών⁴⁷. Μέσω των παραπάνω πολιτικών, η τεχνολογία γίνεται γνωστή στο κοινό διευκολύνοντας την κοινωνική αποδοχή και τελικά υιοθέτηση της (Sam Fankhauser F. J., 2017). Συνεπώς, παρόλο που δεν υφίσταται ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο, φαίνεται πως η γερμανική κυβέρνηση υποστηρίζει την βιομηχανία κυψελών υδρογόνου τόσο μέσω νομοθεσίας αλλά και εθνικών πολιτικών (Azni Muhammad Asyraf, 2021).

1.5.7. Συμπεράσματα

Η Γερμανία, ως πρωτοπόρος στις περιβαλλοντικές δράσεις, αντιμετωπίζει το υδρογόνο ως πιθανή λύση για την καταπολέμηση της εγχώριας ρύπανσης αλλά και ως μέσο για την ανταπόκριση στις ευρωπαϊκές περιβαλλοντικές της υποχρεώσεις. Κατά συνέπεια, το υδρογόνο συμπεριλήφθηκε στην γερμανική νομοθεσία ύστερα από πρόσφατες τροποποιήσεις. Συγκεκριμένα, με την τροποποίηση του Νόμου για τη Βιομηχανική Ενέργεια το 2021, συμπεριλήφθηκαν αρκετοί νέοι κανονισμοί που αποσκοπούν στη νομική ρύθμιση

⁴⁵ Germany Trade and Invest. Germany's Energy Concept, <https://www.gtai.de/en/invest/industries/healthcare-market-germany/germany-s-energy-concept-105260>

⁴⁶ Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action. Regulatory environment and incentives for using electric vehicles and developing a charging infrastructure, <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Artikel/Industry/regulatory-environment-and-incentives-for-using-electric-vehicles.html>

⁴⁷ Press and Information Office of the Federal Government. Energy from climate-friendly gas, <https://www.bundesregierung.de/breg-en/news/hydrogen-technology-2204238>

τόσο του υδρογόνου όσο και των αντίστοιχων εγκαταστάσεων και δικτύων που το εκμεταλλεύονται.

Αντίστοιχα, η τροποποίηση του Νόμου για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας το 2023, προβλέπει την εισαγωγή αρκετών μέτρων στήριξης της βιομηχανίας υδρογόνου, όπως κρατικές επιχορηγήσεις και διαγωνισμούς καινοτομίας.

Τα τελευταία χρόνια, η γερμανική κυβέρνηση αναγνωρίζει τις κυψέλες καυσίμου ως μελλοντική τεχνολογία που δύναται να πρωταγωνιστήσει στον τομέα των μετακινήσεων και της ενέργειας. Ωστόσο, η προώθηση των κυψελών στηρίζεται κυρίως σε πολιτικές και προγράμματα έρευνας αφού δεν υφίσταται ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο. Συνεπώς, η γερμανική κυβέρνηση αναγνωρίζει τη δυναμική του υδρογόνου και των τεχνολογιών του, έχοντας προχωρήσει σε σημαντικές νομοθετικές μεταρρυθμίσεις, όμως υφίστανται αρκετές πτυχές που απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη του θεσμικού πλαισίου.

1.6. Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής

1.6.1. Εισαγωγή

Οι περιβαλλοντικές προκλήσεις, οι γεωπολιτικές εντάσεις αλλά και η διακοπή της παγκόσμιας εφοδιαστικής αλυσίδας κρίνουν ως επιτακτική ανάγκη την άμεση ενεργειακή μετάβαση των ανεπτυγμένων οικονομιών, αναδεικνύοντας το υδρογόνο ως αναπόσπαστο κομμάτι της ενεργειακής ανεξαρτησίας (Talus Kim, 2022). Οι Ηνωμένες Πολιτείες θεωρούνται από τους παγκόσμιους ηγέτες στον τομέα των τεχνολογιών υδρογόνου. Ήδη από τα τέλη του 1960, εμφανίζεται εκτεταμένη έρευνα και ανάπτυξη με αποκορύφωμα την χρήση κυψελών καυσίμου ως πηγές ενέργειας στη διαστημική αποστολή Apollo 11 (Lebrouhi B.E., 2022). Ωστόσο, μια ιστορική ανασκόπηση των ενεργειών για την προώθηση του υδρογόνου, αναδεικνύει έλλειψη συνοχής στις πρωτοβουλίες. Αυτό οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην διαμόρφωση των πολιτικών από την μονομερή βούληση των εκάστοτε προέδρων (Arman Avadikyan, 2015)⁴⁸. Χαρακτηριστικά, οι ΗΠΑ έχουν αποτύχει να ανταγωνιστούν ξένες κυβερνήσεις, όπως Κίνα και Γερμανία, στις επενδύσεις κεφαλαίου ενώ παράλληλα δεν επιτεύχθηκαν οι στόχοι των προηγούμενων στρατηγικών για το υδρογόνο (Talus Kim, 2022). Παρόλα αυτά, το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να συμβάλει ουσιαστικά στο ενεργειακό μείγμα της χώρας.

Η ανάπτυξη μιας υδροοικονομίας είναι ιδιαίτερα επωφελής αφού προσφέρει ευκαιρία απανθρακοποίησης αλλά και ενίσχυσης του οικονομικού τομέα. Επιπλέον, οι ΗΠΑ συγκαταλέγονται μεταξύ των μεγαλύτερων παραγωγών φυσικού αερίου, διαθέτοντας ταυτόχρονα σχετικά ανεπτυγμένο δίκτυο ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Κατ' επέκταση, υφίσταται τα μέσα για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου με χαμηλό κόστος (Lebrouhi B.E., 2022).

Η ρύθμιση του υδρογόνου παρουσιάζεται σε δυο επίπεδα, το ομοσπονδιακό και το πολιτειακό. Συνεπώς, είναι σύνηθες φαινόμενο οι πολιτείες να εφαρμόζουν μεμονωμένες στρατηγικές, όπως η πολιτεία της Καλιφόρνιας⁴⁹. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον διχασμό των στρατηγικών εμποδίζοντας την ταχεία ανάπτυξή τους. Παρά ταύτα, τα τελευταία χρόνια η αμερικάνικη κυβέρνηση έχει αναγνωρίσει το δυναμικό του υδρογόνου ως καύσιμο για την ενεργειακή μετάβαση, προωθώντας το μέσω επενδύσεων και θεσμικών ρυθμίσεων (Talus Kim, 2022).

1.6.2. Ομοσπονδιακή Νομοθετική Διαδικασία

Οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής είναι μια ομοσπονδιακή δημοκρατία αποτελούμενη από 50 πολιτείες. Η πολιτική εξουσία διακρίνεται στην κεντρική κυβέρνηση, τις κυβερνήσεις των πολιτειών αλλά και τις τοπικές κυβερνήσεις. Η νομοθετική εξουσία ανήκει στο Κογκρέσο που αποτελείται από 2 αίθουσες, το Συμβούλιο των Αντιπροσώπων (House of Representatives) και την Γερουσία (Senate)⁵⁰.

Η νομοθετική διαδικασία ξεκινά με την πρόταση νομοσχεδίου από οποιαδήποτε από τα δύο σώματα. Αφού εισαχθεί το νομοσχέδιο, εξετάζεται, τροποποιείται και ψηφίζεται. Μόλις ψηφιστεί και από τα δυο σώματα, εξετάζονται τυχόν διαφορές και εκδίδεται από κοινού το

⁴⁸ The partnership for a new generation of vehicles and the US DoE transportation fuel cells programme.

⁴⁹ Priscilla Brandt. The Emergence of Hydrogen Legal Frameworks in the Global Energy Transition: What can South Africa learn from the US and Germany, <https://sites.dundee.ac.uk/energyhubplus/wp-content/uploads/sites/195/2022/07/CAR-2022-Priscilla-Brandt.pdf>

τροποποιημένο νομοσχέδιο. Ύστερα, ο πρόεδρος ελέγχει το νομοσχέδιο και το εγκρίνει ή ασκεί βέτο⁵⁰.

Εκτός από την ομοσπονδιακή νομοθεσία, υφίσταται και το πολιτειακό δίκαιο, δηλαδή η νομοθεσία κάθε πολιτείας. Η πολιτειακή νομοθεσία ψηφίζεται από το εκάστοτε πολιτειακό νομοθετικό σώμα και αφορά τους πολίτες, τις εταιρείες, τους οργανισμούς και τους επισκέπτες. Η πολιτειακή νομοθεσία, συνήθως, υποτάσσεται στην ομοσπονδιακή⁵¹. Τέλος, όσον αφορά τις ενεργειακές και περιβαλλοντικές πολιτικές, συνήθως αποτελούν μια συνδεδεμένη προσπάθεια τόσο σε ομοσπονδιακό όσο και σε πολιτειακό επίπεδο. Σχετικά με το υδρογόνο, μεγαλύτερη σημασία αποδίδεται σε ομοσπονδιακό επίπεδο με κάποιες εξαιρέσεις, όπως η πολιτεία της Καλιφόρνια που διαθέτει μερική νομοθεσία για αυτό⁵⁶.

1.6.3. Ομοσπονδιακό Θεσμικό Πλαίσιο για το Υδρογόνο

Η ανάπτυξη της υδροοικονομίας στις Ηνωμένες πολιτείες συνιστά μοναδική ευκαιρία για την απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα αλλά και την ενίσχυση της οικονομίας (Lebrouhi B.E., 2022). Για να επιτευχθεί ο στόχος δημιουργίας μιας ανταγωνιστικής οικονομίας υδρογόνου αλλά και οι εθνικοί περιβαλλοντικοί στόχοι, κρίνεται αναγκαία η θέσπιση ευνοϊκών πολιτικών και ολοκληρωμένου θεσμικού πλαισίου. Ωστόσο, δεν υφίσταται συντονισμένες πολιτικές δράσεις (Shree Om Bade, 2024). Παρόλο που το υδρογόνο και τεχνολογίες του μελετώνται αρκετές δεκαετίες στις Ηνωμένες Πολιτείες, δεν έχει παρατηρηθεί η ευρύτερη υιοθέτηση με σκοπό την βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος (Pingkuo Liu, 2022).

Η πρώτη αναφορά για το υδρογόνο, στο ομοσπονδιακό θεσμικό πλαίσιο, εντοπίζεται στο Νόμο για την Ενεργειακή Πολιτική του 1992 (Energy Policy Act of 1992). Σκοπός της νομικής πρωτοβουλίας ήταν η μείωση της εξάρτησης από το πετρέλαιο, ενθαρρύνοντας την έρευνα και ανάπτυξη σε εναλλακτικά καύσιμα όπως το υδρογόνο. Ωστόσο, οι πολιτικές δεν εξελίχθηκαν και παρέμειναν αμετάβλητες για αρκετά χρόνια (Talus Kim, 2022). Η τρέχουσα ομοσπονδιακή πολιτική βασίζεται στο Νόμο για την Ενεργειακή Πολιτική του 2005 (Energy Policy Act of 2005)⁵².

Ο Νόμος για την Ενεργειακή Πολιτική εποπτεύει την παραγωγή ενέργειας σε ομοσπονδιακό επίπεδο. Πιο αναλυτικά, το υδρογόνο αναφέρεται στον Τίτλο VIII⁵², που στοχεύει στην υποστήριξη, προώθηση και ανάπτυξη των τεχνολογιών του. Επιπρόσθετα, περιλαμβάνονται σχέδια για κρίσιμες δημόσιες επενδύσεις με σκοπό την δημιουργία πρωτοβουλιών στην ιδιωτική βιομηχανία και σε εκπαιδευτικά ιδρύματα, προωθώντας την καινοτομία. Σημαντικός στόχος του νόμου αποτελεί και η ευρύτερη διείσδυση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών^{53 54}, αφού ο εντοπισμός νέων αγορών είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη της υδροοικονομίας (Shree Om Bade, 2024).

Ένας ακόμα νόμος που δύναται να έχει θετικό αντίκτυπο στην προώθηση του υδρογόνου και των τεχνολογιών του, είναι ο Νόμος για την Ενεργειακή Ανεξαρτησία και Ασφάλεια του

⁵⁰ USA Gov. How Laws are Made, <https://www.usa.gov/how-laws-are-made>

⁵¹ Diffen. Federal law vs State law. https://www.diffen.com/difference/Federal_Law_vs_State_Law

⁵² ENERGY POLICY ACT OF 2005, <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-109publ58/pdf/PLAW-109publ58.pdf>

⁵³ Dalia Majumder-Russell. HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN THE US, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/united-states-of-america>

⁵⁴ ENERGY POLICY ACT OF 2005, <https://www.ferc.gov/sites/default/files/2020-04/epact-fact-sheet.pdf>

2007 (Energy Independence and Security Act of 2007)⁵⁵. Παρόλο που δεν αναφέρεται άμεσα σε αυτό, προωθεί τον Νόμο για την Ενεργειακή Πολιτική του 2005 ενθαρρύνοντας, μεταξύ άλλων, την παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας και στηρίζοντας οικονομικά τις εξελίξεις στις τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και εκμετάλλευσης υδρογόνου (Shree Om Bade, 2024).

Πρόσφατως, σημειώνονται ενθαρρυντικές εξελίξεις όσον αφορά την νομοθετική πρωτοβουλία για την υλοποίηση μιας ενεργειακής μετάβασης. Οι εξελίξεις αυτές απαντούν στους στόχους του Υπουργείου Ενέργειας (DOE) για το υδρογόνο αλλά και τους πρόσφατους περιβαλλοντικούς στόχους της ομοσπονδιακής κυβέρνησης για τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Πιο αναλυτικά, το 2021, με την υιοθέτηση του Νόμου περί Υποδομών (Infrastructure Act) ολοκληρώνεται ένα σημαντικό βήμα για την ανάπτυξη των αναγκαίων υποδομών υδρογόνου (Talus Kim, 2022). Ουσιαστικά, ο νόμος υποχρεώνει την ομοσπονδιακή κυβέρνηση να δημιουργήσει ένα νέο εθνικό χάρτη υδρογόνου (Shree Om Bade, 2024). Συγκεκριμένα, προβλέπεται η δημιουργία προγραμμάτων καθαρού υδρογόνου, ενώ διατυπώνεται η ανάγκη δημιουργίας έργων ανάπτυξης και υποστήριξης της εγχώριας εφοδιαστικής αλυσίδας πράσινου υδρογόνου. Η χρηματοδότηση για τους παραπάνω στόχους αγγίζει τα 500 εκατομμύρια δολάρια για τα έτη 2022 έως 2026. Επιπλέον, υπαγορεύεται η θέσπιση προγράμματος έρευνας, ανάπτυξης και εμπορευματοποίησης για τη βελτιστοποίηση της ηλεκτρόλυσης, με χρηματοδότηση ύψους 1 δισεκατομμυρίων δολαρίων για το 2022 έως 2026⁵⁶.

Η πρόσφατα εγκριθείσα νομοθεσία, τον Αύγουστο του 2022, Νόμος Μείωσης Πληθωρισμού (Inflation Reduction Act), θεωρείται από της σημαντικότερες νομικές πρωτοβουλίες για την ανάπτυξη του υδρογόνου στις Ηνωμένες Πολιτείες⁵⁷. Το νομικό κείμενο παρέχει ένα ευρύ φάσμα φορολογικής ελάφρυνσης για την ηλιακή, αιολική ενέργεια αλλά και για το πράσινο υδρογόνο. Σύμφωνα με την Ενότητα 45V, παρέχεται πίστωση φόρου επένδυσης για πιστοποιημένες καθαρές εγκαταστάσεις που τίθενται σε λειτουργία μετά τις 31 Δεκεμβρίου 2022 ή κατασκευάζονται από την 1^η Ιανουαρίου 2023. Παράλληλα, προβλέπει μείωση της φορολογίας για ηλεκτρικά οχήματα κυψελών υδρογόνου βοηθώντας περαιτέρω την ανάπτυξη της βιομηχανίας. Ακόμα, σημαντικό αντίκτυπο στην παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο έχουν οι προβλεπόμενες φοροελαφρύνσεις στις εγκαταστάσεις Δέσμευσης και Αποθήκευσης Άνθρακα (CCS), που είναι αναγκαίες για την βιωσιμότητα της διεργασίας (Shree Om Bade, 2024).

Τέλος, όσον αφορά το ρυθμιστικό πλαίσιο του υδρογόνου, παρατηρούνται διαφορές από πολιτεία σε πολιτεία⁵⁸. Σε ομοσπονδιακό επίπεδο, οι βασικοί ρυθμιστικοί φορείς που διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της βιομηχανίας και της υποδομής υδρογόνου είναι συγκεκριμένοι. Αρχικά, το Υπουργείο Ενέργειας (DOE), το οποίο ασκεί εξουσία επί των ενεργειακών πολιτικών, συμπεριλαμβάνει και αυτών του υδρογόνου και

⁵⁵ U.S. EPA. Summary of the Energy Independence and Security Act, <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-energy-independence-and-security-act>

⁵⁶ Dalia Majumder-Russell. HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN THE US, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/united-states-of-america>

⁵⁷ The White House. FACT SHEET: The Inflation Reduction Act Supports Workers and Families, <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/08/19/fact-sheet-the-inflation-reduction-act-supports-workers-and-families/>

⁵⁸ Dalia Majumder-Russell. HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN THE US, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/united-states-of-america>

των κυψελών καυσίμου. Επιπλέον, η Ομοσπονδιακή Ρυθμιστική Επιτροπή Ενέργειας (Federal Energy Regulatory Commission), ρυθμίζει τη χονδρική εμπορία ηλεκτρικής ενέργειας, φυσικού αερίου και τη μεταφορά πετρελαίου με αγωγούς. Παρόλο που δεν περιλαμβάνει άμεσα τους αγωγούς υδρογόνου, εξετάζει την πιθανή εμπλοκή της στον αναδυόμενο τομέα⁵⁹.

Στο πεδίο των πρωτοκόλλων ασφαλείας, η Διοίκηση Ασφάλειας και Υγείας στην Εργασία (Occupational Safety and Health Administration) διαμορφώνει τα πρότυπα επαγγελματικής υγείας και ασφαλείας, μεταξύ άλλων για τα πεπιεσμένα αέρια και το υδρογόνο. Συγκεκριμένα, ο Τίτλος 29 (του C.F.R. Subpart H), καλύπτει τις εγκαταστάσεις υδρογόνου⁶⁰. Το παραπάνω ρυθμιστικό σύνολο συμπληρώνεται από τη Διοίκηση Ασφάλειας Αγωγών και Επικίνδυνων Υλικών (Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration), η οποία επεξεργάζεται τα εθνικά πρότυπα για την ασφαλή μεταφορά ενέργειας και επί του παρόντος εποπτεύει περίπου 700 μίλια αγωγών υδρογόνου από τον Δεκέμβριο του 2020⁶¹. Ωστόσο, οι αγωγοί υδρογόνου δεν αποτελούν πρωταρχικό τομέα του πλαισίου, αφού ορισμένες πτυχές δεν λαμβάνονται υπόψη απαιτώντας περαιτέρω ανάπτυξη κανονισμών καθώς εξελίσσεται ο τομέας.

1.6.4. Θεσμικό Πλαίσιο για τις Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου στις ΗΠΑ

Οι τεχνολογίες των κυψελών καυσίμου υδρογόνου αναγνωρίζονται και εξετάζονται από τις αρχές του 1990. Αρχικά, η πρώιμη ακόμα βιομηχανία στηρίχθηκε από πληθώρα προγραμμάτων έρευνας που θεσπίστηκαν από το Νόμο για την Ενεργειακή Πολιτική του 1992 (Energy Policy Act of 1992). Στις αρχές του 2000, με τη συνεργασία μεταξύ του Υπουργείου Ενέργειας (Department of Energy) και του Συμβουλίου για την Έρευνα Αυτοκινήτων των ΗΠΑ (US Council for Automotive Research) ξεκινά το πρόγραμμα Freedom Comparative Automotive Research (FreedomCAR)⁶², εξασφαλίζοντας την εύκολη πρόσβαση στις κυψέλες καυσίμου και ενισχύοντας ουσιαστικά την υδροοικονομία (Azni Muhammad Asyraf, 2021).

Με την εισαγωγή του Νόμου για την Ενεργειακή Πολιτική του 2005 (Energy Policy Act of 2005)⁶³, σχηματίζεται ένα πλαίσιο στήριξης χάρη στην προβλεπόμενη ίδρυση βοηθητικών φορέων. Συγκεκριμένα, δημιουργείται η Τεχνική Ομάδα Υδρογόνου και Κυψελών Καυσίμων (Hydrogen and Fuel Cell Technical Task Force), σύμφωνα με το άρθρο 806, με σκοπό την ασφαλή και οικονομική ανάπτυξη υποδομής για τη βιομηχανία των κυψελών. Επιπλέον, με το άρθρο 807a δημιουργείται μια επιτροπή υπεύθυνη για την ενημέρωση του Υπουργού

⁵⁹ Drake D. Hernandez and Emre Gençer. Laying the regulatory groundwork for hydrogen in the United States, <https://www.utilitydive.com/news/laying-the-regulatory-groundwork-for-hydrogen-in-the-united-states/601408/>

⁶⁰ Energy.gov. Overview of Federal Regulations for Hydrogen Technologies in the U.S., <https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-05/042921-h2iqhour.pdf>

⁶¹ <https://primis.phmsa.dot.gov/comm/hydrogen.htm>

⁶² FreedomCAR and Fuel Partnership Plan, https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/fc_fuel_partnership_plan.pdf?Status=Master

⁶³ Energy.gov. ENERGY POLICY ACT OF 2005, <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f14/EPAof2005.pdf>

Ενέργειας σχετικά με τα προγράμματα ανάπτυξης και ερευνάς των τεχνολογιών υδρογόνου⁶⁴.

Η στρατηγική προσέγγιση για την ανάπτυξη της βιομηχανίας κυψελών παρέμεινε αμετάλλακτη ανά τα έτη, ιδρύοντας αρκετά νέα προγράμματα οικονομικής ενίσχυσης της έρευνας, όπως το Σχέδιο Προγράμματος Υδρογόνου και Κυψελών το 2011 (Hydrogen and Fuel Cells Program Plan) ή το H2@Scale του 2016. Τελικά, παρόλα την απουσία ολοκληρωμένου θεσμικού πλαισίου, οι υφιστάμενες πολιτικές και προγράμματα φαίνεται να ενισχύουν την εμπιστοσύνη των επενδυτών στην αναδυόμενη βιομηχανία των κυψελών καυσίμου υδρογόνου, ενώ αποτελούν γνώμονα για την συμπεριφορά τις αγορές και για την περαιτέρω ανάπτυξή της (Azni Muhammad Asyraf, 2021).

1.6.5. Θεσμικό Πλαίσιο για το Υδρογόνο και τις Κυψέλες Καυσίμου στην Καλιφόρνια
Η πολιτεία της Καλιφόρνια κατέχει ένα από τα πιο ανεπτυγμένα πολιτειακά θεσμικά πλαίσια για το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου. Η δημιουργία του πηγάζει από το χρόνιο πρόβλημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης που αντιμετώπιζε. Μια από τις σημαντικότερες ενέργειες, στα πλαίσια της προσπάθειας αυτής, αποτελεί το κανονιστικό πρόγραμμα Πρότυπα για Καύσιμα Χαμηλής Εκπομπής Άνθρακα (Low Carbon Fuel Standard)⁶⁵, όπου στοχεύει στην μείωση των αερίων του θερμοκηπίου επιβάλλοντας στις αυτοκινητοβιομηχανίες πλαίσια για την παραγωγή αυτοκινήτων χαμηλής εκπομπής άνθρακα. Παρόλο που το κείμενο δεν αφορά αποκλειστικά το υδρογόνο ή τις κυψέλες καυσίμου, παρέχει την δυνατότητα στην πολιτεία να στηρίξει ενεργά την βιομηχανία κυψελών, αφού η ανάπτυξή της αποτελεί μέσο επίτευξης του στόχου μείωσης των αερίων του θερμοκηπίου (Azni Muhammad Asyraf, 2021).

Ένας ακόμα βασικός μηχανισμός για την προώθηση της ανανεώσιμης ενέργειας αποτελεί το Χαρτοφυλάκιο Προτύπων Ανανεώσιμων Πηγών (Renewable Portfolio Standard). Το παραπάνω πρόγραμμα απαντά στις υποχρεώσεις του Νομοσχεδίου 350 της Γερουσίας (Senate Bill 350 ή SB 350, 2015), που απαιτεί όλες τις εταιρίες κοινής ωφέλειας να παράγουν τουλάχιστον το μισό της εμπορικής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, συμπεριλαμβανομένου και του υδρογόνου, έως το 2023⁶⁶. Επιπλέον, το Νομοσχέδιο 1550 της Γερουσίας (Senate Bill 1550 ή SB 1550, 2023), στηρίζει την παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές βασιζόμενο στο προσχέδιο του Νόμου για το Σχέδιο Αυτοκινητοδρόμων Υδρογόνου (Hydrogen Highway Blueprint Act) (Azni Muhammad Asyraf, 2021).

Γενικότερα, η πλειοψηφία των νόμων, κανονισμών και σχεδίων επικεντρώνονται στις μεταφορές χαμηλών ή μηδενικών εκπομπών. Στα πιο σημαντικά προγράμματα περιλαμβάνεται το Πρόγραμμα Καθαρών Μεταφορών (Clean Transportation Program). Το παραπάνω πρόγραμμα προσφέρει οικονομικά κίνητρα σε διάφορους φορείς που εμπλέκονται στην ανάπτυξη εναλλακτικών καυσίμων, συμπεριλαμβανομένων των

⁶⁴ GovInfo. ENERGY POLICY ACT OF 2005, <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-109publ58/pdf/PLAW-109publ58.pdf>

⁶⁵ CALIFORNIA Air Resources Board. Low Carbon Fuel Standard, <https://ww2.arb.ca.gov/our-work/programs/low-carbon-fuel-standard/about>

⁶⁶ California's Renewables Portfolio Standard (RPS) Program, [https://www.ucsusa.org/resources/californias-renewables-portfolio-standard-program#:~:text=California%27s%20Renewables%20Portfolio%20Standard%20\(RPS\)%20Program&text=The%20California%20state%20legislature%20passed,%2C%20and%20biopower%2C%20by%202030.](https://www.ucsusa.org/resources/californias-renewables-portfolio-standard-program#:~:text=California%27s%20Renewables%20Portfolio%20Standard%20(RPS)%20Program&text=The%20California%20state%20legislature%20passed,%2C%20and%20biopower%2C%20by%202030.)

οχημάτων και των υποδομών υδρογόνου⁶⁷. Εξίσου σημαντικό είναι και το Σχέδιο Προώθησης Οχημάτων Μηδενικών Εκπομπών (Zero Emission Vehicle Promotion Plan), όπου αναθέτει στις κρατικές υπηρεσίες να υποστηρίξουν και να διευκολύνουν την ευρεία υιοθέτηση οχημάτων μηδενικών εκπομπών έως το 2025^{68 69}. Τέλος, εφαρμόζεται και το σχέδιο Οδικός Χάρτης Καλιφόρνια (A California Road Map) που αποσκοπεί στην ευρεία χρήση οχημάτων με κυψέλες καυσίμου⁷⁰.

Συνεπώς, παρόλο που οι περισσότεροι νόμοι και προγράμματα εστιάζουν στο τομέα των μεταφορών, είναι ζωτικής σημασίας για την ανάπτυξη της υδροοικονομίας αφού η διείσδυση του υδρογόνου σε εμπορικούς τομείς επιταχύνει την διαδικασία (Shree Om Bade, 2024). Με τις παραπάνω ενέργειες η κυβέρνηση της Καλιφόρνια έχει καταφέρει την μαζική χρηματοδότηση του βιομηχανικού τομέα των κυψελών καυσίμων, ελκύοντας επενδυτές και προσδίδοντας σταθερότητα στο τομέα (Azni Muhammad Asyraf, 2021).

1.6.6. Συμπεράσματα

Παρόλο που το υδρογόνο και οι τεχνολογίες του μελετώνται αρκετές δεκαετίες στις Ηνωμένες Πολιτείες, δεν υφίστανται αρκετά στοιχεία που να υποδεικνύουν την ευρύτερη υιοθέτησή του με σκοπό τη βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος. Για να επιτευχθεί η ανάπτυξη της υδροοικονομίας και εθνικοί στόχοι για το περιβάλλον κρίνεται αναγκαία η θέσπιση ευνοϊκών πολιτικών και πλήρους νομικού πλαισίου.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες στερούνται συντονισμένων πολιτικών, ενώ παρατηρείται μεγάλη αυτονομία σε πολιτειακό επίπεδο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η πολιτεία της Καλιφόρνια, όπου για την αντιμετώπιση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης θεσπίστηκε πλήθος νόμων και προγραμμάτων, εστιάζοντας στον τομέα των μεταφορών. Οι περισσότερες πρωτοβουλίες αφορούν άμεσα ή έμμεσα το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου, ενθαρρύνοντας την ανάπτυξη του τομέα.

Τα τελευταία χρόνια, σημειώνονται θετικές εξελίξεις όσον αφορά το ομοσπονδιακό θεσμικό πλαίσιο με την εισαγωγή ευνοϊκών νόμων όπως ο Νόμος για την Μείωση του Πληθωρισμού. Φαίνεται λοιπόν, πως η πολιτική των Ηνωμένων Πολιτειών εξελίχθηκε ανά τα χρόνια από στρατηγικές εφαρμογής, σε προγράμματα ανάπτυξης έρευνας και τελικά σε πολιτικές παροχής κινήτρων. Ωστόσο, ακόμα υφίσταται αρκετά ζητήματα που απαιτούν αντιμετώπιση κρίνοντας σημαντική την περαιτέρω ανάπτυξη του θεσμικού πλαισίου

⁶⁷ CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. Clean Transportation Program, <https://www.energy.ca.gov/programs-and-topics/programs/clean-transportation-program>

⁶⁸ Dalia Majumder-Russell. HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN THE US, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/united-states-of-america>

⁶⁹ Enegrgy.gov. Zero Emission Vehicle (ZEV) Promotion Plan. <https://afdc.energy.gov/laws/10212>

⁷⁰ A California Road Map Bringing Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles to the Golden State, [https://h2fcp.org/sites/default/files/20120814_Roadmapv\(Overview\).pdf](https://h2fcp.org/sites/default/files/20120814_Roadmapv(Overview).pdf)

1.7. Κίνα

1.7.1. Εισαγωγή

Η Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας αποτελεί μια από τις πολυπληθέστερες χώρες αλλά και ισχυρότερες οικονομίες παγκοσμίως. Η ραγδαία οικονομική ανάπτυξη που βιώνει τα τελευταία 40 χρόνια συνοδεύεται με την αυξανόμενη ενεργειακή ζήτηση και κατανάλωση (Ren Xi, 2020). Παράλληλα, ο ενεργειακός τομέας της χώρας βασίζεται στην εκτεταμένη χρήση άνθρακα και άλλων ορυκτών καυσίμων, καθιστώντας την τον μεγαλύτερο εισαγωγέα άνθρακα και πετρελαίου παγκοσμίως αλλά και το μεγαλύτερο παραγωγό αερίων του θερμοκηπίου⁷¹. Συνεπώς, η κατάσταση αυτή σε συνδυασμό με την παγκόσμια ενεργειακή κρίση και περιβαλλοντική μόλυνση δημιουργούν σημαντικά εγχώρια προβλήματα, όπως ατμοσφαιρική ρύπανση και ζητήματα στην ενεργειακή ασφάλεια (Bryan Tilt, 2019).

Η ανησυχία για τα ολοένα και πιο σοβαρά προβλήματα που παρουσιάζονται ωθούν την χώρα να επενδύσει σε καθαρές μορφές ενέργειας και ανανεώσιμες πηγές, καθιστώντας την πρωτοπόρο στο τομέα. Η ταχεία ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως η ηλιακή και η αιολική, έχουν κατά συνέπεια αυξήσει την ανάγκη για προηγμένες τεχνολογίες αποθήκευσης και παροχής ενέργειας (Lebrouhi B.E., 2022).

Τα τελευταία χρόνια, το υδρογόνο αποκτά όλο και μεγαλύτερη δυναμική ως εναλλακτική ενεργειακή λύση. Χρησιμοποιώντας το ανεπτυγμένο δίκτυο ανανεώσιμων πηγών και τον άνθρακα που διαθέτει, η Κίνα έχει το δυναμικό να παράγει σημαντικές ποσότητες υδρογόνου, ενισχύοντας έτσι την ενεργειακή ποικιλομορφία για ενεργειακή ασφάλεια και προσφέροντας λύσεις στο πρόβλημα της αποθήκευσης ενέργειας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό λαμβάνοντας υπόψη τα περιορισμένα αποθέματα φυσικού αερίου και πετρελαίου που διαθέτει. Ταυτόχρονα, με την αξιοποίηση του υδρογόνου αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της ρύπανσης και απανθρακοποίησης της οικονομίας. Επιπλέον, ο μεγάλος πληθυσμός της χώρας δύναται να ωφελήσει την υδροοικονομία αφού αποτελεί σημαντική ενεργειακή αγορά (Lebrouhi B.E., 2022). Συνεπώς, λόγω της δυναμικής του υδρογόνου ως βασικό κομμάτι στην επίλυση των ενεργειακών και περιβαλλοντικών ζητημάτων της χώρας, γίνονται όλο και μεγαλύτερες προσπάθειες για την ενσωμάτωσή του στον ενεργειακό σύστημα.

1.7.2. Νομοθετική Διαδικασία

Η Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας αποτελείται από 34 διοικητικές διαιρέσεις σε επίπεδο επαρχίας. Αυτές είναι 23 επαρχίες, 5 αυτόνομες περιοχές, 4 δήμοι και 2 ειδικές διοικητικές περιφέρειες. Η νομοθετική εξουσία πηγάζει από το Εθνικό Λαϊκό Κογκρέσο (National People's Congress ή NPC) που αποτελεί και το ανώτατο νομοθετικό όργανο της χώρας. Συνολικά, αποτελείται από 3.000 μέλη, ωστόσο, σπάνια συνεδριάζει με το πλήρη αριθμό συμμετεχόντων, μόλις δυο εβδομάδες το χρόνο. Αυτό αναγκάζει το Εθνικό Λαϊκό Κογκρέσο να βασίζεται σε διάφορες μικρότερες επιτροπές για την σύνταξη νομοθεσίας. Η πιο σημαντική επιτροπή από αυτές είναι η Μόνιμη Εθνική Επιτροπή (NPC Standing Committee) που συντάσσεται από περίπου 150 μέλη και συνεδριάζει κάθε δύο μήνες⁷².

Η νομοθετική διαδικασία ξεκινά με μια πρόταση που μπορεί να προέρχεται από διαφορετικές πηγές, όπως τα μέλη του Κογκρέσου, ειδικές επιτροπές και άλλα. Στην

⁷¹ International Energy Agency. China's net-zero ambitions: the next Five-Year Plan will be critical for an accelerated energy transition, <https://www.iea.org/commentaries/china-s-net-zero-ambitions-the-next-five-year-plan-will-be-critical-for-an-accelerated-energy-transition>

συνέχεια, η πρόταση προωθείται στην αρμόδια ειδική επιτροπή της Μόνιμης Εθνικής Επιτροπής ή στο Κρατικό Συμβούλιο (State Council) για έλεγχο, αναθεώρηση και σύνταξη. Ύστερα, ο προτεινόμενος νόμος υποβάλλεται σε διαβούλευση και ψηφοφορία στο Εθνικό Λαϊκό Κογκρέσο κατά την διάρκεια των ετήσιων συνόδων. Αφού εγκριθεί, ο νόμος εκδίδεται από τον Πρόεδρο και τίθεται σε ισχύ⁷².

Εκτός από τους εθνικούς νόμους υφίστανται και οι επαρχιακοί νόμοι. Οι επαρχιακοί νόμοι αντιμετωπίζουν ζητήματα που είναι συναφή με τοπικές προκλήσεις και ανάγκες. Ωστόσο, οι επαρχιακοί νόμοι λειτουργούν εντός του πλαισίου που θέτει το εθνικό νομικό σύστημα, ενώ δεν πρέπει να έρχονται σε αντίθεση με τους εθνικούς νόμους. Όσον αφορά την περιβαλλοντική και ενεργειακή νομοθεσία, ενδέχεται να υφίστανται αλλαγές σε επαρχιακό επίπεδο για την αντιμετώπιση τοπικών προκλήσεων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει έναν βαθμό ευελιξίας διατηρώντας παράλληλα την εθνική νομική συνοχή⁷².

1.7.3. Θεσμικό Πλαίσιο για το Υδρογόνο στην Κίνα

Το ενδιαφέρον της Κινεζικής Κυβέρνησης για το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου εντοπίζεται από τις αρχές του 2000. Κατά την διάρκεια της πρώτης δεκαετίας της νέας χιλιετίας, διεξήχθησαν πλήθος συνόδων, ερευνητικών προγραμμάτων και στρατηγικών με επίκεντρο την ανάπτυξη της εγχώριας υδροοικονομίας. Παράλληλα, παρουσιάστηκαν αρκετά έργα επίδειξης εμπορικών εφαρμογών σε συνεργασία με εγχώριους και παγκόσμιους οργανισμούς και εταιρίες (Lebrouhi B.E., 2022). Μάλιστα, το 2008, στα πλαίσια των Ολυμπιακών Αγώνων στο Πεκίνο, 20 οχήματα κυψελών καυσίμου χρησιμοποιήθηκαν για την κάλυψη αναγκών της διοργάνωσης (Jun Lu, 2013).

Την δεκαετία που ακολούθησε, παρατηρήθηκε παρόμοια προσέγγιση με την προώθηση πολιτικών και κυβερνητικών προγραμμάτων. Το 2016, μέσω του προγράμματος «The Action Plan for Energy Technology and Innovation» της Εθνικής Επιτροπής Ανάπτυξης Μεταρρυθμίσεων (National Development and Reform Commission of China) παρουσιάστηκαν στρατηγικές κατεύθυνσης για την ανάπτυξη και προώθηση της βιομηχανίας υδρογόνου. Στην κυβερνητική έκθεση «Government Work Report of the State Council» για το 2019, αναδεικνύεται η εθνική προσπάθεια για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων φόρτισης και ανεφοδιασμού υδρογόνου, αποτελώντας την πρώτη φορά που η ενέργεια υδρογόνου αναδεικνύεται σε κυβερνητική έκθεση (Xiangyu Meng, 2021). Επιπλέον, ένα χρόνο αργότερα, η Εθνική Στατιστική Υπηρεσία ξεκίνησε να συνυπολογίζει το υδρογόνο στις ενεργειακές στατιστικές της (Lebrouhi B.E., 2022). Πλέον, η Κίνα αποτελεί το μεγαλύτερο παραγωγό αλλά και καταναλωτή παγκοσμίως. Το μεγαλύτερο ποσοστό του παραγόμενου υδρογόνου εμπίπτει στην κατηγορία του γκρι, ενώ αξιοποιείται, ως επί το πλείστον, σε τομείς της χημικής βιομηχανίας⁷³. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια εμφανίζεται σημαντική κινητικότητα για την προώθηση και την υιοθέτηση υδρογονοκίνητων οχημάτων.

Παρά τις πολυάριθμες πρωτοβουλίες, προγράμματα και κυβερνητική αναγνώριση δεν υφίσταται σαφώς καθορισμένο πλαίσιο για το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου. Η νομοθετική βάση για την ανάπτυξη υδρογόνου και χρήση της ενέργειάς του, βασίζεται σε εθνικά προγράμματα, πολιτικές βιομηχανικού σχεδιασμού αλλά και τοπικούς - επαρχιακούς κανονισμούς πιλοτικού χαρακτήρα. Αντίστοιχα, οι αναφορές του υδρογόνου σε νομικά

⁷² The US – CHINA Business Council. The PRC Legislative Process: Rule Making in China, https://www.uschina.org/sites/default/files/prc_legislative_process.pdf

⁷³ Vera Zhang. HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN CHINA, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/china>

κείμενα είναι ελάχιστες (Zhang Max, 2022). Τον Απρίλιο του 2020, δημοσιεύτηκε ένα προσχέδιο του Ενεργειακού Νόμου στο οποίο αναδεικνύονταν ορισμένες πηγές ενέργειας όπως η θερμική, ηλιακή ή το διυλισμένο πετρέλαιο. Ωστόσο, σε αντίθεση με άλλες δευτερογενείς πηγές ενέργειας, δεν έγινε ειδική αναφορά στο υδρογόνο, κατηγοριοποιώντας το στον τομέα των «άλλων νέων πηγών ενέργειας»⁷³. Συνεπώς, φαίνεται πως η κινεζική νομοθεσία δεν επικυρώνει πλήρως τη δυναμική του υδρογόνου ως ενεργειακή πηγή. Παρόλα αυτά, η αναγνώριση του ως ενεργειακό μέσο ενθαρρύνει την ανάπτυξη των σχετικών τομέων. Με την πρόσφατη κατηγοριοποίηση, δύναται να διευκολυνθεί σημαντικά η αδειοδότηση υποδομών για την παραγωγή, επεξεργασία, μεταφορά και αποθήκευσή του⁷⁴.

Σε τοπικό επίπεδο, παρατηρείται πιο έντονη θεσμική διαδικασία. Όσον αφορά τους πιλοτικούς κανονισμούς, η πλειοψηφία των επαρχιών έχουν συμπεριλάβει την ανάπτυξη της ενέργειας υδρογόνου στο επαρχιακό στρατηγικό σχεδιασμό «Πλαίσιο για το 14^ο Πενταετές Σχέδιο για την Εθνική Οικονομική και Κοινωνική Ανάπτυξη και το Περίγραμμα των Μακροπρόθεσμων Στόχων για το 2035» (Outline of the 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development and the Long-Range Objectives Through the Year 2035 for the People's Republic of China) (Lebrouhi B.E., 2022). Επιπρόσθετα, 10 επαρχίες έχουν τονίσει την ανάγκη να συμπεριληφθεί ως φορέας ενέργειας στις κυβερνητικές τους εκθέσεις, ενώ αρκετές ακόμα αναπτύσσουν πολιτικές για τη στήριξη και ενθάρρυνση του τομέα, εστιάζοντας στην κατασκευή υποδομών και την παροχή βοηθητικών λειτουργιών. Ταυτόχρονα, αρκετές επαρχίες θέτουν τα θεμέλια για τη δημιουργία ανεξάρτητων και τεχνολογικά προηγμένων βιομηχανιών παραγωγής οχημάτων κυψελών καυσίμου μέσω εξειδικευμένων προγραμμάτων και στρατηγικών⁷⁵.

Σε εθνικό επίπεδο, το υδρογόνο κατατάσσεται στα επικίνδυνα χημικά, σύμφωνα με τους κρατικούς κανονισμούς για την ασφαλή διαχείριση επικίνδυνων χημικών ουσιών⁷⁶. Παρόλα αυτά, δεν διευκρινίζεται αν απαιτούνται άδειες διαχείρισης επικίνδυνων χημικών από τους φορείς εκμετάλλευσης και παραγωγής. Αντίστοιχα, για την μεταφορά του, επικρατεί ασάφεια τόσο στους κανονισμούς όσο και στα πρότυπα. Συνέπεια αυτού, είναι η δημιουργία πολυάριθμων τοπικών κανονισμών για την κάλυψη των αναγκών⁷³.

⁷⁴ VICAI. The "Energy Law" plans to include hydrogen energy in the energy category, and the industry has imagined an "industry explosion" (Translated), <https://www.yicai.com/news/100588754.html>

⁷⁵ Adelphi. The role of clean hydrogen in the future energy systems of Japan and Germany, <https://adelphi.de/en/publications/the-role-of-clean-hydrogen-in-the-future-energy-systems-of-japan-and-germany>

⁷⁶ CIRS. Regulations on Safe Management of Hazardous Chemicals in China - Decree 591, <https://www.cirs-group.com/en/chemicals/regulations-on-safe-management-of-hazardous-chemicals-in-china-decree-591>

1.7.4. Συμπεράσματα

Η Κίνα αναγνωρίζει, πλέον, την δυναμική του υδρογόνου και προχωρά με ταχείς ρυθμούς στην ανάπτυξη μιας ισχυρής υδροοικονομίας. Η μακροπρόθεσμη εξέλιξη της βιομηχανίας υδρογόνου δύναται να επιλύσει το πρόβλημα της απανθρακοποίησης του ενεργειακού τομέα, το ζήτημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και ενεργειακής ασφάλειας. Παράλληλα, το ανεπτυγμένο δίκτυο ανανεώσιμων πηγών σε συνδυασμό με τον μεγάλο πληθυσμό της χώρας προσφέρουν σημαντικό δυναμικό για την παραγωγή και κατανάλωση πράσινου υδρογόνου.

Παρά το ενδιαφέρον της κινεζικής κυβέρνησης για το υδρογόνο τα τελευταία 20 χρόνια, δεν έχει δημιουργηθεί ολοκληρωμένη νομική βάση που να πλαισιώνει την ανάπτυξή του. Έχουν ληφθεί πολυάριθμες πρωτοβουλίες σε κυβερνητικό και ιδιωτικό επίπεδο με τη δημιουργία αρκετών προγραμμάτων έρευνας, ανάπτυξης και εφαρμογής με ιδιαίτερη έμφαση στο τομέα των μεταφορών. Παρόλα αυτά, η θεσμική κατοχύρωση των παραπάνω βασίζεται σε εθνικά προγράμματα, πολιτικές βιομηχανικού σχεδιασμού αλλά και τοπικούς κανονισμούς πιλοτικού χαρακτήρα. Συνεπώς, απαιτείται περαιτέρω ανάπτυξη του ρυθμιστικού πλαισίου για την αναδυόμενη υδροοικονομία τόσο σε εθνικό όσο και σε τοπικό επίπεδο.

1.8. Νότια Κορέα

1.8.1. Εισαγωγή

Η παγκόσμια κοινότητα στρέφεται ολοένα και περισσότερο προς εναλλακτικές ενεργειακές λύσεις, όπως το υδρογόνο και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, για την αντιμετώπιση της ενεργειακής και κλιματικής κρίσης. Στα πλαίσια αυτής της προσπάθειας, η Νότια Κορέα επιδιώκει να ηγηθεί στον τομέα του υδρογόνου ως εναλλακτική πηγή ενέργειας. Με τη δημιουργία ενός ολοκληρωμένου οικοσυστήματος υδροοικονομίας δύναται να αντιμετωπιστούν οι περιβαλλοντικές αλλά και οι οικονομικές, κοινωνικές προκλήσεις που μαστίζουν τη χώρα. Ο γηράσκων πληθυσμός επιβραδύνει την εγχώρια οικονομική ανάπτυξη, ωθώντας την κυβέρνηση να επενδύσει σε δυνητικά ανερχόμενες τεχνολογίες με απώτερο σκοπό την ανταγωνιστικότητα της οικονομίας. Παράλληλα, οι περιορισμένοι φυσικοί πόροι της χερσονήσου, έχουν σαν αποτέλεσμα την εξάρτηση από εισαγωγές για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Ως εκ τούτου, το υδρογόνο δύναται να συμβάλλει στην ενεργειακή ασφάλεια της χώρας (Lebrouhi B.E., 2022).

