



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών
Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 73, Ζωγράφου – 210-7723655 – epminfo@power.ece.ntua.gr

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ
ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΟΥ ΟΙΚΟΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ
ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ, ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ,
ΔΙΑΝΟΜΗΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΗΣ
ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΟΥ ΥΔΡΟΓΟΥΝΟΥ»**

Της Μεταπτυχιακής Φοιτήτριας

Παπαλουκά Βασιλικής

Επιβλέπων

Καρέλλας Σωτήριος

Καθηγητής Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

Αθήνα, Ιούνιος, 2025

(Υπογραφή)

.....

Παπαλουκά Βασιλική

Διπλωματούχος Μεταλλειολόγος – Μεταλλουργός Μηχανικός Ε.Μ.Π.

© 2025 – All rights reserved. Με επιφύλαξη κάθε δικαιώματος.

Πρόλογος – Ευχαριστίες

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία με θέμα «Ανάλυση κύκλου ζωής ολοκληρωμένου οικοσυστήματος παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και χρήσης ανανεώσιμου υδρογόνου» εκπονήθηκε στα πλαίσια του Διατμηματικού Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας» της Σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου κατά τη διάρκεια του ακαδημαϊκού έτους 2024 – 2025, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή Καρέλλα Σωτήρη. Την κινητήριο δύναμη για την διεκπεραίωση της διπλωματικής μου εργασίας αποτελεί η αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των πολλά υποσχόμενων τεχνολογιών υδρογόνου σε επίπεδο κύκλου ζωής.

Πρώτα απ' όλα θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Καρέλλα Σωτήριο για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αναθέτοντάς μου ένα τόσο ενδιαφέρον και επίκαιρο θέμα.

Ένα εξίσου μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στον κ. Σκορδούλια Νικόλαο όπου η βοήθεια του ήταν καθοριστικής σημασίας για την υλοποίηση της διπλωματικής μου. Στάθηκε στο πλευρό μου όλο αυτό το διάστημα και μέσα από την πρακτική του στήριξη, τις πολύτιμες συμβουλές και την επιστημονική του κατάρτιση συνέβαλε με αξιοσημείωτο τρόπο σε κάθε βήμα μου.

Τέλος, δεν θα μπορούσα να μην ευχαριστήσω τους φίλους μου και τους γονείς μου που αποτελούν φάρους στην πορεία της ζωής μου. Τους ευχαριστώ για την αμέριστη στήριξη, την αγάπη και την υπομονή που μου δείχνουν όλα αυτά τα χρόνια και πόσο μάλλον τώρα σε ένα ακόμα κρίσιμο στάδιο της ζωής μου, όπου ολοκληρώνεται ένας εξίσου σημαντικός κύκλος σπουδών.

*Παπαλουκά Βασιλική
Ιούνιος 2025*

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ: «Ανάλυση κύκλου ζωής ολοκληρωμένου οικοσυστήματος παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και χρήσης ανανεώσιμου υδρογόνου»

ΦΟΙΤΗΤΗΣ: Παπαλουκά Βασιλική

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Καρέλλας Σωτήριος, Καθηγητής Ε.Μ.Π., Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

ΑΚΑΔΗΜΑΪΚΟ ΕΤΟΣ: 2024-2025

Σύνοψη

Τα τελευταία χρόνια η κρίση της κλιματικής αλλαγής έχει σημάνει παγκόσμιο συναγερμό, με την απανθρακοποίηση κρίσιμων ενεργειακών τομέων να είναι καθοριστικής σημασίας για την θετική έκβαση του φαινομένου. Είναι επιτακτική ανάγκη, επομένως, η ανάπτυξη εναλλακτικών, φιλικών προς το περιβάλλον λύσεων καθώς και η ολιστική αξιολόγηση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος. Σε αυτό το πλαίσιο, ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει προσελκύσει το υδρογόνο, ως ένας πολλά υποσχόμενος ενεργειακός φορέας με σημαντικές δυνατότητες συμβολής στην ενεργειακή μετάβαση. Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία γίνεται μία προσπάθεια εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός ολοκληρωμένου οικοσυστήματος ανανεώσιμου υδρογόνου, σε επίπεδο κύκλου ζωής και αξιολόγησης των δυνητικών ωφελειών του σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες του τομέα της ηλεκτροπαραγωγής και των μεταφορών. Στα κεφάλαια 1 – 3 παρουσιάζεται ένα γενικό θεωρητικό υπόβαθρο που προσφέρει πληροφορίες για το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής και τις τεχνολογικές εξελίξεις στο δρόμο της απανθρακοποίησης. Επιπλέον, περιλαμβάνονται βασικά στοιχεία για το υδρογόνο και τις τεχνολογίες παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και χρήσης του και αναφέρονται οι βασικές αρχές και το μεθοδολογικό πλαίσιο που διέπουν την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Στο κεφάλαιο 4 περιγράφεται αναλυτικά η μεθοδολογία και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκπόνηση της ανάλυσης, ενώ στο κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα αποτελέσματα εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος μελέτης. Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα διπλωματική εργασία καθώς και οι προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

Περίληψη

Η κλιματική αλλαγή αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις του 21^{ου} αιώνα, με την παγκόσμια θερμοκρασία να παρουσιάζει σταθερή ανοδική τάση τα τελευταία χρόνια. Η εξάρτηση βασικών τομέων, όπως η ηλεκτροπαραγωγή, οι μεταφορές και η βιομηχανία, από τα ορυκτά καύσιμα επιδεινώνουν το φαινόμενο, λόγω των υψηλών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κυρίως του διοξειδίου του άνθρακα CO₂, που παράγονται κατά την καύση τους. Η απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα έχει αναδειχθεί ως αναγκαία συνθήκη για την αντιμετώπιση της κλιματικής κρίσης, με τη διεθνή και ευρωπαϊκή κοινότητα να θέτει συγκεκριμένες στρατηγικές και φιλόδοξους στόχους για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας στο δρόμο προς ένα βιώσιμο ενεργειακό μοντέλο.

Σε αυτό το πλαίσιο, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) διαδραματίζουν πρωταγωνιστικό ρόλο, ως καθαρές, ανεξάντλητες και ανθρακικά ουδέτερες τεχνολογίες. Η αυξανόμενη διείσδυση τους στο ενεργειακό μείγμα αποτελεί σημαντικό βήμα προς έναν βιώσιμο ενεργειακό μετασχηματισμό. Ωστόσο, η στοχαστική και διαλείπουσα φύση των ΑΠΕ περιορίζει την αξιοπιστία τους και θέτει σοβαρά εμπόδια στην πλήρη υιοθέτησή τους. Η ανισορροπία που δημιουργείται μεταξύ παραγωγής και ζήτησης αναδεικνύει την ανάγκη για αποτελεσματική αποθήκευση ενέργειας. Μεταξύ άλλων τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας, το υδρογόνο αναδύεται ως μία πολλά υποσχόμενη ενεργειακή λύση, ικανή να υποστηρίξει την ενεργειακή μετάβαση και να συμβάλει στην απανθρακοποίηση ρυπογόνων τομέων, όπως η ηλεκτροπαραγωγή και οι μεταφορές.

Το υδρογόνο, χάρη στις ιδιότητές του, θεωρείται ένας καθαρός ενεργειακός φορέας μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, με υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα, όπως είναι η βενζίνη και το πετρέλαιο. Παρότι η αξιοποίησή του δεν συνδέεται άμεσα με βλαβερές εκπομπές, το περιβαλλοντικό του αποτύπωμα μεταβάλλεται σε επίπεδο κύκλου ζωής, ανάλογα με τη μέθοδο παραγωγής, τη μεταφορά του και τις απαιτήσεις κατασκευής των σχετικών συστημάτων. Η ηλεκτρόλυση του νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γνωστή ως παραγωγή «πράσινου» ή ανανεώσιμου υδρογόνου, αποτελεί την πιο φιλική προς το περιβάλλον επιλογή.

Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στην περιβαλλοντική αξιολόγηση όλης της αλυσίδας αξίας του υδρογόνου μέσω της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Η προσέγγιση που υιοθετείται είναι cradle-to-grave και λαμβάνει

υπόψη τόσο την κατασκευή όσο και τη λειτουργία των επιμέρους σταδίων παραγωγής, αποθήκευσης – διανομής και τελικής χρήσης. Ειδικότερα, το υδρογόνο παράγεται μέσω αλκαλικής ηλεκτρόλυσης του νερού, με αποκλειστική κατανάλωση ηλιακής ενέργειας. Στο στάδιο της αποθήκευσης – διανομής εξετάζεται η μεταφορά του σε συμπιεσμένη αέρια μορφή με φορητά τύπου tube trailer, ενώ η χρήση του αφορά αφενός την ηλεκτροπαραγωγή μέσω κυψέλης καυσίμου και αφετέρου την κίνηση επιβατικών οχημάτων και αστικών λεωφορείων με την ίδια τεχνολογία. Επιπλέον, πραγματοποιείται συγκριτική αξιολόγηση με τις αντίστοιχες συμβατικές τεχνολογίες, ηλεκτροπαραγωγή με βάση το ελληνικό ενεργειακό μείγμα και χρήση πετρελαιοκίνητων οχημάτων καθώς και ανάλυση εναλλακτικών σεναρίων παραγωγής υδρογόνου για την ανάδειξη της βέλτιστης περιβαλλοντικής απόδοσης. Η ανάλυση διεξάγεται στο λογισμικό SimaPro και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις εκτιμώνται με τη μέθοδο ReCiPe 2016 Midpoint, μέσω 18 περιβαλλοντικών δεικτών.

Τα αποτελέσματα της μελέτης ανέδειξαν την υπεροχή της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας του υδρογόνου έναντι των συμβατικών τεχνολογιών στους δύο πιο ρυπογόνους τομείς, που εξακολουθούν να βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα. Στην περίπτωση της ηλεκτροπαραγωγής, η χρήση του υδρογόνου οδήγησε σε μείωση των εκπομπών CO₂ κατά περίπου 50% σε σύγκριση με το δίκτυο, ενώ στις μεταφορές η μείωση άγγιξε το 90%, προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη σε όλους τους εξεταζόμενους δείκτες. Παρά τις μηδενικές εκπομπές κατά την τελική χρήση του υδρογόνου, τα στάδια παραγωγής και μεταφοράς του επιβαρύνουν ιδιαίτερα το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, τόσο σε κατασκευαστικό όσο και κυρίως σε λειτουργικό επίπεδο. Η φάση λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρόλυσης αναδείχθηκε ως ο βασικότερες συντελεστής των επιπτώσεων, με 3.79 kg CO₂ eq/kg H₂, ακόμα και υπό συνθήκες αποκλειστικής χρήσης ΑΠΕ. Παρ' όλα αυτά, η χρήση ηλιακής ενέργειας στη διαδικασία αυτή φάνηκε να περιορίζει σημαντικά τις επιπτώσεις σε σχέση με την περίπτωση όπου αξιοποιείται εν μέρει το δίκτυο. Ιδιαίτερα υψηλή περιβαλλοντική συνεισφορά προέκυψε επίσης από τη χρήση σπάνιων και κρίσιμων υλικών, όπως το νικέλιο και η πλατίνα, που απαιτούνται στην κατασκευή της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου, αντίστοιχα.

Συμπερασματικά, η μελέτη καταλήγει στο ότι το υδρογόνο, όταν παράγεται με ανανεώσιμες πηγές και ενσωματώνεται σε ολοκληρωμένα ενεργειακά συστήματα, δύναται να αποτελέσει μία βιώσιμη λύση για την ενεργειακή μετάβαση και την καταπολέμηση του της κλιματικής αλλαγής, ιδιαίτερα στους τομείς με υψηλές εκπομπές και ισχυρή εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα. Ωστόσο, παρά τα οφέλη που παρουσιάζει, για την πλήρη αξιοποίηση του δυναμικού του απαιτείται προσεκτική διαχείριση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων που προκύπτουν σε άλλα στάδια του κύκλου ζωής του.

Λέξεις – Κλειδιά

Κλιματική αλλαγή, Απανθρακοποίηση, Ανανεώσιμο υδρογόνο, Ενεργειακός φορέας, Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), Αλκαλική ηλεκτρόλυση νερού, Κυψέλη καυσίμου

POST-GRADUATE THESIS: «Life Cycle Assessment (LCA) of an integrated ecosystem for the production, storage, distribution and utilisation of renewable hydrogen»

STUDENT: Papalouka Vasiliki

SUPERVISOR: Karellas Sotirios, Professor NTUA, School of Mechanical Engineering

ACADEMIC YEAR: 2024-2025

Abstract

In recent years, the climate change crisis has raised global alarm, with the decarbonization of critical energy sectors being crucial for a positive outcome. Therefore, the development of alternative, environmentally friendly solutions and the holistic assessment of their environmental footprint is an urgent necessity. In this context, hydrogen has attracted considerable interest as a promising energy carrier with significant potential to contribute to the energy transition. This master's thesis aims to assess the environmental impacts of an integrated renewable hydrogen ecosystem at life cycle level and to evaluate its potential benefits in comparison with conventional technologies in the power generation and transport sectors. Chapters 1 to 3 present a general theoretical background that offers information on the phenomenon of climate change and technological advancements on the path to decarbonization. Furthermore, key aspects on hydrogen and its production, storage, distribution and use technologies are included, as well as the basic principles and methodological framework of Life Cycle Assessment (LCA). Chapter 4 describes in detail the methodology and data used in the analysis, while Chapter 5 presents the results of the environmental impact assessment of the study system. Finally, Chapter 6 outlines the main conclusions drawn from this thesis along with suggestions for future research.

Summary

Climate change is one of the greatest challenges of the 21st century, with global temperatures exhibiting a steady upward trend in recent years. The dependence of key sectors, such as electricity generation, transportation, and industry, on fossil fuels exacerbates the phenomenon, due to the high emissions of greenhouse gases, primarily carbon dioxide (CO₂), produced during their combustion. The decarbonization of the energy sector has emerged as a necessary condition for addressing the climate crisis, with both the international and European communities setting specific strategies and ambitious targets to achieve climate neutrality on the path to a sustainable energy model.

In this context, renewable energy sources (RES) play a leading role, as clean, inexhaustible, and carbon neutral technologies. Their increasing penetration into the energy mix marks an important step towards a sustainable energy transformation. However, the stochastic and intermittent nature of RES limits their reliability and poses major obstacles to their full adoption. The imbalance between production and demand highlights the need for efficient energy storage. Among other energy storage technologies, hydrogen emerges as a highly promising energy solution, capable of supporting the energy transition and contributing to the decarbonization of polluting sectors such as power generation and transport.

Due to its properties, hydrogen is considered a clean energy carrier with zero carbon dioxide emissions and a high energy content compared to conventional fuels such as gasoline and diesel. Although its use isn't directly associated with harmful emissions, its environmental footprint varies at the life cycle level, depending on the production method, its transport and construction requirements of the systems involved. Water electrolysis using renewable energy, known as "green" or renewable hydrogen production, is the most environmentally friendly option.

This thesis focuses on the environmental assessment of the entire hydrogen value chain using the Life Cycle Assessment (LCA) method. The adopted approach is cradle-to-grave and takes into account both the construction and operation of the individual stages of production, storage-distribution, and end-use. Specifically, hydrogen is produced through alkaline water electrolysis, powered exclusively by solar energy. In the storage-distribution stage, its transport in compressed gaseous form by tube trailer trucks is examined, while its use includes both electricity generation through fuel cell and the operation of passenger vehicles and city buses using the same technology. In addition, a comparative assessment is carried out with the corresponding conventional technologies, electricity generation based on the Greek energy mix and the use of diesel-powered vehicles, as well as an analysis of alternative hydrogen production scenarios to highlight the most environmentally efficient option. The analysis is conducted using SimaPro software and the environmental impacts are assessed with the ReCiPe 2016 Midpoint method, through 18 environmental indicators.