Στα πλαίσια της προσπάθειας της Νότιας Κορέας να αναδειχθεί παγκόσμιος πρωτοπόρος στις τεχνολογίες υδρογόνου, έχουν παρουσιαστεί πληθώρα φιλόδοξων σχεδίων και προγραμμάτων σε σημαντικούς τομείς της οικονομίας όπως η ενέργεια, οι χερσαίες μεταφορές, το εμπόριο και η ναυτιλία. Επιπλέον, παρατηρούνται πρωτοβουλίες και σε ιδιωτικό επίπεδο μέσω στρατηγικών συνεργασιών και κυβερνητικών προγραμμάτων. Οι περισσότερες ενέργειες επικεντρώνονται στην αύξηση παραγωγής και χρήσης οχημάτων κυψελών καυσίμων αλλά και στη δημιουργία υποδομών για την παραγωγή και διανομή υδρογόνου και συναφών τεχνολογιών. Ειδικότερα, το πρώτο όχημα κυψελών καυσίμου κατασκευάστηκε από την νοτιοκορεατική εταιρία Hyundai ενώ το μεγαλύτερο εργοστάσιο παραγωγής κυψελών εντοπίζεται στην νοτιοκορεατική χερσόνησο. Ωστόσο, μεγάλο ποσοστό του εγχώριου υδρογόνου παράγεται με συμβατικές μεθόδους καθώς το δίκτυο ανανεώσιμων πηγών δεν δύναται να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες. Συνεπώς, η κορεατική βιομηχανία υδρογόνου παρουσιάζει αρκετά χρόνια εμπειρίας που σε συνδυασμό με πρόσφατες πρωτοποριακές θεσμικές πρωτοβουλίες στοχεύουν στην μακροπρόθεσμη στήριξη και ανάπτυξη της εγχώριας υδροοικονομίας (Lebrouhi B.E., 2022).

1.8.2. Νομοθετική Διαδικασία

Στο νομικό σύστημα της Νότιας Κορέας, το ανώτατο νομοθετικό όργανο είναι η Εθνοσυνέλευση που είναι υπεύθυνη για τη θέσπιση νόμων, την έγκριση του προϋπολογισμού και την εποπτεία της εκτελεστικής εξουσίας. Τα μέλη της Εθνοσυνέλευσης εκλέγονται μέσω ενός μεικτού συστήματος αναλογικής εκπροσώπησης⁷⁷.

Η νομοθετική διαδικασία ξεκινά με προτάσεις νόμων, νομοσχέδια, που εισάγονται από κυβερνητικούς αξιωματούχους, δηλαδή μέλη της Εθνοσυνέλευσης ή τον Πρόεδρο. Στη συνέχεια, τα νομοσχέδια εξετάζονται από αρμόδιες επιτροπές της Εθνοσυνέλευσης και προτείνονται τροποποιήσεις ή αναθεωρήσεις αν χρειαστεί. Μετά την εξέταση από την επιτροπή, το νομοσχέδιο υποβάλλεται στην ολομέλεια για περαιτέρω συζήτηση και ψηφοφορία. Μόλις εγκριθεί από την Εθνοσυνέλευση, αποστέλλεται στον Πρόεδρο, ο οποίος μπορεί να υπογράψει το νομοσχέδιο σε νόμο ή να ασκήσει βέτο. Εάν ασκηθεί βέτο, παρέχεται η δυνατότητα στην Εθνοσυνέλευση να το υπερψηφίσει⁷⁷.

Εκτός από τους εθνικούς νόμους, η Νότια Κορέα διαθέτει τοπικές κυβερνήσεις με τα δικά τους νομοθετικά όργανα που είναι υπεύθυνα για την τοπική νομοθεσία εντός της δικαιοδοσίας τους. Επιπλέον, όσον αφορά τη διαμόρφωση ενεργειακών και

περιβαλλοντικών πολιτικών συχνά παρατηρείται η συμβολή από ενδιαφερόμενους φορείς αλλά και το κοινό⁷⁷.

1.8.3. Θεσμικό Πλαίσιο για το Υδρογόνο στην Νότια Κορέα

Η απόφαση της νότιας Κορέας να επενδύσει στη βιομηχανία υδρογόνου στηρίζεται τόσο σε οικονομικούς όσο και περιβαλλοντικούς παράγοντες (Stangarone Troy, 2021). Ήδη από τις αρχές του 2000, στην νοτιοκορεατική χερσόνησο λειτουργούσαν εγκαταστάσεις έρευνας χρηματοδοτούμενες από το Υπουργείο Επιστήμης και Τεχνολογίας (Ministry of Science and Technology). Ωστόσο, το εθνικό όραμα για την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης υδροοικονομίας απέκτησε ουσιαστική υπόσταση το 2005 με τη δημοσίευση του Γενικού Σχεδίου για την Υλοποίηση του Υδρογόνου και Νέων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Masterplan for the Realization of Hydrogen and New Renewable Energy Economy) από το Υπουργείο Εμπορίου, Βιομηχανίας και Ενέργειας (Ministry of Trade, Industry and Energy)⁷⁸. Το 2019, η κυβέρνηση υιοθέτησε τον Εθνικό Οδικό Χάρτη για τις Τεχνολογίες Υδρογόνου (National Roadmap for Hydrogen Technology Development) (Vishnu Vijayakumar, 2022), αποσκοπώντας στην στήριξη και εισαγωγή του υδρογόνου σε πληθώρα τομέων, όπως οι μεταφορές, η βιομηχανία αλλά και τον μεσιτικό τομέα (Lebrouhi B.E., 2022).

Οι προσπάθειες στήριξης της υδροοικονομίας δεν περιορίστηκαν μόνο σε στρατηγικές και προγράμματα αλλά επεκτάθηκαν και σε θεσμικές πρωτοβουλίες. Στις αρχές του 2020, ψηφίστηκε από την Εθνοσυνέλευση της Κορέας ο Νόμος για την Προώθηση της Οικονομίας Υδρογόνου και Διαχείρισης Ασφάλειας Υδρογόνου (Hydrogen Economy Promotion and Hydrogen Safety Management Law). Η παραπάνω νομοθεσία αποτελεί παγκόσμια πρωτοτυπία αφού περιέχει ουσιαστικό πλαίσιο για την προώθηση της υδροοικονομίας και την ασφαλή διαχείριση των αντίστοιχων εγκαταστάσεων. Πλέον, αποτελεί την κεντρική νομοθεσία που ρυθμίζει την βιομηχανία υδρογόνου, διευκολύνοντας σημαντικά τη παραγωγή, διανομή και τις επενδύσεις από εγχώριους και διεθνείς οργανισμούς (Stangarone Troy, 2021).

Πιο αναλυτικά, στο άρθρο 36, σημειώνεται πως οι εταιρείες που επιθυμούν να παράγουν κυψέλες καυσίμου υποχρεούνται να λαμβάνουν έγκριση από την τοπική περιφερειακή αρχή. Αντίστοιχα, σύμφωνα με το άρθρο 38, ξένες εταιρείες που ενδιαφέρονται στο εμπόριο εξαρτημάτων κυψελών υποχρεούνται να δηλώσουν την επιχείρησή τους στο Υπουργείο Ενέργειας. Στο άρθρο 10, προβλέπεται κυβερνητική στήριξη με μορφή δανείων και επιδοτήσεων για την ανάπτυξη υποδομών που σχετίζονται με το υδρογόνο. Συνακόλουθα, το άρθρο 13 δίνει την δυνατότητα δημιουργίας ιδιωτικών επενδυτικών ταμείων⁷⁹. Όσον αφορά τους κανονισμούς ασφαλείας, η Ενότητα 6 ορίζει λεπτομερώς τα πρότυπα και πλαίσια με τα οποία πρέπει να συμμορφώνονται οι εταιρείες που δραστηριοποιούνται στο τομέα. Συγκεντρωτικά, τα παραπάνω άρθρα απλοποιούν σημαντικά το νομικό τοπίο διευκολύνοντας την ρύθμιση και τις επενδύσεις στην εγχώρια βιομηχανία υδρογόνου (Lebrouhi B.E., 2022).

⁷⁷ KLRI. Legislative procedures, https://elaw.klri.re.kr/eng_service/step.do

⁷⁸ Mike Welch and Young Chul Choi. The Hydrogen Economy South Korea, Market Intelligence Report January 2021, <https://www.intralinkgroup.com/Syndication/media/Syndication/Reports/Korean-hydrogen-economy-market-intelligence-report-January-2021.pdf>

⁷⁹ KLRI. HYDROGEN ECONOMY PROMOTION AND HYDROGEN SAFETY MANAGEMENT ACT, https://elaw.klri.re.kr/eng_mobile/viewer.do?hseq=54651&type=part&key=31

Το Υπουργείο Ενέργειας είναι η κύρια ρυθμιστική αρχή της βιομηχανίας υδρογόνου, αδειοδοτώντας εταιρίες που ειδικεύονται σε αυτό, βάσει των άρθρων 11 και 12. Παράλληλα, στην Ενότητα 7, σημειώνεται πως το Υπουργείο Ενέργειας κατέχει την εξουσία να ορίζει τον υπεύθυνο οργανισμό για την εποπτεία του τομέα, να εκδίδει άδειες για την κατασκευή εξαρτημάτων που σχετίζονται με τις τεχνολογίες υδρογόνου και να επιβλέπει τις εταιρείες παραγωγής διεξάγοντας επιθεωρήσεις. Ακόμα, σύμφωνα με το άρθρο 19 του νόμου, το Υπουργείο έχει την αρμοδιότητα να απαιτήσει την μετατροπή ενεργειακών εγκαταστάσεων και εργοστασίων, σε συγκεκριμένες περιοχές, σε «Εγκαταστάσεις Προμήθειας Καυσίμου Υδρογόνου» («Hydrogen Fuel Supply Facilities»). Οι περιοχές αυτές ορίζονται ως ελεύθερες οικονομικές ζώνες, χώροι ανάπαυσης σε αυτοκινητόδρομους, βιομηχανικές ζώνες και οποιεσδήποτε άλλες τοποθεσίες που καθορίζονται από την νομοθεσία⁸⁰. Τέλος, ο νόμος προβλέπει την σύσταση της Επιτροπής Οικονομίας Υδρογόνου (Hydrogen Economy Committee), αποτελούμενη από το Υπουργείο Ενέργειας και επτά άλλους κυβερνητικούς φορείς. Σκοπός της παραπάνω επιτροπής είναι ο έλεγχος και η επίβλεψη των θεμάτων που σχετίζονται με την διανομή, προώθηση και ασφάλεια της βιομηχανίας υδρογόνου (Stangarone Troy, 2021).

Εκτός από τον Νόμο για την Προώθηση της Οικονομίας Υδρογόνου και Διαχείριση Ασφάλειας Υδρογόνου, η Νότια Κορέα έχει θεσπίσει και άλλα μέτρα και πολιτικές για να ενθαρρύνει τη χρήση υδρογόνου. Ως απάντηση στην κρίση του COVID-19, η κυβέρνηση εισήγαγε την Πράσινη Νέα Συμφωνία (Green New Deal 2020)⁸¹, στοχεύοντας στην επέκταση των επιδοτήσεων για οχήματα υδρογόνου και την επιτάχυνση της απανθρακοποίησης της οικονομίας. Επιπλέον, στο πλαίσιο του Χαρτοφυλακίου Προτύπων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Renewable Portfolio Standards) προωθούνται οι προσπάθειες αύξησης του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στο συνολικό ενεργειακό μείγμα, ενισχύοντας την διείσδυση του υδρογόνου στο ενεργειακό τομέα⁸². Τέλος, εντοπίζονται προσπάθειες για την προώθηση της βιομηχανίας υδρογόνου και σε τοπικό επίπεδο αλλά σε πολύ μικρότερη κλίμακα⁸³.

1.8.4. Θεσμικό Πλαίσιο για τις Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου στην Νότια Κορέα
Η Νότια Κορέα έχει αναγνωρίσει εδώ και αρκετές δεκαετίες τις δυνατότητες της βιομηχανίας των κυψελών καυσίμου υδρογόνου. Ανά τα έτη, έχουν δημιουργηθεί πολυάριθμα προγράμματα και ινστιτούτα στήριξης όπως το Κέντρο Έρευνας και Ανάπτυξης Υδρογόνου (Hydrogen R&D Center at the Korea Institute of Energy Research) ή το Κέντρο Έρευνας και Ανάπτυξης Κυψελών Καυσίμου (Fuel Cell R&D Center) (Chung Yanghon, 2014). Παράλληλα, η ύπαρξη πολιτικών, όπως το Δεύτερο Βασικό Σχέδιο για τις Νέες και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (Second Basic New and Renewable Energy Plan), επιτρέπουν την οικονομική ενίσχυση για την ανάπτυξη της βιομηχανίας (Azni Muhammad Asyraf, 2021).

Όσον αφορά την νομοθετική ρύθμιση της βιομηχανίας κυψελών καυσίμου, η Νότια Κορέα παρουσιάζει ένα από τα πιο ολοκληρωμένα θεσμικά πλαίσια παγκοσμίως. Ο Νόμος για την Προώθηση της Οικονομίας Υδρογόνου και Διαχείρισης Ασφάλειας Υδρογόνου (Hydrogen

⁸⁰ KLRI. HYDROGEN ECONOMY PROMOTION AND HYDROGEN SAFETY MANAGEMENT ACT, https://elaw.klri.re.kr/eng_mobile/viewer.do?hseq=54651&type=part&key=31

⁸¹ Kim Yeon-joo and Kim Hyo-jin. Korea to extend subsidies for electric cars to 2025 to support green New Deal, <https://pulsenews.co.kr/view.php?year=2020&no=733375>

⁸² Zachary Song. HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN SOUTH KOREA, <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/south-korea>

⁸³ OECD. Green Growth in Action Korea, <https://www.oecd.org/korea/greengrowthinactionkorea.htm>

Economy Promotion and Hydrogen Safety Management Law) αλλά και ο Νόμος για την Ανάπτυξη και την Προώθηση της Τεχνολογίας Εναλλακτικών Μορφών Ενέργειας (Alternative Energy Technology Development and Usage Promotion Act of 1987) διέπουν την αγορά των κυψελών (Sangook Park, 2013). Ουσιαστικά, επιτρέπουν στην κυβέρνηση να παρέχει υποστήριξη και πρότυπα ασφαλείας για τις εγκαταστάσεις παραγωγής.

Σε αντίθεση με άλλες χώρες, εκτός από τον όρο ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εντοπίζεται και ο όρος «νέα και ανανεώσιμη ενέργεια»⁸⁴ («new and renewable energy»), που συμπεριλαμβάνει το υδρογόνο και τις κυψέλες καυσίμου (Chul-Yong Lee, 2017). Με την υιοθέτηση αυτού του εναλλακτικού όρου παρέχεται το πλεονέκτημα της διαφοροποίησης των εναλλακτικών πηγών ενέργειας και της ευκολότερης κατηγοριοποίησης. Συνεπώς, συγκρίνοντας το θεσμικό πλαίσιο της Νότιας Κορέας με αυτά άλλων ισχυρών οικονομιών, διακρίνεται η αποφασιστικότητα της χώρας για την εδραίωση και ανάπτυξη της εγχώριας βιομηχανίας των κυψελών (Azni Muhammad Asyraf, 2021).

1.8.5. Συμπεράσματα

Με μια σειρά αποφάσεων, προγραμμάτων και θεσμικών πρωτοβουλιών η Νότια Κορέα επιδιώκει να ηγηθεί στην ανάπτυξη της βιομηχανίας υδρογόνου και κυψελών καυσίμου. Οι ενέργειες αυτές συμβαδίζουν με τις προσπάθειες επίλυσης οικονομικών, ενεργειακών και περιβαλλοντικών προβλημάτων που αντιμετωπίζει η χώρα. Από τις αρχές της χιλιετίας, στη νοτιοκορεατική χερσόνησο λειτουργούσαν εγκαταστάσεις έρευνας και ανάπτυξης. Παράλληλα, σημειώθηκαν πολλές πρωτοβουλίες και πολιτικές στοχεύοντας στην εισαγωγή του υδρογόνου σε σημαντικούς οικονομικούς τομείς όπως το λιανικό εμπόριο, ο ενεργειακός τομέας, οι μεταφορές και άλλα. Η ψήφιση του Νόμου για την Προώθηση της Οικονομίας Υδρογόνου και Διαχείρισης Ασφάλειας Υδρογόνου το 2020, αποτέλεσε παγκόσμια πρωτοτυπία, αφού απλοποίησε σημαντικά την νομική διαδικασία για την εισαγωγή εγχώριων και διεθνών οργανισμών στην βιομηχανία υδρογόνου. Ακόμα, αποσαφηνίστηκαν οι κανονισμοί ασφαλείας αλλά και οι υπεύθυνοι φορείς για την εποπτεία της αναπτυσσόμενης υδροοικονομίας.

Όσον αφορά τις τεχνολογίες υδρογόνου, η εγχώρια βιομηχανία κυψελών καυσίμου υποστηρίζεται δυναμικά, εδώ και αρκετά χρόνια, με πληθώρα θεσμικών, πολιτικών πρωτοβουλιών αλλά και προγραμμάτων. Παράλληλα, η χρήση του «όρου νέα και ανανεώσιμη ενέργεια» διαφοροποιεί τις τεχνολογίες υδρογόνου διευκολύνοντας σημαντικά τη θεσμική ρύθμισή τους. Ωστόσο, καθώς η εγχώρια οικονομία αναπτύσσεται, κρίνεται αναγκαία η επέκταση του νομικού πλαισίου για την νομική υποστήριξη και κάλυψη όλων των πιθανών πτυχών που απαιτούν ρύθμιση.

⁸⁴ Hwang In-Ha. South Korea's National Basic Plan for New and Renewable Energies, <https://eneken.ieej.or.jp/data/5842.pdf>

2. ΤΕΧΝΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1. Παραγωγή Υδρογόνου

Το υδρογόνο αναγνωρίζεται ευρέως ως μια βιώσιμη δευτερογενής πηγή ενέργειας που μπορεί να αντικαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα (Momirolan M., 2005), δεδομένου ότι δεν απελευθερώνει διοξείδιο του άνθρακα κατά την καύση του και έχει το μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο από όλα τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται σήμερα (Dincer Ibrahim, 2012). Ένα ακόμα σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η ευρεία χρήση των τεχνολογιών του, τόσο σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπως στον τομέα της ενέργειας, όσο και για μικρότερες, όπως η οικιακή κατανάλωση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υδρογόνο μπορεί να παρασκευαστεί με ποικίλες διαδικασίες, να μεταφερθεί με ασφάλεια χρησιμοποιώντας συμβατικές μεθόδους (Hord J., 1980), ενώ υφίστανται αρκετοί μέθοδοι αποθήκευσης (Niaz Saba, 2015). Ωστόσο, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, το αέριο υδρογόνο (H₂) δεν είναι άμεσα διαθέσιμο στη φύση σε μεγάλες ποσότητες⁸⁵.

Η πρώτη μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου που παρατηρήθηκε ήταν, πιθανώς, η διαδικασία ηλεκτρόλυσης του νερού στις αρχές του 19^{ου} αιώνα⁸⁶. Πλέον, έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες διαδικασίες που αξιοποιούν διαφορετικές πηγές ενέργειας, πρώτες ύλες και χημικές διεργασίες ή τεχνικές. Οι διαδικασίες αυτές μπορούν να κατηγοριοποιηθούν με διαφορετικούς τρόπους, ωστόσο, καθώς το υδρογόνο αναδεικνύεται ως υποσχόμενη λύση για την μείωση των αερίων ρύπων και αερίων του θερμοκηπίου, η κατηγοριοποίηση με κριτήριο τις πρώτες ύλες διευκολύνει την μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τις συμβατικές μεθόδους όπου αξιοποιούν ως πρώτη ύλη ορυκτά καύσιμα και τις τεχνικές της πυρόλυσης, της αναμόρφωσης με ατμό, της μερικής οξειδωσης και της αυτοθερμικής αναμόρφωσης με ατμό (Pavlos Nikolaidis, 2017).

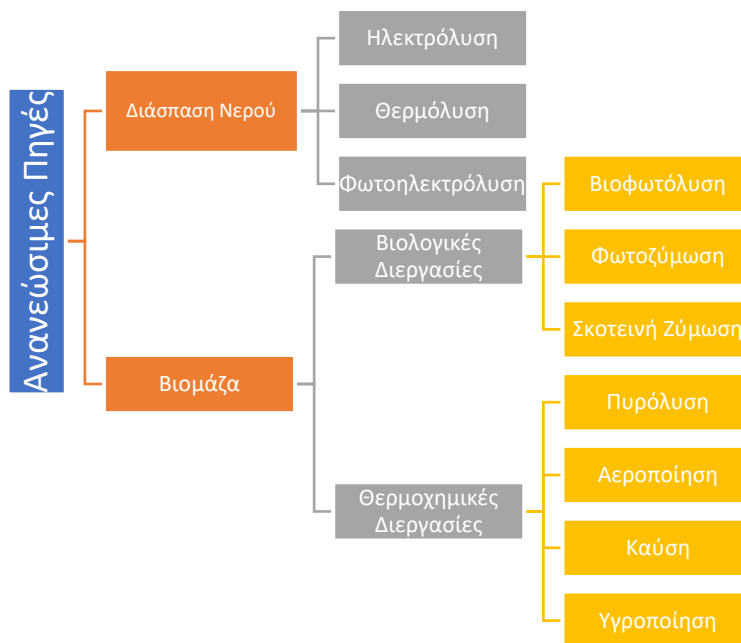
Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει μεθόδους παραγωγής που αξιοποιούν ανανεώσιμες πηγές, δηλαδή το νερό και την βιομάζα. Πιο αναλυτικά, όταν χρησιμοποιείται η βιομάζα ως πρώτη ύλη, οι μέθοδοι υποδιαιρούνται στις θερμοχημικές και βιολογικές διαδικασίες. Στην πρώτη ομάδα περιλαμβάνονται διαδικασίες όπως η πυρόλυση, η αεριοποίηση, η καύση και η υγροποίηση. Αντίστοιχα, στην δεύτερη ομάδα υπόκεινται διαδικασίες όπως η άμεση και έμμεση βιοφωτόλυση, η σκοτεινή ζύμωση, η φωτοζύμωση και η διαδοχική σκοτεινή ζύμωση και φωτοζυμωτική ζύμωση. Από την άλλη, όταν χρησιμοποιείται το νερό ως πρώτη ύλη, αξιοποιούνται διαδικασίες με βάση την διάσπασή του, όπως η ηλεκτρόλυση, η θερμόλυση και η φωτοηλεκτρόλυση (Pavlos Nikolaidis, 2017).

⁸⁵ Nationalgrid. What is hydrogen?, <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-is-hydrogen>

⁸⁶ J. Jonas. THE HISTORY OF HYDROGEN, <https://www.altenergymag.com/article/2009/04/the-history-of-hydrogen/555/>



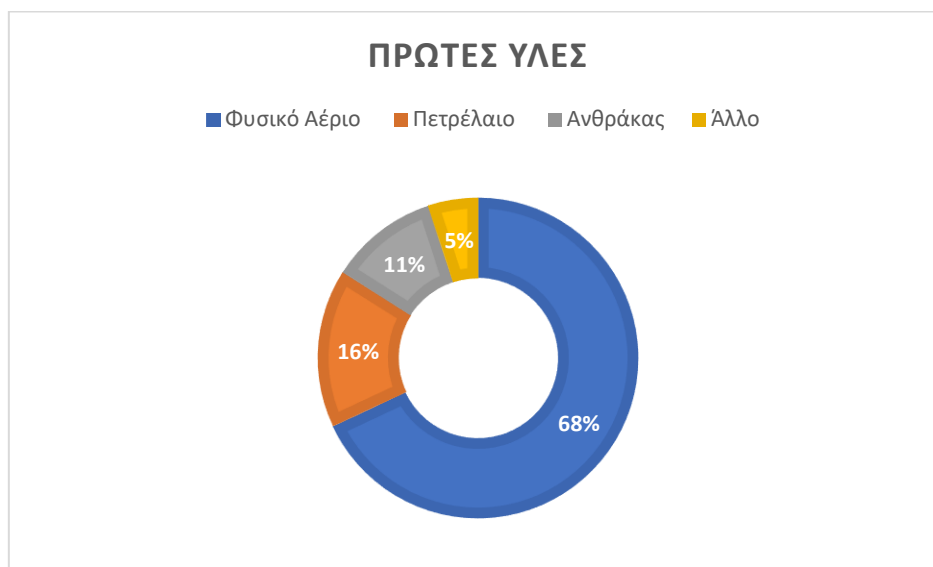
Εικόνα 4: Συμβατικοί Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου.



Εικόνα 5: Μέθοδοι Παραγωγής Υδρογόνου από Ανανεώσιμες Πηγές.

2.1.1. Υδρογόνο από Συμβατικές Μεθόδους – Ορυκτά Καύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα συνιστούν την συνηθέστερη πρώτη ύλη για παραγωγή υδρογόνου παγκοσμίως. Χρησιμοποιούνται σε ποικίλες διαδικασίες, διαφορετικής πολυπλοκότητας, με κυριότερες την αναμόρφωση και την πυρόλυση. Τα πλεονεκτήματά τους είναι αρκετά, με σημαντικότερο το χαμηλό κόστος, αφού η οικονομική βιωσιμότητα μιας διαδικασίας σχετίζεται άμεσα με τις τιμές των πρώτων υλών. Παράλληλα, η διαθεσιμότητα, η υψηλή αναλογία υδρογόνου – άνθρακα αλλά και η ύπαρξη ανεπτυγμένου δικτύου διανομής και αποθήκευσης ενισχύουν περαιτέρω την ανταγωνιστικότητά τους. Σε παγκόσμια κλίμακα, η συντριπτική πλειοψηφία της παραγωγής προέρχεται από το φυσικό αέριο, ενώ ακολουθούν το πετρέλαιο και ο άνθρακας.



Εικόνα 6: Πρώτες Ύλες για την Παραγωγή Υδρογόνου σε Παγκόσμια Κλίμακα.

Συγκεκριμένα, το 68% της παγκόσμιας παραγωγής βασίζεται στην αξιοποίηση φυσικού αερίου ως καύσιμο (Ajanovic A., 2019). Υπερτερεί έναντι των υπολοίπων ορυκτών καυσίμων καθώς παρουσιάζει ευκολία στη διαχείριση, διαθέτει υψηλή αναλογία υδρογόνου – άνθρακα, ενώ παρουσιάζει μειωμένες εκπομπές. Ωστόσο, σημαντικό μειονέκτημα των ορυκτών καυσίμων αποτελεί η παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα ως παραπροϊόν, απαιτώντας την μετατροπή σε πιο βιώσιμες διαδικασίες παραγωγής και την χρήση τεχνολογιών για την δέσμευση και αποθήκευση των ρύπων.

2.1.1.1. Αναμόρφωση με Ατμό

Η αναμόρφωση με ατμό (Steam Reforming – SR) είναι η συνηθέστερη μέθοδος που χρησιμοποιείται στις πετροχημικές και χημικές βιομηχανίες για την παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα⁸⁷. Η διαδικασία περιλαμβάνει μια καταλυτική μετατροπή υδρογονάνθρακα (συνήθως Μεθανίου - CH₄) και ατμού (H₂O) σε οξείδια του άνθρακα και υδρογόνο, γνωστό και ως αέριο σύνθεσης (Syn gas). Οι πρώτες ύλες κυμαίνονται από μεθάνιο, φυσικό αέριο (το μεθάνιο αποτελεί το κύριο συστατικό του φυσικού αερίου) και άλλα αέρια που περιέχουν μεθάνιο. Ακόμα, χρησιμοποιούνται διάφοροι συνδυασμοί ελαφρών υδρογονανθράκων, όπως αιθάνιο (C₂H₆), προπάνιο (C₃H₈), βουτάνιο (C₄H₁₀), πεντάνιο (C₅H₁₂) αλλά και νάφθα (C₁₀H₈). Η διαδικασία απαιτεί την παρουσία κατάλληλων

⁸⁷ Office of Energy Efficiency & Renewable Energy. Hydrogen Production: Natural Gas Reforming. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-natural-gas-reforming>

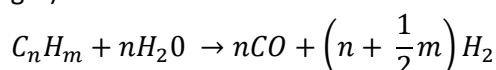
καταλυτών για τους περισσότερους υδρογονάνθρακες. Είναι συνήθως μέταλλα της VIII ομάδας του περιοδικού πίνακα, με το Νικέλιο (Ni) να είναι το πιο αποτελεσματικό (L. Carette, et al., 2001). Ακόμα, αν η πρώτη ύλη περιέχει οργανικές ενώσεις θείου, προηγείται το στάδιο της αποθείωσης για να αποφευχθεί η δηλητηρίαση του καταλύτη αναμόρφωσης. Η διαδικασία πραγματοποιείται σε υψηλές θερμοκρασίες από 700 – 900°C σε πιέσεις έως 3.5MPa και αναλογίες ατμού – άνθρακα 3/5. Η απόδοση της διαδικασίας ποικίλει από 60% έως 85% (Pavlos Nikolaidis, 2017).

Η αποδοτικότητα μιας διαδικασίας παραγωγής μπορεί να ποσοτικοποιηθεί με αρκετές διαφορετικές μεθόδους. Μια από της πιο διαδεδομένες είναι η ενεργειακή απόδοση ή αλλιώς θερμική απόδοση. Η ενεργειακή απόδοση αναφέρεται στον λόγο της ενέργειας εξόδου προς την ενέργεια εισόδου σε ένα ορισμένο χρονικό διάστημα. Η ενέργεια εξόδου υπολογίζεται ως το ενεργειακό περιεχόμενο της μάζας υδρογόνου που παράγεται στο αντίστοιχο χρονικό διάστημα. Αντίστοιχα, η ενέργεια εισόδου, συνήθως, μετρείται σε MJ (Megajoules), στο ίδιο χρονικό διάστημα⁸⁸. Υπολογίζεται ως:

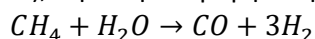
$$\frac{\text{ενεργειά εξόδου (του παραγόμενου } H_2)}{\text{ενέργεια εισόδου}} * 100\%$$

Η γενική διαδικασία περιγράφεται παρακάτω (Pavlos Nikolaidis, 2017):

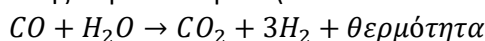
- Η γενική χημική αντίδραση στο στάδιο της Αναμόρφωσης (Reforming) ή παραγωγής Αερίου Σύνθεσης (Syngas):



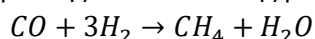
Εφαρμόζοντας στην παραπάνω εξίσωση n=1 και m=4, δημιουργείται στα αντιδραστήρια το μεθάνιο (CH₄), δηλαδή αναμόρφωση μεθανίου με ατμό.



- Το στάδιο της Μετατόπισης Νερού – Αερίου (Water – Gas Shift):



- Τέλος, το στάδιο της απομάκρυνσης του CO₂ και της μεθανοποίησης (methanation):

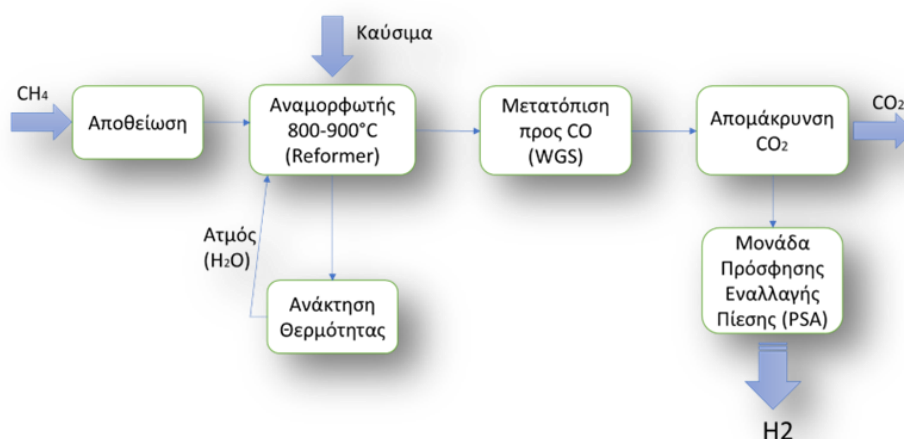


Πρώτα ακολουθεί το στάδιο της Αναμόρφωσης και δημιουργείται το αέριο σύνθεσης. Στην συνέχεια, το αέριο μείγμα περνά από το στάδιο ανάκτησης θερμότητας και τροφοδοτείται σε αντιδραστήρα Μετατόπισης Νερού – Αερίου (Water – Gas Shift). Εκεί, το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) αντιδρά με ατμό για την παραγωγή πρόσθετου αερίου υδρογόνου. Ύστερα, ακολουθεί απομάκρυνση του διοξειδίου του άνθρακα από το μείγμα και η μεθανοποίηση. Η αντίδραση αυτή συμβάλλει στη μείωση της συγκέντρωσης μονοξειδίου του άνθρακα στο αέριο σύνθεσης, καθώς τα υψηλά επίπεδα δηλητηριάζουν τον καταλύτη. Εκτός από την παραπάνω, το μείγμα μπορεί να περάσει από την μονάδα Προσρόφησης Εναλλασσόμενης Πίεσης (Pressure Swing Adsorption), που αποτελεί κυκλική διαδικασία για το καθαρισμό αερίων μειγμάτων⁸⁹. Η διαδικασία απομάκρυνσης του διοξειδίου του άνθρακα και

⁸⁸ Khalil Yehia. (2020). How to calculate the efficiency of hydrogen produced from water electrolysis?. https://www.researchgate.net/post/How_to_calculate_the_efficiency_of_hydrogen_produced_from_water_electrolysis

⁸⁹ Advances in Bioenergy, 2021. Pressure Swing Adsorption. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/pressure-swing-adsorption>

μεθανοποίησης αλλά και η μονάδα Προσρόφησης Εναλλασσόμενης Πίεσης (PSA) συντελούν θετικά στο τελικό προϊόν, καθώς παράγεται υδρογόνο με υψηλότερη καθαρότητα. Συγκεκριμένα, όταν αντιδρούν ατμός και φυσικό αέριο σε καταλύτη με βάση το νικέλιο, σε θερμοκρασίες περίπου 850-900°C και την εφαρμογή Προσρόφησης Εναλλασσόμενης Πίεσης, λαμβάνεται αέριο υδρογόνο με καθαρότητα της τάξης 99,999% (Hsin Liang Chen, 2008).



Εικόνα 7: Διάγραμμα της Διαδικασίας Αναμόρφωσης Μεθανίου με Ατμό.

Όσον αφορά τις ενεργειακές απαιτήσεις της διαδικασίας, χρειάζονται 63.3 kJ ενέργειας ανά ποιε παραγόμενου υδρογόνου (kJ/mol H₂). Η ενέργεια αυτή καλύπτεται από 30 – 35% της συνολικής ποσότητας φυσικού αερίου που χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Η διαδικασία δεν θεωρείται περιβαλλοντικά βιώσιμη λόγω των ανεπιθύμητων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα οι οποίες ανέρχονται σε 0,3-0,4 m³ ανά m³ (κυβικό μέτρο) παραγόμενου υδρογόνου (Muradon, 2001).

Η εκτίμηση του κόστους παραγωγής υδρογόνου με τη χρήση αναμόρφωσης με ατμό αποτελεί δύσκολη και πολυπαραγοντική διαδικασία. Η τιμή του παραγόμενου προϊόντος είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στις κυμαινόμενες τιμές της πρώτης ύλης, τις εμπλεκόμενες διεργασίες αλλά και την κλίμακα παραγωγής της εγκατάστασης (J. R. Bartels, et al., 2010). Ωστόσο, έχουν αναπτυχθεί κάποιες εξισώσεις με σκοπό της προσέγγιση του τελικού κόστους:

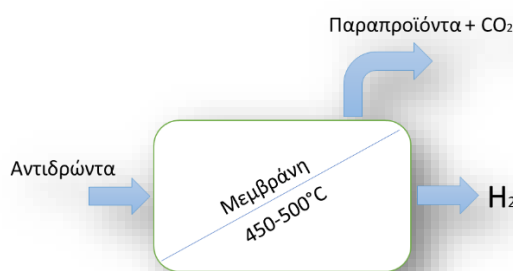
1. $\text{Κόστος}_{\text{H}_2} (\$/\text{MMBtu}) = 1.27 \times \text{Κόστος}_{\text{ΦΑ}} (\$/\text{MMBtu}) + 0.985$
(D. Gray and G.Tomlinson, 2001)
2. $\text{Κόστος}_{\text{H}_2} (\$/\text{Kg}) = 0.286 \times \text{Κόστος}_{\text{ΦΑ}} (\$/\text{MMBtu}) + 0.15$
(S.S. Penner, 2006)

Όπου Κόστος_{ΦΑ} είναι το βιομηχανικό κόστος του φυσικού αερίου και MMBtu (Million British Thermal Units) είναι θερμική μονάδα μέτρησης για το Φυσικό Αέριο⁹⁰ και ισούται με 1.055 GJ.

⁹⁰ Natural Gas Intelligence ,What is an MMBtu? <https://www.naturalgasintel.com/mmbtu/>

Η πρώτη εξίσωση εφαρμόζεται σε εγκαταστάσεις με παραγωγική ικανότητα, περίπου, 236.239kg/ημέρα (100 Εκατομμυρίων Τυποποιημένων Κυβικών Ποδιών ανά ημέρα ή SCFD) όπου το κόστος κεφαλαίου είναι περίπου 0.65 – 0.80\$/SCFD (2007 δολάρια). Επιπλέον, η θερμική απόδοση της εγκατάστασης θεωρείται πως είναι στο 70% ή υψηλότερη. Η δεύτερη εξίσωση αποτελεί σχέση παρόμοιας μορφής χωρίς, όμως, να απαιτείται προσδιορισμός μεγέθους της εγκατάστασης ή άλλων παραγόντων (Brett Parkinson, 2018). Με το μέσο εβδομαδιαίο κόστος φυσικού αερίου να ανέρχεται στα 2.5\$/MMBtu⁹¹ και εφαρμόζοντας στις παραπάνω εξισώσεις προκύπτουν 4.16\$/MMBtu και 0.865\$/kgH₂ (δολάρια 2024).

Η μέθοδος της αναμόρφωσης με ατμό αποτελεί την κύρια μέθοδο παραγωγής υδρογόνου παγκόσμιος και συνεπώς βελτιστοποιείται συνεχώς ως προς την απόδοση και το κόστος. Μια νέα τεχνολογία που παρουσιάζει προοπτική είναι οι αντιδραστήρες μεμβρανών με βάση το παλλάδιο (Pd). Τα μόρια υδρογόνου που παράγονται στον αναμορφωτή μεταφέρονται με προσρόφηση και ατομική διάσπαση στη μία πλευρά της μεμβράνης, ενώ τα παραπροϊόντα παρακρατούνται και απομακρύνονται. Ουσιαστικά, επιτυγχάνεται η ταυτόχρονη διεξαγωγή της αντίδρασης και του διαχωρισμού σε ένα στάδιο, ενώ παρουσιάζεται η ίδια μετατροπή αντιδρώντων στην χαμηλότερη θερμοκρασία των 450 – 550°C (Pavlos Nikolaidis, 2017).



Εικόνα 8: Διάγραμμα της Διαδικασίας Αναμόρφωσης Ατμού Μεθανίου με Ενσωματωμένη Μεμβράνη.

2.1.1.2. Μερική Οξειδωση

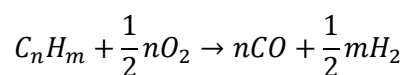
Η διαδικασία της μερικής οξειδωσης (Partial Oxidation – POX) περιλαμβάνει την μετατροπή οξυγόνου, ορισμένες φορές ατμού, και υδρογονανθράκων σε υδρογόνο. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται κυρίως στα διυλιστήρια, ενώ υφίσταται αρκετές τροποποιήσεις, αναλόγως την σύνθεση και το τύπο του καυσίμου που αξιοποιείται. Η μερική οξειδωση μπορεί να είναι καταλυτική ή μη καταλυτική. Η μη καταλυτική χαρακτηρίζεται από υψηλές θερμοκρασίες, 1150 – 1315°C και σαν πρώτη ύλη αξιοποιούνται όλοι οι υδρογονάνθρακες, από μεθάνιο μέχρι πετρέλαιο και άνθρακα (C). Η καταλυτική λειτουργεί σε μικρότερο εύρος θερμοκρασιών, στους 950°C, ενώ η πρώτη ύλη κυμαίνεται από το μεθάνιο μέχρι και την νάφθα (Pavlos Nikolaidis, 2017). Πολλές φορές απαιτείται απομάκρυνση του θείου, ενώ χρησιμοποιείται καθαρό οξυγόνο για τη μερική οξειδωση υδρογονανθράκων. Στην συνέχεια, το παραγόμενο αέριο σύνθεσης επεξεργάζεται περαιτέρω με τις ίδιες διεργασίες όπως στην αναμόρφωση με ατμό. Γενικά, η μέθοδος της μερικής οξειδωσης θεωρείται ιδανική για πρώτες ύλες με χαμηλότερες αναλογίες υδρογόνου – άνθρακα. Ωστόσο, σε αυτά

⁹¹ EIA. Natural gas weekly update. <https://www.eia.gov/naturalgas/weekly/#tabs-prices-2> (accessed on 28/1/2024)

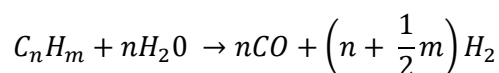
τα καύσιμα, λόγω της χαμηλής αναλογίας, το μεγαλύτερο ποσοστό του παραγόμενου υδρογόνου προέρχεται από τον ατμό (Hsin Liang Chen, 2008).

Η γενική χημική αντίδραση του σταδίου της αναμόρφωσης και της δημιουργίας του αερίου σύνθεσης περιγράφεται παρακάτω (Pavlos Nikolaidis, 2017):

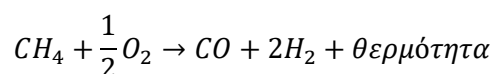
- Καταλυτική:



- Μη καταλυτική:

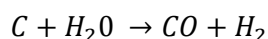


Εφαρμόζοντας στην καταλυτική εξίσωση $n=1$ και $m=4$, δημιουργείται στα αντιδραστήρια το μεθάνιο.

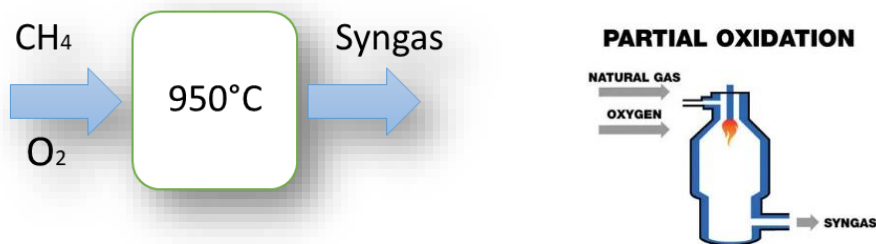


Το πρόσθετο κόστος της μονάδας οξυγόνου και των σταδίων αποθείωσης απαιτούν μεγαλύτερη ένταση κεφαλαίου (Balthasar, 1984). Στην καταλυτική διεργασία, η θερμική απόδοση κυμαίνεται από 60 – 75% (J.D. Holladay, 2009).

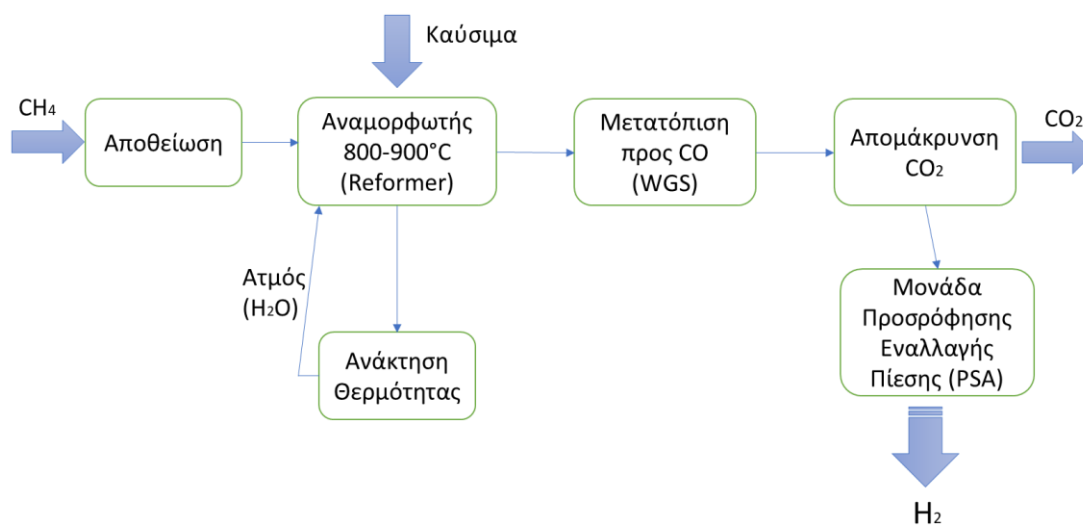
Εφαρμόζοντας στην μη καταλυτική εξίσωση $n=1$ και $m=0$, δημιουργείται στα αντιδραστήρια άνθρακας. Ουσιαστικά, ο άνθρακας μετατρέπεται σε αέριο σύνθεσης αποτελούμενο από μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο.



Η παραπάνω χημική αντίδραση εντοπίζεται στην διαδικασία αεριοποίησης άνθρακα. Η αεριοποίηση άνθρακα αποτελεί την κύρια μέθοδο μέσω της οποίας λαμβάνεται υδρογόνο από άνθρακα. Οι μηχανισμοί αντίδρασης αυτής της μεθόδου μοιάζουν πολύ με εκείνους της μερικής οξείδωσης βαριών κλασμάτων πετρελαίου (Balthasar, 1984), ωστόσο, ο πρόσθετος χειρισμός του καυσίμου ως στερεού και η απομάκρυνση των μεγάλων ποσοτήτων τέφρας έχουν σοβαρό αντίκτυπο στο κόστος. Η παραπάνω εξίσωση αποτελεί το πρώτο βήμα της διαδικασίας της αεριοποίησης, δηλαδή της δημιουργίας του αερίου σύνθεσης. Στην συνέχεια, ακολουθεί καθαρισμός του σύνθετου αερίου, απομακρύνοντας άλλα αέρια και αιωρούμενα σωματίδια. Στο επόμενο στάδιο, το μείγμα προωθείται σε αντιδραστήρια Μετατόπισης Νερού – Αερίου. Όπως και στις άλλες μεθόδους, το μονοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται σε περισσότερο υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα με την βοήθεια ατμού. Μετά, το αέριο αποτελείται κυρίως από υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Τέλος, το αέριο μείγμα περνά από την μονάδα Προσρόφησης Εναλλασσόμενης Πίεσης, που αποτελεί κυκλική διαδικασία για το καθαρισμό αερίων μειγμάτων (Pavlos Nikolaidis, 2017).



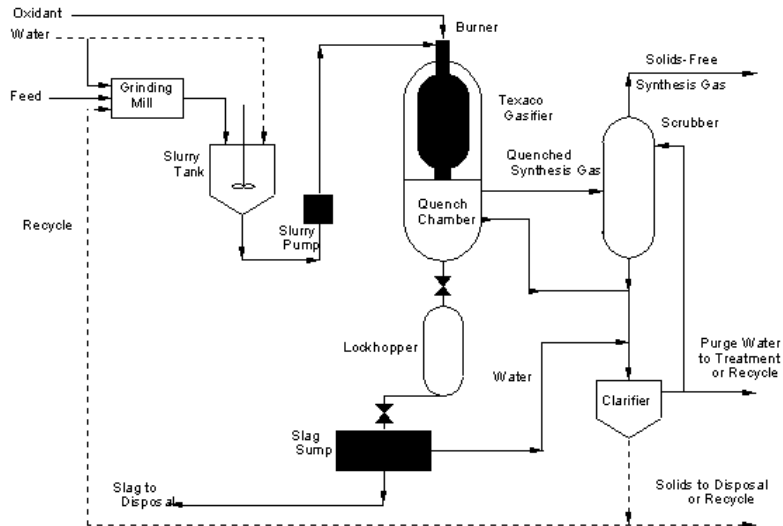
Εικόνα 9: Διαδικασία Μερικής Οξείδωσης του Μεθανίου.
 Πηγή: <https://globalsyngas.org/syngas-technology/syngas-production/partial-oxidation/>



Εικόνα 10: Διάγραμμα της Διαδικασίας Αεριοποίησης του Άνθρακα.

Η παραγωγή υδρογόνου από άνθρακα είναι εμπορικά ώριμη αλλά είναι περισσότερο πολύπλοκη σε σχέση με την διαδικασία της αναμόρφωσης ατμού. Εφαρμόζεται εμπορικά και δύναται να θεωρηθεί ανταγωνιστικότερη της αναμόρφωσης του μεθανίου μόνο σε περιπτώσεις όπου το φυσικό αέριο είναι ακριβό (Yamashita Kei, 2005). Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για δύο μονάδες παραγωγής υδρογόνου που χρησιμοποιούν αεριοποιητή Texaco (Η διεργασία αεριοποίησης της Texaco (TGP) είναι μια μη καταλυτική διεργασία μερικής οξείδωσης)⁹² με την μία να περιλαμβάνει τεχνολογίες Δέσμευσης και Αποθήκευσης Άνθρακα και παραγωγική ικανότητα της τάξης 276.900kg/ημέρα και την άλλη με παραγωγική ικανότητα 255.400kg/ημέρα και χωρίς ικανότητες δέσμευσης, έδειξαν πως το κόστος του υδρογόνου ανέρχεται στα 1.63\$/kg και 1.34\$/kg (δολάρια 2005) αντίστοιχα (Jeffrey R. Bartels, 2010).

⁹² TEXACO INC. TECHNOLOGY DESCRIPTION,
<https://clu-in.org/products/site/complete/democomp/texaco.htm>

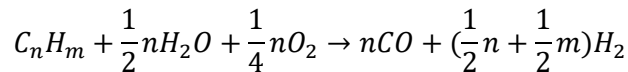


Εικόνα 11: Διαδικασία της Αεριοποίησης Texaco.

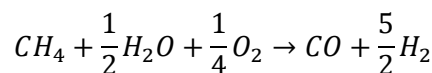
Πηγή: <https://clu-in.org/products/site/complete/democomp/texaco.htm>

2.1.1.3. Αυτόθερμη αναμόρφωση

Η διαδικασία της αυτόθερμης (ή αυτοθερμικής) αναμόρφωσης (Autothermal Reforming – ATR) αξιοποιεί την εξώθερμη μερική οξείδωση για την παροχή θερμότητας και την ενδόθερμη αναμόρφωση ατμού για την παραγωγή υδρογόνου. Ουσιαστικά, συνδυάζονται οι διεργασίες της μερικής οξείδωσης και της αναμόρφωσης. Η μέθοδος περιλαμβάνει την χρήση ατμού, οξυγόνου (ή αέρα) και της πρώτης ύλης, προκαλώντας ταυτόχρονα τις αντιδράσεις αναμόρφωσης και οξείδωσης για την παραγωγή αερίου σύνθεσης. Η χημική αντίδραση για την παραγωγή του αερίου σύνθεσης περιγράφεται παρακάτω (Pavlos Nikolaidis, 2017):

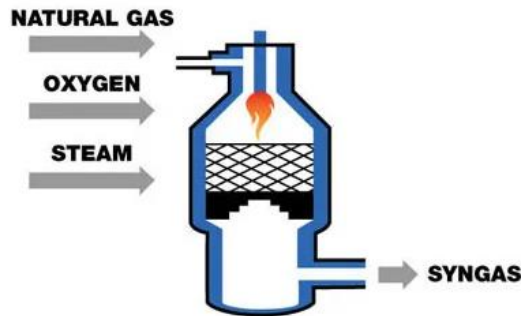


Εφαρμόζοντας $n=1$, $m=4$, σχηματίζεται το μεθάνιο στα αντιδρώντα και προκύπτει:



Μετά τον σχηματισμό του αερίου σύνθεσης, το μείγμα προωθείται σε αντιδραστήρα Μετατόπισης Νερού – Αερίου, ενώ στην συνέχεια εισέρχεται από την μονάδα Προσρόφησης Εναλλασσόμενης Πίεσης για το καθαρισμό του, όπως και στις άλλες διαδικασίες. Χρησιμοποιώντας ως καύσιμο το μεθάνιο, η χημική απόδοση κυμαίνεται στο 60-75%. Οι θερμοκρασίες στις οποίες συνήθως πραγματοποιείται η διεργασία είναι μεταξύ 700°C, όπως στην περίπτωση του μεθανίου, και 1100°C (J.D. Holladay, 2009). Παράλληλα, οι προηγμένες εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας απόδοσης 70% με τεχνολογίες για δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα της τάξης του 90%, επιτρέπουν την παραγωγή υδρογόνου με κόστος που ανέρχεται στα 1.48 \$/kgH₂ (δολάρια 2005). Το κόστος επένδυσης θεωρείται περίπου 15 – 25 % χαμηλότερο από αυτό στην αναμόρφωση με ατμό και στην αεριοποίηση άνθρακα.

AUTOTHERMAL REFORMING

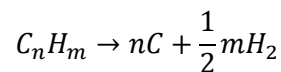


Εικόνα 12: Διαδικασία Αυτόθερμης Αναμόρφωσης.

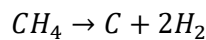
Πηγή: <https://globalsyngas.org/syngas-technology/syngas-production/partial-oxidation/>

2.1.1.4. Πυρόλυση

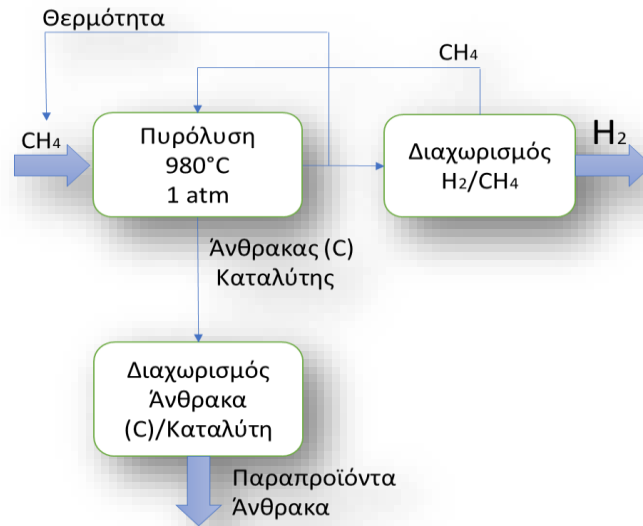
Η διαδικασία της πυρόλυσης (pyrolysis) αποτελεί θερμοκαταλυτική αποσύνθεση υδρογονάνθρακων. Αξιοποιεί ως μοναδική πρώτη ύλη υδρογονάνθρακες, ενώ κατά την διαδικασία δεν παράγονται αέριοι ρύποι διοξειδίου του άνθρακα (CO₂). Η γενική χημική αντίδραση που περιγράφει την διαδικασία είναι (Pavlos Nikolaidis, 2017):



Εφαρμόζοντας n=1, m=4, σχηματίζεται το μεθάνιο (CH₄) στα αντιδρώντα και προκύπτει:



Η πυρόλυση του μεθανίου (CH₄) πραγματοποιείται σε περιβάλλον χωρίς αέρα και νερό, σε θερμοκρασία έως 980°C και ατμοσφαιρική πίεση ίση με 1 atm. Στα προϊόντα παράγονται άνθρακας (C) και αέριο υδρογόνο (H₂), κρίνοντας μη αναγκαία τα στάδια της Μετατόπισης Νερού – Αερίου και του καθαρισμού του τελικού μίγματος. Παράλληλα, ο παραγόμενος άνθρακας (C) μπορεί είτε να απομονωθεί είτε να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω από διάφορες βιομηχανίες. Οι ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας ανέρχονται στα 37.6 kJ/mol H₂, καθιστώντας την λιγότερο απαιτητική από την διαδικασία της αναμόρφωσης με ατμό. Οι ενεργειακές ανάγκες δύναται να καλυφθούν με την καύση περίπου του 15-20% του παραγόμενου υδρογόνου (Muradon, 2001). Επιπλέον, καθώς η πυρόλυση δεν περιλαμβάνει τις διεργασίες Μετατόπισης Νερού – Αερίου, απομάκρυνσης και διαχείρισης του διοξειδίου του άνθρακα οι επενδύσεις κεφαλαίου, για μεγάλες μονάδες, είναι χαμηλότερες σε σχέση με αυτές για την αναμόρφωση με ατμό ή την μερική οξείδωση. Αποτέλεσμα αυτού, είναι η παραγωγή υδρογόνου με 25 – 30% χαμηλότερο κόστος (Pavlos Nikolaidis, 2017).



Εικόνα 13: Διάγραμμα της Διαδικασίας Πυρόλυσης Μεθανίου.

2.1.2. Υδρογόνο από Ανανεώσιμες Πηγές

Ενώ οι υδρογονάνθρακες παραμένουν το κύριο καύσιμο για την παραγωγή υδρογόνου, παρατηρείται αύξηση της ενσωμάτωσης τεχνολογιών που αξιοποιούν ως πρώτη ύλη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και καύσιμα. Καθώς τα παγκόσμια αποθέματα ορυκτών καυσίμων μειώνονται και το φαινόμενο του θερμοκηπίου προσελκύει την προσοχή της παγκόσμιας κοινότητας, το μερίδιο των ανανεώσιμων τεχνολογιών αυξάνεται συνεχώς και μακροπρόθεσμα προβλέπεται να αντικαταστήσουν τις συμβατικές τεχνολογίες (Henrik, 2007). Συνεπώς, οι ανανεώσιμες τεχνολογίες έχουν διεισδύσει και στον τομέα παραγωγής υδρογόνου όπου πλέον υφίστανται πολυάριθμοι μέθοδοι για βιώσιμη παραγωγή αξιοποιώντας ως πρώτη ύλη την βιομάζα και το νερό.

2.1.2.1. Υδρογόνο από Βιομάζα

Η βιομάζα αποτελεί βιώσιμη και ανανεώσιμη πρωτογενής πηγή ενέργειας που προέρχεται από φυτικούς και ζωικούς πόρους, όπως υπολείμματα καλλιεργειών, δασική ξυλεία, βιομηχανικά υπολείμματα, ζωικά και αστικά απόβλητα και άλλα (Demirbaş Ayhan, 2001). Η ποσότητα διοξειδίου του άνθρακα που εκπέμπεται από την χρήση βιομάζας, κατά την παραγωγή ενέργειας, θεωρείται πως αντισταθμίζεται από την ποσότητα που απορρόφησαν οι οργανισμοί όσο ήταν ακόμα ζωντανοί, καθιστώντας την βιώσιμη εναλλακτική. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από τη βιομάζα μέσω θερμοχημικών και βιολογικών διεργασιών. Οι βιολογικές διεργασίες είναι τόσο περιβαλλοντικά επωφελείς όσο και ενεργειακά αποδοτικές (Balat Hanva, 2010). Αντίστοιχα, οι θερμοχημικές διεργασίες είναι ταχύτερες και παρέχουν καλύτερες αποδόσεις παραγωγής, γεγονός που τις καθιστά ελκυστική επιλογή από οικονομική και περιβαλλοντική άποψη (Pavlos Nikolaidis, 2017).

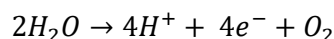
2.1.2.1.1. Βιολογικές Διεργασίες

Οι κύριες βιολογικές διεργασίες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή υδρογόνου είναι η άμεση και έμμεση βιοφωτόλυση, η σκοτεινή ζύμωση, η φωτοζύμωση και η διαδοχική σκοτεινή και φωτοζυμωτική ζύμωση. Το υδρογόνο παράγεται απευθείας από ορισμένα βακτήρια ή φύκια μέσω του ενζυμικού συστήματος ή από ζυμωτικές διεργασίες όπου τα υλικά που περιέχουν υδατάνθρακες μετατρέπονται σε οργανικά οξέα και στη συνέχεια σε αέριο υδρογόνο.

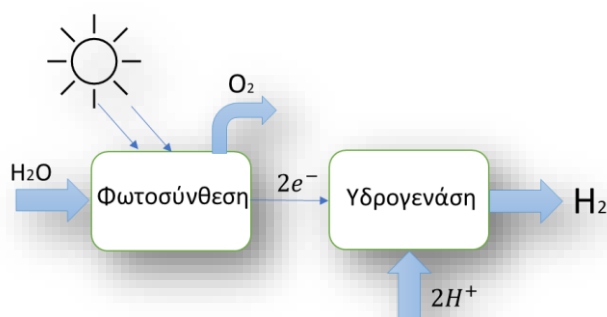
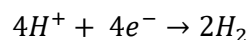
Η βιοφωτόλυση (biophotolysis) βασίζεται στην φωτοσύνθεση και τα καταλυτικά ένζυμα υδρογενάσης (hydrogenase enzyme). Γενικά, στα πράσινα φυτά κατά την διαδικασία της φωτοσύνθεσής λαμβάνει χώρα μόνο η αναγωγή του διοξειδίου του άνθρακα, καθώς τα ένζυμα που καταλύουν το σχηματισμό υδρογόνου απουσιάζουν. Αντιθέτως, η πράσινη άλγη και τα κυανοβακτήρια περιέχουν ένζυμα που παράγουν υδρογόνο. Σε πλήρως ελεγχόμενες συνθήκες, δεδομένου ότι τα συγκεκριμένα ένζυμα δραστηριοποιούνται απουσία φωτός και συγκεκριμένα επίπεδα οξυγόνου, διασπώνται τα μόρια νερού σε ιόντα υδρογόνου ($H^{+/-}$) και οξυγόνο. Στην άμεση βιοφωτόλυση, η πράσινη άλγη διασπά τα μόρια του νερού σε ιόν υδρογόνου και οξυγόνο μέσω φωτοσύνθεσης. Στην συνέχεια, τα παραγόμενα ιόντα υδρογόνου μετατρέπονται σε αέριο υδρογόνο από το ένζυμο υδρογενάση (Ilgı Karapinar Karpan, 2006).

Η γενική διαδικασία παρουσιάζεται παρακάτω (Pavlos Nikolaidis, 2017):

- Φωτοσύνθεση:



- Παραγωγή Υδρογόνου:



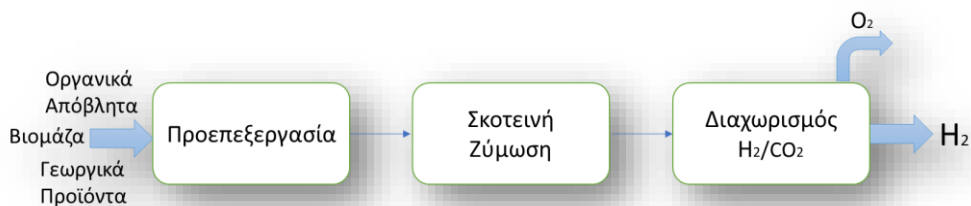
Εικόνα 14: Διάγραμμα της Διαδικασίας Άμεση Βιοφωτόλυσης

Η έμμεση βιοφωτόλυση (direct biophotolysis) είναι μια διαδικασία δύο σταδίων όπου αξιοποιούνται κυανοβακτήρια για την παραγωγή υδρογόνου. Αρχικά, τα κυανοβακτήρια μέσω της διαδικασίας της φωτοσύνθεσης παράγουν κυτταρική ουσία και οξυγόνο. Στην συνέχεια, η κυτταρική ουσία χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου (Olga Βιζάκονά, 2012). Παράλληλα, τα κυανοβακτήρια είναι πιο ανθεκτικά στις μεταβολές του οξυγόνου ενώ διαθέτουν ένζυμα νιτρογενάσης που μπορούν να λειτουργήσουν ξεχωριστά για να καταλύσουν την παραγωγή υδρογόνου. Ουσιαστικά, το υδρογόνο παράγεται τόσο από τα ένζυμα υδρογενάσης (hydrogenase) όσο και από τα ένζυμα νιτρογενάσης (Pavlos Nikolaidis, 2017). Επομένως, η παραγωγή από άλγη δύναται να θεωρηθεί ως μια προσιτή και βιώσιμη προσέγγιση, ωστόσο, υφίστανται και μειονεκτήματα με σημαντικότερα να είναι η χαμηλή παραγωγική ικανότητα, η ανάγκη για μεγάλες επιφάνειες για την απορρόφηση επαρκούς φωτός και η έλλειψη αξιοποίησης των αποβλήτων (Ilgi Karapinar Kardan, 2006).

Οι ζυμώσεις αποτελούν σημαντικές διεργασίες για την παραγωγή υδρογόνου από βιομάζα. Είναι βιοχημικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα με ή χωρίς οξυγόνο, εκτελώντας μικροβιακούς μετασχηματισμούς οργανικών υλικών για την παραγωγή υδρογόνου και παραπροϊόντων, όπως διοξείδιο του άνθρακα και οργανικές ενώσεις. Οι διεργασίες αυτές αποτελούν ελκυστική προσέγγιση για την βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου (Balthasar, 1984).

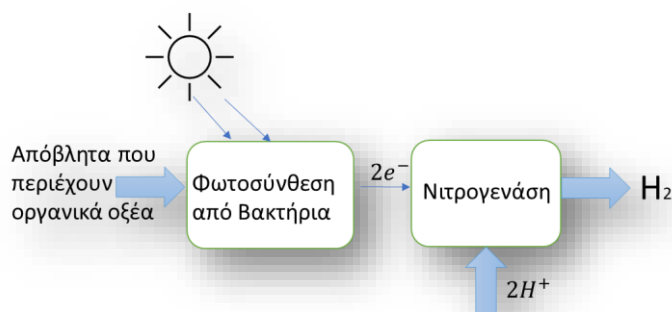
Η σκοτεινή ζύμωση (dark fermentation) είναι μια μικροβιακή διεργασία που λαμβάνει χώρα απουσία φωτός, όπου ορισμένοι αναερόβιοι μικροοργανισμοί διασπούν οργανικά υποστρώματα, όπως σάκχαρα ή απόβλητα βιομάζας, για να παράγουν αέριο υδρογόνο ως μεταβολικό παραπροϊόν (Pavlos Nikolaidis, 2017). Σε αντίθεση με τη βιοφωτόλυση που παράγει μόνο υδρογόνο, τα προϊόντα της σκοτεινής ζύμωσης συνήθως περιλαμβάνουν υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα τα οποία αναμιγνύονται με άλλα αέρια, όπως το μεθάνιο ή το θειώδες υδρογόνο. Το pH πρέπει να διατηρείται σταθερό μεταξύ 5 και 6 για τη βέλτιστη δυνατή παραγωγή, ενώ είναι αναγκαίο να απομακρύνονται τα παραγόμενα αέρια, αφού η πίεση είναι ακόμα μια σημαντική παράμετρος που επηρεάζει την διαδικασία (J.D. Holladay, 2009). Καθώς η σκοτεινή ζύμωση δεν βασίζεται στη διαθεσιμότητα φωτεινών

πηγών, δεν είναι απαραίτητες μεγάλες επιφάνειες, ενώ η παραγωγή είναι διαρκής τόσο κατά τη διάρκεια της ημέρας όσο και της νύχτας (Debabrata Das, 2001).



Εικόνα 15: Διάγραμμα Διαδικασίας της Σκοτεινής Ζύμωσης.

Η φωτοζύμωση (photo-fermentation) είναι μια βιοχημική διαδικασία που περιλαμβάνει τη μετατροπή οργανικών ενώσεων, όπως οξικό ή γαλακτικό οξύ, σε αέριο υδρογόνο και άλλα παραπροϊόντα, χρησιμοποιώντας το φως ως πηγή ενέργειας. Πραγματοποιείται από ορισμένους φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς που, χάρη στην παρουσία των ενζύμων νιτρογενάσης, είναι ικανοί να μετατρέψουν οργανικά οξέα σε υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα. Η διεργασία λαμβάνει μέρος σε συνθήκες έλλειψης αζώτου (N) και οξυγόνου. Σημαντική επίδραση στην παραγωγική ικανότητα της διαδικασίας διαδραματίζει η ένταση του φωτός, καθώς η αύξηση της έντασης δρα ευεργετικά (Pavlos Nikolaidis, 2017). Παρόλο που η παραγωγική ικανότητα της διαδικασίας είναι συνήθως υψηλότερη συγκριτικά με την σκοτεινή ζύμωση, η χαμηλή απόδοση μετατροπής της ηλιακής ενέργειας, η απαίτηση για περίπλοκους αναερόβιους φωτοβιοαντιδραστήρες που καλύπτουν μεγάλες εκτάσεις (Meng Ni, 2006), καθώς και η περιορισμένη διαθεσιμότητα οργανικών οξέων (J.D. Holladay, 2009) είναι βασικά εμπόδια που περιορίζουν την ανταγωνιστικότητά της.



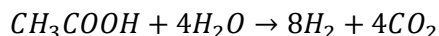
Εικόνα 16: Διάγραμμα Διαδικασίας της Φωτοζύμωσης.

Οι διεργασίες της σκοτεινής ζύμωσης και της φωτοζύμωσης δύναται να συνδυαστούν σε υβριδικά συστήματα επιτυγχάνοντας περισσότερη παραγωγή υδρογόνου με χαμηλότερη εξάρτηση από το φως. Ένα τέτοιο σύστημα περιλαμβάνει μη φωτοσυνθετικούς και φωτοσυνθετικούς μικροοργανισμούς. Συγκεκριμένα, υπό σκοτεινές συνθήκες οι αναερόβιοι μικροοργανισμοί παράγουν υδρογόνο, ενώ τα παραπροϊόντα, δηλαδή οργανικά οξέα, αποτελούν πρώτη ύλη για τα φωτοσυνθετικά βακτήρια με σκοπό την πρόσθετη παραγωγή υδρογόνου. Ο συνδυασμός σκοτεινής ζύμωσης και φωτοζύμωσης αναφέρεται μερικές φορές ως διαδοχική σκοτεινή φωτοζυμωτική ζύμωση ή ως μέθοδος δύο σταδίων (Debabrata Das, 2001). Η γενική χημική διεργασία περιγράφεται παρακάτω (Pavlos Nikolaidis, 2017):

- Σκοτεινή ζύμωση με γλυκόζη ως οργανικό υπόστρωμα:



- Φωτοζύμωση με οξικό οξύ:



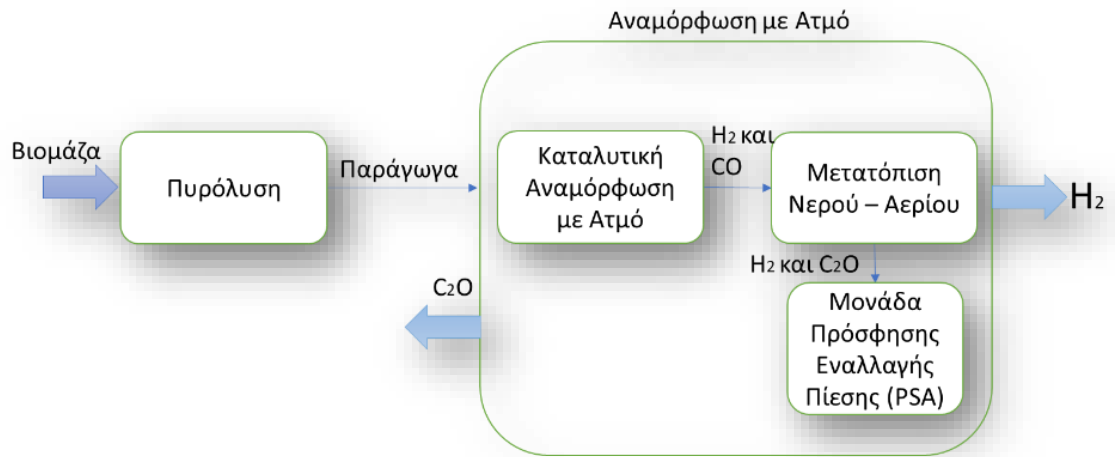
Το κόστος παραγωγής υδρογόνου με διαδοχική σκοτεινή και φωτοζυμωτική ζύμωση δεν είναι γνωστό αλλά θεωρείται χαμηλότερο από τα μεμονωμένα στάδια, τα οποία υπολογίζονται στα 2,57 \$/kgH₂ και 2,83 \$/kgH₂ (δολάρια 2014) για τη σκοτεινή ζύμωση και τη φωτοζύμωση αντίστοιχα (Canan Acar, 2018).

2.1.1.2.2. Θερμοχημικές Διεργασίες

Οι θερμοχημικές διεργασίες αποτελούν την δεύτερη κατηγορία μεθόδων που αξιοποιούν βιομάζα για την παραγωγή υδρογόνου. Οι σημαντικότερες διαδικασίες είναι η αεριοποίηση, η πυρόλυση, η καύση και η υγροποίηση. Ωστόσο, η καύση και η υγροποίηση είναι λιγότερο προτιμώμενες, καθώς προσφέρουν χαμηλή παραγωγική ικανότητα, με την πρώτη να εκπέμπει ρυπογόνα παραπροϊόντα και τη δεύτερη να απαιτεί αναερόβιες συνθήκες λειτουργίας υψηλής πίεσης (Meng Ni, 2006). Με την αξιοποίηση της αεριοποίησης ή της πυρόλυσης, εκτός από υδρογόνο, παράγονται και παραπροϊόντα, όπως μεθάνιο και μονοξείδιο του άνθρακα, τα οποία μπορούν να επεξεργαστούν περαιτέρω για περισσότερη παραγωγή υδρογόνου μέσω αναμόρφωσης ατμού και της αντίδρασης Μετατόπισης Νερού – Αερίου.

Η αεριοποίηση της βιομάζας (biomass gasification) αποτελεί μια θερμοχημική διαδικασία κατά την οποία βιομάζα, οξυγόνο ή ατμός μετατρέπονται σε αέριο σύνθεσης. Λαμβάνει μέρος σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των 500 – 1400°C και σε περιβάλλον με υψηλή πίεση. Η σύνθεση του αερίου μείγματος εξαρτάται από την χρήση ατμού ή οξυγόνου στα πρώτα στάδια της διαδικασίας. Στην συνέχεια, το αέριο σύνθεσης υπόκειται στην ίδια επεξεργασία όπως και στις συμβατικές μεθόδους. Συγκεκριμένα, η αεριοποίηση βιομάζας με ατμό παρουσιάζει θερμική απόδοση της τάξης του 52% και κόστος παραγωγής στα 1.77 – 2.05 \$/kgH₂ (δολάρια 2006), καθιστώντας την αποτελεσματική για την παραγωγή ανανεώσιμου υδρογόνου (Pavlos Nikolaidis, 2017). Ωστόσο, ο τύπος βιομάζας, η θερμοκρασία, η αναλογία ατμού – βιομάζας αλλά και ο τύπος του καταλύτη που χρησιμοποιείται, επηρεάζουν άμεσα την απόδοση της διεργασίας (Zhiqi Wang, 2015).

Η πυρόλυση (biomass pyrolysis) περιλαμβάνει την υποβολή βιομάζας σε υψηλές θερμοκρασίες, 400 – 800°C, απουσία οξυγόνου με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου. Αυτή η θερμοχημική διεργασία έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή υγρών βιοελαίων, στερεού άνθρακα και μειγμάτων αέριων. Τα αέρια, που αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο, μονοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο μπορούν να αναμορφωθούν με ατμό. Επιπλέον, για περισσότερη παραγωγή υδρογόνου μπορεί να εφαρμοστεί η αντίδραση της Μετατόπισης Νερού – Αερίου. Η απόδοση της διαδικασίας εξαρτάται άμεσα από τον τύπο της πρώτης ύλης, τον καταλύτη, τη θερμοκρασία και τον χρόνο επεξεργασίας της βιομάζας (Pavlos Nikolaidis, 2017). Οι υψηλές θερμοκρασίες και μεγαλύτεροι χρόνοι παραμονής ευνοούν την παραγωγή αερίων μειγμάτων, ενώ οι χαμηλότερες θερμοκρασίες και μικρότεροι χρόνοι παραμονής ευνοούν την παραγωγή υγρών προϊόντων. Τέλος, το κόστος παραγωγής κυμαίνεται από 1.25 \$/kgH₂ έως 2.20 \$/kgH₂ (δολάρια 2004), ανάλογα με το μέγεθος της εγκατάστασης και τον τύπο της βιομάζας που χρησιμοποιείται (Meng Ni, 2006).



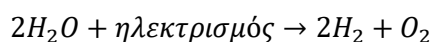
Εικόνα 17: Διάγραμμα Διαδικασίας της Πυρόλυσης Βιομάζας.

2.1.3. Υδρογόνο από Διάσπαση Νερού

Το νερό δύναται να αποτελέσει καθοριστικό παράγοντα για την παραγωγή καθαρού υδρογόνου, λόγω της αφθονίας του και των καινοτόμων μεθόδων που το αξιοποιούν. Διεργασίες όπως η ηλεκτρόλυση, η θερμόλυση και η φωτο-ηλεκτρόλυση επιτρέπουν την εξαγωγή υδρογόνου χωρίς την άμεση παραγωγή ρύπων και αθεμίτων παραπροϊόντων. Παράλληλα, αξιοποιώντας την ενέργεια που προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως η ηλιακή ή η αιολική ενέργεια, εξασφαλίζεται ανανεώσιμη παροχή ενέργειας για την εξάλειψη των ρύπων από όλη την παραγωγική διαδικασία. Αυτή η βιώσιμη προσέγγιση τοποθετεί το υδρογόνο ως ενδεχόμενη λύση στο πρόβλημα αναζήτησης για καθαρότερες και πιο φιλικές προς το περιβάλλον ενεργειακές εναλλακτικές πηγές.

2.1.3.1. Ηλεκτρόλυση

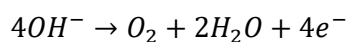
Η ηλεκτρόλυση (electrolysis) είναι η πιο καθιερωμένη και αποτελεσματική διαδικασία διάσπασης του νερού για την παραγωγή υδρογόνου. Αποτελεί ενδόθερμη ηλεκτροχημική διεργασία η οποία περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας για τον διαχωρισμό του νερού στα συστατικά του, δηλαδή υδρογόνο και οξυγόνο. Η γενική χημική αντίδραση που περιγράφει χημικά την λειτουργία της διαδικασίας είναι (Pavlos Nikolaidis, 2017):



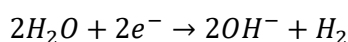
Μια τυπική μονάδα ηλεκτρόλυσης διαθέτει μια κάθοδο και μια άνοδο βυθισμένες σε έναν ηλεκτρολύτη. Όταν εφαρμόζεται ηλεκτρικό ρεύμα, το νερό διασπάται και παράγεται υδρογόνο στην κάθοδο και οξυγόνο στην άνοδο, ενώ ο ηλεκτρολύτης είναι το μέσο μέσω του οποίου τα ιόντα μπορούν να κινηθούν μεταξύ ανόδου και καθόδου (Johanna Ivy Levene, 2007). Οι πιο προηγμένες και ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης είναι η Αλκαλική (Alkaline), η Μembrάνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (Proton Exchange Membrane – PEM) και οι Κυψέλες Ηλεκτρόλυσης Στερεών Οξειδίων (Solid Oxide Electrolysis Cells -SOEC).

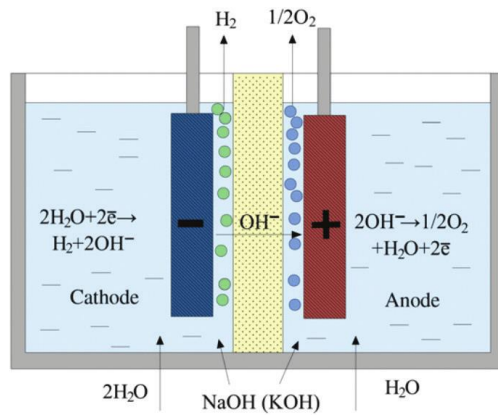
Η αλκαλική ηλεκτρόλυση πραγματοποιείται σε πιέσεις έως 25bar παρουσία υδατικού διαλύματος υδροξειδίου του καλίου (KOH) (P-H. Floch, 2007). Το νερό εισάγεται στην κάθοδο όπου και διασπάται σε υδρογόνο και ιόντα υδροξειδίου (OH⁻). Στην συνέχεια, σε μια εξωτερική μονάδα διαχωρίζονται τα ιόντα υδροξειδίου και μεταφέρονται μέσω του υδατικού ηλεκτρολύτη προς την άνοδο για τον σχηματισμό οξυγόνου. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται παρουσιάζονται παρακάτω (Pavlos Nikolaidis, 2017):

- Άνοδος:



- Κάθοδος:



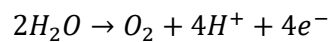


Εικόνα 18: Αλκαλική Ηλεκτρόλυση.

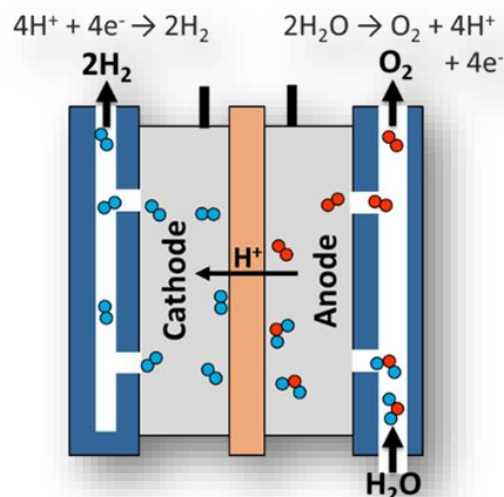
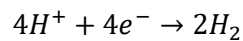
Πηγή: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-the-alkaline-electrolysis-cell-34_fig4_327179309

Η ηλεκτρόλυση σε κυψέλες Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEM) αξιοποιούν, ως ηλεκτρολύτη, μια οργανική πολυμερική μεμβράνη μέσω της οποίας τα πρωτόνια (H^+) κατευθύνονται από την άνοδο στην κάθοδο. Συγκεκριμένα, με την διάσπαση του νερού στην άνοδο, τα πρωτόνια κατευθύνονται μέσω της μεμβράνης στην κάθοδο για το σχηματισμό υδρογόνου. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται παρουσιάζονται παρακάτω (Ρανίος Nikolaidis, 2017):

- Άνοδος:



- Κάθοδος:

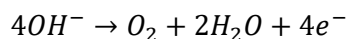


Εικόνα 19: Ηλεκτρόλυση σε Κυψέλες Μεμβράνης Ανταλλαγής Πρωτονίων (PEM).

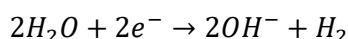
Πηγή: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-electrolysis>

Η ηλεκτρόλυση σε συστήματα Κυψελών Ηλεκτρόλυσης Στερεών Οξειδίων (SOEC), παρουσιάζει πολλές ομοιότητες με την αλκαλική με διαφορά ως προς το ότι μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας αντικαθίσταται με θερμική ενέργεια. Η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για να διαχωριστεί το νερό σε υψηλές θερμοκρασίες είναι αρκετά χαμηλότερη (J.D. Holladay, 2009). Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται παρουσιάζονται παρακάτω (Pavlos Nikolaidis, 2017):

- Άνοδος:



- Κάθοδος:



Ενώ η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης αποτελεί μια από της πιο βιώσιμες επιλογές για τη παραγωγή υδρογόνου, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας καθιστά το κόστος παραγωγής μη ανταγωνιστικό σε σχέση με άλλες τεχνολογίες μεγάλης κλίμακας. Ωστόσο, εάν η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από ανανεώσιμες πηγές, όπως η υδροηλεκτρική, η αιολική και η ηλιακή, το παραγόμενο υδρογόνο δεν επιβαρύνει το περιβάλλον. Παράλληλα, μπορεί να αποτελέσει βιώσιμο φορέα ενέργειας και να χρησιμοποιηθεί για την αποθήκευση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας των ανανεώσιμων πηγών. Μόλις το 5% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου προέρχεται από ηλεκτρόλυση, με την αλκαλική να αποτελεί την πιο διαδεδομένη διαδικασία. Οι εμπορευματοποιημένοι αλκαλικοί ηλεκτρολύτες εμφανίζουν παραγωγική ικανότητα έως και 380.000 κιλά αέριου υδρογόνου (kg H₂) το έτος, με θερμική απόδοση έως 73%. Ωστόσο, οποιαδήποτε εκτίμηση του κόστους παραγωγής είναι ιδιαίτερα δύσκολη καθώς εμφανίζονται σημαντικές διαφορές αναλόγως την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που αξιοποιείται και το μέγεθος της μονάδας (Pavlos Nikolaidis, 2017).

2.1.3.2. Φωτο-ηλεκτρόλυση

Η φωτο-ηλεκτρόλυση (photo-electrolysis) είναι μια διαδικασία που συνδυάζει την φωτοχημεία και την ηλεκτρόλυση για τη διάσπαση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο (O₂), αξιοποιώντας την ενέργεια από το φως. Συγκεκριμένα, το ηλιακό φως απορροφάται από ένα ημιαγωγικό υλικό και τα προσπίπτον φωτόνια εκκινούν την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης. Τα φωτόνια με μεγαλύτερη ή ίση ενέργεια από το ενεργειακό χάσμα (bandgap energy) του ημιαγωγού, δημιουργούν ένα ζεύγος ηλεκτρονίων-οπών (electron-hole), το οποίο διαχωρίζεται από το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ του ημιαγωγού και του ηλεκτρολύτη (Pavlos Nikolaidis, 2017). Το ενεργειακό χάσμα ενός ημιαγωγού ορίζεται ως η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για να διεγερθεί ένα ηλεκτρόνιο από δεσμευμένη κατάσταση σε ελεύθερη κατάσταση⁹³. Αντίστοιχα, το ζεύγος ηλεκτρόνιο-οπή (ή οπή) είναι η έλλειψη ηλεκτρονίου σε μια θέση όπου θα μπορούσε να καταλαμβάνει σε ένα άτομο ή σε ένα ατομικό πλέγμα στον ημιαγωγό⁹⁴. Τα ζεύγη δημιουργούνται με τη διέγερση ενός ηλεκτρονίου από τη ζώνη σθένους στη ζώνη αγωγιμότητας, όπου ζώνη σθένους είναι η ανώτερη πλήρως κατειλημμένη ενεργειακή ζώνη και ζώνη αγωγιμότητας είναι η κατώτερη ενεργειακή ζώνη άδεια από ηλεκτρόνια⁹⁵. Συνεπώς, καθώς τα ηλεκτρόνια μετακινούνται σε υψηλότερες ενεργειακές στάθμες, αφήνουν πίσω τους κενά, τις οπές, στις χαμηλότερες ενεργειακές καταστάσεις. Έτσι, ο διαχωρισμός ενός ηλεκτρονίου από την αρχική του θέση

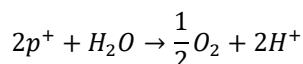
⁹³ Pveducation. Band Gap, <https://www.pveducation.org/pvc/drom/pn-junctions/band-gap>

⁹⁴ Nuclear Power for Everybody. Electron-hole Pair in Semiconductors, <https://www.nuclear-power.com/nuclear-engineering/radiation-detection/semiconductor-detectors/what-are-semiconductors-properties-of-semiconductors/electron-hole-pair/>

⁹⁵ Ζώνη σθένους. Σάββας Παυλόπουλος, <https://slideplayer.gr/slide/12974177/>

δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-οπής. Τα διεγερμένα ηλεκτρόνια και οι οπές είναι ελεύθερα να κινηθούν ανεξάρτητα μέσα στο υλικό του ημιαγωγού. Μετά την δημιουργία ζευγών ηλεκτρονίων-οπών, οι οπές παραμένουν στην άνοδο και διασπών το νερό σε κατιόντα υδρογόνου (H^+) όπου μεταφέρονται μέσω του ηλεκτρολύτη προς την κάθοδο. Παράλληλα, τα ηλεκτρόνια ρέουν μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος στην κάθοδο και αλληλοεπιδρούν με τα κατιόντα υδρογόνου (H^+) για να σχηματίσουν αέριο υδρογόνου (H_2). Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται στην άνοδο και στην κάθοδο αντίστοιχα παρουσιάζονται παρακάτω (Pavlos Nikolaidis, 2017):

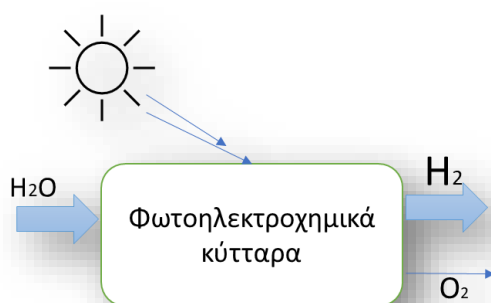
- Άνοδος:



- Κάθοδος:



Η ενέργεια που απαιτείται για σπάσιμο του νερού είναι πολύ μικρή, μόλις 1,23 eV (Ηλεκτρονιοβόλτ – Electro volt), ωστόσο, ο διαχωρισμός του ηλεκτρονίου από την οπή έχει ιδιαίτερα υψηλό ενεργειακό χάσμα με αποτέλεσμα να μειώνεται σημαντικά η συνολική απόδοση (V.M. Aroutiounian, 2005). Τέλος, το συνολικό κόστος παραγωγής υπολογίζεται στα 10.36 \$/kgH₂ (δολάρια 2014) (Canan Acar, 2018).



Εικόνα 20: Διάγραμμα Διαδικασίας της Φωτο-ηλεκτρόλυσης.

2.1.3.3. Θερμόλυση

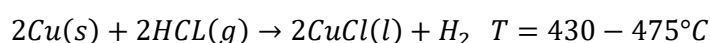
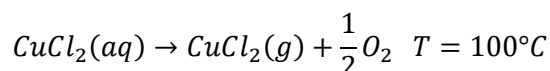
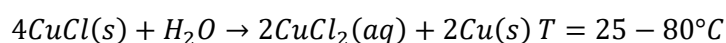
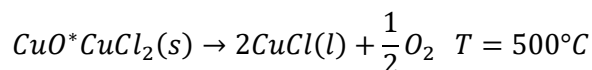
Η θερμόλυση (thermolysis) ή αλλιώς θερμοχημική μέθοδος διάσπασης νερού, είναι μια διαδικασία που αξιοποιεί υψηλές θερμοκρασίες, πολλές φορές πάνω από 2500°C, για την αποσύνθεση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο. Η διεργασία χαρακτηρίζεται από τους θερμοχημικούς κύκλους, δηλαδή μια σειρά χημικών αντιδράσεων που λαμβάνουν μέρος σε διαφορετικές θερμοκρασίες, ενώ απαιτείται η παρουσία ορισμένων χημικών (McKendry, 2002). Τα χημικά που χρησιμοποιούνται σε κάθε κύκλο ανακυκλώνονται, συνεπώς καταναλώνεται μόνο νερό⁹⁶. Ανατρέχοντας την βιβλιογραφία, περιγράφονται μερικοί εκατοντάδες θερμοχημικοί κύκλοι με διαφορετικές συνθήκες λειτουργίας και παραγωγικής ικανότητας⁹⁷. Βέβαια, ορισμένοι κύκλοι προσφέρουν βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου με πιο

⁹⁶ Energy.gov. Hydrogen Production: Thermochemical Water Splitting, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>

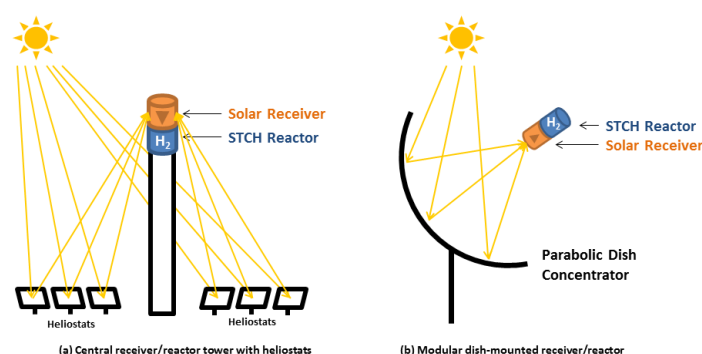
⁹⁷ Robert Perret. Solar Thermochemical Hydrogen Production Research (STCH), <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/articles/solar-thermochemical-hydrogen-production-research-stch-thermochemical-cycle>

διαδεδομένους τον πολλαπλών σταδίων χλωριούχου χαλκού (Cu-Cl) και χλωριούχου μαγνησίου (Mg-Cl).

Παρακάτω παρουσιάζονται οι χημικές αντιδράσεις του κύκλου χλωριούχου χαλκού (Pavlos Nikolaidis, 2017):



Οι ενεργειακές ανάγκες της διεργασίας μπορούν να καλυφθούν από ηλιακή θερμότητα ή από την θερμότητα των αντιδράσεων κατά την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας. Η συγκέντρωση της απαιτούμενης ηλιακής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί με την χρήση ηλιοστατών, παραβολικών ανακλαστήρων και άλλων συστημάτων. Έτσι, είναι δυνατή η παραγωγή υδρογόνου με σχεδόν μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.



Εικόνα 21: Διατάξεις για Παραγωγή Υδρογόνου με Θερμόλυση.

Πηγή: [https://www.nstda.or.th/home/wp-](https://www.nstda.or.th/home/wp-content/uploads/2023/10/2.%E0%B8%94%E0%B8%A3.%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%A8%E0%B8%B2%E0%B8%A5-H2-and-fuel-cell.pdf)

[content/uploads/2023/10/2.%E0%B8%94%E0%B8%A3.%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%A8%E0%B8%B2%E0%B8%A5-H2-and-fuel-cell.pdf](https://www.nstda.or.th/home/wp-content/uploads/2023/10/2.%E0%B8%94%E0%B8%A3.%E0%B8%A7%E0%B8%B4%E0%B8%A8%E0%B8%B2%E0%B8%A5-H2-and-fuel-cell.pdf)

Ωστόσο, η χρήση των απαιτούμενων χημικών δημιουργεί ζητήματα κόστους, τοξικότητας, δυσκολίας διαχωρισμού υλικών και διάβρωσης, αυξάνοντας το απαιτούμενο κεφάλαιο (E.Funk, 2001). Τέλος, ο θερμοχημικός κύκλος χλωριούχου μαγνησίου παρουσιάζει απόδοση της τάξης του 45% και κόστος παραγωγής 2.17 \$/KgH₂ (δολάρια 2007) (Pavlos Nikolaidis, 2017).

2.1.4. Συμπεράσματα

Το υδρογόνο διαθέτει πολυάριθμες διαδικασίες παραγωγής που αξιοποιούν πλήθος πρώτων υλών, όπως ορυκτά καύσιμα, βιοκαύσιμα και νερό. Σε παγκόσμια κλίμακα, η μέθοδος της αναμόρφωσης με ατμό κατέχει το μεγαλύτερο ποσοστό παραγόμενου υδρογόνου καθώς αποτελεί την πιο διαδεδομένη, ανεπτυγμένη και βιώσιμη οικονομικά διαδικασία. Ταυτόχρονα, η αεριοποίηση άνθρακα και η θερμοχημική πυρόλυση αποτελούν ανταγωνιστικές μεθόδους για την παραγωγή μεγάλης κλίμακας. Γενικά, η χρήση ορυκτών καυσίμων στις παραγωγικές διαδικασίες υδρογόνου αγγίζει το 95%, χάρη στην

διαθεσιμότητα αλλά και το χαμηλό τους κόστος. Σε συνδυασμό με την υψηλή αναλογία άνθρακα – υδρογόνου που διαθέτουν και η ύπαρξη ανεπτυγμένου δικτύου διανομής και αποθήκευσης ενισχύουν περαιτέρω την ανταγωνιστικότητά τους. Εξετάζοντας τις τάσεις στον τομέα, παρατηρείται προσπάθεια βελτίωσης των ήδη δοκιμασμένων συμβατικών μεθόδων τόσο στην τελική απόδοση όσο και στην κατανάλωση καυσίμων. Βέβαια, η αναβάθμιση αυτών αποτελεί βραχυπρόθεσμη λύση.