The results of the study highlighted the environmental sustainability superiority of hydrogen over conventional technologies in the two most polluting sectors, which are still relying on fossil fuels. In the case of power generation, the use of hydrogen led to a CO₂ emission reduction of approximately 50% compared to the electricity grid, while in transport the reduction reached 90%, offering significant environmental benefits across all examined indicators. Despite the zero emissions during end-use of hydrogen, the production and transport stages considerably burden the overall environmental footprint, both in terms of construction and especially during operation. The operational phase of the electrolysis system emerged as the main contributor to environmental impacts, with 3.79 kg CO₂ eq/kg H₂, even under conditions of exclusive RES use. Nevertheless, the use of solar energy in this process significantly reduced the impacts compared to the case where the grid is partially used. A notably high environmental contribution also resulted from the use of rare and critical materials, such as nickel and platinum, required in the manufacture of the electrolyser stack and fuel cell, respectively.

In conclusion, the study finds that hydrogen, when produced from renewable sources and integrated into comprehensive energy systems, can be a viable solution for the energy transition and climate change mitigation, especially in sectors with high emissions and strong dependence on fossil fuels. However, despite the benefits it offers, the full utilization of its potential requires careful management of the environmental burdens that arise at other stages of its life cycle.

Key – Words

Climate change, Decarbonization, Renewable hydrogen, Energy carrier, Life Cycle Assessment (LCA), Alkaline water electrolysis, Fuel Cell

Περιεχόμενα

Κατάλογος Εικόνων	10
Κατάλογος Πινάκων.....	10
Κατάλογος Γραφημάτων.....	11
Συντομογραφίες.....	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1° ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	14
1.1 Κλιματική αλλαγή και ο δρόμος προς την απανθρακοποίηση	14
1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας	17
1.2.1 Προκλήσεις διείσδυσης ΑΠΕ και αποθήκευση ενέργειας	19
1.3 Ο ρόλος του υδρογόνου στην ενεργειακή μετάβαση	22
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2° ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΦΟΡΕΑΣ.....	24
2.1 Γενικά στοιχεία.....	24
2.1.1 Ιδιότητες υδρογόνου.....	24
2.1.2 Υδρογόνο ως καύσιμο	25
2.1.3 Χρώματα υδρογόνου	26
2.2 Παραγωγή υδρογόνου	29
2.2.1 Αλκαλική ηλεκτρόλυση νερού.....	31
2.3 Αποθήκευση υδρογόνου	34
2.3.1 Αποθήκευση συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου σε δεξαμενές υψηλής πίεσης	35
2.4 Μεταφορά υδρογόνου	37
2.4.1 Μεταφορά συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου με φορτηγά tube trailers.....	38
2.5 Τελική χρήση υδρογόνου	39
2.5.1 Ηλεκτροπαραγωγή με κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.....	40
2.5.2 Μεταφορές με οχήματα κυψέλης καυσίμου	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3° ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ.....	45
3.1 Ιστορική αναδρομή.....	45
3.2 Γενικά στοιχεία.....	45
3.3 Καθορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής	47
3.4 Απογραφή κύκλου ζωής	49
3.5 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων.....	50
3.5.1 Μέθοδοι ανάλυσης και κατηγορίες επιπτώσεων.....	51
3.6 Ερμηνεία αποτελεσμάτων	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4° ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ.....	55

4.1	Εισαγωγή	55
4.2	Στόχος μελέτης (Goal definition)	56
4.2.1	Προβλεπόμενη εφαρμογή και απευθυνόμενο κοινό	56
4.2.2	Σκοπός εργασίας	56
4.3	Πεδίο εφαρμογής (Scope definition)	56
4.3.1	Όρια συστήματος μελέτης.....	56
4.3.2	Λειτουργική μονάδα.....	57
4.3.3	Παραδοχές.....	57
4.3.4	Περιορισμοί.....	58
4.3.5	Μέθοδος ανάλυσης και κατηγορίες επιπτώσεων	58
4.3.6	Εξεταζόμενα σενάρια	58
4.4	Περιγραφή συστήματος μελέτης	59
4.5	Κατάλογος απογραφής (Life Cycle Inventory)	60
4.5.1	Παραδοχές.....	60
4.5.2	Στάδιο παραγωγής υδρογόνου	60
4.5.3	Στάδιο αποθήκευσης και διανομής υδρογόνου	63
4.5.4	Τελική χρήση υδρογόνου στην ηλεκτροπαραγωγή.....	64
4.5.5	Τελική χρήση υδρογόνου στις μεταφορές.....	67
4.5.6	Εξεταζόμενα σενάρια	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5° ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ		71
5.1	Αποτελέσματα σταδίου παραγωγής υδρογόνου	71
5.2	Αποτελέσματα σταδίου αποθήκευσης-μεταφοράς υδρογόνου.....	78
5.3	Αποτελέσματα σταδίου χρήσης υδρογόνου στην ηλεκτροπαραγωγή.....	81
5.4	Αποτελέσματα σταδίου χρήσης υδρογόνου στις μεταφορές.....	83
5.5	Συνολικά αποτελέσματα αλυσίδας αξίας υδρογόνου	85
5.6	Αποτελέσματα εξεταζόμενων σεναρίων	92
5.6.1	Παραγωγή υδρογόνου με συνδυασμό πηγών ενέργειας	92
5.6.2	Μέγιστη παραγωγή υδρογόνου	94
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6° ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ		97
6.1	Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα	97
6.2	Προτάσεις για μελλοντική έρευνα.....	100
Βιβλιογραφία.....		102
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α		105

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 1.2.1 Αρχή λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε ημερήσια βάση (18) ...	20
Εικόνα 1.2.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ως προς διάρκεια αποθήκευσης και χωρητικότητα (18)	21
Εικόνα 1.3.1 Οικοσύστημα υδρογόνου (20)	22
Εικόνα 1.3.2 Πορεία προς ένα Ευρωπαϊκό οικοσύστημα υδρογόνου (21).....	23
Εικόνα 2.1.1 Χρώματα υδρογόνου - Μέθοδοι παραγωγής και ανθρακικό αποτύπωμα (24).....	27
Εικόνα 2.2.1 Επισκόπηση προσεγγίσεων παραγωγής υδρογόνου (27)	29
Εικόνα 2.2.2 Σχηματική απεικόνιση της μονάδας αλκαλικής ηλεκτρόλυσης (28).....	31
Εικόνα 2.2.3 Σχηματική απεικόνιση του συνολικού συστήματος ηλεκτρόλυσης - Μονάδα ηλεκτρόλυσης και περιφερειακός εξοπλισμός (30)	33
Εικόνα 2.3.1 Τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου (30).....	34
Εικόνα 2.3.2 Τύποι δεξαμενών αποθήκευσης αερίου υδρογόνου (33).....	36
Εικόνα 2.5.1 Σχηματική απεικόνιση της μονάδας κυψέλης καυσίμου PEMFC (27)	40
Εικόνα 2.5.2 Σχηματική απεικόνιση του συνολικού συστήματος της κυψέλης καυσίμου PEMFC - Μονάδα και περιφερειακός εξοπλισμός (30).....	41
Εικόνα 2.5.3 Εξαρτήματα ενός ηλεκτρικού οχήματος κυψέλης καυσίμου FCEV (33).....	43
Εικόνα 3.2.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο και στάδια ανάλυσης κύκλου ζωής (38).....	46
Εικόνα 3.4.1 Παράδειγμα μίας βασικής διεργασίας με απεικόνιση των εισροών και εκροών (41)	49
Εικόνα 4.3.1 Όρια συστήματος μελέτης	57