Καθώς το υδρογόνο αποκτά δυναμική και αναγνωρίζεται ως μέσο για την απελευθέρωση του ενεργειακού τομέα από τα ορυκτά καύσιμα και τις ρυπογόνες εκπομπές, κρίνεται αναγκαία η εισαγωγή και ανάπτυξη εναλλακτικών διαδικασιών παραγωγής. Οι διεργασίες διάσπασης του νερού αποτελούν πολλά υποσχόμενη εναλλακτική για την βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου. Ωστόσο, λόγω των υψηλών ενεργειακών αναγκών δεν δύναται να ανταγωνιστούν, προς το παρόν, τα ορυκτά καύσιμα, καταλαμβάνοντας μόνο το 5% της παγκόσμιας παραγωγής. Από την άλλη, οι βιολογικές και θερμοχημικές διεργασίες συνεισφέρουν μηδαμινά στην διεθνή παραγωγική ικανότητα. Οι περισσότερες βρίσκονται σε πειραματικά στάδια με μεμονωμένες μονάδες παραγωγής μικρής κλίμακας. Στο παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται τα προτερήματα, μειονεκτήματα και απόδοση των σημαντικότερων διεργασιών (Pavlos Nikolaidis, 2017):

Διεργασία	Προτερήματα	Μειονεκτήματα	Απόδοση (%)
Αναμόρφωση με Ατμό	Πιο διαδεδομένη και ανεπτυγμένη διαδικασία, υπάρχουσα υποδομή	Χρήση ορυκτών καυσίμων και παραγωγή CO ₂	74 – 85
Μερική Οξείδωση	Διαδεδομένη και δοκιμασμένη διαδικασία, υπάρχουσα υποδομή	Χρήση ορυκτών καυσίμων και παραγωγή CO ₂	60 – 75
Αυτόθερμη Αναμόρφωση	Διαδεδομένη και δοκιμασμένη διαδικασία	Χρήση ορυκτών καυσίμων και παραγωγή CO ₂	60 – 75
Πυρόλυση	Απουσία αερίων ρύπων	Χρήση ορυκτών καυσίμων και παραγωγή στερέου άνθρακα	-----
Πυρόλυση Βιομάζας	Ουδέτερο ως προς την παραγωγή CO ₂ και φθινή πρώτη ύλη	Παραπροϊόν πίσσας, κυμαινόμενη περιεκτικότητα σε H ₂ λόγω εποχικής διαθεσιμότητας και προσμίξεων της πρώτης ύλης.	35 – 50
Αεριοποίηση Βιομάζας	Ουδέτερο ως προς CO ₂ και φθινή πρώτη ύλη	Παραπροϊόν πίσσας, κυμαινόμενη περιεκτικότητα σε H ₂ λόγω εποχικής διαθεσιμότητας και προσμίξεων της πρώτης ύλης.	-----

Σκοτεινή Ζύμωση	Ουδέτερο ως προς το CO ₂ , ευκολία διαδικασίας, ανακύκλωση αποβλήτων	Απομάκρυνση παραπροϊόντων, χαμηλοί ρυθμοί παραγωγής H ₂ , απαίτηση μεγάλου όγκου αντιδραστήρα.	60 – 80
Βιοφωτόλυση	Ευκολία διαδικασίας, κατανάλωση CO ₂ και παραγωγή O ₂ ως παραπροϊόν	Υψηλές απαιτήσεις ηλιακού φωτός, χαμηλές αποδόσεις, απαίτηση μεγάλου όγκου αντιδραστήρα, ευαισθησία στο O ₂ και υψηλό κόστος πρώτων υλών.	10
Ηλεκτρόλυση	Καμία ρύπανση με ανανεώσιμες πηγές, αποδεδειγμένη τεχνολογία, υπάρχουσα υποδομή, άφθονη πρώτη ύλη, το O ₂ ως παραπροϊόν, αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας ΑΠΕ.	Χαμηλή συνολική απόδοση, υψηλό κόστος κεφαλαίου.	40 – 60
Θερμόλυση	Βιώσιμη διαδικασία, άφθονη πρώτη ύλη, το O ₂ ως παραπροϊόν.	Τοξικότητα απαιτούμενων στοιχείων, προβλήματα διάβρωσης, υψηλό κόστος κεφαλαίου.	20 – 45
Φωτο - ηλεκτρόλυση	Χωρίς εκπομπές, άφθονη πρώτη ύλη, το O ₂ ως παραπροϊόν.	Απαιτηση ηλιακού φωτός, χαμηλή απόδοση μετατροπής.	0.06

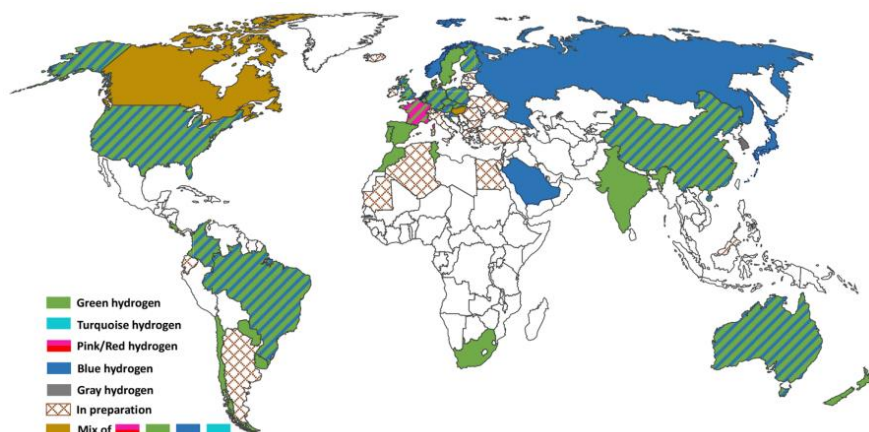
2.2. Τα Χρώματα του Υδρογόνου

2.2.1. Το Ουράνιο Τόξο του Υδρογόνου

Πολυάριθμοι βιομηχανικοί τομείς δύναται να επωφεληθούν από την υιοθέτηση του υδρογόνου ως ενεργειακό φορέα, λόγω της υψηλής ενεργειακής περιεκτικότητάς και της αφθονίας του. Ωστόσο, η πλειονότητα του παραγόμενου υδρογόνου προέρχεται από ορυκτά καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο, δημιουργώντας σημαντικό αποτύπωμα άνθρακα. Τα τελευταία χρόνια, η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ή με μεθόδους μηδενικών εκπομπών, βρίσκονται στο επίκεντρο εκτεταμένης έρευνας από πλήθος κρατικών και ιδιωτικών φορέων. Συνέπεια αυτού αποτελεί η προσέγγιση ως μια υποσχόμενη εναλλακτική λύση για την σταδιακή κατάργηση των ορυκτών καυσίμων και την δραστική μείωση των αερίων ρύπων. Σε παγκόσμια κλίμακα, το υδρογόνο, πλέον, συμπεριλαμβάνεται σε πολυάριθμες εθνικές ενεργειακές στρατηγικές, καθιστώντας επιτακτική ανάγκη την κατηγοριοποίησή του. Στα περισσότερα κείμενα εμφανίζονται όροι όπως «πράσινο» ή «γκρι» υδρογόνο, καθιστώντας τους πιο διαδεδομένους. Συνήθως, το «πράσινο» υδρογόνο συνοδεύεται από όρους όπως «καθαρό» ή «φιλικό προς το περιβάλλον», ενώ το «γκρι» αποδίδεται στο υδρογόνο που προέρχεται από φυσικό αέριο που κατά την παραγωγή του εκπέμπονται αέριοι ρύποι διοξειδίου του άνθρακα. Παράλληλα, με την ανάδειξη των τεχνολογιών Δέσμευσης και Αποθήκευσης Άνθρακα (Carbon Capture and Storage – CCS), δίνεται η δυνατότητα παραγωγής με χρήση ορυκτών καυσίμων αλλά με ελάχιστες ή μηδενικές εκπομπές ρύπων, αποδίδοντάς του το χρώμα «μπλε». Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψιν την απεξάρτηση από τους ρύπους κατά την διαδικασία παραγωγής, κρίνεται αναγκαία η υιοθέτηση εναλλακτικών μεθόδων με πληθώρα διαφορετικών ενεργειακών πηγών. Ως εκ τούτου, η απόδοση χρωμάτων βασίζεται τόσο στην μέθοδο παραγωγής του υδρογόνου όσο και στην ενεργειακή πηγή που αξιοποιείται (Jimena Incer-Valverde, 2023). Η χρωματική παλέτα που κωδικοποιεί τα παραπάνω ονομάζεται «Ουράνιο Τόξο του Υδρογόνου» («Hydrogen Rainbow») ή «Χρωματικός Τροχός του Υδρογόνου» («The Hydrogen Color Wheel»)⁹⁸.

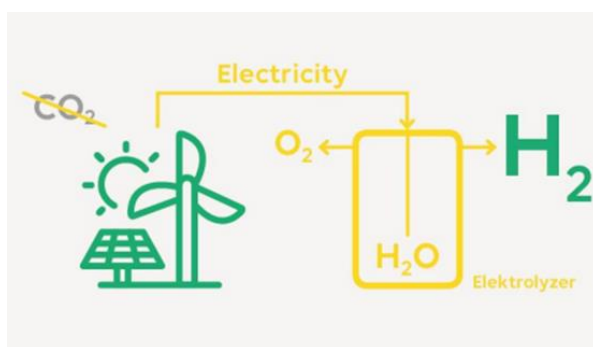
Τα χρώματα που χρησιμοποιούνται δεν είναι επίσημα κατοχυρωμένα δημιουργώντας συχνά σύγχυση καθώς, ανάλογα την βιβλιογραφία, ίδια χρώματα χρησιμοποιούνται για διαφορετικές διαδικασίες ή πηγές ενέργειας. Τα χρώματα που εμφανίζονται στα περισσότερα επίσημα κείμενα από εθνικές στρατηγικές και διεθνής οργανισμούς είναι το πράσινο, γκρι, μπλε και τρκουάζ (Jimena Incer-Valverde, 2023).

⁹⁸ Andrea Willige, The colors of hydrogen: Expanding ways of decarbonization.
<https://spectra.mhi.com/the-colors-of-hydrogen-expanding-ways-of-decarbonization>



Εικόνα 22: Χρώματα που Αναφέρονται στο Εθνικό Σχέδιο, τη Στρατηγική ή τον Οδικό Χάρτη για το Υδρογόνο κάθε Χώρα. Πηγή: J. Incer-Valverde, et al., 2023

Το πράσινο υδρογόνο παράγεται μέσω της διαδικασίας της ηλεκτρόλυσης, με μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Ωστόσο, η διαδικασία της ηλεκτρόλυσης απαιτεί ηλεκτρική ενέργεια η οποία πρέπει να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας^{98 99 100}.



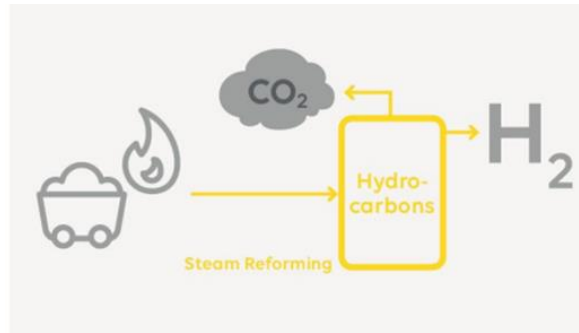
Εικόνα 23: Παραγωγή Πράσινου Υδρογόνου. Πηγή: <https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen>

Το γκρι υδρογόνο προέρχεται κυρίως από την επεξεργασία φυσικού αερίου, μέσω αναμόρφωσης ατμού μεθανίου και αποτελεί την τυπική βιομηχανική διαδικασία. Είναι ιδιαίτερα ρυπογόνο αφού απελευθερώνει μεγάλες ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα στο περιβάλλον^{98 99 100 101}.

⁹⁹ A. Energiewende, Making renewable hydrogen cost-competitive Policy instruments for supporting green H₂. https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_11_EU_H2-Instruments/A-EW_223_H2-Instruments_WEB.pdf

¹⁰⁰ R. Hage, R. Kombargi, S. Elborai, Y. Anouti. The dawn of green hydrogen: Maintaining the GCC's edge in a decarbonized world. <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/reports/2020/the-dawn-of-green-hydrogen/the-dawn-of-green-hydrogen.pdf>

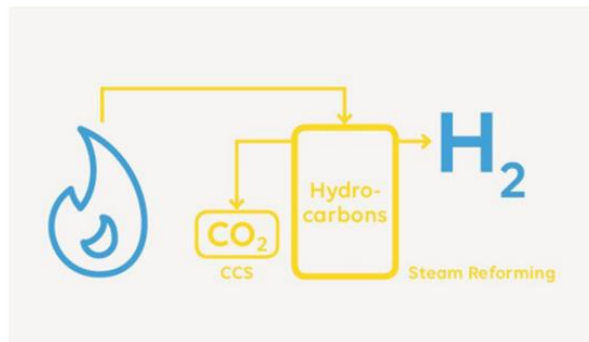
¹⁰¹ nationalgrid, The hydrogen colour spectrum. <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>



Εικόνα 24: Παραγωγή Γκρι Υδρογόνου.

Πηγή: <https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen>

Το μπλε υδρογόνο παρασκευάζεται όπως το γκρι με ειδοποιό διαφορά ότι τα ρυπογόνα παραπροϊόντα αποθηκεύονται με την χρήση τεχνολογιών Δέσμευσης και Αποθήκευσης Άνθρακα και δεν απελευθερώνονται απευθείας στο περιβάλλον^{98 99 100}.



Εικόνα 25: Παραγωγή Μπλε Υδρογόνου.

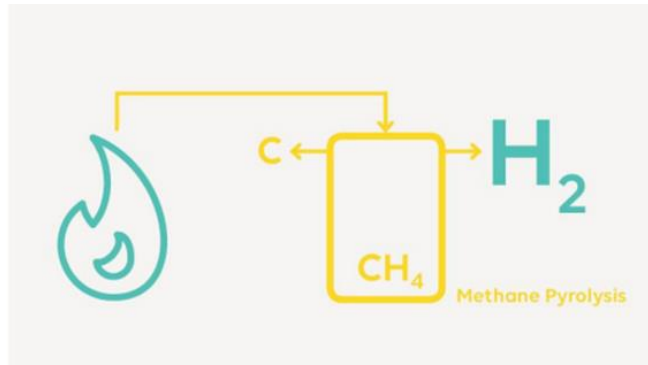
Πηγή: <https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen>

Το τirkουάζ υδρογόνο παράγεται από την πυρόλυση του μεθανίου, που αποτελεί θερμική διαδικασία κατά την οποία το φυσικό αέριο διασπάται σε υδρογόνο και στερεό άνθρακα. Με την παραγωγή τirkουάζ υδρογόνου παρακάμπτεται το ζήτημα των αερίων ρύπων, θέτοντας την παραπάνω διαδικασία ουδέτερη ως προς το αποτύπωμα άνθρακα υπό την προϋπόθεση ότι οι εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούνται τροφοδοτούνται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Ωστόσο, η αποθήκευση του στερεού άνθρακα παραμένει πρόβλημα^{98 102 103 104}.

¹⁰² P. Schneider, The colours of hydrogen. <https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen>

¹⁰³ V. Riet S, N. Bais. A hydrogen rainbow is emerging, but which colors lead to the pot of gold? <https://www2.deloitte.com/nl/nl/pages/energy-resources-industrials/articles/hydrogen-rainbow.html..html>

¹⁰⁴ Κ. Κούση, Τα χρώματα του υδρογόνου. <https://greekwomeninstem.com/gr/the-colours-of-hydrogen/>



Εικόνα 26: Παραγωγή Τηκούάζ Υδρογόνου.

Πηγή: <https://www.ewe.com/en/shaping-the-future/hydrogen/the-colours-of-hydrogen>

Για το υδρογόνου που παράγεται με την αξιοποίηση πυρηνικής ενέργειας αποδίδονται πολλαπλά χρώματα, όπως το μωβ^{105 106}, ροζ^{98 101 107 104} ή κόκκινο^{98 102 108}. Τα πιο διαδεδομένα από αυτά είναι το ροζ και το κόκκινο, με το πρώτο να αντιστοιχεί σε θερμοχημικές διαδικασίες, ενώ το δεύτερο στην ηλεκτρόλυση με την χρήση ενέργειας από πυρηνικές εγκαταστάσεις. Παράλληλα, σύγχυση εντοπίζεται και με τον ορισμό του λευκού υδρογόνου. Το παραπάνω χρώμα αποδίδεται σε υδρογόνο που απαντάται στην φύση και εντοπίζεται σε υπόγεια κοιτάσματα^{98 101}, ενώ άλλες πηγές το θεωρούν ως παραπροϊόν χημικών διεργασιών^{102 105}. Διαφορά στους ορισμούς, ανά την βιβλιογραφία, εντοπίζεται και στο κίτρινο υδρογόνο. Το κίτρινο ή πορτοκαλί (J. Incer-Valverde, et al., 2023) χρώμα αποδίδεται, συνήθως, στο υδρογόνο που παράγεται με ηλεκτρόλυση αλλά η ενεργειοδότηση για την διαδικασία γίνεται μέσω του δικτύου ενέργειας^{104 106}. Ωστόσο, το κίτρινο χρώμα συχνά αναφέρεται και στο υδρογόνο που παράγεται με την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης και την χρήση ηλιακής ενέργειας^{94 97 109}. Από την άλλη, το μαύρο και το καφέ υδρογόνο παράγονται από την καύση λιγνίτη ή από άνθρακα. Αποτελούν τα πιο επιβλαβή για το περιβάλλον και τα εντελώς αντίθετα του πράσινου υδρογόνου. Το καφέ και το μαύρο είναι όροι που χρησιμοποιούνται εναλλάξ και αναφέρονται σε οποιοδήποτε υδρογόνο παράγεται μέσω της διαδικασίας αεριοποίησης από ορυκτά καύσιμα^{105 107}. Τέλος, αν και λιγότερο διαδεδομένο, εντοπίζεται και το χρυσό χρώμα που αποδίδεται στο υδρογόνο που παράγεται από ζυμώσεις μικροβίων⁹⁸.

¹⁰⁵ J. Castigliero, T. Stasio, The "Colors" of Hydrogen. <https://aeclinic.org/aec-blog/2021/6/24/the-colors-of-hydrogen>

¹⁰⁶ S. Chandra. What is the HYDROGEN RAINBOW?, <https://www.linkedin.com/pulse/what-hydrogen-rainbow-sandeep-chandra>

¹⁰⁷ Cummins Inc. WHAT IS THE HYDROGEN RAINBOW?, <https://www.cummins.com/news/2021/11/16/what-hydrogen-rainbow>

¹⁰⁸ J. Callens. "The Renaissance of Nuclear Power to Accommodate Net-Zero by 2050: New Energy Outlook 2021.", <https://about.bnef.com/blog/the-renaissance-of-nuclear-power-to-accommodate-net-zero-by-2050-new-energy-outlook-2021/>

¹⁰⁹ B. Williams. Exploring the Wonders of Yellow Hydrogen, <https://www.hydrogenfuelnews.com/what-is-yellow-hydrogen/8552843/>

Χρώμα	Πηγή Ενέργειας	Πηγή Υδρογόνου	Διαδικασία Παραγωγής	Εκπομπή CO ₂
Πράσινο	Ανανεώσιμες Πηγές	Νερό	Ηλεκτρόλυση	Μηδενικές ή Όχι Άμεσες
Μπλε	Από μη Ανανεώσιμες με αξιοποίηση συστημάτων Δέσμευσης και Αποθήκευσης Άνθρακα	Φυσικό Αέριο ή Βιομάζα	Αναμόρφωση	Χαμηλές
Γκρι	Ηλεκτρισμός από μη Ανανεώσιμες Πηγές	Φυσικό Αέριο	Αναμόρφωση Αερίου Μεθανίου	Υψηλές
Τιρκουάζ	Ηλεκτρισμός από μη Ανανεώσιμες Πηγές	Φυσικό Αέριο	Πυρόλυση	Όχι Άμεσες
Ροζ	Πυρηνική	Νερό	Ηλεκτρόλυση	Όχι Άμεσες
Κόκκινο	Πυρηνική	Νερό	Θερμόλυση ή Θερμοχημικές διαδικασίες	Όχι Άμεσες
Πορτοκαλί (ή Κίτρινο)	Ηλεκτρισμός από το Δίκτυο Ενέργειας. Μίξη από Ανανεώσιμες και μη Πηγές	Νερό	Ηλεκτρόλυση	Εξαρτάται από το Μείγμα
Κίτρινο	Ηλιακή Ενέργεια	Νερό	Ηλεκτρόλυση	Όχι Άμεσες
Μαύρο		Κάρβουνο ή Λιγνίτης	Αεροποίηση	Υψηλές
Καφέ		Λιγνίτης ή Βιομάζα	Αεροποίηση	Υψηλές

Εικόνα 27: Ορισμοί των Χρωμάτων Υδρογόνου

2.2.2. Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Δεδομένου ότι η ραγδαία ανάπτυξη της υδροοικονομίας οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, στην ανάγκη απεξάρτησης της παγκόσμιας οικονομίας από τον άνθρακα, ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος του παραγόμενου υδρογόνου αποτελεί ένα από τα πρωταρχικά κριτήρια για την ταξινόμηση των πολυάριθμων επιλογών παραγωγής (A. Ajanovic, 2022). Την μεγαλύτερη επίπτωση στις ρυπογόνες εκπομπές κάθε παραγωγικής διαδικασίας έχουν οι πηγές ενέργειας και υδρογόνου¹¹⁰. Όταν πρώτη ύλη είναι το νερό, όπως στο πράσινο, πορτοκαλί ή κίτρινο, κόκκινο και ροζ υδρογόνο, δεν υπάρχουν άμεσες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Αντίστοιχα, όταν η πρώτη ύλη είναι ορυκτό καύσιμο, όπως στο γκρι, μαύρο ή καφέ υδρογόνο, οι εκπομπές ρύπων είναι αναπόφευκτες εκτός εάν ληφθούν υπόψη τεχνολογίες Δέσμευσης και Αποθήκευσης Άνθρακα. Επιπλέον, όταν χρησιμοποιείται βιομάζα, θεωρείται ως διαδικασία παραγωγής με μηδενικό αποτύπωμα άνθρακα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η βιομάζα συγκαταλέγεται στους ανανεώσιμους πόρους ενώ οι άμεσες εκπομπές από τη διαδικασία θεωρούνται ότι απορροφώνται εκ νέου στο σχηματισμό της βιομάζας (Jimena Incer-Valverde, 2023).

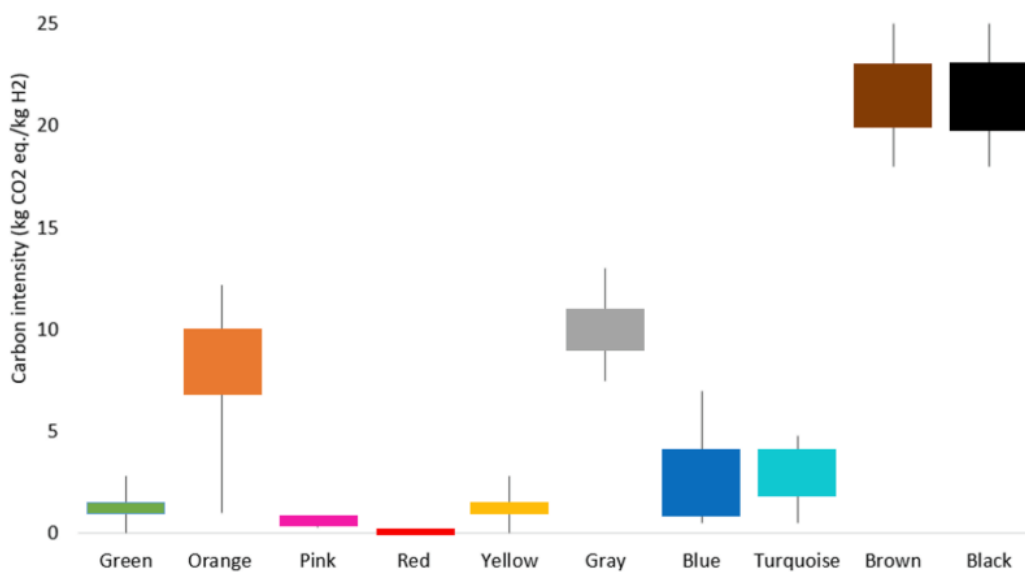
Ο υπολογισμός του αποτυπώματος άνθρακα κάθε χρώματος υδρογόνου αποτελεί αρκετά περίπλοκη διαδικασία. Καταμετρώντας μόνο τις άμεσες εκπομπές, δηλαδή τους αέριους ρύπους διοξειδίου του άνθρακα που εκλύονται κατά την διαδικασία παραγωγής, το πράσινο υδρογόνο πετυχαίνει μηδενικές εκπομπές. Ωστόσο, αν στο τελικό απολογισμό συμπεριληφθούν οι εκπομπές του κύκλου ζωής των ανανεώσιμων πηγών (Nana Yaw Amponsah, 2014), οι τελικές τιμές κυμαίνονται από 0.7 - 2.8 kgCO₂/kgH₂ (κιλά CO₂ ανά κιλό H₂)¹¹¹. Η ένταση των εκπομπών στο μπλε υδρογόνο εξαρτάται από τη τεχνολογία Δέσμευσης και Αποθήκευσης Άνθρακα που αξιοποιείται, με τις τιμές να κυμαίνονται μεταξύ 0.8 έως 4.8 kgCO₂/kgH₂, θεωρώντας δέσμευση της τάξης του 95%¹¹². Από την άλλη, κατά την

¹¹⁰ IEA. Towards hydrogen definitions based on their emissions intensity,“ International Energy Agency, Paris; 2023. <https://www.iea.org/reports/towards-hydrogen-definitions-based-on-their-emissions-intensity>

¹¹¹ UNECE. Technology Brief Hydrogen. United Nations Economic Commission for Europe Task Force on Hydrogen, Geneva; 2021. https://unece.org/sites/default/files/2022-02/Hydrogen%20brief_EN_final.pdf

¹¹² IEA, Global Hydrogen Review, IEA, Paris, 2022. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022#overview>

δημιουργία τερκούαζ δεν παράγονται αέριοι ρύποι αλλά στερεοί, εξαλείφοντας την ανάγκη των παραπάνω συστημάτων. Οι ρυπογόνες εκπομπές για το τερκούαζ υδρογόνο υπολογίζονται ως 1.9 με 4.8 kgCO₂/kgH₂¹¹¹. Το γκρι υδρογόνο, που συνιστά την πλειοψηφία του βιομηχανικά παραγόμενου υδρογόνου, έχει άμεσες εκπομπές άνθρακα που κυμαίνονται από 7.5 – 13 kgCO₂/kgH₂¹¹². Όσον αφορά το πορτοκαλί ή κίτρινο υδρογόνο, η ενεργειακή σύνθεση του δικτύου καθορίζει πρωτίστως τον τρόπο με τον οποίο επηρεάζει το περιβάλλον. Οι εκπομπές δύναται να είναι εξαιρετικά χαμηλές σε ορισμένα έθνη με πολύ καθαρό ενεργειακό μείγμα ή πολύ ψηλές σε χώρες που ο ενεργειακός τους τομέας βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα⁹⁹. Τέλος, όταν αξιοποιείται πυρηνική ενέργεια, όπως στο κόκκινο και το ροζ υδρογόνο, δεν υφίστανται άμεσοι ρύποι διοξειδίου του άνθρακα, αλλά ζητήματα όπως η ακτινοβολία και η διαχείριση των αποβλήτων¹¹¹.



Εικόνα 28: Εκπομπές Διοξειδίου του Άνθρακα των Χρωμάτων Υδρογόνου.
 Πηγή: J. Incer-Valverde, et al., 2023

2.3. Αποθήκευση και Μεταφορά Υδρογόνου

Η χρήση του υδρογόνου ως μέσω για την καταπολέμηση των αερίων ρύπων του θερμοκηπίου και την επίτευξη της βιώσιμης ενεργειακής μετάβασης παρουσιάζει σημαντικά προτερήματα και δυναμική. Παρόλα αυτά, για την αξιοποίησή του και την δημιουργία μιας ολοκληρωμένης υδροοικονομίας απαιτείται η περαιτέρω ανάπτυξη των τεχνολογιών αποθήκευσης και μεταφοράς (Gregorio Marbán, 2007).

Ένα από τα πιο σημαντικά εμπόδια για την χρήση των τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου σε μεγάλη κλίμακα είναι η χαμηλή πυκνότητά του σε κανονικές συνθήκες, μόλις $0,09 \text{ kg/m}^3$ (κιλά ανά κυβικό μέτρο). Σήμερα, οι πιο διαδεδομένες τεχνολογίες επιτρέπουν την αποθήκευση σε αέρια και υγρή μορφή. Η πιο κοινή και εμπορικά ώριμη μέθοδος είναι η αποθήκευση αερίου υδρογόνου σε υψηλές πιέσεις, έως και 77 MPa, χρησιμοποιώντας μηχανικά μέσα όπως έμβολα. Παρά την εκτενή χρήση της μεθόδου, η ενέργεια που απαιτείται για την συμπίεση του αερίου είναι αρκετά υψηλή. Αντιθέτως, η διαδικασία υγρής αποθήκευσης σε κρυογονικές δεξαμενές απαιτεί χαμηλότερες τιμές ενέργειας. Η μέθοδος βασίζεται στο χαμηλό σημείο βρασμού του υδρογόνου, $-252,87^\circ\text{C}$, και το μέγεθος της δεξαμενής που αξιοποιείται. Ωστόσο και αυτή η μέθοδος παρουσιάζει προβλήματα καθώς ένα ποσοστό του αερίου απελευθερώνεται και χάνεται παρά την προσθήκη μόνωσης (Pavlos Nikolaidis, 2017).

Εκτός από τους μεθόδους αποθήκευσης σε υγρή και αέρια μορφή, είναι δυνατή και η αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων υδρογόνου σε στερεά κατάσταση. Η παραπάνω μέθοδος βασίζεται στην χρήση νανοσωλήνων άνθρακα για την αποτελεσματική αποθήκευση σε χαμηλές θερμοκρασίες, $-196,15^\circ\text{C}$, και πιέσεις, 6 MPa. Οι χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες λειτουργίας αλλά και το χαμηλό κόστος των υλικών αποτελούν σημαντικά πλεονεκτήματα της παραπάνω μεθόδου. Εκτός από την χρήση νανοσωλήνων, υφίσταται και άλλη μια μέθοδος στερεάς αποθήκευσης που βασίζεται στην χρήση ορισμένων μετάλλων και υψηλών θερμοκρασιών. Μέταλλα όπως λίθιο (Li), βηρύλλιο (Be), νάτριο (Na), αλουμίνιο (Al) και βόριο (B) σχηματίζουν υδρίδια μετάλλου – υδρογόνου επιτρέποντας την αποθήκευση σε κανονικές συνθήκες. Τα σύνθετα υδρίδια κατέχουν σημαντικό επιστημονικό ενδιαφέρον στον τομέα των υλικών αποθήκευσης, παρέχοντας προοπτικές έρευνας και ανάπτυξης. Στον παρακάτω πίνακα συμπυκνώνονται και παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των βασικών μεθόδων αποθήκευσης υδρογόνου (Pavlos Nikolaidis, 2017):

Μέθοδος	Θερμοκρασία (°C)	Βαρυμετρική Πυκνότητα (wt%)	Ογκομετρική Πυκνότητα (kg/m^3)	Πίεση (MPa)
Υψηλής πίεσης αέριο H_2	25	13	40	77
Κρυογονικό υγρό	-252,87	-	70,8	Ατμοσφαιρική
Προσροφημένο σε νανοσωλήνες άνθρακα	-196,15	10,8	41	6
Σχηματισμός υδριδίων	25	3	150	Ατμοσφαιρική
Σχηματισμός σύνθετων υδριδίων	>100	18	150	Ατμοσφαιρική

Η μεταφορά του υδρογόνου βασίζεται είτε στην χρήση αγωγών είτε στην μεταφορά με πλοία, βυτιοφόρα τρένα και φορτηγά. Ωστόσο, η ανεπαρκής ικανότητα μεταφοράς των συμβατικών μέσων αλλά και η δυσκολία χειρισμού του αερίου υδρογόνου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση του κόστους παράδοσης. Η χρήση των υφιστάμενων αγωγών φυσικού αερίου δύναται να αποτελέσει μια μεσοπρόθεσμη λύση, ωστόσο, παρουσιάζει σημαντικές απώλειες που φτάνουν έως και το 20%. Επομένως, η ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου δικτύου για τον χειρισμό και την μεταφορά υδρογόνου κρίνεται αναγκαία για την ευρεία υιοθέτηση και χρήση του (Pavlos Nikolaidis, 2017).



Εικόνα 29: Μονάδα Αποθήκευσης Υγρού Υδρογόνου.

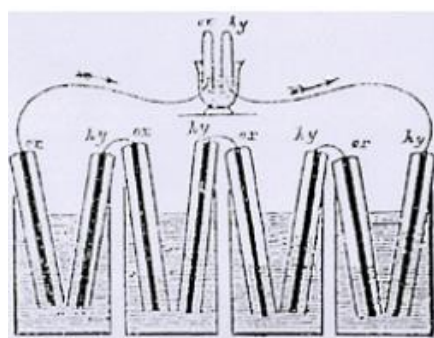
Πηγή: <https://energyresearch.ucf.edu/research/hydrogen/liquid-hydrogen-storage/>

2.4. Κυψέλες Καυσίμου Υδρογόνου

2.4.1. Εισαγωγή

Οι κυψέλες καυσίμου (fuel cell) απασχολούν την επιστημονική κοινότητα για πάνω από 150 χρόνια¹¹³. Αποτελούν συσκευές που μετατρέπουν, μέσω ηλεκτροχημικών διεργασιών, το υδρογόνο και οξυγόνο σε ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα¹¹⁴. Αποτελούν ανοικτά θερμοδυναμικά συστήματα καθώς αλληλοεπιδρούν με το περιβάλλον ανταλλάσσοντας ύλη και ενέργεια (S. Mekhilef, 2012).

Πρώτες αναφορές για τις αρχές λειτουργίας τους εντοπίζονται στο πειραματικό έργο του Ουαλού δικαστή και ιατρού Sir William Grove το 1839. Η πειραματική διάταξη που δημιούργησε αποτελούνταν από δύο ηλεκτρόδια περιβαλλόμενα από γυάλινους κυλίνδρους. Ο ένας κύλινδρος περιείχε οξυγόνο και ο άλλος υδρογόνο, ενώ βυθίζοντάς τους σε αραιωμένο θειικό οξύ (H_2SO_4) δημιουργούνταν ηλεκτρικό ρεύμα χαμηλής τάσης¹¹³.



Εικόνα 30: Το πείραμα Grove.

Πηγή: <https://americanhistory.si.edu/fuelcells/origins/origins.htm>

Για περίπου έναν αιώνα, μετά τα πειράματα του Sir William Grove, οι κυψέλες κατείχαν μόνο επιστημονικό και πειραματικό ενδιαφέρον χωρίς να αναπτύσσονται πρακτικές εφαρμογές. Κατά την διάρκεια του Β΄ Παγκοσμίου Πολέμου, ο Άγγλος μηχανικός Thomas Bacon συνεργάστηκε με το Βασιλικό Ναυτικό για την εφαρμογή κυψελών σε υποβρύχια, ενώ την δεκαετία του 1950 παρήγαγε με επιτυχία την πρώτη αλκαλική κυψέλη καυσίμου. Η πρώτη ουσιαστικά πρακτική εφαρμογή εμφανίζεται το 1960 στα πλαίσια των διαστημικών προγραμμάτων Gemini και Apollo. Η έρευνα που πραγματοποιήθηκε για την ενσωμάτωση των κυψελών στις διαστημικές αποστολές έδωσε την απαιτούμενη ώθηση για την ανάπτυξη της τεχνολογίας. Τις επόμενες δεκαετίες μέχρι και τις αρχές του 1990, σημειώθηκε σημαντική πρόοδος σε αρκετούς τομείς και ιδιαίτερα στις μεταφορές με εφαρμογές σε φορτηγά, λεωφορεία και επιβατικά αυτοκίνητα¹¹⁵.

Τα τελευταία χρόνια, η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου απέκτησε δυναμική ως μια πολλά υποσχόμενη λύση στην προσπάθεια υποκατάστασης των ορυκτών καυσίμων στον ενεργειακό τομέα. Οι χαμηλές έως μηδενικές εκπομπές, η απλότητα σχεδιασμού, οι υψηλές αποδόσεις και η αξιόπιστη λειτουργία αποτελούν σημαντικά προτερήματα στην

¹¹³ Smithsonian Institution. Fuel Cell Origins, <https://americanhistory.si.edu/fuelcells/origins/origins.html>

¹¹⁴ Κακαρουντα Αργυρώ. Κυψέλες Καυσίμου, <https://eclass.upatras.gr/modules/document/index.php?course=ECON1210&download=/0323749mcc71/0323749lu56m/0323749ce9qs.pdf>

¹¹⁵ HORIZON EDUCATIONAL. Fuel Cells: A Unique History, <https://www.horizoneducational.com/fuel-cells-a-unique-history/t1483?currency=usd>

προσπάθεια παραγωγής βιώσιμης ενέργειας. Ωστόσο, παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα, δεν υφίστανται εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Αυτό οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, σε ορισμένα ζητήματα όπως η διάρκεια ζωής, η έλλειψη ανεπτυγμένου δικτύου υδρογόνου αλλά και το υψηλό κόστος λόγω χαμηλής διαθεσιμότητας. Συνεπώς, κρίνεται αναγκαία η επίλυση των παραπάνω περιορισμών για την περαιτέρω ανάπτυξη και εξάπλωσή τους (S. Mekhilef, 2012).

2.4.2. Περιγραφή και Λειτουργία μιας Βασικής Κυψέλης Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου παράγουν ηλεκτρική και θερμική ενέργεια μέσω ηλεκτροχημικών αντιδράσεων με αντιδρώντα το υδρογόνο, το οξυγόνο και παραπροϊόν το (S. Mekhilef, 2012). Η λειτουργία τους μπορεί να παραλληλιστεί με αυτή των μπαταριών χωρίς όμως να εξαντλούνται και να απαιτούν επαναφόρτιση¹¹⁶. Σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, επιτρέπουν την άμεση μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρική ενέργεια παρακάμπτοντας τα ενδιάμεσα βήματα που οδηγούν σε απώλειες ενέργειας¹²⁰.



Εικόνα 31:Μετατροπή Ενέργειας σε Μηχανή Εσωτερικής Καύσης και Κυψέλη Καυσίμου.

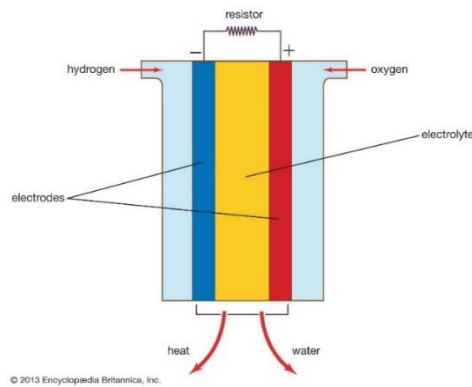
Η γενική διάταξη μιας κυψέλης καυσίμου υδρογόνου αποτελείται από τέσσερα βασικά στοιχεία:

1. Την άνοδο.
2. Την κάθοδο.
3. Τον ηλεκτρολύτη.
4. Το εξωτερικό κύκλωμα.

Πιο αναλυτικά, τα δυο ηλεκτρόδια, η κάθοδος και η άνοδος, πλαισιώνονται εξωτερικά από μια πλάκα γραφίτη, την πλάκα ροής, που δρομολογεί τα αέρια. Αποτελούν πολύπλοκες δομές που περιέχουν καταλύτη, πόρους και αγωγίμα υλικά, ενώ δεν αλλάζει η χημική τους σύσταση κατά την λειτουργία. Ανάμεσά τους παρεμβάλλεται ένα πορώδες υλικό εμποτισμένο με τον ηλεκτρολύτη. Οι ηλεκτρολύτες διαθέτουν μεγάλη θερμική και μηχανική αντοχή. Ακόμα, σημαντικό στοιχείο της κυψέλης αποτελεί και ο καταλύτης όπου τοποθετείται στην άνοδο και κάθοδο διευκολύνοντας την λειτουργία της κυψέλης, αφού στην επιφάνεια αυτή πραγματοποιούνται οι αντιδράσεις¹¹⁷.

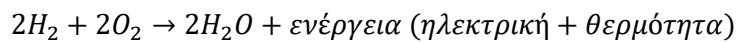
¹¹⁶ Energy.gov. Fuel Cells, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>

¹¹⁷ Energy.gov. Parts of a Fuel Cell, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/parts-fuel-cell#catalyst>



Εικόνα 32: Διάταξη Βασικής Κυψέλης Καυσίμου.
 Πηγή: <https://www.britannica.com/technology/fuel-cell>

Υφίστανται αρκετά διαφορετικά είδη τεχνολογιών κυψελών με ειδοποιό διαφορά τον ηλεκτρολύτη που αξιοποιούν (COOK B., 2002). Παρόλα αυτά, όλα τα είδη υπάγονται στην ίδια γενικευμένη αρχή λειτουργίας (S. Mekhilef, 2012):

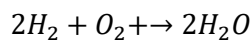


Οι αντιδράσεις που συμβαίνουν σε μια κυψέλη αποτελούνται από δυο επιμέρους ημιαντιδράσεις στην άνοδο και στην κάθοδο (S. Mekhilef, 2012):

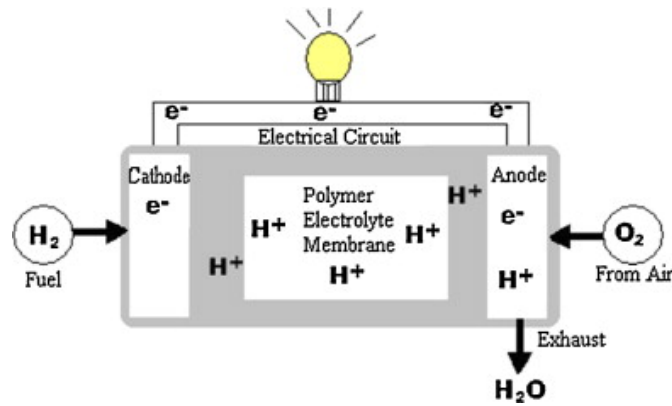
- Άνοδο (Ημιαντίδραση Οξειδωσης):

$$2H_2 \rightarrow 4H^+ + 4e^-$$
- Κάθοδος (Ημιαντίδραση Αναγωγής):

$$O_2 + 4e^- + 4H^+ \rightarrow 2H_2O + \text{θερμότητα}$$
- Συνολικά:



Πιο αναλυτικά, στην άνοδο πραγματοποιείται η οξείδωση του υδρογόνου σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Αντίστοιχα, στην κάθοδο λαμβάνει μέρος η αναγωγή του οξυγόνου με την βοήθεια των ηλεκτρονίων που διοχετεύτηκαν από το εξωτερικό κύκλωμα και των πρωτονίων. Έτσι, σχηματίζονται διάφορα είδη οξειδίων, αναλόγως την κυψέλη, με αποτέλεσμα το σχηματισμό νερού και την απελευθέρωση θερμότητας. Ανάλογα τον ηλεκτρολύτη, είτε τα πρωτόνια είτε τα ιόντα οξειδίων μετακινούνται μεταξύ των ηλεκτροδίων. Από την άλλη, τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος, που συνδέει την άνοδο με την κάθοδο, αποφεύγοντας την μετακίνηση εντός του ηλεκτρολύτη. Η παραπάνω κίνηση των ηλεκτρονίων δημιουργεί την ηλεκτρική και θερμική ενέργεια.



Εικόνα 33: Αρχή Λειτουργίας μιας Κυψέλης Καυσίμου.
Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012

2.4.3. Απόδοση Κυψέλης Καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου, μέσω ηλεκτροχημικών διεργασιών, μετατρέπουν χημική ενέργεια σε θερμική και ηλεκτρική υπακούοντας στους νόμους της θερμοδυναμικής¹¹⁸. Η χρήση τους ως εναλλακτικές ενεργειακές πηγές απαιτεί γνώση της απόδοσης τους με σκοπό την σύγκριση με άλλα συστήματα παραγωγής ενέργειας.

Οι έννοιες ελεύθερη ενέργεια Gibbs, ενθαλπία και εντροπία σχετίζονται άμεσα με την απόδοση των κυψελών καυσίμου¹¹⁸. Εξίσου σημαντικές έννοιες για τον υπολογισμό και την περιγραφή της απόδοσης αποτελούν η ανώτερη και η κατώτερη θερμογόνος δύναμη (lower heating value – LHV, higher heating value – HHV)¹¹⁹. Η κατώτερη θερμογόνος δύναμη εκφράζει την ποσότητα ενέργειας που απελευθερώνεται κατά την καύση ενός καυσίμου για την παραγωγή υδρατμού. Αντίστοιχα, η ανώτερη θερμογόνος δύναμη περιλαμβάνει την κατώτερη θερμογόνο και την λανθάνουσα θερμότητα εξάτμισης του νερού στα προϊόντα καύσης, υποθέτοντας ότι οι υδρατμοί παραμένουν σε αέρια κατάσταση¹²⁰. Ουσιαστικά, καθορίζουν το ενεργειακό περιεχόμενο ενός καυσίμου.

Γενικά, η απόδοση μιας ενεργειακής μετατροπής υπολογίζεται με τον λόγο της παραχθείσας ενέργειας προς την ενέργεια που καταναλώθηκε κατά την διαδικασία. Ωστόσο, στην περίπτωση των κυψελών, η παραγόμενη ενέργεια αποτελείται τόσο από ηλεκτρική όσο και θερμική ή αλλιώς ενθαλπία (H). Η θερμότητα που εκλύεται είναι γνωστή ως μεταβολή ενθαλπίας (ΔH). Παράλληλα, η ελεύθερη ενέργεια Gibbs μετρά το μέγιστο χρήσιμο έργο που δύναται να εξαχθεί από ένα σύστημα σε σταθερή θερμοκρασία και πίεση¹¹⁸. Στην περίπτωση των κυψελών εκφράζει την μέγιστη ποσότητα αξιοποιήσιμης ηλεκτρικής ενέργειας που διαθέτει το υδρογόνο όταν ανασυνδιάζεται με το οξυγόνο¹¹⁹. Συνεπώς, το μέγιστο ηλεκτρικό έργο που παράγεται αντιστοιχεί στην μεταβολή της ελεύθερης ενέργειας Gibbs (ΔG)¹¹⁹. Τέλος, καθώς μετά τις αντιδράσεις η συνολική εντροπία (S) του συστήματος αυξάνεται, υφίστανται μη αντιστρεπτές απώλειες στην μετατροπή ενέργειας¹¹⁸. Η ενθαλπία εξαρτάται άμεσα από την θερμοκρασία (T) της διαδικασίας. Δηλαδή η TΔS εκφράζει την ποσότητα της θερμότητας που παράγεται από μια κυψέλη καυσίμου που λειτουργεί αντιστρεπτά.

¹¹⁸ Lindiwe Khotseng. Fuel Cell Thermodynamics, <https://www.intechopen.com/chapters/70166>

¹¹⁹ NREL. Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries, <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47302.pdf>

¹²⁰ Tony Leo. Fuel cell efficiency explained, <https://www.fuelcellenergy.com/blog/fuel-cell-efficiency>

Η θερμοδυναμική μιας κυψέλης καυσίμου εκφράζεται ως¹¹⁸:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \text{ ή } \Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Η θεωρητική απόδοση μιας κυψέλης υπολογίζεται από τον λόγο:

$$\frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{\Delta H - T\Delta S}{\Delta H}$$

Στην περίπτωση της κυψέλης υδρογόνου, η ανώτερη θερμογόνος δύναμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν μέτρο της ενέργειας που εισέρχεται στο σύστημα. Το ενεργειακό περιεχόμενο, δηλαδή του υδρογόνου, ισούται με την θερμική ενέργεια που απελευθερώνεται κατά την καύση του, συνεπώς, η παραχθείσα θερμική ενέργεια, δηλαδή ΔH , είναι η ανώτερη θερμογόνος. Αντιστρόφως, η μεταβολή ενθαλπίας (ΔH) είναι το συνολικό θερμικό περιεχόμενο της τροφοδοσίας¹²¹. Τελικά, η τυπική μέθοδος για τον υπολογισμό της απόδοσης είναι ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται προς την ανώτερη θερμογόνος δύναμη του καυσίμου που χρησιμοποιείται¹¹⁹:

$$\text{Ηλεκτρική απόδοση} = \frac{\text{ηλεκτρική ενέργεια}}{\text{ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV)}}$$

Εκτός της ανώτερης θερμογόνος δύναμης χρησιμοποιείται και η κατώτερη στο παραπάνω λόγο.

2.4.4. Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου

Μια μεμονωμένη τυπική κυψέλη καυσίμου παρέχει ανεπαρκή τάση για τις περισσότερες εφαρμογές. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη τάση και ισχύς, μεμονωμένες ομοειδής κυψέλες μπορούν να στοιβαχτούν σε σειρά με την χρήση διπολικών πλακών σχηματίζοντας μια συστοιχία (fuel cell stack). Τόσο η ισχύς όσο και η τάση της εξόδου εξαρτάται άμεσα από το μέγεθος της συστοιχίας. Αυξάνοντας τον αριθμό των κυψελών αυξάνεται η τάση ενώ αυξάνοντας την επιφάνεια αυξάνεται το ρεύμα¹²². Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια της συστοιχίας είναι σε μορφή συνεχούς ρεύματος (DC). Ανάλογα την χρήση, μια συστοιχία μπορεί να διαθέτει από μερικές κυψέλες έως αρκετές εκατοντάδες¹²³.

Οι διπολικές πλάκες πλαισιώνουν τα ηλεκτρόδια διαχωρίζοντας τις κυψέλες της συστοιχίας. Αποτελούν αγωγίμες πλάκες με κανάλια μεταφοράς για την διοχέτευση ή απομάκρυνση καυσίμου ή οξειδωτικής ουσίας. Κατασκευάζονται από υλικά όπως γραφίτης ή πολυμερή, ενώ για τις κυψέλες υψηλής θερμοκρασίας παρασκευάζονται από κεραμικά υλικά. Συμμετέχουν ενεργά στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος καθώς η μεταφορά ηλεκτρονίων γίνεται μεταξύ της πλάκας ανόδου και καθόδου μέσω της φυσικής τους επαφής. Ουσιαστικά, λειτουργούν ως εξωτερικό κύκλωμα. Σε μια συστοιχία μόνο η πρώτη σε σειρά κυψέλη απαιτεί την παρουσία εξωτερικού κυκλώματος καθώς οι υπόλοιπες λειτουργούν λόγω της καλής αγωγιμότητας των πλακών¹²⁴.

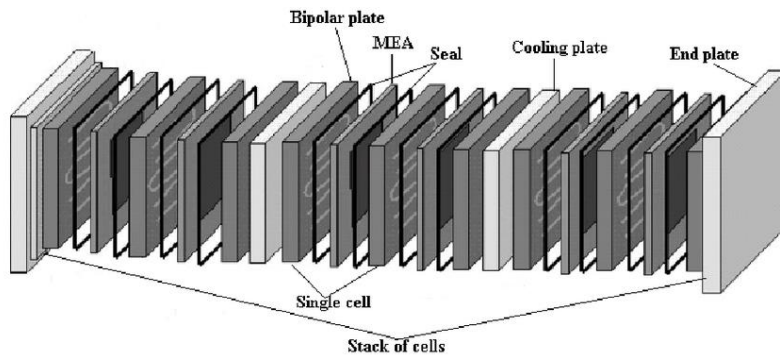
¹²¹ Γεώργιος Μαρνέλλος. Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας (pages 11 – 19)

https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/5%CE%B2_%CE%9A%CF%85%CF%88%CE%AD%CE%BB%CE%B5%CF%82%20%CE%9A%CE%B1%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%BC%CE%BF%CF%85_oc.pdf

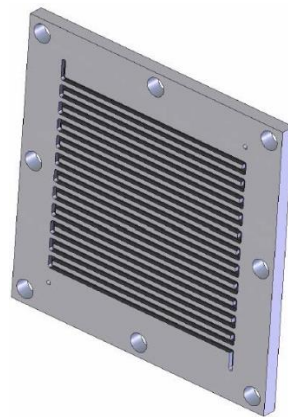
¹²² Fuelcellstore. Fuel Cell Stacks, <https://www.fuelcellstore.com/fuel-cell-stacks>

¹²³ Energy.gov. Fuel Cell Systems, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-systems>

¹²⁴ Μπομπολάκη Ευτυχία. «Ανάλυση Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου και Μοντελοποίηση τους με τη Χρήση του Λογισμικού Simulink (pages 36-38), <https://dias.library.tuc.gr/view/25781?locale=en>



Εικόνα 34: Συστοιχία Κυψελών Καυσίμου PEM.
 Πηγή: Xiao-Zi Yuan, et al., 2006



Εικόνα 35: Διπολική Πλάκα Συστοιχίας PEMFC.
 Πηγή: Salwan S. Dibrab, et al., 2008.

2.4.5. Περιφερειακά Συστήματα

Σε ένα σύστημα παραγωγής ενέργειας κυψελών καυσίμου, υφίστανται περιφερειακές συσκευές που υποστηρίζουν την λειτουργία του. Ο σχεδιασμός των παραπάνω συστημάτων διαφέρει ανάλογα με τον τύπο της κυψέλης και την εφαρμογή, ωστόσο, ορισμένες περιφερειακές συσκευές απαντώνται σε πολλά από αυτά. Οι συνηθέστερες από αυτές είναι¹²³:

- Επεξεργαστής καυσίμου:**
 Μετατρέπει το καύσιμο ώστε να χρησιμοποιηθεί από την κυψέλη. Ανάλογα το καύσιμο και τον τύπο κυψέλης, ο επεξεργαστής μπορεί απλά να φιλτράρει τις προσμίξεις μέχρι και να αναμορφώνει συμβατικά καύσιμα, όπως μεθανόλη, βενζίνη, ντίζελ ή αεριοποιημένο άνθρακα.
- Συμπιεστής Αέρα:**
 Πολλές φορές η απόδοση των κυψελών βελτιώνεται με την αύξηση της πίεσης των αντιδρώντων αερίων. Για τον παραπάνω λόγο, αρκετά συστήματα κυψελών περιλαμβάνουν συμπιεστή αέρα.
- Υγραντήρας:**
 Ορισμένα είδη κυψελών λειτουργούν βέλτιστα υπό ορισμένες συνθήκες υγρασίας. Για αυτό τον λόγο, συχνά περιλαμβάνεται υγραντήρας για τον εισερχόμενο αέρα.

- **Ηλεκτρονικοί Μετατροπείς Ισχύος:**

Συμβάλλουν στον έλεγχο των χαρακτηριστικών της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, όπως η τάση, η συχνότητα και άλλα. Παράλληλα, η παραγόμενη συνεχής τάση μετατρέπεται σε εναλλασσόμενη (DC-AC Converter) για να ανταποκρίνεται στις ανάγκες των περισσότερων εφαρμογών.

2.4.6. Τεχνολογίες Κυψελών Υδρογόνου

Παρόλο που όλα τα είδη κυψελών υπάγονται στην ίδια γενικευμένη αρχή λειτουργίας, η αντίδραση μεταξύ υδρογόνου και οξυγόνου διαφέρει σε κάθε τύπο. Τα διάφορα είδη ταξινομούνται με βάση τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν, ωστόσο, διαφορές παρατηρούνται και στην θερμοκρασία λειτουργίας, το κόστος και την απόδοση (A. Kirubakaran, 2009). Τα σημαντικότερα είδη κυψελών είναι:

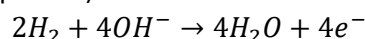
1. Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου (Alkaline Fuel Cell – AFC).
2. Κυψέλη Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (Phosphoric Acid Fuel Cell – PAFC).
3. Κυψέλη Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC).
4. Κυψέλη Καυσίμου Λιωμένου Ανθρακικού Άλατος (Molten Carbonate Fuel Cell - MCFC).
5. Κυψέλες Καυσίμου Πολυμερούς Ηλεκτρολυτικής Μembrάνης (Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC).
6. Κυψέλες Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (Direct Methanol Fuel Cell – DMFC).

2.4.6.1. Αλκαλική Κυψέλη Καυσίμου (AFC)

Οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου αποτελούν την πιο ανεπτυγμένη τεχνολογία κυψελών χαμηλής θερμοκρασίας. Η ανάπτυξη τους βασίστηκε στο πρωτοποριακό έργο του Francis Bacon στις αρχές του 1930, ενώ η πρώτη πρακτική εφαρμογή τους ήρθε μερικές δεκαετίες αργότερα στα πλαίσια αμερικάνικων διαστημικών προγραμμάτων. Πλέον, χρησιμοποιούνται ευρέως, από σταθμούς ηλεκτρικής παραγωγής μέχρι υποβρύχια σκάφη και άλλες εξειδικευμένες εφαρμογές μεταφορών (S. Mekhilef, 2012).

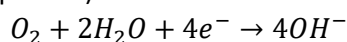
Οι αλκαλικές κυψέλες χρησιμοποιούν υδατικό διάλυμα αλκαλικού ηλεκτρολύτη υδροξειδίου του καλίου (KOH). Ο συγκεκριμένος ηλεκτρολύτης επιτρέπει την μεταφορά των ιόντων υδροξυλίου (OH⁻) που παράγονται στην κάθοδο, δημιουργώντας κύκλωμα και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο αναλυτικά, το αέριο υδρογόνο, που τροφοδοτείται στην άνοδο, συνδυάζεται με τα ανιόντα υδροξυλίου, του ηλεκτρολύτη, παράγοντας ηλεκτρόνια και νερό. Ένα μέρος του νερού μεταφέρεται μέσω του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο. Παρακάτω παρουσιάζεται η αντίδραση οξειδοαναγωγής που λαμβάνει μέρος στην άνοδο (Alexander Schenk, 2018):

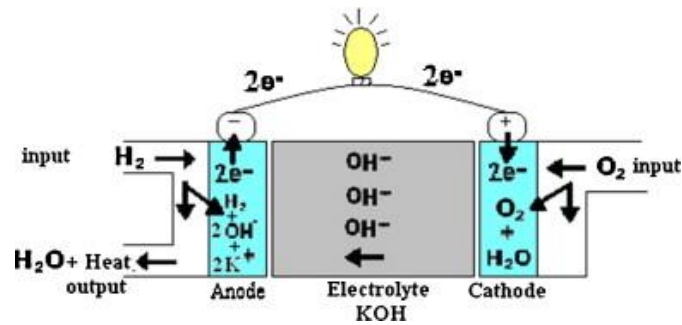
- Οξείδωση (αποβολή ηλεκτρονίων):



Στην συνέχεια, τα παραχθείσα ηλεκτρόνια μεταφέρονται μέσω του εξωτερικού κυκλώματος στην κάθοδο για περαιτέρω παραγωγή ανιόντων υδροξυλίου. Συγκεκριμένα, το οξυγόνο που εισάγεται στην κάθοδο, αντιδρά με το νερό απορροφώντας ηλεκτρόνια και σχηματίζοντας ανιόντα υδροξυλίου. Παρακάτω παρουσιάζεται η αντίδραση οξειδοαναγωγής στην κάθοδο (Alexander Schenk, 2018):

- Αναγωγή (πρόσληψη ηλεκτρονίων):





Εικόνα 36: Λειτουργία Αλκαλικής Κυψέλης Καυσίμου (AFC).
Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012

Οι αλκαλικές κυψέλες χαρακτηρίζονται ως κυψέλες χαμηλής θερμοκρασίας. Συνήθως λειτουργούν σε θερμοκρασίες που κυμαίνονται από 60° έως 90°C. Ωστόσο, ορισμένες καινούργιες εκδόσεις μπορούν να λειτουργήσουν σε ακόμα χαμηλότερες θερμοκρασίες, μεταξύ 23° και 70°C. Αξιοποιούν, κυρίως, καταλύτη νικελίου, που σε συνδυασμό με την απλή δομή τους, τις καθιστά ως τον πιο οικονομικό τύπο κυψελών. Παράγουν ηλεκτρική ενέργεια έως 20 kW με ηλεκτρική απόδοση περίπου 60%. Βέβαια, η απόδοση ισχύς συνδυασμένου θερμικού κύκλου ή CHP (Combined Heat and Power) είναι αρκετά υψηλότερη. Η απόδοση CHP ενός συστήματος αναφέρεται στη συνολική απόδοση του συστήματος από την μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε ωφέλιμη ενέργεια, δηλαδή λαμβάνοντας υπόψη τόσο την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας όσο και την ανάκτηση θερμότητας. Συνεπώς, όταν οι κυψέλες καυσίμου εξετάζονται ως συστήματα CHP, δηλαδή αξιοποιούν και την απορριπτόμενη θερμότητα, η συνολική τους απόδοση αυξάνεται¹²⁵. Στην περίπτωση των αλκαλικών κυψελών ξεπερνά το 80% (S. Mekhilef, 2012).

Παρά τα πλεονεκτήματα των αλκαλικών κυψελών, υφίστανται ορισμένα ζητήματα που εμποδίζουν την διείσδυση τους στην αγορά¹²¹. Τα πιο σημαντικά προβλήματα που παρουσιάζονται σχετίζονται με τη διάρκεια ζωής και την υποβάθμιση της απόδοσης λόγω παρουσίας διοξειδίου του άνθρακα¹²⁶. Πιο αναλυτικά, ο ηλεκτρολύτης απορροφά διοξείδιο του άνθρακα μετατρέποντας το υδροξειδίου του καλίου σε ανθρακικό κάλιο (K_2CO_3), δηλητηριάζοντας την κυψέλη καυσίμου. Ως εκ τούτου, απαιτείται καθαρός αέρας ή καθαρό οξυγόνο, η χρήση φίλτρων και συχνές αλλαγές του ηλεκτρολύτη, αυξάνοντας σημαντικά το κόστος λειτουργίας (S. Mekhilef, 2012).

2.4.6.2. Κυψέλη Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC)

Οι κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος είναι από τις πρώτες που αξιοποιήθηκαν εμπορικά. Χρησιμοποιούνται εκτενώς ως σταθερές γεννήτριες σε κτιριακές εγκαταστάσεις αλλά και σε μεγάλα οχήματα, όπως λεωφορεία¹²⁷.

Οι συγκεκριμένες κυψέλες αξιοποιούν ως ηλεκτρολύτη υγρό φωσφορικό οξύ (H_3PO_4). Η ιοντική αγωγιμότητα του οξέος μειώνεται σε χαμηλές θερμοκρασίες, συνεπώς, οι κυψέλες

¹²⁵ EPA. Methods for Calculating CHP Efficiency, <https://www.epa.gov/chp/methods-calculating-chp-efficiency>

¹²⁶ Energy.gov. Types of Fuel Cells, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>

¹²⁷ ScienceDirect. Phosphoric Acid Fuel Cells System, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/phosphoric-acid-fuel-cells-system>

λειτουργούν σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες κοντά στους 150° – 200°C¹²⁸. Ο παραπάνω ηλεκτρολύτης επιτρέπει την μεταφορά κατιόντων υδρογόνου (ή πρωτόνια) από την άνοδο στην κάθοδο, επομένως, τα πρωτόνια αποτελούν το φορέα φορτίου σε αυτό το τύπο κυψέλης. Η ηλεκτρική απόδοση κυμαίνεται μεταξύ 40 – 50%, ωστόσο, αξιοποιώντας και την απορριπτόμενη θερμική ενέργεια η απόδοση CHP φτάνει έως και 85% (S. Mekhilef, 2012).

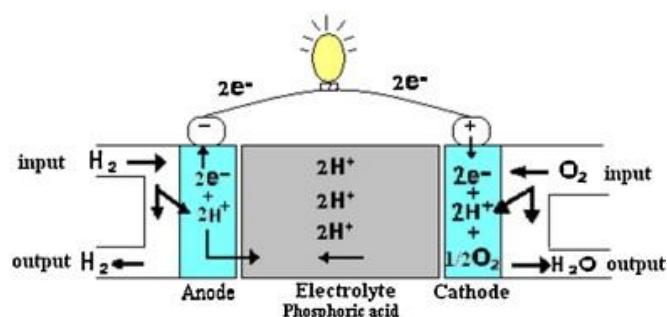
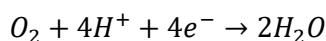
Όσον αφορά την λειτουργία της κυψέλης, το αέριο υδρογόνο που εισέρχεται στην άνοδο διασπάται σε πρωτόνια και ηλεκτρόνια. Τα πρωτόνια μετακινούνται μέσω του ηλεκτρολύτη στην κάθοδο ενώ τα ηλεκτρόνια μέσω του εξωτερικού κυκλώματος. Παρακάτω παρουσιάζεται η αντίδραση οξειδοαναγωγής που λαμβάνει μέρος στην άνοδο (S. Mekhilef, 2012):

- Οξείδωση :



Στην κάθοδο τα ηλεκτρόνια και πρωτόνια, που προέρχονται από την άνοδο, αντιδρούν με το οξυγόνο για το σχηματισμό νερού. Παρακάτω παρουσιάζεται η αντίδραση οξειδοαναγωγής στην κάθοδο:

- Αναγωγή :



Εικόνα 37: Λειτουργία Κυψέλης Καυσίμου Φωσφορικού Οξέος (PAFC).

Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012

Οι κυψέλες φωσφορικού οξέος παρέχουν μεγαλύτερη αξιοπιστία σε σχέση με άλλα είδη κυψελών λόγω της ανοχής τους στο διοξείδιο του άνθρακα, ενώ το φωσφορικό οξύ παρουσιάζει μακροπρόθεσμη σταθερότητα αυξάνοντας περαιτέρω την αξιοπιστία τους. Ωστόσο, υφίστανται ορισμένα μειονεκτήματα όπως η μειωμένη πυκνότητα ρεύματος και η χρήση λευκόχρυσου (Pt) ως καταλύτη που αυξάνουν σημαντικά το κόστος. Τέλος, λόγω των διαβρώσεων που προκαλεί το φωσφορικό οξύ στο εσωτερικό της κυψέλης κρίνεται απαραίτητη η χρήση υλικών καλής ποιότητας¹²⁹.

¹²⁸ Energy.gov. Comparison of Fuel Cell Technologies, <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/comparison-fuel-cell-technologies>

¹²⁹ ScienceDirect. Phosphoric Acid Fuel Cell, <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/phosphoric-acid-fuel-cell>

2.4.6.3. Κυψέλη Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFC)

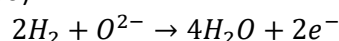
Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου αξιοποιούνται στον ενεργειακό τομέα σε σταθερές μονάδες παραγωγής με χωρητικότητα αρκετών Megawatt, ενώ ελκύουν θερμότητα ως παραπροϊόν που με κατάλληλες υποδομές αξιοποιείται για την συμπαραγωγή ενέργειας (S. Mekhilef, 2012).

Οι κυψέλες στερεού οξειδίου χρησιμοποιούν συνήθως ως ηλεκτρολύτη ύτριο σταθεροποιημένο με ζιρκόνιο (yttria stabilized zirconia, YSZ)¹²⁶. Το ύτριο σταθεροποιημένο με ζιρκόνιο αποτελεί πυκνό κεραμικό υλικό με κρυσταλλική δομή που άγει τα ιόντα οξυγόνου ενώ παράλληλα προσδίδει υψηλή θερμική και χημική σταθερότητα (J Will, 2000).

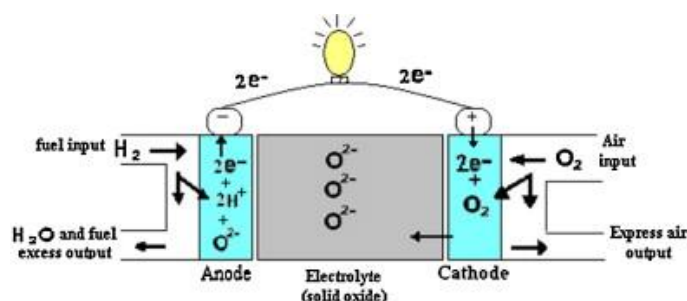
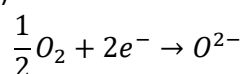
Σε αντίθεση με άλλες κυψέλες, οι στερεού οξείος δεν δηλητηριάζονται από το μονοξείδιο του άνθρακα επιτρέποντας την χρήση φυσικού αερίου, βιοαερίου και άλλων αερίων που παράγονται από άνθρακα ως καύσιμα¹²⁶.

Όσον αφορά την λειτουργία των παραπάνω κυψελών, το εισερχόμενο οξυγόνο αντιδρά στην κάθοδο, ενώ η οξείδωση του καυσίμου συμβαίνει στην άνοδο. Ουσιαστικά, στην άνοδο τα ιόντα οξυγόνου, που διαχέονται μέσω του ηλεκτρολύτη, αντιδρούν με το καύσιμο υδρογόνου. Επιπλέον, η άνοδος είναι πορώδης με σκοπό την μεταφορά του καυσίμου αλλά και των προϊόντων της οξείδωσης (M. Sahibzada, 1999). Παρακάτω παρουσιάζονται οι αντιδράσεις οξειδοαναγωγής που λαμβάνουν μέρος στην άνοδο και κάθοδο¹³⁰:

- Αναγωγή (Αντίδραση Ανόδου) :



- Οξείδωση (Αντίδραση Καθόδου):



Εικόνα 38: Λειτουργία Κυψέλης Καυσίμου Στερεού Οξειδίου (SOFC).
Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012

Οι κυψέλες στερεού οξειδίου λειτουργούν σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες καθώς οι επιθυμητές ιονικές αγωγιμότητες επιτυγχάνονται στους 800° - 1.000°C. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας επιτρέπει την εσωτερική αναμόρφωση καυσίμων αλλά και τη μείωση του κόστους αφού δεν είναι αναγκαία η προσθήκη αναμορφωτή¹²⁶. Ακόμα, σημαντικό πλεονέκτημα αποτελεί η χρήση στερεού ηλεκτρολύτη αφού απλοποιείται η σχεδίαση, ενώ δεν απαιτείται συντήρηση και διαχείριση λόγω της διάβρωσης που προκαλούν οι υγροί ηλεκτρολύτες¹³¹. Παρουσιάζουν ηλεκτρική απόδοση της τάξης του 60%,

¹³⁰ K. BRINKMAN, K. HUANG. Special Section: Energy - Solid Oxide Fuel Cells and Membranes, <https://www.aidce.org/resources/publications/cep/2016/july/special-section-energy-solid-oxide-fuel-cells-and-membranes>

¹³¹ Μπομπολάκη Ευτυχία. «Ανάλυση Λειτουργίας Κυψελών Καυσίμου και Μοντελοποίηση τους με τη Χρήση του Λογισμικού Simulink (pages 11-20), <https://dias.library.tuc.gr/view/25781?locale=en>

ενώ με την σύλληψη και αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας του συστήματος η απόδοση CHP μπορεί να ξεπεράσει το 85%¹²⁶.

Παρόλα αυτά, οι υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας δημιουργούν προβλήματα όπως μεγάλους χρόνους εκκίνησης, ψύξης αλλά και μηχανικής, χημικής συμβατότητας¹³². Λόγω των παραπάνω ζητημάτων, τα τελευταία χρόνια αναπτύσσονται κυψέλες στερεού οξέος που λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες, ωστόσο, οι συγκεκριμένες δεν παρουσιάζουν ικανοποιητικές επιδόσεις ενώ τα υλικά που απαιτούνται για την λειτουργία τους χρειάζονται περεταίρω ανάπτυξη¹²⁶.

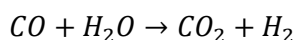
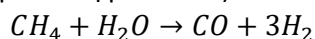
2.4.6.4. Κυψέλη Καυσίμου Λιωμένου Ανθρακικού Άλατος (MCFC)

Σήμερα, οι κυψέλες καυσίμου λιωμένου ανθρακικού άλατος αξιοποιούνται στον ενεργειακό τομέα, στο βιομηχανικό τομέα αλλά και σε στρατιωτικές εφαρμογές (M. Sahibzada, 1999). Στον ενεργειακό τομέα χρησιμοποιούνται σε μεγάλες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με βάση το φυσικό αέριο ή τον άνθρακα¹³³, ενώ αποτελούν κατάλληλη επιλογή για συμπαραγωγή ενέργειας με ανάκτηση θερμότητας χάρη στις υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας¹³⁴.

Οι κυψέλες καυσίμου λιωμένου ανθρακικού άλατος αξιοποιούν ως ηλεκτρολύτη τήγματα ανθρακικών αλάτων από ανθρακικά μέταλλα αιωρούμενα σε μια πορώδη κεραμική μήτρα από LiAlO_2 ¹²¹. Άλατα που χρησιμοποιούνται συνήθως είναι το ανθρακικό λίθιο (Li_2CO_3), το ανθρακικό κάλιο (K_2CO_3) και το ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3)¹³⁵. Τα ανθρακικά ιόντα (CO_3^{2-}) αποτελούν το φορέα φορτίου σε αυτό το τύπο κυψέλης. Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών στις οποίες λειτουργούν, 600° - 700°C¹²⁸, ελαφροί υδρογονάνθρακες, όπως το μεθάνιο (CH_4), μετατρέπονται σε υδρογόνο μέσα στην ίδια την κυψέλη. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εσωτερική αναμόρφωση και απαλλάσσει από την ανάγκη χρήσης εξωτερικού αναμορφωτή για τη μετατροπή καυσίμων μειώνοντας σημαντικά το κόστος¹²⁶.

Πιο αναλυτικά, η εσωτερική αναμόρφωση συμβαίνει στην άνοδο όπου το αέριο τροφοδοσίας, συνήθως μεθάνιο, αντιδρά με το νερό παράγοντας υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα. Στην συνέχεια, το μονοξείδιο του άνθρακα αντιδρά περαιτέρω με το νερό παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο (S. Mekhilef, 2012).

- Εσωτερική Αναμόρφωση (περίπτωση μεθανίου):



¹³² United Nations. Solid oxide fuel cell technology, <https://archive.unescwa.org/solid-oxide-fuel-cell-technology>

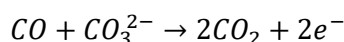
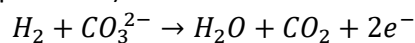
¹³³ ScienceDirect. Molten Carbonate Fuel Cell, <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/molten-carbonate-fuel-cell>

¹³⁴ ScienceDirect. Molten Carbonate Fuel Cell, <https://www.sciencedirect.com/topics/chemical-engineering/molten-carbonate-fuel-cell>

¹³⁵ FuelCellsWorks. Molten Carbonate Fuel Cell, <https://fuelcellworks.com/knowledge/technologies/mcfc/>

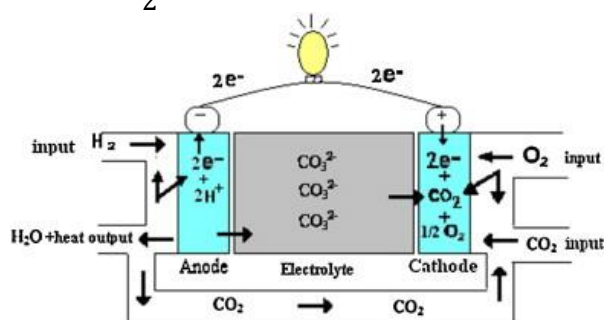
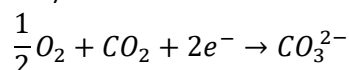
Παράλληλα, στην άνοδο πραγματοποιούνται, ταυτοχρόνως, δυο ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που εκμεταλλεύόμενες τα ανθρακικά ιόντα παράγουν ηλεκτρόνια. Παρακάτω περιγράφονται αναλυτικά (S. Mekhilef, 2012):

- Οξειδώσεις (περίπτωση μεθανίου):



Αντίστοιχα, στην κάθοδο παράγονται τα ανθρακικά ιόντα που μέσω του ηλεκτρολύτη μεταφέρονται στην άνοδο. Παρακάτω περιγράφεται αναλυτικά η αντίδραση αναγωγής στην κάθοδο (S. Mekhilef, 2012):

- Αναγωγή (περίπτωση μεθανίου):



Εικόνα 39: Λειτουργία Κυψέλης Καυσίμου Λιωμένου Ανθρακικού Άλατος (MCFC).
Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012

Οι κυψέλες λιωμένου ανθρακικού άλατος λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες έως και 650°C. Τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τα μειονεκτήματά τους συνδέονται άμεσα με την θερμοκρασία λειτουργίας. Συγκεκριμένα, λόγω της υψηλής θερμοκρασίας δεν απαιτούνται ακριβοί καταλύτες ούτε εξωτερικός αναμορφωτής, μειώνοντας σημαντικά το κόστος λειτουργίας¹²⁶. Ακόμα, οι παραπάνω κυψέλες παρουσιάζουν ηλεκτρική απόδοση της τάξης του 50% – 60%, αλλά όταν αξιοποιείται η απορριπτόμενη θερμότητα του συστήματος, η συνολική απόδοση μπορεί να ξεπεράσει το 85%¹²⁶.

Όσον αφορά τα μειονεκτήματα, το σημαντικότερό είναι η ανθεκτικότητα των κυψελών. Οι υψηλές θερμοκρασίες σε συνδυασμό με τον διαβρωτικό χαρακτήρα του καταλύτη μειώνουν σημαντικά την διάρκεια ζωής τους¹²⁶. Επιπλέον, παρατηρούνται μεγάλοι χρόνοι εκκίνησης εξαιτίας της απαιτούμενης θερμοκρασίας λειτουργίας (S. Mekhilef, 2012). Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια γίνονται προσπάθειες για την ανάπτυξη νέων ανθεκτικών υλικών και σχεδίων ώστε να πολλαπλασιαστεί η διάρκεια ζωής τους χωρίς μείωση της απόδοσης.

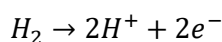
2.4.6.5. Κυψέλη Καυσίμου Πολυμερούς Ηλεκτρολυτικής Μembrάνης (PEMFC)

Οι κυψέλες καυσίμου πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης ή αλλιώς κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membrane fuel cells) χρησιμοποιούνται τόσο σε φορητές όσο και σταθερές εφαρμογές¹²⁶. Χαρακτηριστικά όπως ο μικρός χρόνος εκκίνησης, το υψηλό επίπεδο απόδοσης και η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας τις καθιστά ιδανικότερες για εφαρμογές στον τομέα των μεταφορών (B.D. McNicol).

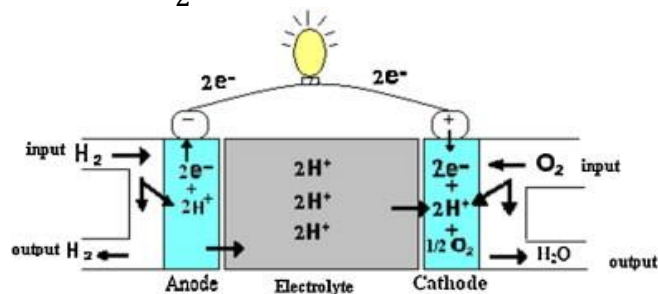
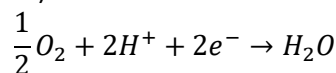
Αξιοποιούν ως ηλεκτρολύτη μια μεμβράνη από στερεό πολυμερές που διαχωρίζει το καύσιμο από την οξειδωτική ουσία, ενώ επιτρέπει την μεταφορά ιόντων υδρογόνου (ή αλλιώς πρωτονίων) και εμποδίζει αυτή των ηλεκτρονίων. Φορέα φορτίου σε αυτό το τύπο κυψέλης αποτελούν τα πρωτόνια (S. Mekhilef, 2012).

Για την επιτυχή διάσπαση του υδρογόνου διαθέτουν πορώδη ηλεκτρόδια με καταλύτη από λευκόχρυσο (Pt) ή κράμα λευκόχρυσου^{126 131}. Ο καταλύτης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην λειτουργία της κυψέλης καθώς συμβάλλει στον σχηματισμό πρωτονίων και ηλεκτρονίων στην άνοδο. Η μεμβράνη επιτρέπει την μεταφορά των πρωτονίων, εμποδίζοντας τα ηλεκτρόνια και αναγκάζοντας τα να κινηθούν στο εξωτερικό κύκλωμα. Καθώς τα ηλεκτρόνια ρέουν στην κάθοδο, αλληλοεπιδρούν με το οξυγόνο και τα πρωτόνια σχηματίζοντας νερό. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν μέρος σε κάθε ηλεκτρόδιο (S. Mekhilef, 2012):

- Οξείδωση (Αντίδραση Ανόδου) :



- Αναγωγή (Αντίδραση Καθόδου):



Εικόνα 40: Λειτουργία Κυψέλης Καυσίμου Πολυμερούς Ηλεκτρολυτικής Μεμβράνης (PEMFC).
Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012

Οι κυψέλες μεμβράνης αποτελούν κυψέλες χαμηλής θερμοκρασίας καθώς λειτουργούν στους 60° – 100°C, ενώ παρουσιάζουν υψηλή ηλεκτρική απόδοση που κυμαίνεται μεταξύ 40 – 50%. Υψηλότερες αποδόσεις δύναται να επιτευχθούν με την αύξηση της θερμοκρασίας, ωστόσο, υπερβαίνοντας τους 100°C, εξατμίζεται το νερό αφυδατώνοντας την μεμβράνη μειώνοντας την αγωγιμότητά της. Επιπρόσθετα, η χαμηλή λειτουργική θερμοκρασία επιτρέπει την γρήγορη εκκίνηση με αποτέλεσμα την μικρότερη φθορά στα εξαρτήματα του συστήματος¹²⁶.

Παρά τα πλεονεκτήματα, η χρήση καταλύτη από ευγενή μέταλλα, όπως η πλατίνα, δημιουργεί ορισμένα ζητήματα. Αρχικά, η παρουσία των παραπάνω αυξάνει σημαντικά το κόστος του συστήματος, ενώ είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στη δηλητηρίαση από αερίους ρύπους μονοξειδίου του άνθρακα, αμμωνίας και θείου. Ως εκ τούτου, καθίσταται αναγκαία η χρήση υδρογόνου υψηλής καθαρότητας και η ύπαρξη πρόσθετου αντιδραστήρα για τη μείωση των ρύπων εάν το καύσιμο προέρχεται από υδρογονάνθρακες^{124 126}. Επομένως, η ύπαρξη επιπλέον συστημάτων, όπως ο αντιδραστήρας, αλλά και η ανάγκη για υψηλής καθαρότητας υδρογόνου αυξάνουν περαιτέρω το κόστος της μεθόδου μειώνοντας την ανταγωνιστικότητά της.

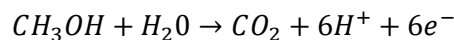
2.4.6.6. Κυψέλη Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (DMFC)

Οι κυψέλες καυσίμου άμεσης μεθανόλης χαρακτηρίζονται ως υποκατηγορία των κυψελών πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης με ειδοποιό διαφορά ότι το καύσιμο που αξιοποιείται είναι η μεθανόλη (CH₃OH)¹³¹. Αποτελούν κατάλληλη πηγή ενέργειας για φορητές συσκευές λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, της μεγάλης διάρκειας ζωής και την ταχύτητα ανεφοδιασμού (S. Mekhilef, 2012).

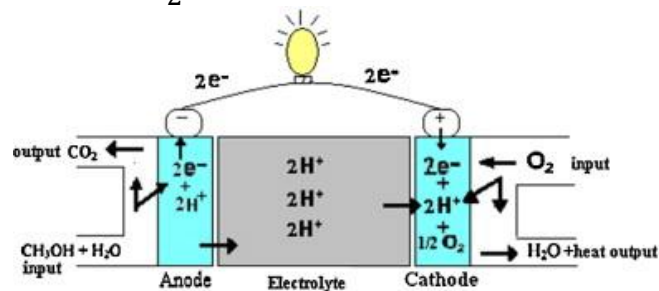
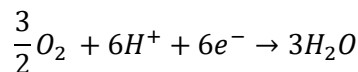
Πηγή ενέργειας των παραπάνω κυψελών είναι η μεθανόλη που συχνά αναμιγνύεται με νερό και τροφοδοτείται απευθείας στην άνοδο¹²⁶. Ένας από τους σημαντικότερους λόγους που χρησιμοποιείται νερό είναι η κατανάλωσή του στην άνοδο κατά την αντίδραση της οξειδωσης. Συνήθως, το καύσιμο μεθανόλης τροφοδοτείται στο σύστημα ως διάλυμα με σκοπό την μείωση του φαινομένου της διασταύρωσης μεθανόλης (methanol cross-over phenomenon). Κατά το φαινόμενο της διασταύρωσης, η μεθανόλη διαχέεται, μέσω της μεμβράνης του ηλεκτρολύτη, από την πλευρά της ανόδου προς την πλευρά της καθόδου χωρίς να αντιδρά (Yongsheng Wei, 2011). Το παραπάνω φαινόμενο έχει ως αποτέλεσμα την σημαντική μείωση της απόδοσης της κυψέλης. Οι κυψέλες άμεσης μεθανόλης χαρακτηρίζονται ως υποκατηγορία των κυψελών πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης και χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη πολυμερή μεμβράνη με τα πρωτόνια να αποτελούν το φορέα φορτίου (S. Mekhilef, 2012).

Όσον αφορά την λειτουργία των κυψελών, στην άνοδο η μεθανόλη μετασχηματίζεται σε διοξείδιο του άνθρακα, ενώ στην κάθοδο το οξυγόνο συμμετέχει στο σχηματισμό ατμού ή νερού. Οι αντιδράσεις της ανόδου και καθόδου περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω (S. Mekhilef, 2012):

- Οξείδωση (Άνοδος):



- Αναγωγή (Κάθοδος):



Εικόνα 41: Λειτουργία Κυψέλης Καυσίμου Άμεσης Μεθανόλης (DMFC).

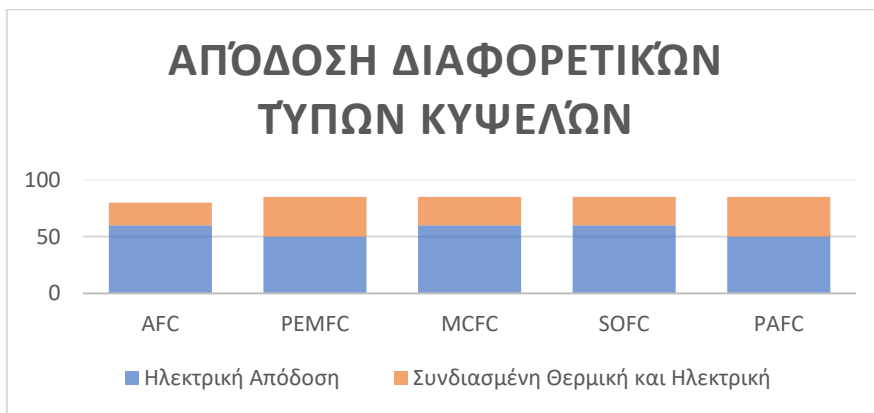
Πηγή: S. Mekhilef, et al., 2012

Παρουσιάζουν χαμηλή ηλεκτρική απόδοση σε σχέση με τα άλλα είδη κυψελών αφού δεν ξεπερνάνε το 30%. Ωστόσο, με την αξιοποίηση της απορριπτόμενης θερμότητας, η απόδοση CHP αυξάνεται σημαντικά και φτάνει έως και 80% (S. Mekhilef, 2012). Παράλληλα, η απουσία θορύβου, οι μικρές θερμικές απώλειες και η χαμηλή τοξικότητα τις καθιστούν ιδανικές για μη στατικές εφαρμογές¹²⁴, ενώ το καύσιμο που αξιοποιούν, δηλαδή η μεθανόλη, παρουσιάζει ευκολία στην μεταφορά και διάθεση λόγω της υπάρχουσας υποδομής και της υγρής κατάστασής του. Σημαντικότερο μειονέκτημα αυτού του είδους κυψέλης αποτελεί το φαινόμενο διασταύρωσης καθώς μειώνει σημαντικά την απόδοση.

2.5. Σύγκριση Τεχνολογιών Κυψελών Καυσίμου

Βασικός παράγοντας για την κατηγοριοποίηση των κυψελών αποτελεί ο ηλεκτρολύτης που αξιοποιείται. Χρησιμοποιώντας διαφορετικό ηλεκτρολύτη, διαφοροποιούνται οι θερμοκρασίες λειτουργίας, το κόστος και η απόδοση¹³¹. Συνεπώς, λόγω των παραπάνω διαφορών, κάθε τύπος κυψέλης αντιστοιχεί καλύτερα σε συγκεκριμένες εφαρμογές.

Παρόλο που όλα τα είδη κυψελών στηρίζονται στις ίδιες αρχές λειτουργίας, παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στην ηλεκτρική απόδοση. Η πιο αποδοτική κυψέλη είναι η αλκαλική με ηλεκτρική απόδοση που φτάνει έως και 60%, ενώ ακολουθούν οι κυψέλες πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης και οι λιωμένου ανθρακικού άλατος. Ωστόσο, όταν αξιοποιείται η απορριπτόμενη θερμότητα του συστήματος, η εικόνα της συνολικής απόδοσης αλλάζει σημαντικά. Παρακάτω παρουσιάζεται διάγραμμα σύγκρισης της ηλεκτρικής και CHP απόδοσης για διαφορετικά είδη κυψελών (υπολογίζονται οι μέγιστες αποδόσεις για κάθε κυψέλη):



Σημαντικός παράγοντας διάκρισης αποτελεί και η θερμοκρασία. Με γνώμονα την θερμοκρασία λειτουργίας, οι κυψέλες χωρίζονται σε κυψέλες χαμηλής, μεσαίας και υψηλής θερμοκρασίας. Συγκεκριμένα¹²⁸:

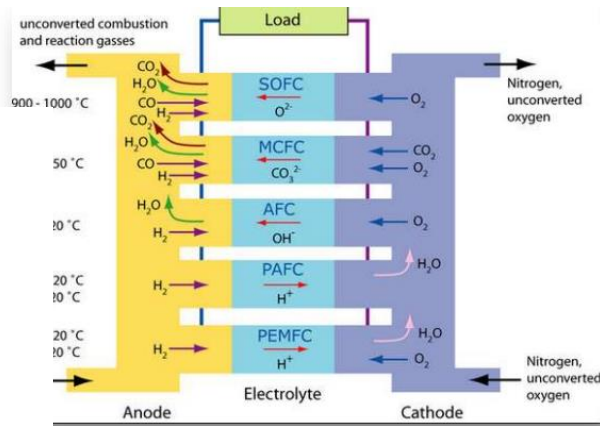
ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	ΚΥΨΕΛΗ
ΧΑΜΗΛΗ	<100°C	AFC
	<120°C	PEMFC
	<100°C	DMFC
ΜΕΣΑΙΑ	150° - 200°C	PAFC
ΥΨΗΛΗ	500°-1000°C	SOFC
	600°-700°C	MCFC

Γενικά, οι κυψέλες που λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες απαιτούν καθαρό υδρογόνο χωρίς προσμείξεις. Από την άλλη, οι κυψέλες υψηλών θερμοκρασιών παρουσιάζουν ανθεκτικότητα στην παρουσία ξένων προσμίξεων, ενώ μπορούν να χρησιμοποιήσουν και άλλα καύσιμα εκτός του υδρογόνου¹²¹.