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 2.1.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες υδρογόνου (23)	25
Πίνακας 3.5.1 Περιβαλλοντικοί δείκτες μεθόδου ReCiPe 2016 Midpoint (43)	52
Πίνακας 4.5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος αλκαλικής ηλεκτρόλυσης	61
Πίνακας 4.5.2 Κατάλογος υλικών κατασκευής μονάδων ηλεκτρόλυσης (stacks) 30MW	62
Πίνακας 4.5.3 Κατάλογος υλικών κατασκευής περιφερειακού εξοπλισμού (BoP) 30MW	62
Πίνακας 4.5.4 Πληροφορίες αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου	63
Πίνακας 4.5.5 Κατάλογος υλικών κατασκευής δεξαμενών μεταφοράς.....	63
Πίνακας 4.5.6 Πληροφορίες διανομής υδρογόνου στις τελικές χρήσεις	64
Πίνακας 4.5.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου PEM Fuel Cell	65
Πίνακας 4.5.8 Κατάλογος υλικών κατασκευής μονάδας (stack) PEMFC 100kW	65
Πίνακας 4.5.9 Κατάλογος υλικών κατασκευής περιφερειακού εξοπλισμού (BoP) PEMFC 100kW	66
Πίνακας 4.5.10 Πληροφορίες χρήσεις υδρογόνου στις μεταφορές	67
Πίνακας 4.5.11 Κατάλογος υλικών κατασκευής σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου (HRS).....	67
Πίνακας 4.5.12 Κατάλογος υλικών κατασκευής επιβατικών οχημάτων FCEVs.....	68

Πίνακας 4.5.13 Τεχνικά χαρακτηριστικά οχήματος FCEV Toyota Mirai	68
Πίνακας 4.5.14 Κατάλογος υλικών κατασκευής λεωφορείων FCEBs	69
Πίνακας 4.5.15 Τεχνικά χαρακτηριστικά λεωφορείου FCEB Van Hool.....	69
Πίνακας 4.5.16 Πηγές ενέργειας για τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρόλυσης.....	70
Πίνακας 5.5.1 Μεταβολή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω χρήσης υδρογόνου.....	89
Πίνακας A.1 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων σταδίου παραγωγής	105
Πίνακας A.2 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων σταδίου αποθήκευσης – μεταφοράς	106
Πίνακας A.3 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων σταδίων τελικής χρήσης	107
Πίνακας A.4 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων συμβατικής ενέργειας/καυσίμου	108
Πίνακας A.5 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων 1ου εναλλακτικού σεναρίου παραγωγής.....	109
Πίνακας A.6 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων 2ου εναλλακτικού σεναρίου παραγωγής.....	110

Κατάλογος Γραφημάτων

Γράφημα 1.1.1 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά πηγή 1800-2023 (2).....	14
Γράφημα 1.1.2 Συγκέντρωση CO ₂ στην ατμόσφαιρα τις τελευταίες δεκαετίες (5)	15
Γράφημα 1.2.1. Κατανομή ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, 2023 (15)	18
Γράφημα 1.2.2. Μερίδιο ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά χώρα, 2023 (15)	18
Γράφημα 1.2.3 10ετής εξέλιξη του μείγματος ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα (16)	19
Γράφημα 4.5.1 Ενεργειακό μείγμα παραγωγής Ελλάδας 2023 (49).....	66
Γράφημα 5.1.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής των μονάδων ηλεκτρόλυσης (stacks)	72
Γράφημα 5.1.2 Συμβολή της κατασκευής των μονάδων ηλεκτρόλυσης στην υπερθέρμανση του πλανήτη	73
Γράφημα 5.1.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής του περιφερειακού εξοπλισμού (BoP)	74
Γράφημα 5.1.4 Συμβολή της κατασκευής του περιφερειακού εξοπλισμού στην υπερθέρμανση του πλανήτη	74
Γράφημα 5.1.5 Συγκριτικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής των μονάδων ηλεκτρόλυσης και του περιφερειακού εξοπλισμού.....	75
Γράφημα 5.1.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνολικά για το στάδιο παραγωγής υδρογόνου	76
Γράφημα 5.1.7 Συμβολή του σταδίου παραγωγής υδρογόνου στην υπερθέρμανση του πλανήτη.....	77
Γράφημα 5.2.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής των δεξαμενών αποθήκευσης - μεταφοράς υδρογόνου	78

Γράφημα 5.2.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνολικά για το στάδιο αποθήκευσης - μεταφοράς υδρογόνου	79
Γράφημα 5.2.3 Συμβολή του σταδίου αποθήκευσης - μεταφοράς υδρογόνου στην υπερθέρμανση του πλανήτη.....	80
Γράφημα 5.3.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής της κυψέλης καυσίμου PEM.....	81
Γράφημα 5.3.2 Συμβολή της κατασκευής της κυψέλης καυσίμου PEM στην υπερθέρμανση του πλανήτη	82
Γράφημα 5.4.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σχετικών κατασκευών του τομέα μεταφορών	83
Γράφημα 5.4.2 Συμβολή των σχετικών κατασκευών του τομέα μεταφορών στην υπερθέρμανση του πλανήτη.....	84
Γράφημα 5.5.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σταδίων κύκλου ζωής του υδρογόνου στην ηλεκτροπαραγωγή	85
Γράφημα 5.5.2 Συμβολή των σταδίων κύκλου ζωής του υδρογόνου στην υπερθέρμανση του πλανήτη - Ηλεκτροπαραγωγή	86
Γράφημα 5.5.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σταδίων κύκλου ζωής του υδρογόνου στις μεταφορές.....	87
Γράφημα 5.5.4 Συμβολή των σταδίων κύκλου ζωής του υδρογόνου στην υπερθέρμανση του πλανήτη - Μεταφορές	88
Γράφημα 5.5.5 Συγκριτική συμβολή του υδρογόνου και των συμβατικών τεχνολογιών στην υπερθέρμανση του πλανήτη	91
Γράφημα 5.6.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρόλυσης με συνδυασμό πηγών ενέργειας.....	93
Γράφημα 5.6.2 Συμβολή του σταδίου παραγωγής υδρογόνου με συνδυασμό πηγών ενέργειας στην υπερθέρμανση του πλανήτη	94
Γράφημα 5.6.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνολικά για το σενάριο μέγιστης παραγωγής υδρογόνου	95
Γράφημα 5.6.4 Συγκριτική συμβολή των σεναρίων παραγωγής με διαφορετικό συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας στην υπερθέρμανση του πλανήτη	96

Συντομογραφίες

GHG = GreenHouse Gases

ΕΕ = Ευρωπαϊκή Ένωση

ΑΠΕ = Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

BoP = Balance of Plant

PEM = Proton Exchange Membrane

PEMFC = Proton Exchange Membrane Fuel Cell

FCEV = Fuel Cell Electric Vehicle

FCEB = Fuel Cell Electric Bus

BEV = Battery Electric Vehicle

HRS = Hydrogen Refueling Station

AKZ = Ανάλυση Κύκλου Ζωής

LCA = Life Cycle Assessment

LCI = Life Cycle Inventory

LCIA = Life Cycle Impact Assessment

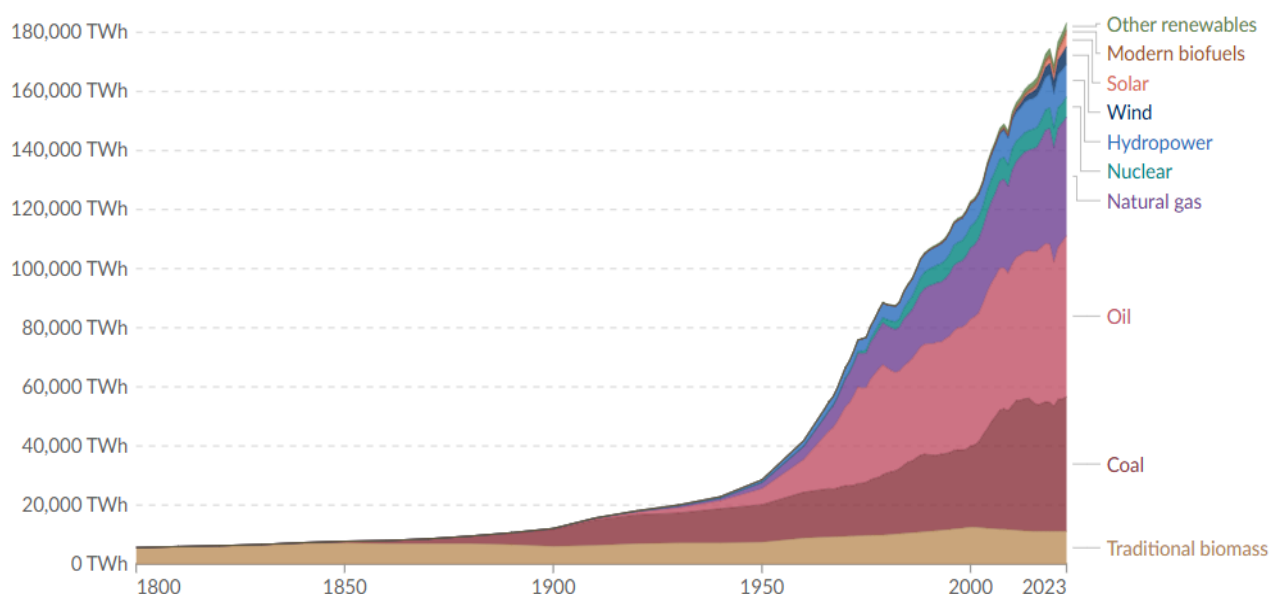
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Κλιματική αλλαγή και ο δρόμος προς την απανθρακοποίηση

Η κλιματική αλλαγή, που μέχρι πριν από λίγα χρόνια αντιμετωπιζόταν ως μία μελλοντική απειλή, αποτελεί σήμερα ένα παγκόσμιο και πολυπαραγοντικό φαινόμενο με πολυδιάστατες επιπτώσεις στην πραγματικότητα που βιώνουμε. Από πρόκληση του μέλλοντος, έχει μετατραπεί σε κρίση του παρόντος, επηρεάζοντας σημαντικά κάθε πτυχή της ανθρωπότητας, του περιβάλλοντος και του κλίματος σε κάθε άκρη της γης.

Η ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού σε συνδυασμό με την πρόοδο του πολιτισμού και της τεχνολογίας, έχει οδηγήσει σε εκθετική άνοδο των ενεργειακών απαιτήσεων και επομένως της κατανάλωσης ενέργειας. Τα ορυκτά καύσιμα (άνθρακας, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) διαδραματίζουν, μέχρι και σήμερα, πρωταρχικό ρόλο στην κάλυψη αυτών των αναγκών, καθώς θεωρούνται ως το κυρίαρχο μέσο για την παραγωγή ενέργειας, ενισχύοντας περαιτέρω την εξάρτηση μας από αυτά (1). Είναι χαρακτηριστικό πως το ποσοστό της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας που προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα αγγίζει σχεδόν το 80% τα τελευταία χρόνια (2).

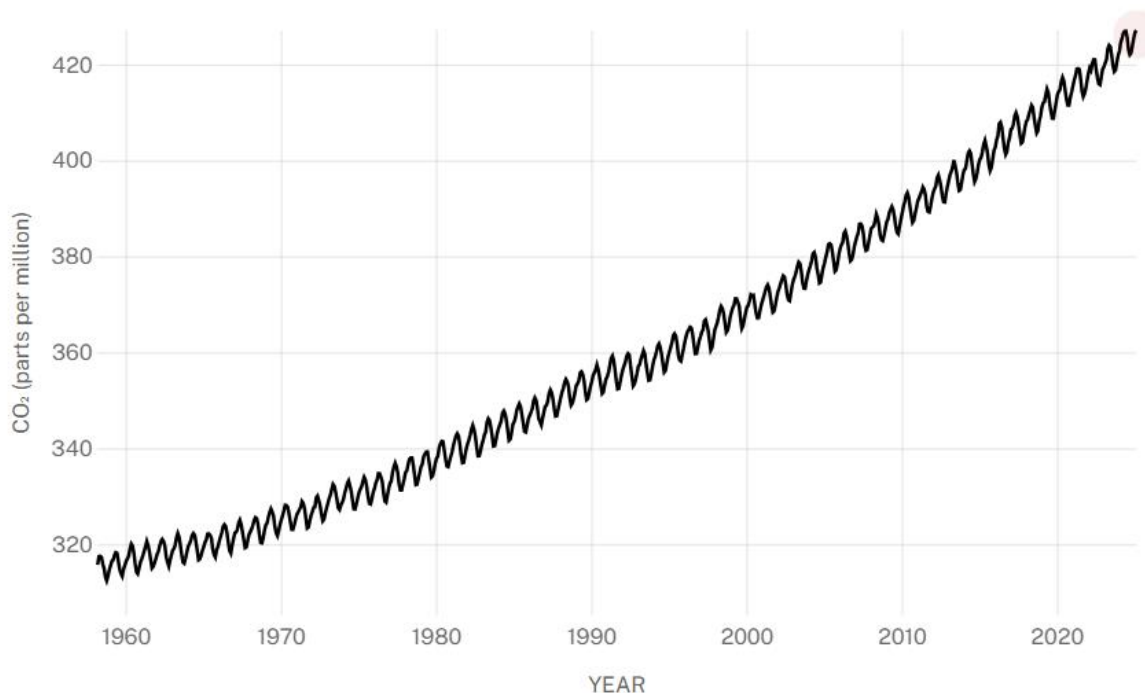


Γράφημα 1.1.1 Παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανά πηγή 1800-2023 (2)

Ως συνέπεια αυτής της ενεργειακής εξάρτησης, το μείζον περιβαλλοντικό ζήτημα της σημερινής εποχής, που συνεχώς επιδεινώνεται και είναι άρρηκτα συνδεδεμένο, κυρίως, με τη χρήση ορυκτών καυσίμων, είναι το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Καθοριστικής σημασίας στην εξέλιξη του φαινομένου αποτελούν οι συνεχώς εντεινόμενες ανθρωπογενείς δραστηριότητες σε καίριους τομείς όπως η παραγωγή ενέργειας, οι μεταφορές και οι βιομηχανικές διεργασίες, μέσω των οποίων παράγονται και εκπέμπονται αέρια προϊόντα CO₂, CH₄, N₂O, γνωστά και ως αέρια του θερμοκηπίου (Greenhouse Gases) (3). Τα ορυκτά καύσιμα αποτελούν το βασικό ενεργειακό

πυλώνα αυτών των δραστηριοτήτων, υπαίτια για περίπου το 75% των συνολικών εκπομπών GHG (4). Η επιβλαβής επίδραση των εκπομπών αυτών έγκειται στη μακροζωία τους και στην ικανότητα τους να απορροφούν μέρος της υπέρυθρης ακτινοβολίας που προέρχεται από την επιφάνεια της γης, αποτρέποντας την να διαφύγει στο διάστημα και ως εκ τούτου να παγιδεύονται σημαντικά ποσά θερμότητας (3).

Λαμβάνοντας υπόψιν τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των παραπάνω εκπομπών, το μεθάνιο CH_4 και το υποξείδιο του αζώτου N_2O φαίνεται να είναι περισσότερο επιβλαβή από το διοξείδιο του άνθρακα CO_2 , ωστόσο αυτό που καθιστά το τελευταίο ως τον κύριο παράγοντα στη συνεισφορά του φαινομένου είναι ο υπερβολικά μεγάλος όγκος στον οποίο συναντάται στην ατμόσφαιρα (3). Η αδιάλειπτη χρήση των ορυκτών καυσίμων ως πηγή ενέργειας, από την έναρξη της Βιομηχανικής Επανάστασης, είναι η κύρια υπεύθυνη για την ολοένα και αυξανόμενη απελευθέρωση ποσοτήτων διοξειδίου του άνθρακα. Από τον 18^ο αιώνα έως σήμερα, οι συγκεντρώσεις CO_2 έχουν αυξηθεί κατά περίπου 40%, με τα ορυκτά καύσιμα να ευθύνονται για το 90% των συνολικών εκπομπών του συγκεκριμένου αερίου παγκοσμίως (4), (5).