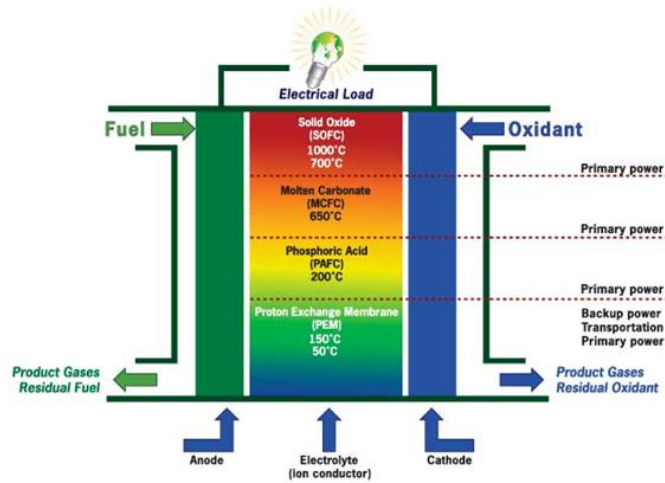
Οι κυψέλες παράγουν ευρύ φάσμα ισχύος που κυμαίνεται από λίγα kW έως μερικά MW, επομένως, χρησιμοποιούνται σε πολλές διαφορετικές εφαρμογές. Αξιοποιούνται σε

συσκευές ισχύος μικρής εμβέλειας, όπως προσωπικό ηλεκτρονικό εξοπλισμό, για εφαρμογές μεσαίας εμβέλειας, όπως οχήματα, οικιακές συσκευές, στρατιωτικές εφαρμογές και εφαρμογές μεγάλης εμβέλειας, όπως στον ενεργειακό τομέα. Συγκεκριμένα¹²⁸:

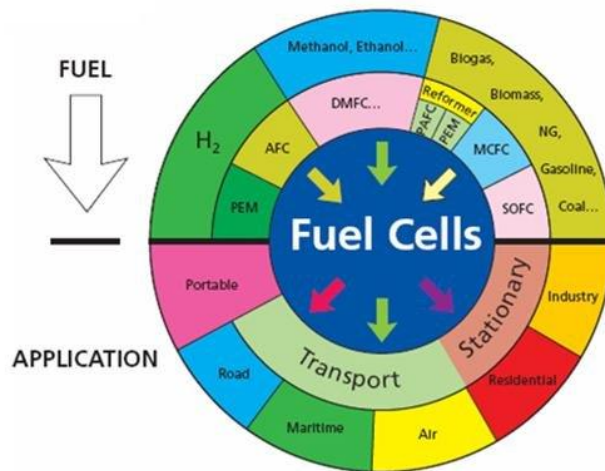
ΚΥΨΕΛΗ	ΙΣΧΥΣ (kW)	ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ	ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ
AFC	1 – 100	Στρατιωτικό Διάστημα Εφεδρική ισχύς Μεταφορές	Χαμηλό κόστος Χαμηλή θερμοκρασία Γρήγορη εκκίνηση	Ευαισθησία CO ₂ Διαχείριση ηλεκτρολύτη Διάρκεια ζωής
PEMFC	<1 – 100	Εφεδρική ενέργεια Φορητή ενέργεια Ενεργειακό Τομέα Μεταφορές	Ανθεκτικά στην διάβρωση Χαμηλή θερμοκρασία Γρήγορη εκκίνηση	Ακριβοί καταλύτες Ευαίσθητες στη δηλητηρίαση
MCFC	300 – 3000	Ενεργειακός τομέας	Υψηλή απόδοση Ευελιξία καυσίμου Κατάλληλο για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας	Ανθεκτικότητα Μεγάλος χρόνος εκκίνησης Χαμηλή πυκνότητα ισχύος
SOFC	1 – 2000	Ενεργειακός τομέας	Υψηλή απόδοση Ευελιξία καυσίμου Στερεός ηλεκτρολύτης Κατάλληλο για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας	Διάβρωση Μεγάλος χρόνος εκκίνησης
PAFC	5 – 400	Ενεργειακός τομέας	Αξιοπιστία Ανοχή στο CO ₂ Κατάλληλο για συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας	Ακριβοί καταλύτες Διάβρωση Ευαισθησία στο S



Εικόνα 42: Συγκεντρωτική Απεικόνιση Λειτουργίας Διαφορετικών Τύπων Κυψελών Καυσίμου.
 Πηγή: <https://dias.library.tuc.gr/view/25781?locale=en>



Εικόνα 43: Συγκεντρωτική Απεικόνιση Θερμοκρασιών Λειτουργίας Ορισμένων Τύπων Κυψελών.
 Πηγή: https://fuelcellcollaborative.org/Fuel_Cell_Technologies.html



Εικόνα 44: Καύσιμα και Πιθανές Εφαρμογές των Κυψελών Καυσίμου.
 Πηγή: A. Abougarair, 2013

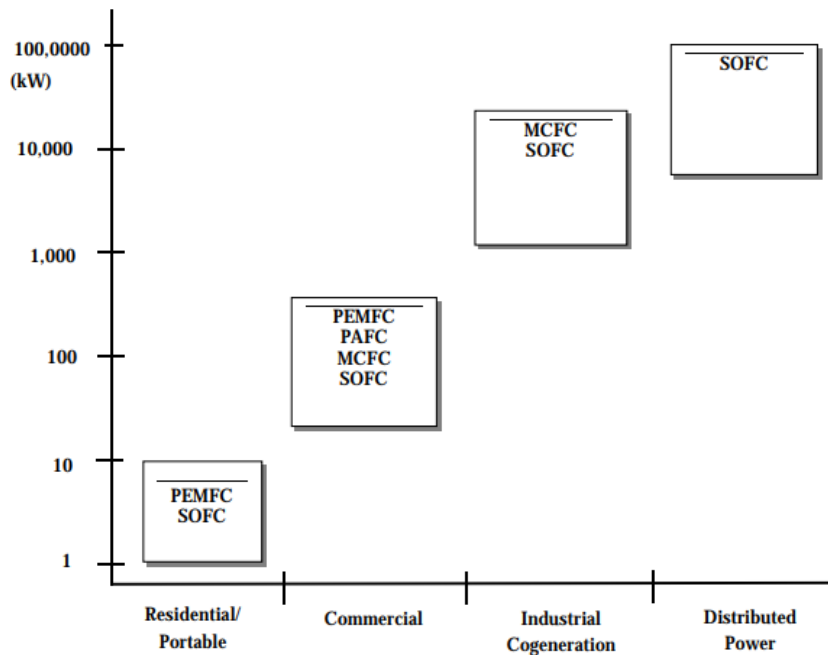
2.6. Εφαρμογές στον Ενεργειακό Τομέα

2.6.1. Εισαγωγή

Η εισαγωγή των κυψελών καυσίμου στον ενεργειακό τομέα αποκτά όλο και μεγαλύτερη δυναμική λόγω της συνεχής αύξησης των ενεργειακών αναγκών αλλά και της αναζήτησης βιώσιμων ενεργειακά λύσεων. Καθώς η τεχνολογία ωριμάζει και οι δυνατότητές τους αυξάνονται, δύνανται να διαδραματίσουν καθοριστικό ρόλο στην αποτελεσματική κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών ελαχιστοποιώντας, παράλληλα, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των υφιστάμενων τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας, με σημαντικότερα την υψηλή απόδοση και τις μειωμένες εκπομπές. Παράλληλα, δεν εξαρτώνται αποκλειστικά από το υδρογόνο καθώς μπορούν να χρησιμοποιήσουν μια σειρά από καύσιμα, όπως φυσικό αέριο, βιοαέριο και άλλα, αυξάνοντας σημαντικά την ευελιξία τους. Επιπλέον, η επεκτασιμότητα που παρουσιάζουν τις καθιστά κατάλληλες για εφαρμογές μικρής αλλά και μεγάλης κλίμακας.

Η ύπαρξη διαφορετικών τεχνολογιών, με διακριτά χαρακτηριστικά, επιτρέπει την αξιοποίησή των κυψελών σε πληθώρα ενεργειακών εφαρμογών. Αποκτούν δυναμική ως φορητές μονάδες παραγωγής ενέργειας, ενώ η ικανότητά τους να λειτουργούν ανεξάρτητα από το δίκτυο τις καθιστά ιδανική λύση εφεδρικής ενέργειας. Παράλληλα, αξιοποιούνται όλο και περισσότερο σε αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής ενέργειας, ως μέσα συμπαραγωγής ενέργειας στο βιομηχανικό τομέα αλλά και ως μέσα χημικής αποθήκευσης ενέργειας. Παρόλα αυτά, εξακολουθούν να υφίστανται προκλήσεις, όπως το κόστος και η απουσία ανεπτυγμένου δικτύου, που χρήζουν άμεσης αντιμετώπισης για την πλήρη υιοθέτηση και αξιοποίησή τους.



Εικόνα 45: Εφαρμογές Κυψελών Καυσίμου για την Παραγωγή Ενέργειας.

Πηγή: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=982f97445a8a928f11e2c3e5bfbc593c073537>

2.6.2. Αποκεντρωμένη Παραγωγή Ενέργειας

Η ενεργειακή βιομηχανία μεταβάλλεται συνεχώς από τις αλλαγές στην παγκόσμια αγορά και νομοθεσία. Ταυτοχρόνως, η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται τόσο στις ανεπτυγμένες όσο και στις αναπτυσσόμενες χώρες¹³⁶. Λόγω των παραπάνω, η αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας αποκτά δυναμική ως μέσω την κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών, την τήρηση των επιτρεπτών επιπέδων εκπομπών και την αξιοποίηση καινοτόμων τεχνολογιών¹³⁷. Η αποκεντρωμένη (ή αλλιώς κατακεντρωμένη) παραγωγή (Distributed Generation) αναφέρεται σε μονάδες που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια στο σημείο ή κοντά στο σημείο όπου θα καταναλωθεί. Μπορεί να εξυπηρετούν μια μεμονωμένη δομή ή να αποτελούν μέρος ενός μικροδικτύου που συνδέεται με το ευρύτερο δίκτυο, όπως σε μια μεγάλη βιομηχανική εγκατάσταση¹³⁸. Κατέχουν αρκετά πλεονεκτήματα, ενώ δύναται να αξιοποιηθούν σε αναπτυσσόμενες χώρες για την ταχεία δημιουργία ενεργειακής υποδομής (COOK B., 2002).

Οι μονάδες αποκεντρωμένης παραγωγής χρησιμοποιούν ποικίλες πηγές ενέργειας, όπως ορυκτά καύσιμα, ανανεώσιμες πηγές ή συνδυασμό τεχνολογιών. Ωστόσο, όταν η παραγωγή ενέργειας βασίζεται σε κυψέλες καυσίμου παρουσιάζει αρκετά προτερήματα. Σημαντικότερα από αυτά είναι η υψηλή ενεργειακή απόδοση και οι ελάχιστοι έως μηδενικοί ρύποι. Ακόμα, ο μικρός αριθμός κινούμενων εξαρτημάτων μειώνει το θόρυβο και την πολυπλοκότητα, αυξάνοντας σημαντικά την αξιοπιστία και μειώνοντας το κόστος συντήρησης. Παράλληλα, η γρήγορη εγκατάσταση και επεκτασιμότητα των κυψελών διευκολύνουν την εξατομίκευση του συστήματος για την κάλυψη διαφορετικών αναγκών χωρίς να απαιτείται αναδιαμόρφωση και ανακατασκευή ολόκληρης της μονάδας. Τέλος, η παραγόμενη θερμότητα, των κυψελών μεσαίας και υψηλής θερμοκρασίας, μπορεί να αξιοποιηθεί για συμπαραγωγή, αυξάνοντας περαιτέρω την αποδοτικότητα της εγκατάστασης (Xinhong Huang, 2006).

Καθώς το υδρογόνο διεισδύει στην ενεργειακή αγορά και αναπτύσσονται οι υποδομές και οι τεχνολογίες του, διευκολύνεται η δημιουργία αποκεντρωμένων μονάδων που αξιοποιούν κυψέλες για την παραγωγή ενέργειας. Σήμερα, υφίστανται μεμονωμένες μονάδες σε διάφορες χώρες όπως η Γερμανία και οι Ηνωμένες Πολιτείες, ενώ υπάρχουν αρκετές εταιρίες που δραστηριοποιούνται στο παραπάνω τομέα (COOK B., 2002). Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η Ballard Power Systems που δραστηριοποιείται στον τομέα αρκετά χρόνια προσφέροντας σταθερές μονάδες κυψελών καυσίμου με ισχύ που κυμαίνεται από 200 kW έως 1.2MW, παρέχοντας την δυνατότητα ηλεκτροδότησης και θέρμανσης μιας κτηριακής μονάδας έως και μιας μικρής κοινότητας¹³⁹.

¹³⁶ Exxonmobil. Global energy demand by sector, <https://exxonmobil.co/45rcUwB>

¹³⁷ Energy center. Fuel Cells for Distributed Generation. A Technology and Marketing Summary, <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=982f97445a8a928f11e2c3e5bfbc5d593c073537> (pages 15 - 20)

¹³⁸ EPA. Distributed Generation of Electricity and its Environmental Impacts, <https://www.epa.gov/energy/distributed-generation-electricity-and-its-environmental-impacts>

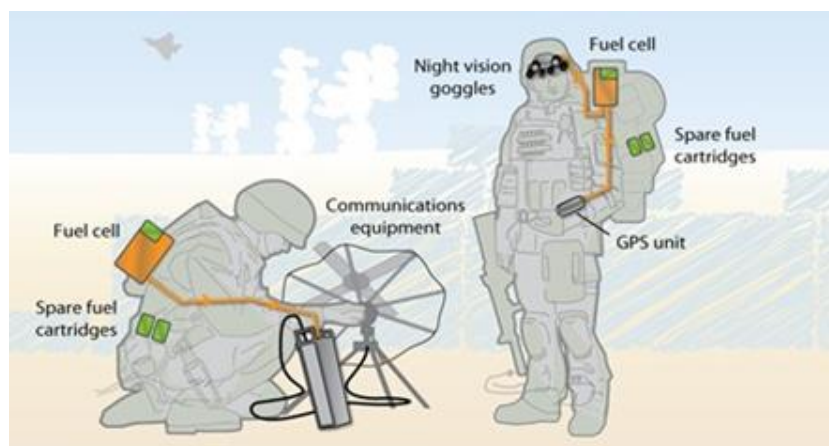
¹³⁹ BALLARD. Stationary Power Generation, <https://www.ballard.com/fuel-cell-solutions/fuel-cell-power-products/backup-power-systems>



Εικόνα 46: Κατανεμημένη – Αποκεντρωμένη Μονάδα Συμπαραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας Ballard 250kW.
Πηγή: B. Cook, 2002

2.6.3. Φορητή Ενέργεια

Ως φορητές κυψέλες καυσίμου, χαρακτηρίζονται οι κυψέλες που αξιοποιούνται ως ενεργειακές πηγές φορητών εφαρμογών, παρέχοντας ηλεκτρική ενέργεια μερικών Watt έως αρκετών kW¹⁴⁰. Παρουσιάζουν προοπτικές ανάπτυξης καθώς υπερτερούν έναντι των συμβατικών μεθόδων παραγωγής φορητής ενέργειας, δηλαδή των γεννητριών και μπαταριών. Δύναται να αξιοποιηθούν για την κάλυψη στρατιωτικών εφαρμογών, για την χρήση ως βοηθητικές μονάδες ισχύος αλλά και για την λειτουργία προσωπικών ηλεκτρονικών συσκευών.



Εικόνα 47: Πιθανή Χρήση Φορητών Κυψελών Καυσίμου για Στρατιωτικές Εφαρμογές.
Πηγή: <https://fuelcellsworks.com/knowledge/applications/portable/>

Όσον αφορά την φορητή παραγωγή ενέργειας, οι κυψέλες παρουσιάζουν αρκετά πλεονεκτήματα έναντι των γεννητριών βενζίνης και πετρελαιοκαυσίμων. Εκπέμπουν ελάχιστους έως μηδενικούς ρύπους με μοναδικό παραπροϊόν το νερό (όταν αξιοποιείται το υδρογόνο ως καύσιμο). Επιπλέον, ο ελάχιστος αριθμός κινούμενων εξαρτημάτων, τους προσδίδει αξιοπιστία αλλά και αθόρυβη λειτουργία (COOK B., 2002).

¹⁴⁰ FuelCellsWorks. Portable, <https://fuelcellsworks.com/knowledge/applications/portable/>

Συγκριτικά με τις μπαταρίες, οι κυψέλες προσφέρουν μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα καθώς παράγουν ισοδύναμη ή και περισσότερη ενέργεια καταλαμβάνοντας μικρότερο όγκο και μάζα. Επιπρόσθετα, η ταχεία επαναφόρτιση και η μεγαλύτερη διάρκεια ζωής, τις καθιστά πιο εύχρηστες¹⁴⁰. Γενικά, η θερμοκρασία επηρεάζει σημαντικά την λειτουργική απόδοση των μπαταριών, ενώ με την συνεχή χρήση μειώνεται αισθητά η χωρητικότητά τους. Ωστόσο, στις κυψέλες, υποθέτοντας σταθερή παροχή υδρογόνου και ελάχιστες διαρροές, δεν παρουσιάζονται τα παραπάνω προβλήματα (COOK B., 2002).

Οι κυψέλες πολυμερούς ηλεκτρολυτικής μεμβράνης και οι άμεσης μεθανόλης αποτελούν τις δυο τεχνολογίες που παρουσιάζουν την μεγαλύτερη προοπτική ανάπτυξης στο τομέα της φορητής ενέργειας. Σήμερα, υπάρχουν αρκετές εταιρίες που αναπτύσσουν και προσφέρουν πληθώρα προϊόντων στο παραπάνω τομέα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η Ballard Power Systems, η PowerUP Energy Technologies, η FC TecNrgy και άλλες¹⁴¹.



Εικόνα 48: PowerUp Φορητή Γεννήτρια Κυψελών Υδρογόνου 1 kW.
Πηγή: <https://powerup-tech.com/product/up1k/>



Εικόνα 49: Χρήση Φορητών Κυψελών για την Φόρτιση Μικρών Συσκευών.
Πηγή: <https://dias.library.tuc.gr/view/25781?locale=en>

¹⁴¹ Inven. Decoding Top 26 Portable Fuel Cell Enterprises, <https://www.inven.ai/company-lists/top-26-portable-fuel-cell-companies>

2.6.4. Υδρογόνο και Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

2.6.4.1. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ως Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) χαρακτηρίζονται οι ενεργειακές πηγές που συναντώνται στο περιβάλλον (φυσικές πηγές) και η εκμετάλλευσή τους δεν οδηγεί σε εξάντληση φυσικών πόρων (Juan Carlos León Gómez, 2023). Σε αντίθεση με τις συμβατικές, μη ανανεώσιμες πηγές, οι ανανεώσιμες αποτελούν βιώσιμη επιλογή καθώς παρουσιάζουν μειωμένες έως μηδενικές εκπομπές και αειφορία. Συνεπώς, η μεγαλύτερη συμμετοχή τους στο ενεργειακό μείγμα συμβαδίζει με το στόχο του ενεργειακού μετασχηματισμού των περισσότερων οικονομιών¹⁴².

Αναπτύσσονται συνεχώς καθώς συμβάλλουν στην μείωση των αερίων ρύπων και στην απεξάρτηση από τις ασταθές αγορές των ορυκτών καυσίμων¹⁴³. Τα τελευταία χρόνια, οι τεχνολογίες για την σύλληψη και αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών βελτιώνεται συνεχώς, καθιστώντας την χρήση τους όλο και πιο οικονομικά και περιβαλλοντικά βιώσιμη (Juan Carlos León Gómez, 2023). Η ενσωμάτωσή τους στα ενεργειακά συστήματα αυξάνεται συνεχώς. Χαρακτηριστικά, το 2021, το 21,8% της ακαθάριστης τελικής ενεργειακής κατανάλωσης της Ευρωπαϊκής Ένωσης καλύφθηκε από ανανεώσιμες πηγές¹⁴³. Ωστόσο, υφίστανται ορισμένα ζητήματα, όπως η αστάθεια από ακραίες αλλαγές στην ζήτηση, που παρεμποδίζουν την μεγιστοποίηση της ενεργειακής τους απόδοσης^{142 144}.

2.6.4.2. Φαινόμενο της Καμπύλης Πάπιας (Duck Curve)

Η ηλιακή και αιολική ενέργεια είναι από τις πιο διαδεδομένες ανανεώσιμες ενεργειακές πηγές¹⁴⁵. Η παραγωγή ενέργειας των παραπάνω βασίζεται στην ηλιοφάνεια και την ένταση του ανέμου, καθιστώντας τις ασταθές¹⁴⁶. Ένα παράδειγμα της αστάθειας αυτής είναι η «Καμπύλη Πάπιας» («Duck Curve»), που εντοπίζεται σε μια μελέτη από το Ανεξάρτητο Διαχειριστή Συστήματος της Καλιφόρνια (California Independent System Operator) πάνω σε φωτοβολταϊκές μονάδες. Στην μελέτη υπογραμμίζεται πως τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες η ηλιακή ενέργεια αυξάνεται, ωστόσο, δεν υπάρχει αρκετή ενεργειακή ζήτηση στο δίκτυο με κίνδυνο την υπερπαραγωγή. Παράλληλα, τις απογευματινές και βραδινές ώρες που κορυφώνεται η ενεργειακή ανάγκη η ηλιακή ενέργεια μειώνεται¹⁴⁷.

¹⁴² sesHydrogen. Hydrogen as energy storage – a remedy for the instability of RES,

<https://seshydrogen.com/en/hydrogen-as-energy-storage-a-remedy-for-the-instability-of-res/>

¹⁴³ Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, <https://seshydrogen.com/en/hydrogen-as-energy-storage-a-remedy-for-the-instability-of-res/>

¹⁴⁴ Synergy. Everything you need to know about the Duck Curve.

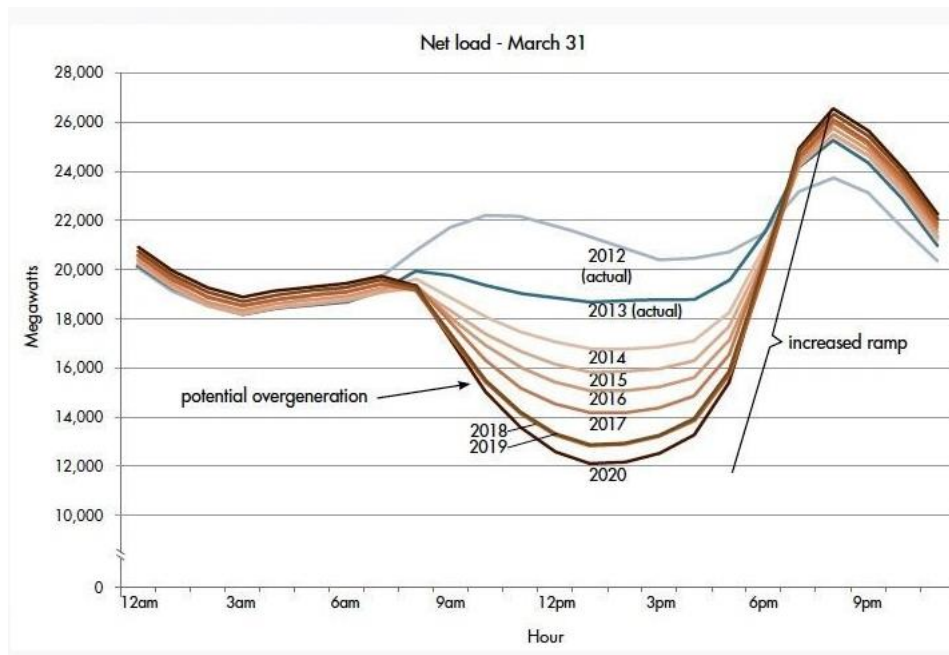
<https://www.synergy.net.au/Blog/2021/10/Everything-you-need-to-know-about-the-Duck-Curve>

¹⁴⁵ PowerTechnology. The world's most used renewable power sources, <https://www.power-technology.com/features/featurethe-worlds-most-used-renewable-power-sources-4160168/?cf-view&cf-closed&cf-closed>

¹⁴⁶ Fuel Cell & Hydrogen Energy Association. Hydrogen As Energy Storage,

<https://www.fchea.org/hydrogen-as-storage>

¹⁴⁷ Energy.gov, BECCA JONES-ALBERTUS. Confronting the Duck Curve: How to Address Over-Generation of Solar Energy, <https://www.energy.gov/eere/articles/confronting-duck-curve-how-address-over-generation-solar-energy>

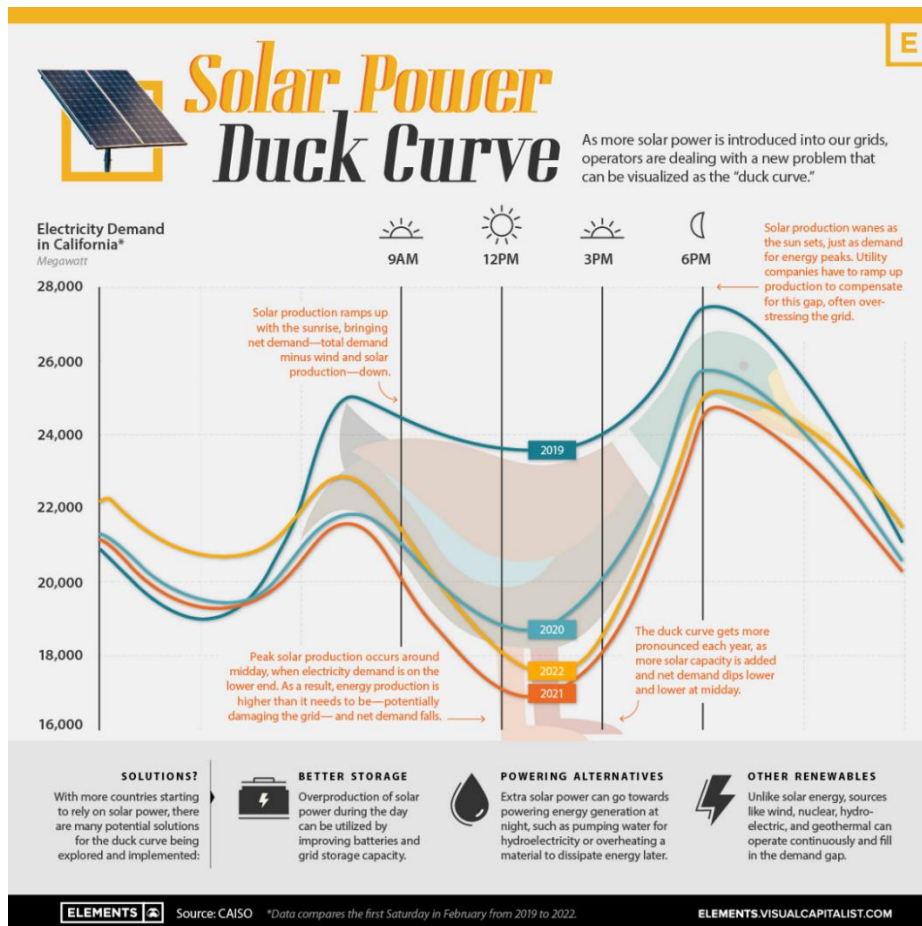


Εικόνα 50: Καμπύλη Πάπιας (Duck Curve).
 Πηγή: <https://www.mdpi.com/2075-5309/12/3/371>

Το σχεδιάγραμμα της Καμπύλης Πάπιας, ουσιαστικά, απεικονίζει την ανισορροπία μεταξύ της ζήτησης αιχμής και της παραγωγής ηλιακής ενέργειας, που μπορεί να δημιουργήσει πιθανή υπερπαραγωγή και περικοπή. Κάθε καμπύλη αντιστοιχεί στην καθαρή ποσότητα ισχύος που υφίσταται στο δίκτυο μείον την αιολική και την φωτοβολταϊκή παραγωγή. Η θετική κυρτότητα, που εμφανίζεται τις πρωινές και μεσημεριανές ώρες, αντιπροσωπεύει τη περίοδο με το μικρότερο δικτυακό φορτίο. Ωστόσο, τις ίδιες ώρες η παραγωγή φωτοβολταϊκής ενέργειας είναι η μέγιστη. Αυτό, σε συνδυασμό με την απότομη αύξηση της ζήτησης στο τέλος της ημέρας, δημιουργεί δύο σημαντικά προβλήματα. Αρχικά, για να αντισταθμιστεί το κενό, οι συμβατικές μονάδες παραγωγής ενέργειας, εταιρίες κοινής ωφέλειας, αυξάνουν την παραγωγή με τον κίνδυνο υπερφόρτωσης του δικτύου. Επιπρόσθετα, οι συμβατικές μονάδες έχουν αργή εκκίνηση και καθίστανται οικονομικά βιώσιμες όταν λειτουργούν συνεχώς. Επομένως, η απενεργοποίησή τους το πρωί και το μεσημέρι δεν είναι εφικτή, με αποτέλεσμα να λειτουργούν στα ελάχιστα επίπεδα τις αντίστοιχες ώρες^{144 148 149}. Τέλος, η καμπύλη γίνεται πιο έντονη κάθε χρόνο, καθώς ενσωματώνονται όλο και περισσότερες φωτοβολταϊκές μονάδες στο δίκτυο¹⁴⁸.

¹⁴⁸ Omri Wallach and Bruno Venditti. ENERGY SHIFTThe Solar Power Duck Curve Explained, <https://elements.visualcapitalist.com/the-solar-power-duck-curve-explained/>

¹⁴⁹ Λούρου Αντωνίου, Το φαινόμενο του σχήματος της πάπιας (Duck chart, Duck curve) στην Ελλάδα για τα έτη 2015 και 2016 (pages 53 - 56), <https://ikee.lib.auth.gr/record/288307/files/GRI-2017-18856.pdf>



Εικόνα 51: Ο Όρος «Καμπύλη Πάπιας» Δημιουργήθηκε καθώς το Γράφημα Μοιάζει με Καθιστή Πάπια.
 Πηγή: <https://samueli.ucla.edu/ucla-expert-warns-impact-of-extreme-heat-wave-on-californias-energy-grid/>

2.6.4.3. Αποθήκευση Ενέργειας με Υδρογόνο

Καθώς η ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό σύστημα αυξάνεται ραγδαία, αυξάνεται και η ανάγκη επίλυσης του προβλήματος της υπερπαραγωγής και περικοπής. Μια από τις πιο πολλά υποσχόμενες λύσεις για την αντιμετώπιση των παραπάνω, αποτελεί η εισαγωγή και αξιοποίηση τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας¹⁴⁷. Ουσιαστικά, με την χρήση συστημάτων αποθήκευσης δίνεται η δυνατότητα να αποθηκεύεται η περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται κατά τις ώρες αιχμής, αξιοποιώντας την όταν η παραγωγή μειώνεται και η δικτυακή ζήτηση αυξάνεται

Οι μπαταρίες κυριαρχούν στην αγορά ως μέσω αποθήκευσης, καθώς αποτελούν αποδεδειγμένη τεχνολογία που αξιοποιείται χρόνια σε πληθώρα διαφορετικών εφαρμογών. Παρουσιάζουν ποικιλομορφία ενώ είναι εύκολα διαθέσιμες. Παρέχουν την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας για μερικά λεπτά έως μερικές ημέρες στην περιοχή των 10 MW. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες μπαταρίες δεν διαθέτουν την χωρητικότητα και την ικανότητα απόδοσης που απαιτείται για την αξιοποίησή τους σε μονάδες ανανεώσιμων πηγών. Επιπλέον, η αύξηση ζήτησης μπαταριών για την κάλυψη των αναγκών στην αναδυόμενη αγορά των ηλεκτροκίνητων αυτοκινήτων, δημιουργεί τον κίνδυνο εξάλειψης των παγκόσμιων αποθεμάτων λιθίου (Li)^{142 146}. Εκτός από τις μπαταρίες, υφίστανται αρκετές ακόμα πιθανές τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας, όπως η αποθήκευση σε κινητική ενέργεια, θερμική ενέργεια, με πεπιεσμένο αέρα και άλλα¹⁴².

Το υδρογόνο, χάρη στην υψηλή ενεργειακή του πυκνότητα και την ευελιξία στην παραγωγή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσω αποθήκευσης ενέργειας. Στην περίπτωση των ανανεώσιμων πηγών, το υδρογόνο δύναται να προσφέρει αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας για μεγάλα χρονικά διαστήματα, με σκοπό την ισοστάθμιση της ζήτησης στις ώρες αιχμής αλλά και την εξισορρόπηση στην απόδοση από την εποχιακή αστάθεια. Πλέον, υφίστανται αρκετές μέθοδοι αποθήκευσης υδρογόνου που βελτιώνονται συνεχώς, ενώ μπορεί να αποθηκευτεί ως συμπιεσμένο αέριο ή σε υγροποιημένη κατάσταση. Παράλληλα, σε περιοχές που το επιτρέπει η γεωμορφολογία, δύναται να αποθηκευτεί σε φυσικούς γεωλογικούς σχηματισμούς, όπως φυσικά σπήλαια άλατος^{142 146 147}.

Το απαιτούμενο υδρογόνο μπορεί να παραχθεί στις ίδιες τις μονάδες, με την διαδικασία της ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιώντας την περίσσεια της ανανεώσιμης ενέργειας κατά τις ώρες αιχμής. Έτσι, η περίσσεια ενέργεια αξιοποιείται, ενώ δεν επιβαρύνεται το περιβάλλον. Στην συνέχεια, αποθηκεύεται όταν απαιτηθεί και αξιοποιείται σε σταθερές κυψέλες καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καλύπτοντας την ζήτηση στο δίκτυο^{142 146}. Επομένως, η αξιοποίηση εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών για την παραγωγή, αποθήκευση και αξιοποίηση υδρογόνου, δύναται να δημιουργήσει ένα αποκεντρωμένο κόμβο που παράγει, αξιοποιεί και εφοδιάζει υδρογόνο καλύπτοντας τις ανάγκες του τοπικού δικτύου και μειώνοντας την ανάγκη παροχής υδρογόνου από κεντρικές μονάδες παραγωγής¹⁴².

2.6.5. Συμπεράσματα

Η διαθεσιμότητα πολλαπλών μεθόδων παραγωγής και η ευελιξία αποθήκευσης του υδρογόνου, σε συνδυασμό με την ποικιλομορφία της συνεχώς εξελισσόμενης τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου, το καθιστούν ελκυστική επιλογή για χρήση στον ενεργειακό τομέα. Δύναται να αποτελέσει το μέσο για την ενεργειακή ανεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα χάρη στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα των τεχνολογιών που το αξιοποιούν αλλά και των μεθόδων παραγωγής του.

Η συνεχής αναζήτηση βιώσιμων ενεργειακά λύσεων επιτρέπει την εισαγωγή των κυψελών καυσίμου στον ενεργειακό τομέα. Η ποικιλομορφία σε κυψέλες με διακριτά χαρακτηριστικά, επιτρέπει την αξιοποίησή τους σε πληθώρα ενεργειακών εφαρμογών. Χρησιμοποιούνται ως φορητές μονάδες παραγωγής ενέργειας αλλά και ως συστήματα εφεδρικής ενέργειας. Σημαντικό πλεονέκτημά τους αποτελεί η ικανότητα ανεξάρτητης λειτουργίας στο δίκτυο, καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν ως αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής ενέργειας. Η παραπάνω χρήση, τους προσδίδει σημαντική δυναμική ως τεχνολογία, αφού οι αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής, δύναται να αποτελέσουν σημαντικό στοιχείο της ενεργειακής μετάβασης. Ωστόσο, εξακολουθούν να υφίστανται προκλήσεις για την ευρεία υιοθέτηση και χρήση τους, όπως το κόστος και η απουσία ανεπτυγμένου δικτύου υδρογόνου.

ο υδρογόνο, χάρη στην υψηλή ενεργειακή του πυκνότητα και την ευελιξία στην παραγωγή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας, στηρίζοντας την ραγδαία αυξανόμενη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό σύστημα. Η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών για την παραγωγή βιώσιμου υδρογόνου και η χρήση του για την αποθήκευση της περίσσειας ενέργειας, το καθιστούν κατάλληλη λύση για την επίλυση του ζητήματος της υπερπαραγωγής και περικοπής. Τέλος, η ανάπτυξη εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών με την δυνατότητα τοπικής παραγωγής, αποθήκευσης και αξιοποίησης υδρογόνου, μπορεί να δημιουργήσει ένα αποκεντρωμένο κόμβο υδρογόνου καλύπτοντας, βιώσιμα, τις ανάγκες του τοπικού δικτύου.

3. ΕΛΛΑΔΑ

3.1. Εισαγωγή

Οι αυξημένες ενεργειακές ανάγκες, το ζήτημα της κλιματικής αλλαγής και η αστάθεια στην αγορά ορυκτών καυσίμων απαιτούν την ανάπτυξη και εισαγωγή νέων, εναλλακτικών και καινοτόμων τεχνολογιών καθαρής ενέργειας. Ανάμεσα σε όλες τις πιθανές επιλογές, το υδρογόνο και οι τεχνολογίες του παρουσιάζουν όλο και μεγαλύτερο πολιτικό και επιχειρηματικό ενδιαφέρον. Το βιώσιμο υδρογόνο δύναται να αποτελέσει πιθανή λύση για τα περισσότερα ζητήματα, συνεισφέροντας σημαντικά στην παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση. Ακόμα, η ανάπτυξη μιας ισχυρής υδροοικονομίας μπορεί να στηρίξει την εξάπλωση και ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών, επιλύοντας το σημαντικό πρόβλημα της αποθήκευσης ενέργειας.

Η ανάπτυξη μιας βιώσιμης υδροοικονομίας είναι ιδιαίτερα επωφελής σε χώρες όπως η Ελλάδα, δηλαδή χώρες με σημαντική δυνατότητα παραγωγής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές. Παράλληλα, η Ελλάδα αποτελεί κομβικό σημείο για την ενεργειακή αγορά των Βαλκανίων αλλά και της Νοτιοανατολικής Ευρώπης. Συνεπώς, με την ανάπτυξη υποστηρικτικών δομών για το υδρογόνο, η χώρα μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στην υδροοικονομία της ευρύτερης περιοχής. Ακόμα, αποτελεί μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, συνεπώς, η περιβαλλοντική και ενεργειακή πολιτική της συμβαδίζει με την ευρωπαϊκή. Παρόλα αυτά, η ελληνική νομοθεσία δεν έχει αναπτύξει, ακόμα, τα απαραίτητα πλαίσια, κανόνες και πολιτικές για την στήριξη και ανάπτυξη της εγχώριας υδροοικονομίας¹⁵⁰.

3.2. Ελληνικός Ενεργειακός Τομέας και Υδρογόνο

3.2.1. Εισαγωγή

Ο ενεργειακός τομέας αποτελεί καίριο κομμάτι της οικονομικής ανάπτυξης μιας χώρας. Η ομαλή λειτουργία του σχετίζεται άμεσα με την βιομηχανία, την ποιότητα ζωής αλλά και την παραγωγική ικανότητά της. Συνεισφέρει άμεσα στην προστιθέμενη αξία της οικονομίας αλλά και έμμεσα με την ευρύτερη επίδραση στους περισσότερους οικονομικούς τομείς της. Όσον αφορά τα ελληνικά δεδομένα, ο ενεργειακός τομέας συνεισφέρει σημαντικά στο Ακαθάριστο Εγχώριο Προϊόν (ΑΕΠ), 3.8% το 2017, μέσω της παραγωγής, διανομής και εμπορίας ενέργειας, καθώς και μέσω των επενδύσεων σε υποδομές ενέργειας¹⁵¹.

Το ελληνικό ενεργειακό σύστημα διαμορφώνεται τόσο από τις απαιτήσεις της εθνικής οικονομίας αλλά και τις εκάστοτε πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Συνεπώς, συμβαδίζοντας με την ευρύτερη ευρωπαϊκή προσέγγιση, η χώρα στοχεύει στην κλιματική ουδετερότητα. Παρόλο που ο ρόλος του υδρογόνου δεν έχει ακόμα διευκρινιστεί, ο ελληνικός ενεργειακός τομέας παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την ανάπτυξη και εξάπλωσή του^{151 152 153}.

¹⁵⁰ Κωστής Σταμπολής et al. Ο Ελληνικός Ενεργειακός Τομέας Ετήσια Έκθεση 2023 (pages 174 - 175), <https://www.iene.gr/page.asp?pid=5875&lng=1>

¹⁵¹ DIANEOSIS. Ο Τομέας Της Ενέργειας Στην Ελλάδα, <https://www.dianeosis.org/2021/04/i-energeia-stin-ellada/>

¹⁵² Κωστής Σταμπολής et al. Ο Ελληνικός Ενεργειακός Τομέας Ετήσια Έκθεση 2023 (pages 68 - 71), <https://www.iene.gr/page.asp?pid=5875&lng=1>

¹⁵³ VIA – Consultants. HYDROGEN IN GREECE The state of play, <https://vis-consultants.com/wp-content/uploads/H2-Greece.pdf>

3.2.2 Ενεργειακά Μεγέθη

Για την ποσοτικοποίηση και απεικόνιση ενεργειακών μεγεθών χρησιμοποιείται το ενεργειακό ισοζύγιο. Το ενεργειακό ισοζύγιο, ουσιαστικά, παρουσιάζει την ισορροπία μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας. Ακόμα, όταν εξετάζεται μόνο το υποσύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας, χρησιμοποιείται το ισοζύγιο ηλεκτροπαραγωγής¹⁵².

Εξίσου σημαντικοί όροι για την ανάλυση των ενεργειακών μεγεθών αποτελούν η συνολική Ακαθάριστη Διαθέσιμη Ενέργεια (Gross Available Energy), η Ακαθάριστη Εγχώρια Ενεργειακή Κατανάλωση (Gross Inland Energy Consumption) και η Τελική Ενεργειακή Κατανάλωση (Final Energy Consumption)¹⁵². Πιο αναλυτικά:

- **Η συνολική Ακαθάριστη Διαθέσιμη Ενέργεια:** Αποτελεί το σύνολο της ενέργειας που αξιοποιείται για όλες τις δραστηριότητες. Περιλαμβάνει και τα καύσιμα που αγοράζονται εντός της χώρας αλλά χρησιμοποιούνται αλλού, όπως τα καύσιμα για διεθνής πτήσης, ναυτιλιακά καύσιμα για διεθνής μετακινήσεις και άλλα¹⁵⁴.
- **Η Ακαθάριστη Εγχώρια Ενεργειακή Κατανάλωση:** Αποτελεί μέτρο της ενέργειας που παρέχεται για όλες τις εγχώριες δραστηριότητες. Εξαιρούνται τα ναυτιλιακά καύσιμα για διεθνής μετακινήσεις¹⁵⁵.
- **Τελική Ενεργειακή Κατανάλωση:** Αποτελεί την συνολική ενεργειακή κατανάλωση από τελικούς χρήστες, όπως βιομηχανίες, νοικοκυριά και άλλα. Δεν συνυπολογίζεται η ενέργεια που χρησιμοποιείται στον ενεργειακό τομέα¹⁵⁶.
- **Ακαθάριστη Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας:** Αναφέρεται στη συνολική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τον μετασχηματισμό άλλων μορφών ενέργειας. Καλύπτει την ακαθάριστη παραγωγή σε όλους τους τύπους σταθμών ηλεκτροπαραγωγής.

¹⁵⁴ Eurostat. Glossary:Gross available energy, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Gross_available_energy

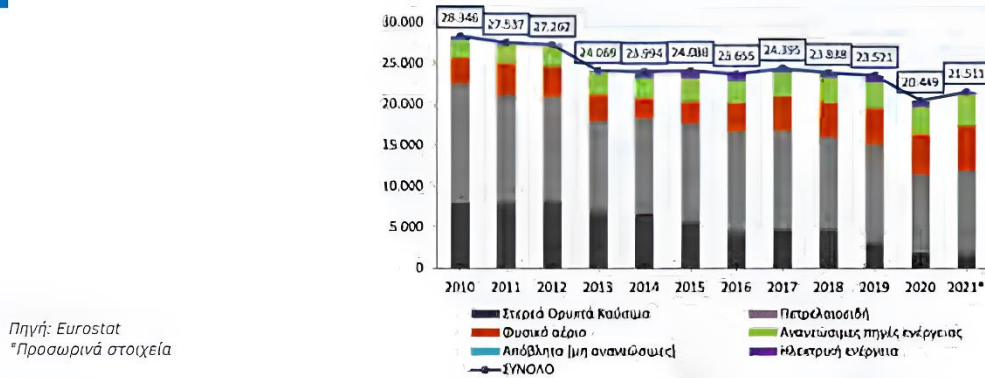
¹⁵⁵ Eurostat. Glossary:Final energy consumption, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Final_energy_consumption

¹⁵⁶ Eurostat. Glossary:Gross inland energy consumption, https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Gross_inland_energy_consumption

3.2.3. Ενεργειακός Τομέας στην Ελλάδα

Η ακαθάριστη εγχώρια ενεργειακή κατανάλωση παρουσιάζει μια ήπια ανοδική πορεία τα τελευταία χρόνια. Το 2021, η κατανάλωση διαμορφώθηκε στους 21.511 ktoe (χιλιάδες τόνους), παρουσιάζοντας μικρή αύξηση σε σχέση με το προηγούμενο έτος¹⁵².

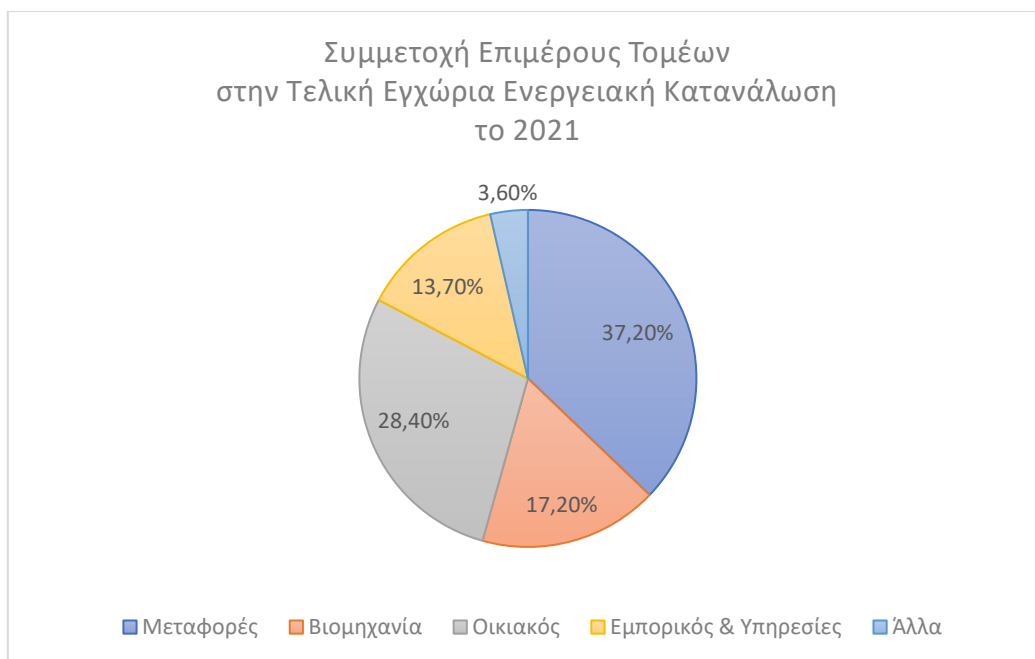
Διάγραμμα 29: Ακαθάριστη εγχώρια ενεργειακή κατανάλωση στην Ελλάδα (ktoe), 2010-2021



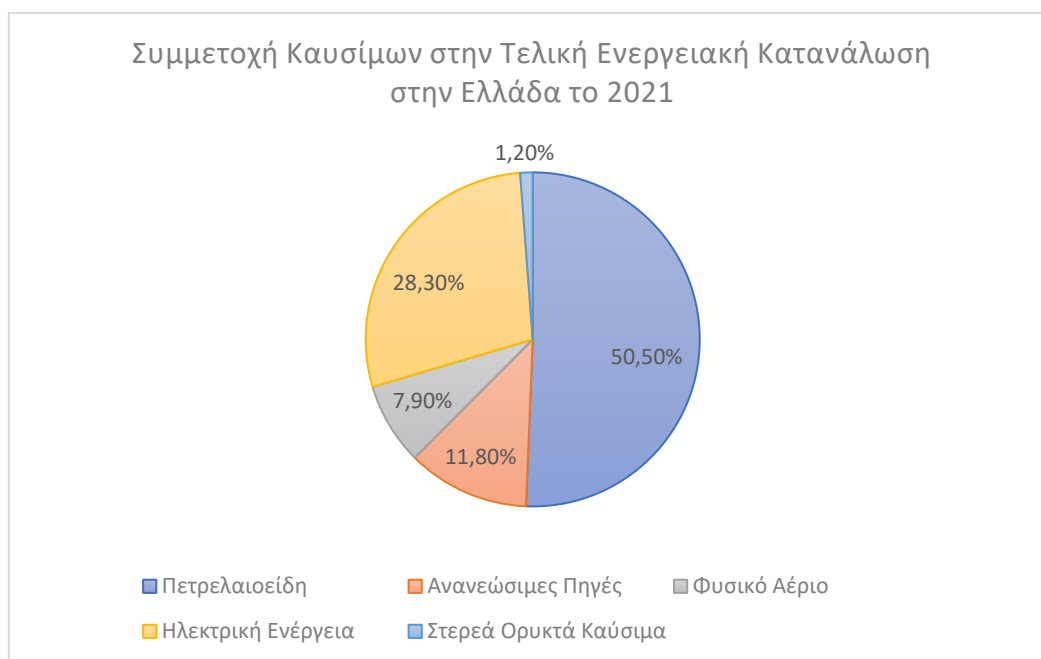
Εικόνα 52: Ακαθάριστη Εγχώρια Ενεργειακή Κατανάλωση ανά τα Έτη
Πηγή: <https://www.iene.gr/page.asp?pid=5875&lng=1>

Οι μεταφορές αποτελούν τον πιο ενεργοβόρο τομέα της χώρας, καταναλώνοντας το 37,2% της εγχώριας ενεργειακής παραγωγής το 2021. Συγκεκριμένα, το μεγαλύτερο ποσοστό καταναλώθηκε από τις οδικές μεταφορές, αγγίζοντας το 86,8%, ενώ το υπόλοιπο 13,2% διαμοιράστηκε στην ναυσιπλοΐα, στις σιδηροδρομικές μεταφορές και άλλα. Στην δεύτερη θέση κατατάσσεται ο οικιακός τομέας με μερίδιο της τάξης του 24,1%, ενώ σημαντική ήταν και η συμμετοχή του βιομηχανικού τομέα αγγίζοντας το 17,2% της ολικής κατανάλωσης¹⁵³
¹⁵².