Γράφημα 1.1.2 Συγκέντρωση CO_2 στην ατμόσφαιρα τις τελευταίες δεκαετίες (5)

Το αποτύπωμα, λοιπόν, της αποκλειστικής εξάρτησης του ανθρώπου από τα ορυκτά καύσιμα στη ραγδαία αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και ειδικότερα του διοξειδίου του άνθρακα, ενισχύει το φαινόμενο, το οποίο με τη σειρά του έχει επιφέρει τα τελευταία χρόνια αύξηση της θερμοκρασίας του πλανήτη κατά 1.5°C από τα επίπεδα της προβιομηχανικής εποχής, αύξηση η οποία αναμένεται να φτάσει τους 4°C μέχρι το τέλος του αιώνα (6). Η εν λόγω ανοδική μεταβολή της θερμοκρασίας, ευρέως γνωστή και ως υπερθέρμανση του πλανήτη, διαταράσσει τους φυσικούς μηχανισμούς της γης και την ισορροπία του οικοσυστήματος προκαλώντας δυσμενείς κλιματολογικές επιπτώσεις, όπως έντονη ξηρασία, άνοδο της στάθμης της θάλασσας,

καταστροφικούς τυφώνες και πλημμύρες, μείωση βιοποικιλότητας, φαινόμενα που χαρακτηρίζουν στο σύνολο τους την κλιματική αλλαγή. Οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα δεν προβληματίζουν μόνο σε τοπικό επίπεδο, σε περιοχές με ευρεία χρήση ορυκτών καυσίμων, αλλά έχουν συλλογικό χαρακτήρα, με την κλιματική αλλαγή να έχει παγκόσμιο αντίκτυπο με απρόβλεπτες συνέπειες τόσο σε περιβαλλοντική όσο και σε ανθρώπινη κλίμακα (7).

Αυτά τα περιβαλλοντικά ζητήματα δεσπόζουν στην καθημερινότητα μας και τίθενται συνεχώς υπό συζήτηση στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης καθιστώντας επιτακτική ανάγκη τον καθορισμό σαφών στόχων στο δρόμο της απανθρακοποίησης και της πράσινης μετάβασης. Σε αυτό το πλαίσιο, τόσο η ευρωπαϊκή όσο και η διεθνής κοινότητα, ενστερνιζόμενες τις ανησυχίες για την κλιμακούμενη ένταση του φαινομένου της κλιματικής αλλαγής και των συνεπειών της, αναλαμβάνουν ενεργό ρόλο στην προσπάθεια εξεύρεσης βιώσιμων λύσεων και στρατηγικών για την αποτροπή της περαιτέρω επιδείνωσης με απώτερο σκοπό την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας.

Η Συμφωνία του Παρισιού (Paris Agreement), που υπογράφηκε στις 12 Δεκεμβρίου 2015 από 196 κράτη, αποτελεί ένα σημαντικό ορόσημο στη παγκόσμια προσπάθεια για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και το μετριασμό των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Πρόκειται για μία νομικά δεσμευτική διεθνή συνθήκη που ενώνει όλα τα κράτη του κόσμου, θέτοντας ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τον καθορισμό εθνικών στόχων. Κύριο μέλημα της είναι ο περιορισμός της υπερθέρμανσης του πλανήτη, διατηρώντας τη μέση θερμοκρασία εντός ασφαλών επιπέδων και συγκεκριμένα κάτω από τους 2°C σε σύγκριση με τα προβιομηχανικά επίπεδα, με ένα πιο φιλόδοξο όριο της τάξης του 1.5°C, έως το τέλος του αιώνα. Για την επίτευξη του στόχου του 1.5°C κρίνεται αναγκαία η ταχεία και ουσιαστική μείωση των εκπομπών τουλάχιστον κατά 43% έως το 2030, με την κορύφωση αυτών να έχει επέλθει το αργότερο μέχρι το 2025 (8).

Σε αυτό το πλαίσιο, τα συμμετέχοντα κράτη οφείλουν να εργάζονται από κοινού για να προσαρμοστούν στις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής και να ενισχύουν τις πολιτικές τους με την πάροδο του χρόνου. Συγκεκριμένα, καλούνται κάθε πέντε χρόνια να επανεξετάζουν τα σχέδια δράσης τους και να υποβάλλουν ανανεωμένες και πιο φιλόδοξες κλιματικές δεσμεύσεις. Επιπλέον, η συμφωνία μεριμνά για τις αναπτυσσόμενες χώρες, παρέχοντας τους χρηματοδότηση και υποστήριξη από τα αναπτυγμένα έθνη, δημιουργώντας ταυτόχρονα ένα πλαίσιο για τη διαφανή εποπτεία και αναφορά των κρατικών στόχων. Όλες οι παραπάνω διαδικασίες βασίζονται στην αρχή της κοινής αλλά διαφοροποιημένης ευθύνης, λαμβάνοντας υπόψιν τις διαφορετικές δυνατότητες και συνθήκες κάθε κράτους, με έναν συλλογικό, όμως, στόχο (9).

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η ΕΕ έχει δρομολογήσει τη δική της στρατηγική στην παγκόσμια τροχιά που διαγράφεται προς την πράσινη μετάβαση. Πρόκειται για την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (European Green Deal), η οποία εγκρίθηκε το 2019 με τη σύμφωνη γνώμη όλων των κρατών μελών της ΕΕ και αποτελεί την κύρια ευρωπαϊκή συμβολή στην υλοποίηση της Συμφωνίας του Παρισιού. Η στρατηγική αυτή προβλέπει ένα ευρύ φάσμα μέτρων και κανονισμών που αποσκοπούν στη δραστική μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας της Ευρώπης μέχρι το 2050. Το φιλόδοξο αυτό όραμα επιδιώκει να

αναδείξει την ΕΕ σε πρωτοπόρο δύναμη στη παγκόσμια κλιματική δράση, καθιστώντας την ως την πρώτη κλιματικά ουδέτερη ήπειρο (10).

Στις πολιτικές αυτής της στρατηγικής εντάσσεται και η δέσμη μέτρων Fit for 55, η οποία αποτελεί μία σειρά νομοθετικών προτάσεων και πρωτοβουλιών σε τομείς υψηλού ανθρακικού αποτυπώματος που σχετίζονται με την ενέργεια, τις μεταφορές και τα κτίρια, για την ευθυγράμμιση της Ευρώπης με τους παγκόσμιους στόχους για το κλίμα. Η Ευρωπαϊκή Ένωση δεσμεύεται νομικά, εντός αυτού του πλαισίου, να μειώσει τις εκπομπές της κατά τουλάχιστον 55% έως το 2030, σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990, με απώτερο σκοπό την αναχαίτηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη και τελικώς την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Η υλοποίηση των παραπάνω στόχων απαιτεί το ριζικό μετασχηματισμό του τρόπου τόσο που παράγουμε όσο και του τρόπου που καταναλώνουμε, με την υιοθέτηση νέων και πράσινων τεχνολογιών (11).

1.2 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

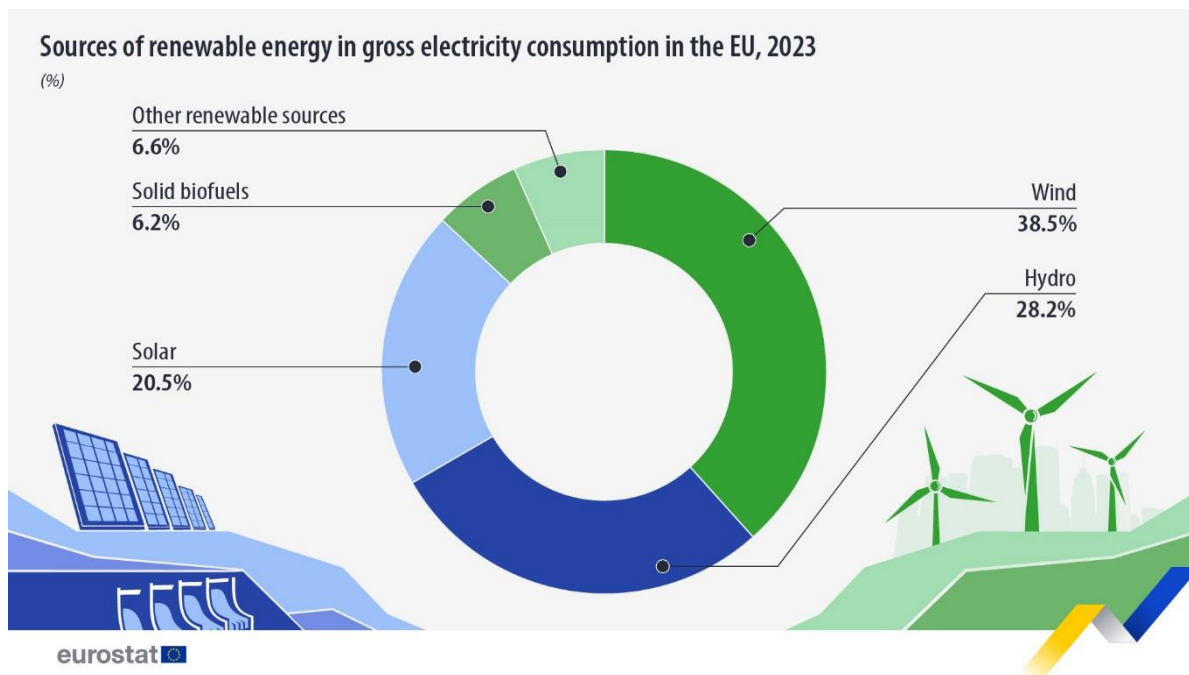
Η απανθρακοποίηση του ενεργειακού συστήματος, μέσω της αξιοποίησης εναλλακτικών μορφών ενέργειας με χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αποτελεί ένα βήμα καίριας σημασίας στον αγώνα κατά της κλιματικής αλλαγής. Η ελαχιστοποίηση της χρήσης ορυκτών καυσίμων και η στροφή προς πράσινες και ανθρακικά ουδέτερες τεχνολογίες, διαμορφώνουν με αισιοδοξία ένα βιώσιμο και ασφαλές μέλλον, ενισχύοντας ταυτόχρονα την ενεργειακή ανεξαρτησία από ρυπογόνες πηγές.

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, όπως είναι η ηλιακή, η αιολική, η υδροηλεκτρική ενέργεια, έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον της παγκόσμιας κοινότητας εξαιτίας του βιώσιμου και περιβαλλοντικά φιλικού τους χαρακτήρα αλλά και της ανεξάντλητης φύσης τους. Θεωρούνται ως η απόλυτη λύση στην πρόκληση της πολυπόθητης ενεργειακής μετάβασης, προσφέροντας τη δυνατότητα παραγωγής καθαρής ενέργειας με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Οι ΑΠΕ συμβάλλουν σημαντικά στην επίτευξη ουδετερότητας ως προς τον άνθρακα και στο μετριασμό των εκπομπών GHG, κυρίως χάρη στις μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά τη φάση λειτουργίας τους (12).

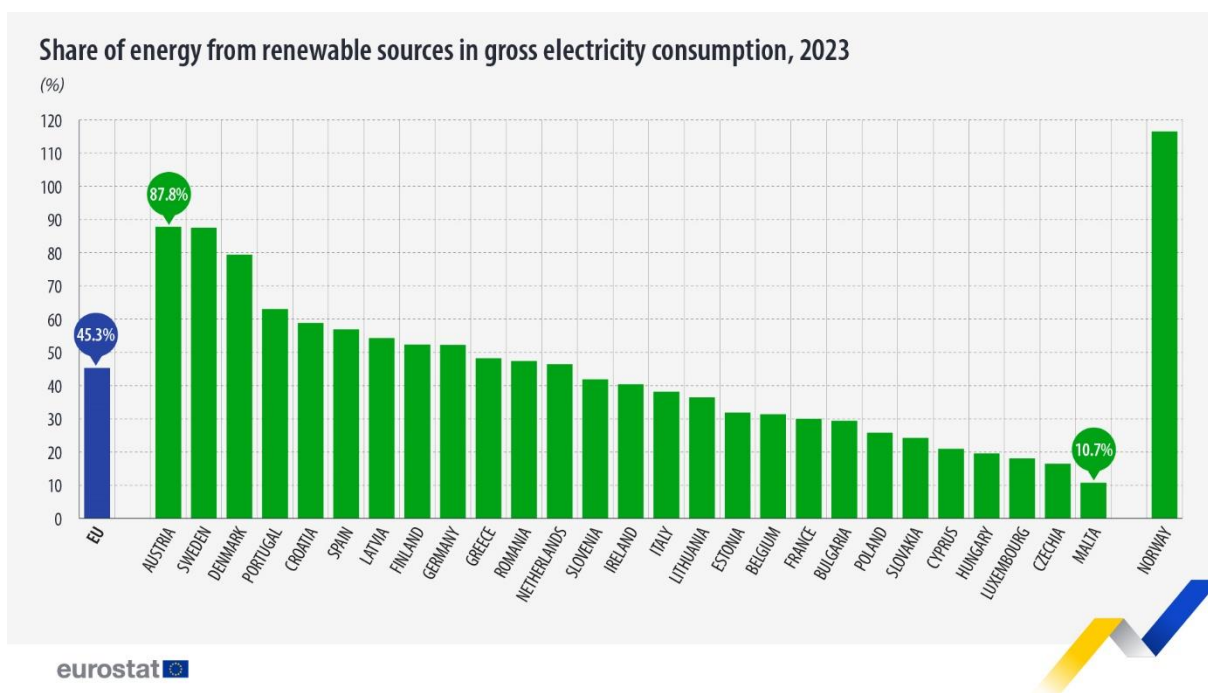
Είναι, επομένως, σαφές ότι η υποκατάσταση των ορυκτών καυσίμων από τις ΑΠΕ, σε τομείς υψηλής συμβολής στην κλιματική αλλαγή, είναι απαραίτητη για την επίτευξη των φιλόδοξων κλιματικών στόχων που έχουν τεθεί σε παγκόσμιο επίπεδο. Η ΕΕ, κινούμενη προς αυτή την κατεύθυνση, στοχεύει στην αύξηση του μεριδίου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στη συνολική ενεργειακή κατανάλωση σε ποσοστό που θα αγγίζει τουλάχιστον το 42.5% μέχρι το 2030, σύμφωνα με την αναθεωρημένη οδηγία. Αυτό σημαίνει το διπλασιασμό του υφιστάμενου μεριδίου τους στην Ευρώπη (13).

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται πρωτίστως στον τομέα της παραγωγής ενέργειας, δεδομένης της σημαντικής συμμετοχής του στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και ακολούθως στις μεταφορές και τη βιομηχανία, που παρουσιάζουν εξίσου αυξημένο ανθρακικό αποτύπωμα. Ο

απώτερος σκοπός είναι η επιτάχυνση της ενσωμάτωσης των βιώσιμων πηγών ενέργειας στο ενεργειακό μείγμα και τελικώς η απανθρακοποίηση του δικτύου (13). Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως το ποσοστό ηλεκτροπαραγωγής στην ΕΕ που προέρχεται από τις ΑΠΕ έφτασε το 46.9% για τη χρονιά 2024, χαρακτηρίζοντας την ως χρονιά – ρεκόρ (14). Όσον αφορά την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, στα παρακάτω γραφήματα φαίνεται η κατανομή των ΑΠΕ στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στην ΕΕ και το μερίδιο ΑΠΕ στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά χώρα, για το 2023 (15).