Το μεγαλύτερο μερίδιο της εγχώριας ενεργειακής κατανάλωσης καλύπτεται με την χρήση πετρελαιοειδών προϊόντων. Συγκεκριμένα, το 2021, κάλυψαν το 50,5% των αναγκών των τομέων τελικής χρήσης. Στην συνέχεια ακολούθησαν η ηλεκτρική ενέργεια με μερίδιο 28,3%, η ανανεώσιμες πηγές με ποσοστό 11,8% και το φυσικό αέριο με 7,9%. Σημαντική παρουσιάζεται η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών στην ακαθάριστη ενεργειακή κατανάλωση, φτάνοντας σχεδόν το ένα πέμπτο. Γενικότερα, η διεύθυνσή τους στο ενεργειακό μείγμα σημειώνει αισθητή αύξηση την τελευταία δεκαετία, αντισταθμίζοντας την μειωμένη χρήση πετρελαιοειδών και ορυκτών καυσίμων. Ωστόσο, καθώς η εγχώρια παραγωγή πετρελαίου είναι ανεπαρκής και του φυσικού αερίου μηδενική, είναι αναγκαία η εισαγωγή καυσίμων για την κάλυψη των αναγκών^{152 153}.



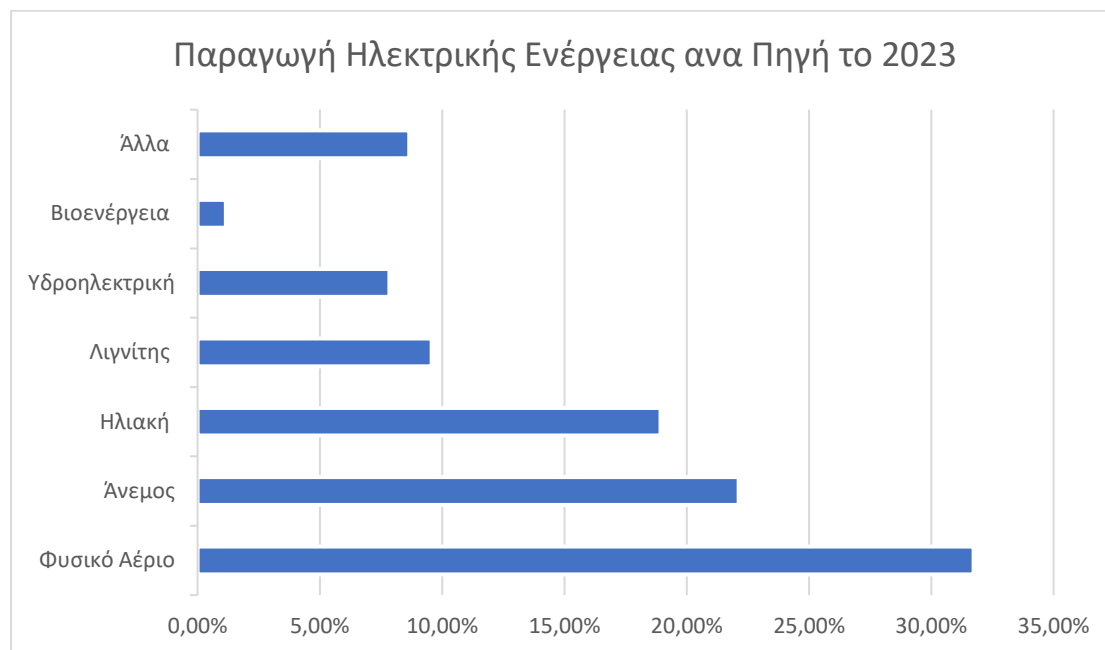
Εικόνα 53: Συμμετοχή Επιμέρους Τομέων στην Τελική Εγχώρια Ενεργειακή Κατανάλωση.
Πηγή: <https://www.iene.gr/page.asp?pid=5875&lng=1>



Εικόνα 54: Συμμετοχή Καυσίμων στην Τελική Ενεργειακή Κατανάλωση στην Ελλάδα το 2021.
Πηγή: <https://www.iene.gr/page.asp?pid=5875&lng=1>

Σε ό,τι αφορά την ακαθάριστη εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών παρουσιάζει σημαντική αύξηση. Το 2019, η συνεισφορά τους ανερχόταν περίπου στο 30%, ενώ το 2023 αυξήθηκε φτάνοντας σχεδόν το 50%. Αντίστοιχα, το φυσικό αέριο, τα πετρελαιοειδή και τα ορυκτά καύσιμα παρουσιάζουν πτωτική πορεία. Το 2023 το φυσικό αέριο κατείχε την δεύτερη θέση μετά τις ανανεώσιμες πηγές με ποσοστό 31,7%, σημαντικά μειωμένο σε σχέση με το 2019 που ανερχόταν στο 42,4%. Παρόλα αυτά, η

εγχώρια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας δεν επαρκεί για να καλύψει τις ενεργειακές ανάγκες ^{153 157}.

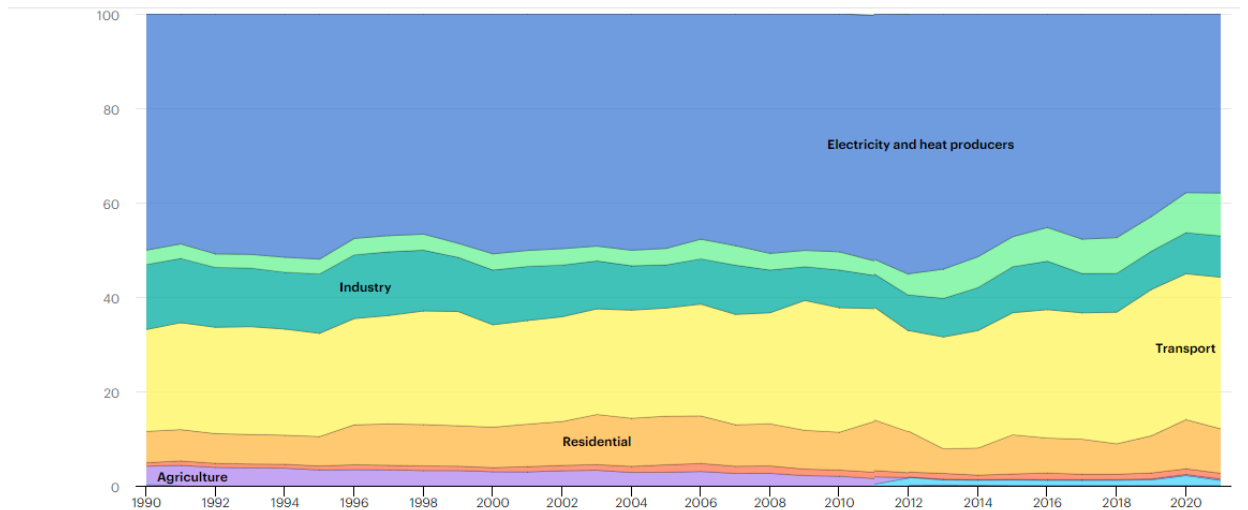


Εικόνα 55: Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας ανά Πηγή το 2023.

Πηγή: <https://www.statista.com/statistics/1235419/greece-distribution-of-electricity-production-by-source/>

Ο τομέας της ηλεκτροπαραγωγής και θέρμανσης αποτελεί τον τομέα με τις περισσότερες εκπομπές αερίων ρύπων. Αντίστοιχα, τα πετρελαιοειδή αποτελούν τα καύσιμα που συμβάλουν σε μεγαλύτερο ποσοστό στην παραγωγή αερίων ρύπων, ενώ στην δεύτερη θέση ακολουθούν τα ορυκτά καύσιμα¹⁵³.

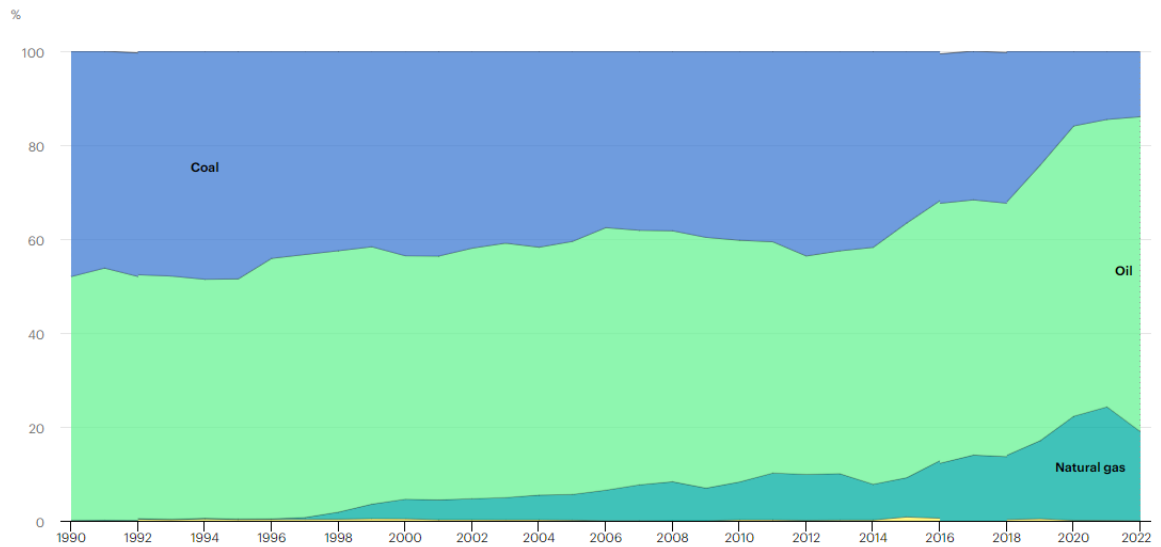
¹⁵⁷ Statista. Distribution of electricity generation in Greece in 2023, by source, <https://www.statista.com/statistics/1235419/greece-distribution-of-electricity-production-by-source/>



Lic

- Electricity and heat producers
- Other energy industries
- Industry
- Transport
- Residential
- Commercial and public services
- Agriculture
- Final consumption not elsewhere specified
- Fishing

Εικόνα 56: Συμμετοχή Επιμέρους Τομέα στην Παραγωγή CO₂.
 Πηγή: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=GRC&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySource>



Εικόνα 57: Συμμετοχή Επιμέρους Καυσίμου στην Παραγωγή CO₂.
 Πηγή: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=GRC&fuel=CO2%20emissions&indicator=CO2BySource>

3.2.4. Ευκαιρίες Εισαγωγής Υδρογόνου στο Ενεργειακό Σύστημα

Η Ελλάδα αποτελεί χώρα μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης, επομένως, συμμετάσχει ενεργά στο συλλογικό στόχο της βιώσιμης ενεργειακής μετάβασης. Όπως και σε άλλες ευρωπαϊκές οικονομίες, η εισαγωγή του υδρογόνου σε διάφορες πτυχές του εγχώριου ενεργειακού τομέα δύναται να συμβάλλει στην επίτευξη του παραπάνω στόχου¹⁵⁸.

Οι τομείς της ηλεκτροπαραγωγής και των μεταφορών αναδεικνύονται ως οι μεγαλύτεροι παραγωγοί ρύπων, ενώ η χρήση πετρελαιοειδών καλύπτει τις περισσότερες ενεργειακές ανάγκες. Ωστόσο, οι υφιστάμενες τεχνολογίες υδρογόνου, όπως οι κυψέλες καυσίμου, δύναται να εφαρμοστούν στους παραπάνω τομείς με την ανάπτυξη κατάλληλης υποδομής και πολιτικών στήριξης. Επομένως, λόγω των ενεργειακών χαρακτηριστικών της χώρας, η εισαγωγή υδρογόνου, σε διάφορες ενεργειακές πτυχές, έχει σημαντικές προοπτικές για τη μείωση των εκπομπών αλλά και την απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.

3.2.4.1. Ηλεκτροπαραγωγή

Η χώρα διαθέτει σημαντικό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, κυρίως ηλιακής και αιολικής, ενώ τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική αύξηση συμμετοχής τους στον ενεργειακό τομέα. Ωστόσο, οι πηγές αυτές παρουσιάζουν αστάθεια, αφού βασίζονται στην ένταση και την συχνότητα της ηλιοφάνειας και των ανέμων. Το ζήτημα αυτό δύναται να αντιμετωπιστεί με την χρήση υδρογόνου ως μέσω αποθήκευσης ενέργειας, βελτιώνοντας την ενεργειακή ασφάλεια και ενισχύοντας την ευελιξία του συστήματος. Παράλληλα, τα περισσότερα νησιά της χώρας δεν είναι διασυνδεδεμένα με το ηπειρωτικό ηλεκτρικό σύστημα, λειτουργώντας με αυτόνομα ενεργειακά συστήματα που αξιοποιούν κυρίως φυσικό αέριο. Επομένως, η αξιοποίηση εγκαταστάσεων ανανεώσιμων πηγών σε συνδυασμό με εγκαταστάσεις παραγωγής, αποθήκευσης και αξιοποίησης υδρογόνου, δύναται να δημιουργήσει ένα αποκεντρωμένο βιώσιμο σύστημα που καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες του τοπικού δικτύου¹⁴³.

Επιπρόσθετα, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται σημαντική μείωση της χρήσης λιγνίτη, ενώ δρομολογείται η σταδιακή κατάργηση όλων των λιγνιτικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας¹⁵³. Συνέπεια αυτού, είναι η αύξηση χρήσης ανανεώσιμων πηγών, φυσικού αερίου και πετρελαιοειδών. Ωστόσο, σε αντίθεση με το λιγνίτη, δεν υφίσταται επαρκής εγχώρια παραγωγή πετρελαιοειδών και φυσικού αερίου με αποτέλεσμα οι ανάγκες να καλύπτονται με εισαγωγές. Συνεπώς, η εγχώρια παραγωγή βιώσιμου υδρογόνου και η συμμετοχή του στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να βελτιώσει την ενεργειακή ασφάλεια της χώρας μειώνοντας ταυτόχρονα την εκπομπή ρύπων.

3.2.4.2. Θέρμανση

Η πλειοψηφία της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης του οικιακού τομέα οφείλεται στην θέρμανση χώρων, με το πετρέλαιο να αποτελεί το καύσιμο που αξιοποιείται παραπάνω, αγγίζοντας το 46,7%. Στην δεύτερη θέση ακολουθούν οι ανανεώσιμες πηγές με ποσοστό της τάξης του 29%, ενώ στην τρίτη θέση βρίσκεται το φυσικό αέριο με 16,9% (Ε. Ι. Sakellariou, et al., 2023). Η εισαγωγή του υδρογόνου στο παραπάνω τομέα μπορεί να επιτευχθεί, μεσοπρόθεσμα, με την ανάμειξή του με φυσικό αέριο και την μεταφορά μέσω των αγωγών που ήδη υφίστανται. Ωστόσο, καθώς το φυσικό αέριο συμμετέχει σε μικρότερο βαθμό σε σχέση με τα άλλα καύσιμα στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών, η ανάμειξή του με υδρογόνο πιθανόν να μην επιφέρει σημαντικές αλλαγές σχετικά με τις εκπομπές¹⁵³. Συνεπώς, για την αξιοποίηση του υδρογόνου στην θέρμανση απαιτούνται μακροπρόθεσμοι

¹⁵⁸ ΥΠΕΝ. Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, <https://ypen.gov.gr/energeia/esek/>

σχεδιασμοί με σκοπό την ανάπτυξη υποδομής αποθήκευσης και μεταφοράς αλλά και επενδύσεις για την αντικατάσταση των παλαιών συστημάτων θέρμανσης^{153 150}.

Ακόμα, στην βόρεια Ελλάδα υφίστανται ορισμένες εγκαταστάσεις θέρμανσης που αξιοποιούν λιγνίτη. Στις περιοχές αυτές, η κατά κεφαλήν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι σημαντικά αυξημένες σε σχέση με άλλες περιοχές της χώρας. Επομένως, η αντικατάσταση των λιγνιτικών μονάδων με νέες που αξιοποιούν υδρογόνο θα συντελούσε σημαντικά στην μείωση των εκπομπών¹⁵³.

3.2.4.3. Μεταφορές

Όσον αφορά τα ελληνικά δεδομένα, οι οδικές μεταφορές ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης του τομέα, αντιπροσωπεύοντας το 81,6% το 2018¹⁵⁹. Ακολουθούν οι εγχώριες θαλάσσιες και αεροπορικές μεταφορές, ενώ την τελευταία θέση κατέχουν οι σιδηροδρομικές μεταφορές, καθώς αντιστοιχούν μόλις στο 2% της τελικής κατανάλωσης. Επομένως, λόγω ποικίλων παραγόντων, όπως η γεωμορφολογία του εδάφους ή το υποανάπτυκτο σιδηροδρομικό δίκτυο, οι οδικές μεταφορές αποτελούν την κύρια μέθοδο μεταφοράς επιβατών και προϊόντων¹⁵³.

Η συντριπτική πλειοψηφία της τελικής ενεργειακής κατανάλωσης του τομέα καλύπτεται με την χρήση πετρελαιοειδών προϊόντων, συνεπώς, η εισαγωγή του υδρογόνου δύναται να συμβάλει σημαντικά στην ενεργειακή του μετάβαση. Γενικά, στις περισσότερες ευρωπαϊκές ενεργειακές στρατηγικές, ο τομέας των μεταφορών αποτελεί το πρώτο στάδιο υιοθέτησης και εισαγωγής του υδρογόνου, με τις κυψέλες καυσίμου να αποτελούν την πιο διαδεδομένη τεχνολογία που προτιμάται. Τα τελευταία χρόνια, οι κυψέλες χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε φορτηγά και επαγγελματικά οχήματα καθώς παρουσιάζουν σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι των αμιγώς ηλεκτροκίνητων οχημάτων με μπαταρία¹⁵³. Συνεπώς, η τεχνολογία των κυψελών μπορεί να αξιοποιηθεί στην εγχώρια μεταφορά επιβατών και εμπορευμάτων, συμβάλλοντας στην σταδιακή απανθρακοποίηση μιας αρκετά ενεργειακά απαιτητικής πτυχής της χώρας.

Σε αντίθεση με άλλες ευρωπαϊκές χώρες, το εγχώριο σιδηροδρομικό δίκτυο δεν είναι αρκετά ανεπτυγμένο, συνεπώς, η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο πιθανόν να μην επιφέρει αισθητά αποτελέσματα στις συνολικές εκπομπές. Από την άλλη, η εισαγωγή στην εγχώρια ναυσιπλοΐα αποτελεί πιο συνετή επιλογή, ωστόσο, τα τελευταία χρόνια προωθείται ταυτόχρονα και το υδροποιημένο φυσικό αέριο.

Όσον αφορά τα επιβατικά οχήματα ιδιωτικής χρήσης, υφίσταται η τάση της ηλεκτροκίνησης. Η τεχνολογία των οχημάτων κυψελών δεν έχει ωριμάσει για ιδιωτική χρήση, ενώ δεν υπάρχει το απαιτούμενο δίκτυο στήριξής τους. Ωστόσο, με την ανάπτυξη σύγχρονων υποδομών και την εισαγωγή ενδιάμεσων τεχνολογιών, όπως οχήματα κυψελών που υποστηρίζονται με μπαταρία, θέτονται τα θεμέλια για την ενεργειακή μετάβαση του τομέα¹⁵³.

¹⁵⁹ODYSSEE-MURE. Greece | Energy profile, March 2021, <https://www.odyssee-mure.eu/publications/efficiency-trends-policies-profiles/greece-country-profile-english.pdf>

3.2.4.4. Βιομηχανία

Το ανανεώσιμο υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην απανθρακοποίηση του βιομηχανικού τομέα, αφού μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο ως φορέας ενέργειας όσο και ως πρώτη ύλη σε μια ποικιλία βιομηχανικών διεργασιών. Γενικότερα, το γκρι υδρογόνο χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη για την σύνθεση αμμωνίας αλλά και ως καύσιμο ή αντιδρών στις βιομηχανίες χάλυβα και διύλισης πετρελαίου (Marius Neuwirth, 2022). Επομένως, η εισαγωγή μπλε ή πράσινου υδρογόνου στις παραπάνω εγκαταστάσεις είναι εφικτή στο άμεσο μέλλον καθώς υφίσταται η απαραίτητη τεχνογνωσία και ορισμένες υποδομές.

Οι ελληνικές εξαγωγές αμμωνίας, χάλυβα και προϊόντων πετρελαίου είναι ζωτικής σημασίας για την οικονομία της χώρας, παρά τις περιορισμένες παραγωγικές ικανότητες σε σύγκριση με άλλα κράτη μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης¹⁵³. Συγκεκριμένα, τα ελληνικά διυλιστήρια διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην ελληνική οικονομία, αντιπροσωπεύοντας σχεδόν το 34% των εσόδων από εξαγωγές το 2018¹⁶⁰. Ωστόσο, με την εφαρμογή των ευρωπαϊκών μέτρων τιμολόγησης των εκπομπών, απειλείται η ανταγωνιστικότητα των εγχώριων εγκαταστάσεων από εγκαταστάσεις εκτός Ένωσης. Επομένως, η χρήση υδρογόνου αντί φυσικού αερίου, ως πρώτη ύλη, θα μπορούσε να μειώσει τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και να τονώσει την οικονομία της χώρας καθιστώντας την πιο ανταγωνιστική.

¹⁶⁰ ΣΕΒΕ. ΙΣΤΟΡΙΚΟ ΠΕΚΟΡ ΕΞΑΓΩΓΩΝ ΤΟ 2018, <https://www.seve.gr/%CE%B9%CF%83%CF%84%CE%BF%CF%81%CE%B9%CE%BA%CF%8C-%CF%81%CE%B5%CE%BA%CF%8C%CF%81-%CE%B5%CE%BE%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CF%8E%CE%BD-%CF%84%CE%BF-2018/>

3.2.5. Συμπεράσματα

Η εισαγωγή βιώσιμου υδρογόνου και η ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης υδροοικονομίας δύναται να συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή μετάβαση της χώρας, συμβαδίζοντας με την ευρωπαϊκή ενεργειακή στρατηγική. Η Ελλάδα διαθέτει ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως η διαμόρφωση των ενεργειακών αναγκών των εκάστοτε πτυχών του ενεργειακού τομέα, η ένταση των αερίων ρύπων, το δυναμικό των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, η γεωγραφική της θέση και άλλα, που δημιουργούν σημαντικές ευκαιρίες για την επένδυση και ανάπτυξη του υδρογόνου.

Η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο, ή των τεχνολογιών του, παρουσιάζει προοπτικές για την μετάβαση των ενεργοβόρων πτυχών του ενεργειακού τομέα, όπως οι οδικές μεταφορές αλλά και η ναυσιπλοΐα. Παράλληλα, υφίστανται δυνατότητες αξιοποίησής στην εγχώρια βιομηχανία, συμβάλλοντας στην απανθρακοποίηση και ανταγωνιστικότητα του τομέα. Τέλος, η χρήση του ως μέσω αποθήκευσης ενέργειας μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις δυνατότητες των ανανεώσιμων πηγών, αυξάνοντας τη συμμετοχή τους στο ενεργειακό μείγμα.

Παρά τις πολυάριθμες προοπτικές και ευκαιρίες που παρουσιάζονται για την εισαγωγή του στον εγχώριο ενεργειακό τομέα, δεν υφίσταται ακόμα οι αναγκαίες υποδομές ούτε οι κατάλληλες πολιτικές στήριξης. Ωστόσο, στο μεσοπρόθεσμο διάστημα δύναται να αξιοποιηθεί η υπάρχουσα υποδομή φυσικού αερίου για μεταφορά και διανομή του. Βέβαια, καθώς οι ευρωπαϊκές στρατηγικές θέτουν του στόχους για τις επόμενες δεκαετίες, η ανάπτυξη αποκλειστικών αγωγών υδρογόνου ή η πλήρης μετατροπή των υφιστάμενων αγωγών αποτελεί μια πιο μακροπρόθεσμη προοπτική¹⁶¹.

¹⁶¹ Κωστής Σταμπολής et al. Ο Ελληνικός Ενεργειακός Τομέας Ετήσια Έκθεση 2023 (pages 181 - 182), <https://www.iene.gr/page.asp?pid=5875&lng=1>

3.3. Θεσμικό Πλαίσιο

Παρόλα τις πρωτοβουλίες των τελευταίων ετών για την ευθυγράμμιση των εθνικών περιβαλλοντικών στόχων με αυτούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης και την αναγνώριση του υδρογόνου ως πιθανό μέσο που θα συμβάλλει στην ενεργειακή μετάβαση της χώρας, δεν υφίστανται ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο, στρατηγικές, ποσοτικοί στόχοι και πολιτικές για την ανάπτυξη και αξιοποίησή του. Καθώς το υδρογόνο αναγνωρίζεται σε όλο και περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες, ενσωματώνοντας το στις εθνικές ενεργειακές στρατηγικές, γεννιέται η ανάγκη δημιουργίας εγχώριων στόχων και πολιτικών. Χωρίς σαφές πλαίσιο, ελλοχεύει ο κίνδυνος η χώρα να καθυστερήσει την υιοθέτηση του και πιθανόν την ενεργειακή της μετάβαση. Η δημιουργία πολιτικών και ολοκληρωμένου θεσμικού πλαισίου είναι αναγκαία για την ευθυγράμμιση με την ευρωπαϊκή τάση αξιοποίησης της δυναμικής του υδρογόνου και την ανάπτυξη εγχώριας υδροοικονομίας. Συνεπώς, παρόλο που τα τελευταία χρόνια παρατηρούνται κάποιες πρωτοβουλίες που τείνουν προς αυτή την κατεύθυνση, η χώρα στερείται ενός συνολικού πλαισίου για την ανάπτυξη και αξιοποίηση του υδρογόνου.

3.3.1. Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα

Το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα (ΕΣΕΚ) αποτελεί ένα στρατηγικό σχεδιασμό που σκιαγραφεί τα ενεργειακά και κλιματικά ζητήματα, παρουσιάζοντας έναν αναλυτικό οδικό χάρτη για την επίτευξη συγκεκριμένων μακροπρόθεσμων στόχων έως το έτος 2030. Το κείμενο αναλύει προτεραιότητες και παρουσιάζει μέτρα πολιτικής, καθιστώντας το σημείο αναφοράς για την επόμενη δεκαετία. Κυρώθηκε το 2019 με Απόφαση του Κυβερνητικού Συμβουλίου Οικονομικής Πολιτικής (ΦΕΚ Β' 4893) συμβαδίζοντας με τις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (EU Green Deal). Παράλληλα, αναπτύσσει μια μακροχρόνια στρατηγική επικυρώνοντας την συμμετοχή της χώρας στους συλλογικούς ευρωπαϊκούς στόχους για βιώσιμη μετάβαση σε μια κλιματικά ουδέτερη οικονομία έως το 2050^{153 162}.

Παρότι θέτονται φιλόδοξοι στόχοι όσον αφορά την μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και το μερίδιο συμμετοχής των ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό μείγμα, ξεπερνώντας και τους στόχους της Ένωσης, δεν περιλαμβάνονται στρατηγικές και σχέδια για την ανάπτυξη και υιοθέτηση του υδρογόνου. Ωστόσο, αναγνωρίζεται ως μελλοντική λύση για την επίτευξη των εγχώριων ενεργειακών και κλιματικών στόχων^{153 163}.

Πιο αναλυτικά, στο κείμενο επισημαίνεται πως προκειμένου να επιτευχθούν υψηλά επίπεδα διεύθυνσης ανανεώσιμων πηγών στο σύστημα, είναι αναγκαία η αποθήκευση ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, γίνεται εκτενείς αναφορά στις δυνατότητες του υδρογόνου σε συνδυασμό με τις ανανεώσιμες πηγές, σημειώνοντας ότι μέσω πιλοτικών εφαρμογών θα προωθηθεί η ανάπτυξη έργων για την παραγωγή του από αυτές. Παράλληλα, εκφράζεται η αναγκαιότητα ανάπτυξης κατάλληλου νομοθετικού πλαισίου και μηχανισμών στήριξης ώστε διαφορετικοί φορείς ενέργειας, όπως το υδρογόνο, να συμβάλλουν στην βιώσιμη και οικονομικά βέλτιστη λειτουργία του συστήματος.

¹⁶² ΥΠΕΝ. Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, <https://ypen.gov.gr/energeia/esek/>

¹⁶³ ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ. Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, <https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2020/11/%CE%A6%CE%95%CE%9A-%CE%92-4893.2019.pdf>

Ωστόσο, εκτιμάται πως η δυνατότητες αποθήκευσης ενέργειας με την χρήση υδρογόνου, σε μεγάλη κλίμακα, θα παραμείνουν χαμηλές έως και το 2030¹⁶⁴.

Όσον αφορά τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, εκφράζεται ενδιαφέρον για τις εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας με μετατροπή σε αέριο, όπως το υδρογόνο, διευρύνοντας την σύζευξη των δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας και αερίου. Επισημαίνεται ότι το παραγόμενο αέριο υδρογόνο δύναται να διοχετεύεται στο υφιστάμενο δίκτυο φυσικού αερίου και να χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Ακόμα, υπολογίζεται πως μέχρι το 2030 αναμένεται η λειτουργία των πρώτων συστημάτων ηλεκτρόλυσης, επιτρέποντας την σύνδεση του τομέα ηλεκτροπαραγωγής με τον τομέα παραγωγής υδρογόνου¹⁶⁴.

Υπογραμμίζεται πως υφίσταται η ανάγκη ενίσχυσης της έρευνας για τις περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμες λύσεις στο ενεργειακό τομέα, με το υδρογόνο να κατέχει σημαντική δυναμική. Συγκεκριμένα, τονίζεται πως η συμμετοχή του επιστημονικού δυναμικού της χώρας σε προγράμματα που προωθούν το υδρογόνο ως καύσιμο στην ναυτιλία, είναι ιδιαίτερης σημασίας. Ωστόσο, ξεκαθαρίζεται πως η εφαρμογή του υδρογόνου δεν είναι ελκυστική σε ποντοπόρα πλοία καθώς μειώνει σημαντικά την ωφέλιμη μεταφορική ικανότητά τους, ενώ αποτελεί πολύπλοκη και ακριβή επένδυση¹⁶⁴.

Επιπρόσθετα, το κείμενο στηρίζει τις πρωτοβουλίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης για την εισαγωγή εγγυήσεων προέλευσης για το βιοαέριο, το υδρογόνο αλλά και για διάφορες πηγές ενέργειας, καθώς θεωρείται πως η πιστοποίηση δύναται να συμβάλλει στην αύξηση της διεύθυνσης των ανανεώσιμων πηγών στην τελική κατανάλωση¹⁶⁴.

Τέλος, το κείμενο δεν κατέχει νομικό χαρακτήρα, ωστόσο, σκιαγραφεί τον ρόλο που πιθανόν να διαδραματίσει το υδρογόνο στον εγχώριο ενεργειακό τομέα, ενώ προοικονομεί την άμεση σχέση και την παράλληλη λειτουργία του με τις ανανεώσιμες πηγές. Με την αναγνώριση του ως εν δυνάμει λύση για την ενεργειακή μετάβαση, θέτονται οι βάσεις για την ανάπτυξη της εγχώριας υδροοικονομίας. Παράλληλα, η ενεργειακή μετάβαση αποτελεί και πολιτιστικό μετασχηματισμό, συνεπώς, οι αναφορές στο υδρογόνο, πιθανόν, να συνεισφέρουν στην αποδοχή του από την κοινή άποψη. Επομένως, παρόλο που το Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα δεν αποτελεί νομικό κείμενο, ούτε περιγράφει συγκεκριμένες στρατηγικές και ποσοτικούς στόχους, η αναγνώριση των δυνατοτήτων του υδρογόνου αποτελεί σημαντική εξέλιξη για την ευρύτερη εισαγωγή και ανάπτυξή του στο εγχώριο ενεργειακό σύστημα.

3.3.2. Εθνική Στρατηγική Για το Υδρογόνο

Η Ελλάδα αντιμετωπίζει σήμερα ένα αξιοσημείωτο κενό όσον αφορά τη δημιουργία ολοκληρωμένου θεσμικού πλαισίου για την παραγωγή, την ανάπτυξη και τη χρήση υδρογόνου. Παρά το πρόσφατο ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συμπεριλαμβανομένου του υδρογόνου, η χώρα δεν έχει ακόμη αξιοποιήσει πλήρως αυτό το δυναμικό λόγω απουσίας ισχυρής ρυθμιστικής και λειτουργικής δομής. Ωστόσο, τα τελευταία χρόνια, υπήρξαν κάποιες πρωτοβουλίες και ενέργειες με στόχο την ανάδειξη του υδρογόνου στο εγχώριο ενεργειακό μείγμα.

Μία από τις σημαντικότερες πρωτοβουλίες αποτελεί η σύσταση ειδικής Επιτροπής με σκοπό την δημιουργία και επίβλεψη της Εθνικής Στρατηγικής για το υδρογόνο. Το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας ανακοίνωσε την παραπάνω ενέργεια το Δεκέμβριο

¹⁶⁴ Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα, https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/el_final_necp_main_el_0.pdf

του 2020, απαντώντας στις απαιτήσεις της Ευρωπαϊκής Στρατηγικής για το Υδρογόνο που εκδόθηκε την ίδια χρονιά και στοχεύοντας, παράλληλα, στην κάλυψη των προτεραιοτήτων της εθνικής κλιματικής και ενεργειακής στρατηγικής για την ανάπτυξη καθαρών πηγών και τεχνολογιών ενέργειας. Ουσιαστικά, η σύσταση της Επιτροπής στοχεύει στην χάραξη οδικού χάρτη με σκοπό την ανάπτυξη και χρήση τεχνολογιών υδρογόνου και άλλων αερίων από ανανεώσιμες πηγές, στην παροχή τεχνοοικονομικών στοιχείων για το κόστος ανάπτυξης και λειτουργίας στους εγχώριους τομείς ενδιαφέροντος αλλά και στην πρόταση μέτρων πολιτικής για κάθε τομέα τελικής χρήσης. Πιο αναλυτικά, έχει ανατεθεί στην Επιτροπή¹⁶⁵:

- Η καταγραφή του εγχώριου δυναμικού για την ανάπτυξη εφαρμογών και τεχνολογιών υδρογόνου σε διάφορες ενεργειακές πτυχές.
- Η αξιολόγηση των ρίσκων αλλά και της οικονομικής βιωσιμότητας της παραγωγής και χρήσης υδρογόνου, εστιάζοντας στο ρόλο των υποδομών μεταφοράς, των υποδομών αποθήκευσης αλλά και του υφιστάμενου δικτύου φυσικού αερίου.
- Η συγκριτική αξιολόγηση ξένων στρατηγικών και η εξέταση συμβατότητάς τους με τα εγχώρια δεδομένα.
- Η πρόταση μέτρων και πολιτικών για την διαμόρφωση του αδειοδοτικού και ρυθμιστικού πλαισίου αλλά και την προώθηση των προτεινόμενων τεχνολογιών και εφαρμογών.
- Η αξιολόγηση της συμβατότητας των προτεινόμενων εθνικών μέτρων και πολιτικών με τις Ευρωπαϊκές Στρατηγικές, διευρύνοντας την δυνατότητα αξιοποίησης ευρωπαϊκών χρηματοδοτήσεων.

Σύμφωνα με το Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος, η Εθνική Στρατηγική θα είχε ολοκληρωθεί έως και το Σεπτέμβριο του 2021, ωστόσο, δεν έχει παραδοθεί ακόμα με την ολοκλήρωσή της να αναμένεται εντός του 2024¹⁶⁶.

3.3.3. Ανάπτυξη Εγχώριου Θεσμικού Πλαισίου

Για την ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης εγχώριας υδροοικονομίας πρέπει να δοθεί προτεραιότητα σε ορισμένους κρίσιμους τομείς. Η χάραξη στρατηγικών, η διαμόρφωση κατάλληλης πολιτικής, η ανάπτυξη υποδομών και η άμεση συμμετοχή του κοινού δύναται να συμβάλλουν σημαντικά στην δημιουργία ενός ολοκληρωμένου θεσμικού πλαισίου, επιτρέποντας την βιώσιμη ενεργειακή μετάβαση της χώρας και ξεκλειδώνοντας σημαντικά οικονομικά, περιβαλλοντικά και κοινωνικά οφέλη.

Αρχικά, η ανάπτυξη και διαμόρφωση ενός Εθνικού Σχεδίου Στρατηγικής που θα περιγράφει σαφείς στόχους, ρυθμιστικά πλαίσια και πιθανά κίνητρα είναι επιτακτικής ανάγκης. Η εισαγωγή του θα προσφέρει την απαραίτητη σαφήνεια και βεβαιότητα, προσελκύνοντας επενδύσεις και τον προγραμματισμό μακροχρόνιων έργων. Παράλληλα, η απουσία αποκλειστικών μηχανισμών και εργαλείων χρηματοδότησης σε εθνικό επίπεδο, δύναται να αποτρέψει πιθανούς ενδιαφερόμενους επενδυτές. Επομένως, η Εθνική Στρατηγική θα πρέπει να προβλέπει ισχυρούς μηχανισμούς χρηματοδότησης, προσαρμοσμένων στα

¹⁶⁵ ΥΠΕΝ. Σύσταση Επιτροπής για τη χάραξη Εθνικής Στρατηγικής για το υδρογόνο, <https://ypen.gov.gr/systasi-epitropis-gia-ti-charaxi-ethnikis-stratigikis-gia-to-ydrogono/>

¹⁶⁶ Ιωάννα Κωσταδήμα. Ζητούνται κίνητρα για επενδύσεις και ρύθμιση της αγοράς υδρογόνου, <https://www.powergame.gr/green-power/542337/zitountai-kinitra-gia-ependyseis-kai-rythmisi-tis-agoras-ydrogonou/>

εγχώρια δεδομένα, ώστε να αποφευχθεί το κλείδωμα της ενεργειακής αγοράς από άλλες εδραιωμένες τεχνολογίες^{153 167}.

Κάθε χώρα παρουσιάζει διαφορετικά δεδομένα, όπως το μέγεθος, την ωριμότητα του ενεργειακού τομέα, το τρέχον επίπεδο οικονομικής ανταγωνιστικότητας, την διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό μείγμα και άλλα. Επομένως, η Εθνική Στρατηγική αλλά και οι υπεύθυνοι χάραξης των πολιτικών πρέπει να εξετάζουν προσεκτικά τα βασικά κριτήρια κάθε οικονομικής πτυχής που μπορεί να εισαχθεί το υδρογόνο. Καθώς η Ελλάδα αποτελεί μια χώρα με σημαντικό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών, οι προτεινόμενες πολιτικές θα μπορούσαν να επικεντρωθούν στην προώθηση της ηλεκτρόλυσης ώστε να αυξηθεί η ανταγωνιστικότητα του ανανεώσιμου υδρογόνου.

Η ανάπτυξη της εγχώριας υδροοικονομίας πιθανόν να διευκολυνθεί με την εισαγωγή ενός ισχυρού θεσμικού πλαισίου προσαρμοσμένο στην μεσοπρόθεσμη αξιοποίηση του υφιστάμενου δικτύου μεταφοράς φυσικού αερίου, όπως στην περίπτωση της Γερμανίας. Η αξιοποίηση των υποδομών μεταφοράς φυσικού αερίου δύναται να αποτελέσουν μεσοπρόθεσμη λύση μέχρι την δημιουργία των απαραίτητων δομών υδρογόνου. Πιο αναλυτικά, μεταβατικές διατάξεις που αποσκοπούν στην διευκόλυνση μετατροπής των υφιστάμενων υποδομών δύναται να συμβάλουν στην οικονομική βιωσιμότητα της προσπάθειας, καθώς στην χώρα εντοπίζεται ανεπτυγμένο δίκτυο φυσικού αερίου και η απαραίτητη τεχνολογία.

Το θεσμικό πλαίσιο θα πρέπει να περιγράφει με σαφήνεια τους ρόλους και ευθύνες των εμπλεκόμενων, διασφαλίζοντας τη διαφάνεια και επιτρέποντας την εύκολη χρήση και αξιοποίηση των υποδομών μεταφοράς. Επομένως, είναι απαραίτητο οι πολιτικές για την ανάπτυξη του υδρογόνου να προβλέπουν την ομαλή ενσωμάτωσή τους στην ευρύτερη υπάρχουσα ενεργειακή νομοθεσία, λαμβάνοντας υπόψιν την κατάσταση στο εγχώριο ενεργειακό τομέα^{153 167}.

Η δημιουργία σαφών ορισμών όπου θα υπάγονται το υδρογόνο και οι εγκαταστάσεις παραγωγής, εκμετάλλευσης αλλά και αποθήκευσης, δύναται να αποτελέσουν θετικό αντίκτυπο στην εκκίνηση της εγχώριας αγοράς. Ακολουθώντας το παράδειγμα της Γερμανίας και της Νότιας Κορέας, η ύπαρξη αυστηρών ορισμών πιθανόν να αποδώσει σαφήνεια και βεβαιότητα για το μεσοπρόθεσμο, αλλά και μακροπρόθεσμο, μέλλον της εγχώριας υδροοικονομίας, προσελκύοντας επενδυτές. Επιπρόσθετα, ακολουθώντας την πρωτοτυπία της Νότιας Κορέας, δηλαδή την κατηγοριοποίηση του υδρογόνου και των κυψελών καυσίμου ως «νέες και ανανεώσιμες πηγές», πιθανόν να ενισχυθεί η πολιτιστική πτυχή του ενεργειακού μετασχηματισμού, δηλαδή η αποδοχή από την κοινή άποψη.

Επιπλέον, μελετώντας περαιτέρω τις πρωτοβουλίες της Νότιας Κορέας, δύναται να εντοπιστούν αρκετές πολιτικές και μέτρα που μπορούν να συμβάλλουν στην ανάπτυξη της εγχώριας υδροοικονομίας. Αυτές περιλαμβάνουν τη θέσπιση ειδικής νομοθεσίας που θα προωθεί την οικονομία υδρογόνου, συμπεριλαμβανομένης της χορήγησης αδειών και της χρηματοδότησης μέσω επιδοτήσεων και δανείων. Επίσης, η δημιουργία μιας ειδικής επιτροπής για την οικονομία υδρογόνου θα ενισχύσει τον συντονισμό δράσεων και πρωτοβουλιών σε αυτόν τον τομέα, κάτι που ήδη έχει αρχίσει να υλοποιείται σύμφωνα με

¹⁶⁷ IRENA. GREEN HYDROGEN A GUIDE TO POLICY MAKING, https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf

τους βασικούς στόχους της Εθνικής Στρατηγικής για το Υδρογόνο. Παράλληλα, θα πρέπει να προσδιοριστούν οι κατάλληλοι οργανισμοί και υπουργεία με ειδικές αρμοδιότητες για την αποτελεσματική ρύθμιση και εποπτεία του τομέα.

Οι νέες καινοτόμες τεχνολογίες χρειάζονται διάφορα μέτρα υποστήριξης για την εδραίωσή τους στην ενεργειακή αγορά. Ο πρόσφατος νόμος Μείωσης Πληθωρισμού (Inflation Reduction Act) των Ηνωμένων Πολιτειών, εισάγει ένα ευρύ φάσμα φορολογικών ελαφρύνσεων τόσο για τις ανανεώσιμες πηγές όσο και για το υδρογόνο. Προσαρμόζοντας την παραπάνω νομοθεσία και εφαρμόζοντάς την, δεδομένου ότι οι Ηνωμένες πολιτείες είναι πρωτοπόρες στην ανάπτυξη τεχνολογιών υδρογόνου παρά την έλλειψη ολοκληρωμένου θεσμικού πλαισίου, δύναται να βοηθηθεί σημαντικά η ανάπτυξη εγχώριας βιομηχανίας υδρογόνου και κυψελών.

Η εισαγωγή μέτρων στήριξης για την χρήση ηλεκτρικών αυτοκινήτων κυψελών είναι σημαντική μακροπρόθεσμα. Καθώς οι υποδομές υδρογόνου αναπτύσσονται, η εγχώρια υδροοικονομία μπορεί να βοηθηθεί με την δημιουργία περεταίρω κινήτρων από την εισαγωγή νέων αγορών. Τέτοιου είδους νομικές πρωτοβουλίες παρατηρούνται στην Νότια Κορέα αλλά και στην Πολιτεία της Καλιφόρνια, δηλαδή σε περιοχές που υφίσταται ήδη μια περιορισμένη αγορά υδρογόνου, μέσω προγραμμάτων επιδοτήσεων και πρωτοβουλιών για την αύξηση της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Τέλος, καθώς το υδρογόνο μπορεί να αξιοποιηθεί σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, είναι αναγκαίος ο προσδιορισμός πρωτοβουλιών που ταιριάζουν περισσότερο στα εγχώρια δεδομένα, ώστε να αποφευχθεί η σπατάλη πόρων. Επομένως, απαιτείται από τους φορείς χάραξης πολιτικής να προσδιορίσουν τους τεχνικούς περιορισμούς και ευκαιρίες, επικεντρώνοντας τις πολιτικές τους προσπάθειες όπου εμφανίζονται άμεσα πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, οι εγχώριες πολιτικές θα μπορούσαν να εστιάσουν αρχικά στην βιομηχανία πετρελαιοειδών, αφού χρησιμοποιούν ήδη μεγάλα ποσά υδρογόνου, θέτοντας τη μετάβασή στο πράσινο υδρογόνο πιο οικονομικά προσιτή.

3.4. Επενδυτικά Κίνητρα

Οι πρόσφατες ευρωπαϊκές πρωτοβουλίες για το υδρογόνο αποκαλύπτουν την δυναμική που κατέχει αλλά και τον ρόλο που πρόκειται να διαδραματίσει στην ενεργειακή μετάβαση των επόμενων ετών. Οι παραπάνω συνθήκες σε συνδυασμό με την αναγνώριση και προσθήκη του σε ενεργειακές στρατηγικές όλο και περισσότερων χωρών αυξάνει σημαντικά το επενδυτικό ενδιαφέρον. Η ανάπτυξη της ευρωπαϊκής υδροοικονομίας απαιτεί την δόμηση εγκαταστάσεων παραγωγής, μεταφοράς και αποθήκευσης, δημιουργώντας σημαντικά οικονομικά κίνητρα. Τα τελευταία χρόνια προγραμματίζονται πολυάριθμα έργα σε όλη την ευρωπαϊκή επικράτεια αλλά και την Ελλάδα με την συμμετοχή κρατικών φορέων αλλά και ιδιωτικών εταιριών.

3.4.1. Σημαντικά Έργα Κοινού Ευρωπαϊκού Ενδιαφέροντος (Important Projects of Common European Interest- IPCEI)

Τα Σημαντικά Έργα Κοινού Ευρωπαϊκού Ενδιαφέροντος αποτελούν στρατηγικά έργα με σκοπό την επίτευξη των πολιτικών στόχων της Ένωσης προωθώντας ταυτόχρονα την καινοτομία, την ανταγωνιστικότητα και την βιωσιμότητα. Αρκετές φορές περιλαμβάνουν διασυνοριακή συνεργασία κρατών μελών στοχεύοντας στην αντιμετώπιση προκλήσεων ή την εκμετάλλευση ευκαιριών σε βασικούς οικονομικούς τομείς όπως η ενέργεια, η βιομηχανία, οι υποδομές και άλλα. Η νομική τους βάση στηρίζεται στην Συνθήκη για τη Λειτουργία της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Treaty on the Functioning of the European Union ή TFEU) για την ενίσχυση και προώθηση έργων που θεωρούνται επωφελή και συμβατά με την εσωτερική ευρωπαϊκή αγορά. Η Επιτροπή εγκρίνει και ενισχύει τέτοια έργα από το 2018 με τα περισσότερα να αφορούν την έρευνα και την στήριξη νέων βιομηχανικών εφαρμογών. Επομένως, πολλές πρωτοβουλίες για το υδρογόνο κατατάσσονται στην κατηγορία των Σημαντικών Έργων, αφού δύναται να συμβάλλουν στην επίτευξη βασικών στόχων της ενεργειακής πολιτικής που σχετίζονται με την βιωσιμότητα, την καινοτομία αλλά και την απαλλαγή από ανθρακούχες εκπομπές.

Στα τέλη του 2021 εγκρίθηκε, από το Υπουργείο Ανάπτυξης και το Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, η συμμετοχή πέντε ελληνικών έργων που σχετίζονται με το υδρογόνο στο πρώτα κύμα των σημαντικών έργων κοινού ευρωπαϊκού συμφέροντος. Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά^{153 150}:

- **White Dragon:** Αποτελεί σύμπλεγμα έργων στην δυτική Μακεδονία. Περιλαμβάνει την ανάπτυξη εγκαταστάσεων μεγάλης κλίμακας ανανεώσιμων πηγών για την παραγωγή πράσινου υδρογόνου από ηλεκτρόλυση και την διανομή του μέσω του Εθνικού Συστήματος Μεταφοράς Φυσικού Αερίου και του Διαδριατικού Αγωγού Φυσικού Αερίου (TAP). Σκοπός του εγχειρήματος αποτελεί η στήριξη στην προσπάθεια σταδιακής κατάργησης των εργοστασίων λιγνίτη έως το 2029. Συμμετέχουν πλήθος εταιριών, όπως η Σωληνοργεία Κορίνθου και οι όμιλοι των Ελληνικών Πετρελαίων, αλλά και άλλοι φορείς όπως η ΔΕΗ και ο ΔΕΣΦΑ.
- **Green HIPO:** Αποτελεί έργο που συμπληρώνει και στηρίζει το White Dragon. Περιλαμβάνει την κατασκευή εργοστασίου για την παραγωγή καινοτόμων ηλεκτρολυτών και κυψελών καυσίμου συνδυασμένης θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας στην δυτική Μακεδονία. Υπεύθυνη για την δημιουργία της γραμμής παραγωγής είναι η εταιρία Advanced Energy Technologies (Advent Technologies).

- **Blue Med:** Αποτελεί σύμπλεγμα έργων για την παραγωγή μπλε και πράσινου υδρογόνου με χρονικό ορίζοντα το 2025. Προβλέπει τη δημιουργία ολοκληρωμένου κύκλου παραγωγής υδρογόνου για την μεταφορά και διανομή στον βιομηχανικό τομέα αλλά και την χρήση στις μεταφορές με εφαρμογές σε λεωφορεία και πλοία. Υπεύθυνη εταιρία είναι η Motor Oil, ωστόσο, αναμένεται η συμμετοχή ερευνητικών ιδρυμάτων της χώρας, της ΔΕΗ και ΔΕΣΦΑ.
- **H₂CAT TANKS:** Αποτελεί έργο αφιερωμένο στην κατασκευή καινοτόμων δεξαμενών αποθήκευσης υδρογόνου υψηλής πίεσης από σύνθετα υλικά και ίνες άνθρακα με σκοπό την χρήση στον τομέα των μεταφορών. Υπεύθυνη για το έργο είναι η εταιρία B&T Composites.
- **H₂CEM – TITAN:** Αποτελεί έργο για την παραγωγή, αποθήκευση και χρήση πράσινου υδρογόνου για καύση προς παραγωγή ενέργειας σε κλιβάνους με σκοπό την απανθρακοποίηση των τσιμεντοβιομηχανιών της εταιρείας TITAN.

Σύμφωνα με την συντονιστική αρχή των Σημαντικών Έργων Κοινού Ευρωπαϊκού Ενδιαφέροντος, τα έργα Green HIPO, White Dragon και H₂CAT Tanks εντάσσονται στην υποκατηγορία των τεχνολογιών υδρογόνου, ενώ τα Blue Med και το H₂CEM στην υποκατηγορία των έργων που συμβάλλουν στην απανθρακοποίηση μέσω του υδρογόνου. Γενικότερα, οι παραπάνω εγχώριες πρωτοβουλίες δύναται να δημιουργήσουν σημαντικές επενδυτικές ευκαιρίες προσελκύοντας χρηματοδότηση και υποστήριξη του ιδιωτικού τομέα αλλά και την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών της βιομηχανίας και κρατικών φορέων. Παράλληλα, χάρη στην συμμετοχή κρατικών και μη εταιριών φαίνεται πως προσελκύουν επενδύσεις τόσο από τον δημόσιο όσο και από τον ιδιωτικό τομέα, τονώνοντας την οικονομική ανάπτυξη και προωθώντας την έρευνα και την καινοτομία^{153 150}.

3.4.2. Ανάπτυξη Απαραίτητης Υποδομής

Για να επιτευχθεί η υιοθέτηση και αξιοποίηση του ανανεώσιμου υδρογόνου απαιτείται η άμεση εκτίμηση της αγοράς με σκοπό την ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών παραγωγής, την αξιοποίηση των υφιστάμενων υποδομών φυσικού αερίου και, μακροπρόθεσμα, την δημιουργία αποκλειστικών υποδομών διανομής και αποθήκευσης υδρογόνου. Η ζήτηση αυτή, δημιουργεί σημαντικές οικονομικές ευκαιρίες και επενδυτικά κίνητρα για δημόσιες και ιδιωτικές εταιρίες.

Μια από τις σημαντικότερες πρωτοβουλίες στο πλαίσιο ανάπτυξης των απαραίτητων εγχώριων υποδομών, είναι η συμμετοχή του Διαχειριστή Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (ΔΕΣΦΑ) στο ευρωπαϊκό σχέδιο European Hydrogen Backbone. Στο σχέδιο συμμετέχουν πολυάριθμοι ευρωπαϊκοί Διαχειριστές Συστημάτων Μεταφοράς Φυσικού Αερίου με απώτερο σκοπό την δημιουργία ενός πανευρωπαϊκού δικτύου μεταφοράς υδρογόνου που θα εκτείνεται σε 21 χώρες. Εκτιμάται πως το έργο απαιτεί συνολικές επενδύσεις ύψους 43 – 81€ δισεκατομμυρίων ευρώ^{153 168 152}.

Το εγχώριο τμήμα του σχεδίου περιλαμβάνει την κατασκευή ενός αγωγού που θα συνδέει την Αθήνα, την Θεσσαλονίκη και την Καβάλα. Παράλληλα, περιλαμβάνει τον υφιστάμενο αγωγό φυσικού αερίου της δυτικής Μακεδονίας, χαρακτηρίζοντάς τον έτοιμο για την μεταφορά υδρογόνου αλλά και την μετατροπή του εξαντλημένου κοιτάσματος φυσικού αερίου της Καβάλας σε υπόγεια αποθήκη. Η ολοκλήρωση του έργου αναμένεται το 2040,

συμβαδίζοντας με τους ευρωπαϊκούς στόχους, ενώ θα ακολουθεί την ίδια όδευση με το υπάρχον εθνικό σύστημα φυσικού αερίου. Σημαντικοί παράγοντες για την χάραξη του αποτελεί η ανάγκη κάλυψης των αναμενόμενων εγχώριων αναγκών για ανανεώσιμά αέρια, όπως το υδρογόνο, από βιομηχανίες και διυλιστήρια της Θεσσαλονίκης και της Αθήνας. Τέλος, το παραπάνω έργο συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη της εγχώριας υδροοικονομίας, ενώ παράλληλα προσδίδει κάποια βεβαιότητα για τον εγχώριο ρόλο που θα διαδραματίσει το υδρογόνο αυξάνοντας, πιθανόν, το επενδυτικό ενδιαφέρον τόσο από ιδιωτικές όσο και από κρατικές εταιρίες^{153 168}.

¹⁶⁸ DESFA. European Hydrogen Backbone, <https://www.desfa.gr/press-center/press-releases/to-sxedio-european-hydrogen-backbone-epekteinetai-sta-40-000-xlm-kalyptontas-11-nees-xwres>

4. Συζήτηση

Το υδρογόνο αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στο μελλοντικό ενεργειακό σύστημα καθώς και στην επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας. Το υδρογόνο ως καύσιμο παρουσιάζει υψηλή ενεργειακή πυκνότητα, σχετικά μικρή μάζα αλλά και ευκολία στην ηλεκτροχημική επεξεργασία και μεταφορά. Επιπλέον, εκτός από την καινοτομία στις βιώσιμες τεχνικές παραγωγής, δύναται να αποτελέσει λύση στο πρόβλημα αποθήκευσης της πλεονάζουσας ενέργειας από τις ανανεώσιμες πηγές, που αποτελεί επιπλέον πλεονέκτημα για την χρήση του στην προσπάθεια απανθρακοποίησης της παγκόσμιας οικονομίας.

Για να επιτευχθεί η παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση απαιτείται η ανάπτυξη δημόσιων πολιτικών, με απώτερο σκοπό την τόνωση και ανάπτυξη της υδροοικονομίας. Οι δημόσιες πολιτικές, είτε στην μορφή νομοθετικών και κανονιστικών πλαισίων, είτε με την εφαρμογή προτύπων, αποτελούν βασικό εργαλείο στα χέρια της πολιτείας. Επιπρόσθετα, το περιβάλλον και η ενέργεια είναι αλληλένδετοι όροι στις περισσότερες σύγχρονες κοινωνίες, θέτοντας την ενεργειακή μετάβαση και ως πολιτιστικό μετασχηματισμό. Παράλληλα, η επιλογή του θεσμικού πλαισίου και των δημόσιων πολιτικών μπορούν να επηρεάσουν ενεργά την χρηματοδότηση, δημόσια και ιδιωτική. Η ανάγκη άμεσης παροχής δημόσιων πολιτικών για την καθιέρωση και εξάπλωση του υδρογόνου αντικατοπτρίζεται και από τους στόχους που έχουν θέσει πολυάριθμες χώρες και οργανισμοί παγκοσμίως. Ωστόσο, λόγω του πρώιμου σταδίου των τεχνολογιών υδρογόνου και της περιορισμένης εφαρμογής τους στο ενεργειακό σύστημα, η διεξαγωγή μιας ολοκληρωμένης ανάλυσης των πολιτικών και μέτρων αποτελεί ιδιαίτερη πρόκληση, ενώ είναι σχετικά νωρίς να εκτιμηθεί η αποτελεσματικότητα κάθε πολιτικής που εφαρμόζεται.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση πρωτοστατεί στις περιβαλλοντικές πρωτοβουλίες προσδιορίζοντας συνεχώς φιλόδοξους στόχους για την μείωση των εκπομπών με βασικό στόχο τη μετάβαση σε μια οικονομία χωρίς εκπομπές άνθρακα. Ωστόσο, παρόλο που τα τελευταία χρόνια αναγνωρίζει την δυναμική του υδρογόνου ως βιώσιμη λύση, δεν έχει αναπτυχθεί ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο. Οι υφιστάμενες ενεργειακές πολιτικές που εφαρμόζονται φαίνεται να ευνοούν ελάχιστα τη χρήση υδρογόνου στον ενεργειακό τομέα. Παράλληλα, μηχανισμοί όπως το Σύστημα Εμπορίας Δικαιωμάτων Εκπομπών, οι προσπάθειες για προώθηση της ενεργειακής απόδοσης αλλά και η ενίσχυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας φαίνεται να έχουν θετικό αντίκτυπο, αφού θέτουν τα πλαίσια για ανάπτυξη και καινοτομία στον τομέα της αειφόρου ενέργειας. Από την άλλη, τα μέτρα για την απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας πιθανόν να έχουν σχετικά ασθενή αποτελέσματα αλλά ενδέχεται να ευνοήσουν την είσοδο των κυψελών καυσίμου στην αγορά. Επομένως, φαίνεται πως η Ευρωπαϊκή Ένωση δεν παρουσιάζει ολιστικό πλαίσιο για την στήριξη και ανάπτυξη του υδρογόνου, ωστόσο, το αναγνωρίζει ως πιθανή λύση, προσδίδοντας φιλοδοξία για το μελλοντικό ρόλο του στην ευρωπαϊκή ενεργειακή αγορά.

Η Γερμανία αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες ευρωπαϊκές οικονομίες και πρωτοπόρος στις περιβαλλοντικές δράσεις. Ακολουθώντας την πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αντιμετωπίζει το υδρογόνο ως πιθανή λύση για την καταπολέμηση της εγχώριας ρύπανσης αλλά και ως μέσο για την ανταπόκριση στις ενωσιακές περιβαλλοντικές υποχρεώσεις. Τα τελευταία χρόνια, ύστερα από πρόσφατες ενέργειες, το υδρογόνο συμπεριλήφθηκε στην γερμανική νομοθεσία χάρη στην τροποποίηση των νόμων για τη Βιομηχανική Ενέργεια και για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Μέσα από τα συγκεκριμένα νομικά κείμενα συμπεριλήφθηκαν αρκετοί νέοι κανονισμοί που αποσκοπούν στη νομική ρύθμισή του,

εισήχθησαν μεταβατικά μέτρα για την ομαλή εισαγωγή του στην αγορά, ενώ δρομολογήθηκε και η εισαγωγή αρκετών μέτρων στήριξης, όπως κρατικές επιχορηγήσεις και διαγωνισμοί καινοτομίας. Παράλληλα, οι κυψέλες καυσίμου αναγνωρίζονται ως τεχνολογία που δύναται να πρωταγωνιστήσει στον τομέα των μετακινήσεων και της ενέργειας, με την προώθησή τους να στηρίζεται κυρίως σε πολιτικές και προγράμματα έρευνας. Επομένως, η γερμανική κυβέρνηση αναγνωρίζει τη δυναμική του υδρογόνου και των τεχνολογιών του, ενώ προχωρά στην ανάπτυξη των πιο ολοκληρωμένων νομοθετικών μεταρρυθμίσεων στην Ευρώπη. Παρόλα αυτά, υφίστανται αρκετές πτυχές, ακόμα, που απαιτούν περαιτέρω ανάπτυξη του θεσμικού πλαισίου.

Οι Ηνωμένες Πολιτείες αποτελούν μια από τις πιο πρωτοπόρες χώρες στις τεχνολογίες υδρογόνου παγκοσμίως. Ωστόσο, δεν έχει παρατηρηθεί ευρύτερη υιοθέτησή τους με σκοπό τη βιωσιμότητα του ενεργειακού συστήματος, αφού στερούνται συντονισμένες πολιτικές και παρατηρείται μεγάλη αυτονομία σε πολιτειακό επίπεδο με χαρακτηριστικό παράδειγμα την πολιτεία της Καλιφόρνια. Βέβαια, τα τελευταία χρόνια σημειώνονται θετικές εξελίξεις όσον αφορά το ομοσπονδιακό θεσμικό πλαίσιο λόγω της εισαγωγή ευνοϊκών νόμων όπως ο Νόμος για την Μείωση του Πληθωρισμού. Συνολικά, η πολιτική των Ηνωμένων Πολιτειών εξελίσσεται ανά τα χρόνια, από στρατηγικές εφαρμογής, σε προγράμματα ανάπτυξης έρευνας και τελικά σε πολιτικές παροχής κινήτρων. Παρόλα αυτά, η περαιτέρω ανάπτυξη του θεσμικού πλαισίου είναι απαραίτητη για την προώθηση της εγχώριας υδροοικονομίας.

Η Κίνα αποτελεί τη δεύτερη μεγαλύτερη οικονομία και το μεγαλύτερο παραγωγό ρύπων διοξειδίου του άνθρακα παγκοσμίως. Ακολουθώντας την παγκόσμια τάση, αναγνωρίζει την δυναμική του υδρογόνου και προχωρά με ταχείς ρυθμούς στην ανάπτυξη μιας ισχυρής υδροοικονομίας, καθώς το ανεπτυγμένο δίκτυο ανανεώσιμων πηγών σε συνδυασμό με τον μεγάλο πληθυσμό της χώρας προσφέρουν σημαντικό δυναμικό για την παραγωγή και κατανάλωσή του. Η μακροπρόθεσμη εξέλιξη της εγχώριας υδροοικονομίας δύναται να επιλύσει το πρόβλημα της απανθρακοποίησης του ενεργειακού τομέα, το ζήτημα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης και της ενεργειακής ασφάλειας. Παρά το ενδιαφέρον της κινεζικής κυβέρνησης για το υδρογόνο τα τελευταία χρόνια, δεν έχει δημιουργηθεί ολοκληρωμένη νομική βάση που να πλαισιώνει την ανάπτυξή του, ενώ παρατηρούνται πολυάριθμες πρωτοβουλίες σε κυβερνητικό και ιδιωτικό επίπεδο με έμφαση στο τομέα των μεταφορών. Γενικότερα, η θεσμική κατοχύρωση βασίζεται σε εθνικά προγράμματα, πολιτικές βιομηχανικού σχεδιασμού αλλά και τοπικούς κανονισμούς πιλοτικού χαρακτήρα, απαιτώντας περαιτέρω ανάπτυξη του ρυθμιστικού πλαισίου.

Τέλος, η Νότια Κορέα παρουσιάζει μια από τις πιο ολοκληρωμένες θεσμικές βάσεις για την νομική πλαισίωση του υδρογόνου και των τεχνολογιών του. Με μια σειρά αποφάσεων, προγραμμάτων και θεσμικών πρωτοβουλιών επιδιώκει να ηγηθεί στην ανάπτυξη της βιομηχανίας υδρογόνου και κυψελών καυσίμου. Ήδη από τις αρχές του 2000, αναπτύχθηκαν διάφορες πολιτικές για την εισαγωγή του υδρογόνου και των τεχνολογιών του σε σημαντικούς οικονομικούς τομείς. Η ψήφιση του Νόμου για την Προώθηση της Οικονομίας Υδρογόνου και Διαχείρισης Ασφάλειας Υδρογόνου, αποτέλεσε παγκόσμια πρωτοτυπία, αφού απλοποίησε νομικά την βιομηχανία υδρογόνου. Παράλληλα, η υιοθέτηση του «όρου νέα και ανανεώσιμη ενέργεια» διαφοροποιεί τις τεχνολογίες υδρογόνου και διευκολύνει, πιθανόν, τη θεσμική ρύθμισή τους αλλά και την αποδοχή τους από την κοινή άποψη. Ωστόσο, παρόλο που η Νότια Κορέα παρουσιάζει ένα από τα πιο ολοκληρωμένα θεσμικά πλαίσια, κρίνεται αναγκαία η επέκτασή του για την υποστήριξη και

κάλυψη όλων των πιθανών πτυχών που προκύπτουν από την ταχεία ανάπτυξη της εγχώριας υδροοικονομίας.

Συνεπώς, φαίνεται πως σε παγκόσμια κλίμακα λίγες κυβερνήσεις έχουν προχωρήσει στην ανάπτυξη ολιστικών θεσμικών πλαισίων για την ρύθμιση του υδρογόνου και των τεχνολογιών του. Η ανάπτυξή του στηρίζεται, κυρίως, σε ερευνητικά προγράμματα, ενώ η θεσμική κατοχύρωσή του σε εθνικά προγράμματα και κανονισμούς πιλοτικού χαρακτήρα. Εξαιρέσεις αποτελούν η Γερμανία και η Νότια Κορέα που παρουσιάζουν την πιο ανεπτυγμένη νομοθεσία. Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια τάση για την ανάπτυξη πλαισίων στις μεγαλύτερες οικονομίες, ακολουθώντας διαφορετικές προσεγγίσεις. Η Ευρωπαϊκή Ένωση φαίνεται πως στηρίζεται στην χρήση των ανανεώσιμων πηγών αλλά και του υφιστάμενου δικτύου φυσικού αερίου για την μεσοπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη ανάπτυξή του, ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες και Κίνα στην βιομηχανική ανάπτυξη με την χρήση πολιτικών παροχής κινήτρων.

Πάρα την έλλειψη θεσμικών πλαισίων, το υδρογόνο αξιοποιείται εδώ αρκετές δεκαετίες σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά του είναι οι πολυάριθμες διαδικασίες παραγωγής που αξιοποιούν πλήθος διαφορετικών πρώτων υλών. Σε παγκόσμια κλίμακα, η πιο διαδομένη μέθοδος είναι αυτή της αναμόρφωσης με ατμό, ενώ ακολουθούν η αεριοποίηση άνθρακα και η θερμοχημική πυρόλυση. Γενικά, η χρήση ορυκτών καυσίμων στις παραγωγικές διαδικασίες υδρογόνου αγγίζει το 95%, χάρη στην διαθεσιμότητά τους, το χαμηλό τους κόστος, την υψηλή αναλογία άνθρακα – υδρογόνου και την ύπαρξη ανεπτυγμένου δικτύου διανομής και αποθήκευσης. Ωστόσο, καθώς το υδρογόνο αναγνωρίζεται ως πιθανό μέσο για την απανθρακοποίηση του ενεργειακού συστήματος, καταβάλλονται προσπάθειες βελτίωσης των ήδη δοκιμασμένων συμβατικών μεθόδων αλλά και η ανάπτυξη βιώσιμων διαδικασιών παραγωγής. Από αυτές, οι διεργασίες διάσπασης του νερού αποτελούν την πιο πολλά υποσχόμενη εναλλακτική για την βιώσιμη παραγωγή υδρογόνου. Ωστόσο, λόγω των υψηλών ενεργειακών αναγκών και την χαμηλή παραγωγική ικανότητα, οι βιώσιμες μέθοδοι δεν δύναται να ανταγωνιστούν, προς το παρόν, τα ορυκτά καύσιμα.

Καθώς το υδρογόνο αποκτά δυναμική ως μέσω για την παγκόσμια ενεργειακή μετάβαση, δημιουργείται η ανάγκη κατηγοριοποίησής του λαμβάνοντας υπόψη το περιβαλλοντικό αποτύπωμα κάθε παραγωγικής διαδικασίας. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος βασίζεται στην απόδοση χρωμάτων αναλόγως την μέθοδο παραγωγής και την ενεργειακή πηγή που αξιοποιείται. Ωστόσο, τα χρώματα που χρησιμοποιούνται δεν είναι επίσημα κατοχυρωμένα δημιουργώντας συχνά σύγχυση.

Μια από τις σημαντικότερες τεχνολογίες υδρογόνου που δύναται να πρωτοστατήσει στην προσπάθεια της ενεργειακής μετάβασης είναι οι κυψέλες καυσίμου. Η διαθεσιμότητα πολλαπλών μεθόδων παραγωγής σε συνδυασμό με την ποικιλομορφία της συνεχώς εξελισσόμενης τεχνολογίας των κυψελών, το καθιστούν ελκυστική επιλογή για χρήση στον ενεργειακό τομέα. Οι κυψέλες απασχολούν την επιστημονική κοινότητα για πάνω από 100 χρόνια, ωστόσο, πρακτικές εφαρμογές εντοπίζονται μόνο τις τελευταίες δεκαετίες. Υφίστανται αρκετά διαφορετικά είδη με ειδοποιό διαφορά τον ηλεκτρολύτη που χρησιμοποιούν. Επομένως, η ποικιλομορφία σε κυψέλες με διακριτά χαρακτηριστικά, όπως το μέγεθος και η θερμοκρασία λειτουργίας, επιτρέπει την αξιοποίησή τους σε πληθώρα ενεργειακών εφαρμογών. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως φορητές μονάδες παραγωγής ενέργειας αλλά και ως συστήματα εφεδρικής ενέργειας. Παράλληλα, υφίσταται η δυνατότητα αξιοποίησής τους ως αποκεντρωμένες μονάδες παραγωγής, ενώ δύναται να

χρησιμοποιηθούν και ως μέσω αποθήκευσης ενέργειας, στηρίζοντας την ραγδαία αυξανόμενη ενσωμάτωση ανανεώσιμων πηγών στο ενεργειακό σύστημα. Παρόλα αυτά, εξακολουθούν να υφίστανται προκλήσεις για την ευρεία υιοθέτηση και χρήση τους, όπως το κόστος και η απουσία ανεπτυγμένου δικτύου διανομής και αποθήκευσης υδρογόνου.

Όσον αφορά τα εγχώρια δεδομένα, η εισαγωγή βιώσιμου υδρογόνου δύναται να συμβάλλει σημαντικά στην ενεργειακή μετάβαση της χώρας, συμβαδίζοντας με την ευρωπαϊκή ενεργειακή στρατηγική. Η Ελλάδα διαθέτει ορισμένα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, όπως οι ενεργειακές ανάγκες των εκάστοτε πτυχών του ενεργειακού τομέα, το σημαντικό δυναμικό ανανεώσιμων πηγών, η γεωγραφική της θέση και άλλα, που δημιουργούν πληθώρα ευκαιριών για την επένδυση και την εισαγωγή του υδρογόνου. Η χρήση του ως καύσιμο παρουσιάζει προοπτικές για την μετάβαση των ενεργοβόρων πτυχών του ενεργειακού τομέα, όπως οι οδικές μεταφορές. Επιπλέον, υφίστανται δυνατότητες αξιοποίησής στην εγχώρια βιομηχανία, ενώ η χρήση του ως μέσω αποθήκευσης μπορεί να αυξήσει σημαντικά τις δυνατότητες των ανανεώσιμων πηγών. Βέβαια, δεν υφίσταται ακόμα οι αναγκαίες υποδομές ούτε ολοκληρωμένο θεσμικό πλαίσιο. Παρόλα αυτά, στο μεσοπρόθεσμο διάστημα, μέχρι την ανάπτυξη ισχυρής νομικής βάσης και των αναγκαίων υποδομών, δύναται να αξιοποιηθεί η υπάρχουσα υποδομή φυσικού αερίου. Τέλος, παρά την έλλειψη ρυθμιστικών πλαισίων, προγραμματίζονται πολλά σημαντικά επενδυτικά έργα για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων παραγωγής, αξιοποίησης και αποθήκευσης, σκιαγραφώντας τον μελλοντικό ρόλο του υδρογόνου στην χώρα.

Βιβλιογραφία

- A. Ajanovic, M. S. (2022). The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 24136-24154. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319922007066>
- A. Kirubakaran, S. J. (2009). A review on fuel cell technologies and power electronic interface. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, σσ. 2430-2440. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032109000872>
- Agora Energiewende and Guidehouse. (2021). *Making renewable*. Ανάκτηση από https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2020/2020_11_EU_H2-Instruments/A-EW_223_H2-Instruments_WEB.pdf
- Ajanovic A., H. R. (2019). Economic and Environmental Prospects for Battery Electric- and Fuel Cell Vehicles: A Review. *Fuel Cells*, σσ. 515-529. Ανάκτηση από <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/fuce.201800171>
- Alexander Schenk, B. C. (2018). Chapter 5 - Other Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Fuel Cells and Hydrogen*, σσ. 91-115. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128114599000050?via%3Dihub>
- Andrea Willige. (2022). *The colors of hydrogen: Expanding ways of decarbonization*. Ανάκτηση από SPECTRA: <https://spectra.mhi.com/the-colors-of-hydrogen-expanding-ways-of-decarbonization>
- Ankica Kovač, M. P. (2021). Hydrogen in energy transition: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 10016-10035.
- Arman Avadikyan, P. L. (2015). The Partnership for a New Generation of Vehicles and the US DoE Transportation Fuel Cells Programme. *The Economic Dynamics of Fuel Cell Technologies*, σσ. 133-158.
- Arthur W. Brian. (1989). Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-In by Historical Events. *The Economic Journal*.
- Azni Muhammad Asyraf, M. K. (2021). Hydrogen Fuel Cell Legal Framework in the United States, Germany, and South Korea—A Model for a Regulation in Malaysia. *Sustainability*.
- B.D. McNicol, D. R. (χ.χ.). Fuel cells for road transportation purposes — yes or no? *Journal of Power Sources*, σσ. 47-59. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775301008825?via%3Dihub>
- Balat Havva, K. E. (2010). Hydrogen from biomass – Present scenario and future prospects. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 7416-7426. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319910008396>

- Balthasar, W. (1984). Hydrogen production and technology: today, tomorrow and beyond. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 649-668. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0360319984902635>
- Berkhout, A. S. (2004). Socio-technological regimes and transition contexts.
- Bleischwitz Raimund, B. N. (2010). Policies for the transition towards a hydrogen economy: the EU case. *Energy Policy*, σσ. 5388-5398.
- Bobolaki Eftychia. (2015). *Bobolaki_Eftychia_Dip_2015.pdf*. Ανάκτηση από Institutional Repository Technical University of Crete: <https://dias.library.tuc.gr/view/25781?locale=en>
- Brett Parkinson, M. T. (2018). Hydrogen production using methane: Techno-economics of decarbonizing fuels and chemicals. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 2540-2555. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319917347201?via%3Dihub>
- Bryan Tilt. (2019). China's air pollution crisis: Science and policy perspectives. *Environmental Science & Policy*, σσ. 275-280. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1462901118313133>
- Bundesamt für Justiz. (2014). *Gesetz für den Ausbau erneuerbarer Energien*. Ανάκτηση από https://www.gesetze-im-internet.de/eeg_2014/index.html
- California Fuel Cell Partnership. (χ.χ.). *A California Road Map Bringing Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles to the Golden State*. Ανάκτηση από [https://h2fcp.org/sites/default/files/20120814_Roadmapv\(Overview\).pdf](https://h2fcp.org/sites/default/files/20120814_Roadmapv(Overview).pdf)
- California State Council. (2012). *A California Road Map Bringing Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles to the Golden State*. Ανάκτηση από Hydrogen Fuel Cell Partnership: [https://h2fcp.org/sites/default/files/20120814_Roadmapv\(Overview\).pdf](https://h2fcp.org/sites/default/files/20120814_Roadmapv(Overview).pdf)
- Canan Acar, I. D. (2018). 3.1 Hydrogen Production. *Comprehensive Energy Systems*, σσ. 1-40. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128095973003047?via%3Dihub>
- Chernyavs'ka, L. L. (2006). Energy Taxation Policy in the European Union : The Hydrogen Case. σσ. 1-24.
- Chul-Yong Lee, S.-Y. H. (2017). Forecasting the diffusion of renewable electricity considering the impact of policy and oil prices: The case of South Korea. *Applied Energy*, σσ. 29-39. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261917303707>
- Chung Yanghon, H. S. (2014). Which of the technologies for producing hydrogen is the most prospective in Korea?: Evaluating the competitive priority of those in near-, mid-, and long-term. *Energy Policy*, σσ. 115-125. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421513010422>

- COOK B. (2002). Introduction to fuel cells and hydrogen technology. *Engineering Science & Education Journal*, σσ. 205-216. Ανάκτηση από https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/esej_20020601
- Dalia Majumder-Russell. (2021). *HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN THE US*. Ανάκτηση από CMS: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/united-states-of-america>
- Debabrata Das, T. V. (2001). Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 13-28. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319900000586?via%3Dihub>
- Demirbaş Ayhan. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, σσ. 1357-1378. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890400001370>
- Department of Energy (.gov). (2005). *ENERGY POLICY ACT OF 2005*. Ανάκτηση από <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f14/EPAof2005.pdf>
- Department of Energy (.gov). (2006). *FreedomCAR and Fuel Partnership Plan*. Ανάκτηση από Hydrogen Program: https://www.hydrogen.energy.gov/docs/hydrogenprogramlibraries/pdfs/fc_fuel_partnership_plan.pdf?Status=Master
- Department of Energy (.gov). (χ.χ.). *Fuel cell systems*. Ανάκτηση από Fuel Cells: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-systems>
- Department of Energy (.gov). (χ.χ.). *Parts of a fuel cell*. Ανάκτηση από Fuel Cells: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/parts-fuel-cell>
- Department of Energy (.gov). (χ.χ.). *Types of Fuel Cells*. Ανάκτηση από Fuel Cells: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>
- Dincer Ibrahim. (2012). Green methods for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 1954-1971. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319911019823>
- E.Funk, J. (2001). Thermochemical hydrogen production: past and present. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 185-190. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319900000628>
- Energiewirtschaftsgesetz. (2005). *Gesetz über die Elektrizitäts- und Gasversorgung (Energiewirtschaftsgesetz - EnWG)*. Ανάκτηση από Bundesamt für Justiz: https://www.gesetze-im-internet.de/enwg_2005/BJNR197010005.html
- Energy (.gov). (χ.χ.). *Hydrogen Production*. Ανάκτηση από <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-thermochemical-water-splitting>
- ENERGY CENTER OF WISCONSIN. (2000). *Fuel Cells for Distributed Generation A Technology and Marketing Summary*. Ανάκτηση από <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=982f97445a8a928f11e2c3e5bfbc593c073537>

- EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. (2021). *COM/2021/558 final*. Ανάκτηση από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0558>
- EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. (2021). *COM/2021/562 final*. Ανάκτηση από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0562>
- EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. (2021). *COM/2021/563 final*. Ανάκτηση από Proposal for a COUNCIL DIRECTIVE restructuring the Union framework for the taxation of energy products and electricity (recast): <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52021PC0563>
- EUROPEAN PARLIAMENT, T. C. (2023). *COM/2023/156 final*. Ανάκτηση από <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM%3A2023%3A156%3AFIN>
- European Union. (2021). *Clean Hydrogen Joint Undertaking*. Ανάκτηση από https://european-union.europa.eu/institutions-law-budget/institutions-and-bodies/search-all-eu-institutions-and-bodies/clean-hydrogen-joint-undertaking_en
- Friedrich von Burchard. (2021). *HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN GERMANY*. Ανάκτηση από CMS : <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/germany>
- Gene D. Berry, A. D. (1996). Hydrogen as a future transportation fuel. *Energy*, σσ. 289-303. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360544295001042>
- Gregorio Marbán, T. V.-S. (2007). Towards the hydrogen economy? *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 1625-1637. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319906006276>
- H Damon Matthews, K. Z. (2018). Focus on cumulative emissions, global carbon budgets and the implications for climate mitigation targets. *Purpose-led Publishing* .
- Henrik, L. (2007). Renewable energy strategies for sustainable development. *Energy*, σσ. 912-919. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S036054420600301X>
- Hord J. (1980). Hydrogen safety: an annotated bibliography of regulations, standards and guidelines. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 579-584. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0360319980900361>
- Hsin Liang Chen, H. M. (2008). Review of plasma catalysis on hydrocarbon reforming for hydrogen production—Interaction, integration, and prospects. *Applied Catalysis B: Environmental*, σσ. 1-9. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926337308002403?via%3Dihub>
- Hwang In-Ha. (2014). *South Korea's National Basic Plan for New and Renewable Energies*. Ανάκτηση από <https://eneken.ieej.or.jp/data/5842.pdf>
- Hwang In-Ha. (2014). *South Korea's National Basic Plan for New and Renewable Energies*. Ανάκτηση από <https://eneken.ieej.or.jp/data/5842.pdf>

- Ilgi Karapinar Kapdan, F. K. (2006). Bio-hydrogen Production from Waste Materials. *Enzyme and Microbial Technology*, σσ. 569-582. Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/publication/222705744_Bio-hydrogen_Production_from_Waste_Materials
- IRENA. (2011). *Green hydrogen: A guide to policy making*. Ανάκτηση από https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf
- J Will, A. M. (2000). Fabrication of thin electrolytes for second-generation solid oxide fuel cells. *Solid State Ionics*, σσ. 79-96. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016727380000624X?via%3Dihub>
- J.D. Holladay, J. H. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*, σσ. 244-260. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0920586108004100?via%3Dihub>
- Javad Hikmati. (2020). *How to calculate the efficiency of hydrogen produced from water electrolysis?* Ανάκτηση από https://www.researchgate.net/post/How_to_calculate_the_efficiency_of_hydrogen_produced_from_water_electrolysis
- Jeffrey R. Bartels, M. B. (2010). An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 8371-8384. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910007317?via%3Dihub>
- Jimena Incer-Valverde, A. K. (2023). “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy Conversion and Management*, σ. 117294. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890423006404>
- Johanna Ivy Levene, M. K. (2007). An analysis of hydrogen production from renewable electricity sources. *Solar Energy*, σσ. 773-780. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X06002635?via%3Dihub>
- Juan Carlos León Gómez, S. E. (2023). A Review of Hybrid Renewable Energy Systems: Architectures, Battery Systems, and Optimization Techniques. *Eng*, σσ. 1446-1467. Ανάκτηση από <https://www.mdpi.com/2673-4117/4/2/84>
- Jun Lu. (2013). Building the hydrogen economy in China: Drivers, resources and technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, σσ. 543-556. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032113001445>
- K.W. Harrison, R. R. (2010). *Hydrogen Production: Fundamentals and Case Study Summaries*. Ανάκτηση από <https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47302.pdf>

- Kavita Surana, L. D. (2015). Public policy and financial resource mobilization for wind energy in developing countries: A comparison of approaches and outcomes in China and India. *Global Environmental Change*.
- Lebrouhi B.E., D. J. (2022). Global hydrogen development - A technological and geopolitical overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 7016-7048.
- Lena Maria Ringsgwandl, J. S. (2022). Current Legislative Framework for Green Hydrogen Production by Electrolysis Plants in Germany. *energies*.
- Lindiwe Khotseng. (2019). *Fuel Cell Thermodynamics*. Ανάκτηση από INTECHOPEN:
<https://www.intechopen.com/chapters/70166>
- M. Sahibzada, B. S. (1999). Operation of solid oxide fuel cells at reduced temperatures. *Fuel*, σσ. 639-643. Ανάκτηση από
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S001623619800194X>
- M.E. Ros, M. W. (2007). Snapshots of hydrogen uptake in the future. Ανάκτηση από
<https://publicaties.ecn.nl/PdfFetch.aspx?nr=ECN-E--07-056>
- Marius Neuwirth, T. F. (2022). The future potential hydrogen demand in energy-intensive industries - a site-specific approach applied to Germany. *Energy Conversion and Management*, σ. 115052. Ανάκτηση από
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890421012280>
- McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. *Bioresource Technology*, σσ. 37-46. Ανάκτηση από
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960852401001183>
- Meng Ni, D. Y. (2006). An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Processing Technology*, σσ. 461-472. Ανάκτηση από
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378382005001980?via%3Dihub>
- Momirlan M., V. T. (2005). The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 795-802. Ανάκτηση από
<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319904003398>
- Moura João, S. I. (2023). Financing low-carbon hydrogen: The role of public policies and strategies in the EU, UK and USA. *Green Finance*, σσ. 265-297.
- Muradov, N. (2001). Hydrogen via methane decomposition: an application for decarbonization of fossil fuels. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 1165-1175. Ανάκτηση από
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319901000738?via%3Dihub>
- Nana Yaw Amponsah, M. T. (2014). Greenhouse gas emissions from renewable energy sources: A review of lifecycle considerations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, σσ. 461-475. Ανάκτηση από
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114005395?via%3Dihub>

- Niaz Saba, M. T. (2015). Hydrogen storage: Materials, methods and perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, σσ. 457-469. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032115004694>
- Olga Bičáková, P. S. (2012). Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 11563-11578. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912011901>
- Omri Wallach. (2022). *The Solar Power Duck Curve Explained*. Ανάκτηση από <https://elements.visualcapitalist.com/the-solar-power-duck-curve-explained/>
- Pavlos Nikolaidis, A. P. (2017). A comparative overview of hydrogen production processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, σσ. 597-611. doi:/10.1016/j.rser.2016.09.044
- P-H. Floch, S. G. (2007). On the production of hydrogen via alkaline electrolysis during off-peak periods. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 4641-4647. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319907004193?via%3Dihub>
- Pingkuo Liu, X. H. (2022). Comparative analysis on similarities and differences of hydrogen energy development in the World's top 4 largest economies: A novel framework. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 9485-9503.
- Priscilla Brandt. (2022). *The Emergence of Hydrogen Legal Frameworks in the Global Energy Transition: What can South Africa learn from the US and Germany?* Ανάκτηση από <https://sites.dundee.ac.uk/energyhubplus/wp-content/uploads/sites/195/2022/07/CAR-2022-Priscilla-Brandt.pdf>
- R. Daniel Kelemen, T. K. (2016). The United States, the European Union, and international environmental law: The domestic dimensions of green diplomacy. *International Journal of Constitutional Law*, σσ. 945–965.
- Ren Xi, D. L. (2020). Challenges towards hydrogen economy in China. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 34326-34345.
- Riccardo Crescenzi, A. R.-P. (2007). The territorial dynamics of innovation: a Europe–United States comparative analysis. *Journal of Economic Geography*, σσ. 673–709.
- Riccardo Crescenzi, A. R.-P. (2007). The territorial dynamics of innovation: a Europe–United States comparative analysis. *Journal of Economic Geography*, σσ. 673–709.
- S. Mekhilef, R. S. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, σσ. 981-989. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032111004709?via%3Dihub>
- Sam Fankhauser, F. J. (2017). Economic growth and development with low-carbon energy. *WIREs Climate Change*, σ. 495.
- Sam Fankhauser, F. J. (2018). Economic growth and development with low-carbon energy. *WIREs Climate Change*.

- Sangook Park. (2013). The country-dependent shaping of 'hydrogen niche' formation: A comparative case study of the UK and South Korea from the innovation system perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 6557-6568. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319913007544>
- Shree Om Bade, O. S. (2024). Economic, social, and regulatory challenges of green hydrogen production and utilization in the US: A review. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- Stangarone Troy. (2021). South Korean efforts to transition to a hydrogen economy. *Clean Technologies and Environmental Policy*, σσ. 509-516. Ανάκτηση από <https://link.springer.com/10.1007/s10098-020-01936-6>
- Sudi Apak, E. A. (2012). Renewable hydrogen energy regulations, codes and standards: Challenges faced by an EU candidate country. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 5481-5497.
- Talus Kim, M. M. (2022). A guide to hydrogen legislation in the USA. *The Journal of World Energy Law & Business*, σσ. 449-461.
- Tony Leo. (2023). *Fuel cell efficiency explained*. Ανάκτηση από <https://www.fuelcellenergy.com/blog/fuel-cell-efficiency>
- U.S. Environmental Protection Agency (.gov). (2007). *Public Law 110-140*. Ανάκτηση από Summary of the Energy Independence and Security Act: <https://www.epa.gov/laws-regulations/summary-energy-independence-and-security-act>
- U.S. Government. (2005). *ENERGY POLICY ACT OF 2005*. Ανάκτηση από <https://www.govinfo.gov/content/pkg/PLAW-109publ58/pdf/PLAW-109publ58.pdf>
- V.M. Aroutiounian, V. A. (2005). Metal oxide photoelectrodes for hydrogen generation using solar radiation-driven water splitting. *Solar Energy*, σσ. 581-592. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X04000301>
- Vera Zhang. (2021). *HYDROGEN LAW, REGULATIONS & STRATEGY IN CHINA*. Ανάκτηση από CMS: <https://cms.law/en/int/expert-guides/cms-expert-guide-to-hydrogen/china>
- VIS CONSULTANTS. (2021). *HYDROGEN IN GREECE THE STATE OF PLAY*. Ανάκτηση από <https://vis-consultants.com/wp-content/uploads/H2-Greece.pdf>
- Vishnu Vijayakumar, L. F. (2022). Creating a Global Hydrogen Economy Review of International Strategies, Targets, and Policies with a Focus on Japan, Germany, South Korea, and California. Ανάκτηση από <https://escholarship.org/uc/item/9f95p0m1>
- Xiangyu Meng, A. G. (2021). Status quo of China hydrogen strategy in the field of transportation and international comparisons. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 28887-28899. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319920342506>
- Xinhong Huang, Z. Z. (2006). Fuel Cell Technology for Distributed Generation: An Overview. *International Symposium on Industrial Electronics*, σσ. 1613-1618. Ανάκτηση από <http://ieeexplore.ieee.org/document/4078328/>

- Yahya Anouti, R. K. (2020). *The dawn of green hydrogen Maintaining the GCC's edge in a decarbonized world*. Ανάκτηση από <https://www.strategyand.pwc.com/m1/en/reports/2020/the-dawn-of-green-hydrogen/the-dawn-of-green-hydrogen.pdf>
- Yamashita Kei, B. L. (2005). Energyplexes for the 21st century: Coal gasification for co-producing hydrogen, electricity and liquid fuels. *Energy*, σσ. 2453-2473. Ανάκτηση από <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544204004980>
- Yongsheng Wei, S. M. (2011). A novel membrane for DMFC – Na₂Ti₃O₇ Nanotubes/Nafion® composite membrane: Performances studies. *International Journal of Hydrogen Energy*, σσ. 1857-1864. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319911020325?via%3Dihub>
- Zhang Max, Y. X. (2022). The Regulatory Perspectives to China's Emerging Hydrogen Economy: Characteristics, Challenges, and Solutions. *Sustainability*, σ. 9700. Ανάκτηση από <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/15/9700>
- Zhiqi Wang, T. H. (2015). Gasification of biomass with oxygen-enriched air in a pilot scale two-stage gasifier. *Fuel*, σσ. 386-393. Ανάκτηση από <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236115002045?via%3Dihub>
- Γεώργιος Μαρνέλλος. (χ.χ.). *Ειδικά Κεφάλαια Παραγωγής Ενέργειας*. Ανάκτηση από Ανοικτά Ψηφιακά Μαθήματα του Πανεπιστημίου Δυτικής: https://eclass.uowm.gr/modules/document/file.php/MECH101/%CE%91%CE%A3%CE%9A%CE%97%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3/5%CE%B2_%CE%9A%CF%85%CF%88%CE%AD%CE%BB%CE%B5%CF%82%20%CE%9A%CE%B1%CF%85%CF%83%CE%AF%CE%BC%CE%BF%CF%85_oc.pdf
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο. (2001). *Οδηγία 2001/77/ΕΚ*. Ανάκτηση από EUR-Lex.europa.eu. - European Union: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/ALL/?uri=CELEX%3A32001L0077>
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο. (2009). *Οδηγία 2009/28/ΕΚ*. Ανάκτηση από EUR-Lex.europa.eu. - European Union: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/ALL/?uri=CELEX%3A32009L0028>
- Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο και Συμβούλιο. (2019). *Οδηγία (ΕΕ) 2019/944*. Ανάκτηση από EUR-Lex.europa.eu. - European Union: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EL/TXT/?uri=CELEX:32019L0944>
- ΕΦΗΜΕΡΙΔΑ ΤΗΣ ΚΥΒΕΡΝΗΣΕΩΣ ΤΗΣ ΕΛΛΗΝΙΚΗΣ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑΣ. (2019). *Κύρωση του Εθνικού Σχεδίου για την Ενέργεια*. Ανάκτηση από https://www.eydamth.gr/images/site_2017/ArticleID_514/5_04.pdf
- Κωστής Σταμπολής, Ε. Τ. (2023). *Ο Ελληνικός Ενεργειακός Τομέας Ετήσια Έκθεση 2023*. Ανάκτηση από Ινστιτούτο Ενέργειας Νοτιοανατολικής Ευρώπης: <https://www.iene.gr/page.asp?pid=5876&lng=1>

- Λούρου Αντωνίου. (2017). *Το φαινόμενο του σχήματος της πάπιας (Duck chart, Duck curve) στην Ελλάδα*. Ανάκτηση από <https://ikee.lib.auth.gr/record/288307/files/GRI-2017-18856.pdf>
- Συμβούλιο και το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο. (χ.χ.). *Δέσμη Fit for 55*. Ανάκτηση από Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία: <https://www.consilium.europa.eu/el/policies/green-deal/fit-for-55/>
- Συμβούλιο της ΕΕ και το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο. (χ.χ.). *Το σχέδιο REPowerEU με απλά λόγια*. Ανάκτηση από <https://www.consilium.europa.eu/el/infographics/repowereu/>
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (2020). *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα*. Ανάκτηση από ΥΠΕΝ_ΤΕΛΙΚΟ ΣΧΕΔΙΟ ΕΣΕΚ_231219: https://energy.ec.europa.eu/system/files/2020-01/el_final_necp_main_el_0.pdf
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. (χ.χ.). *Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα*. Ανάκτηση από <https://ypen.gov.gr/energeia/esek/>
- 한국법제연구원 KLRI. (2020). *HYDROGEN ECONOMY PROMOTION AND HYDROGEN SAFETY MANAGEMENT ACT*. Ανάκτηση από https://elaw.klri.re.kr/eng_mobile/viewer.do?hseq=54651&type=part&key=31