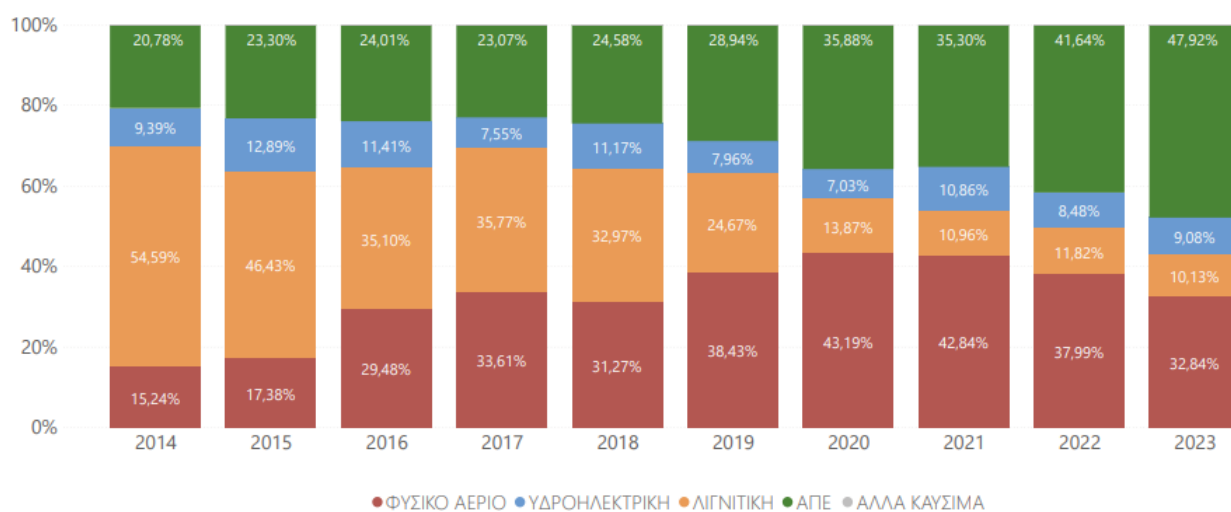


Γράφημα 1.2.1. Κατανομή ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, 2023 (15)



Γράφημα 1.2.2. Μερίδιο ΑΠΕ στην ακαθάριστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ανά χώρα, 2023 (15)

Τα δεδομένα για την Ελλάδα είναι εξίσου εντυπωσιακά, καθώς οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας έχουν εισέλθει δυναμικά στον ενεργειακό τομέα. Οι ευνοϊκές κλιματολογικές συνθήκες της χώρας, όπως είναι η υψηλή ηλιοφάνεια και το σημαντικό αιολικό δυναμικό, συμβάλλουν καθοριστικά στην ευρεία χρήση που γνωρίζουν σήμερα, με το ποσοστό παραγωγής τους να αυξάνεται συνεχώς. Αυτό έχει οδηγήσει σε μεταβολές του ετήσιου μείγματος ηλεκτροπαραγωγής τα τελευταία χρόνια, με τις ΑΠΕ, συμπεριλαμβανομένων των μεγάλων υδροηλεκτρικών σταθμών, να καταλαμβάνουν την πρώτη θέση συμμετοχής αγγίζοντας το 57% για το 2023. Αντίστοιχα για την ίδια χρονιά, όσον αφορά την τελική κατανάλωση, το 43% των εθνικών ενεργειακών απαιτήσεων καλύφθηκε από ανανεώσιμες πηγές. Τα ποσοστά αυτά αναμένεται να αυξηθούν τα επόμενα χρόνια, σύμφωνα με τους εθνικούς στόχους στο πλαίσιο της παγκόσμιας δράσης κατά της κλιματικής αλλαγής (16).



Γράφημα 1.2.3 10ετής εξέλιξη του μείγματος ηλεκτροπαραγωγής στην Ελλάδα (16)

1.2.1 Προκλήσεις διείσδυσης ΑΠΕ και αποθήκευση ενέργειας

Η αυξανόμενη διείσδυση των ΑΠΕ τόσο στο ευρωπαϊκό όσο και στο παγκόσμιο ενεργειακό μείγμα συνοδεύεται από αρκετά εμπόδια και περιορισμούς, ενώ αναδεικνύει νέες προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την εκτεταμένη αξιοποίηση τους. Οι συζητήσεις επικεντρώνονται στην ικανότητα τους να υποκαταστήσουν πλήρως τα ορυκτά καύσιμα καθώς και στο βέλτιστο τρόπο μετάβασης σε αυτές τις εναλλακτικές λύσεις, υπό το πρίσμα της ραγδαίας αύξησης κατανάλωσης ενέργειας. Ειδικότερα, η μετάβαση σε μία πράσινη οικονομία με μεγάλη συμμετοχή των ΑΠΕ προσκρούει σε φραγμούς οικονομικής, περιβαλλοντικής, τεχνικής αλλά και θεσμικής φύσης, λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι υφιστάμενες πολιτικές είναι διαμορφωμένες για μία ενεργειακή αγορά όπου επικρατούν τα ορυκτά καύσιμα.

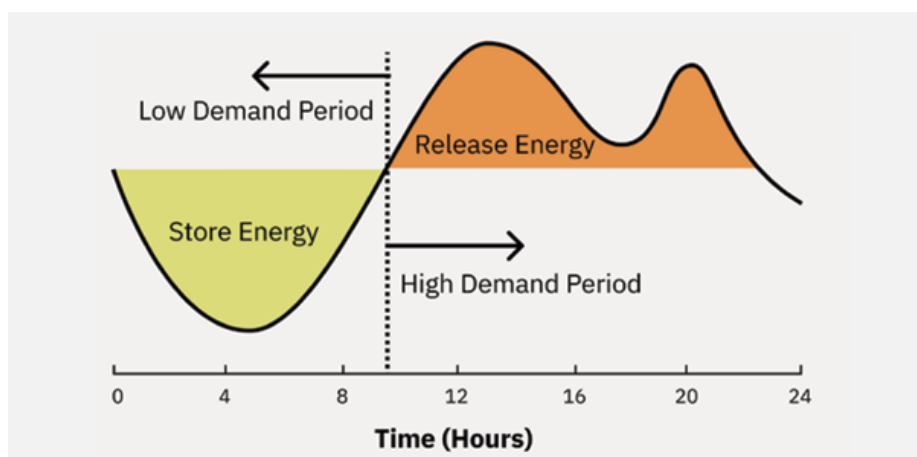
Από οικονομικής άποψης απαιτούνται επενδύσεις αυξημένου κεφαλαίου, ενώ παρουσιάζουν και υψηλές λειτουργικές δαπάνες που παραπέμπουν σε υψηλό ενεργειακό κόστος, με αποτέλεσμα να μην είναι ιδιαίτερα ανταγωνιστικές απέναντι στις ώριμες συμβατικές τεχνολογίες. Επιπλέον, παρόλο που οι ΑΠΕ θεωρούνται ανθρακικά ουδέτερες κατά τη φάση λειτουργίας τους, σε επίπεδο κύκλου ζωής τα πράγματα είναι διαφορετικά. Η κατασκευή των απαραίτητων συστημάτων, η

μεταφορά τους αλλά και η χρήση γης για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών και αιολικών πάρκων συνδέονται με αρκετές περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, θέτοντας ερωτήματα βιωσιμότητας. Η τεχνολογική πρόοδος, όμως, δημιουργεί προϋποθέσεις για τη διαχείριση των παραπάνω δυσκολιών, με τις λύσεις για την υπέρβαση τους να βρίσκονται προ των πυλών.

Τα τεχνικά εμπόδια περιλαμβάνουν ζητήματα συνδεσιμότητας και επαρκούς χωρητικότητας των δικτύων μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, τα οποία με τη σειρά τους απαιτούν την ανάπτυξη των σχετικών υποδομών. Μεταξύ των κυριότερων περιορισμών συγκαταλέγεται και το εγγενές απρόβλεπτο του χαρακτήρα των ΑΠΕ. Παρότι είναι ποσοτικά ανεξάντλητες, η διαθεσιμότητα, και κατ' επέκταση η παραγόμενη ισχύς τους, εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από μεταβλητές καιρικές συνθήκες, όπως η ηλιακή ακτινοβολία και ο άνεμος, οι οποίες δεν είναι εύκολα προβλέψιμες. Η αβεβαιότητα και η διαλείπουσα φύση τους προκαλεί ανισορροπία μεταξύ παραγωγής – ζήτησης και οδηγεί σε μείωση της αξιοπιστίας αλλά και των συντελεστών εκμεταλλευσιμότητας των ΑΠΕ, καθιστώντας δύσκολη την περαιτέρω διεξόδηση τους στο ενεργειακό μοντέλο.

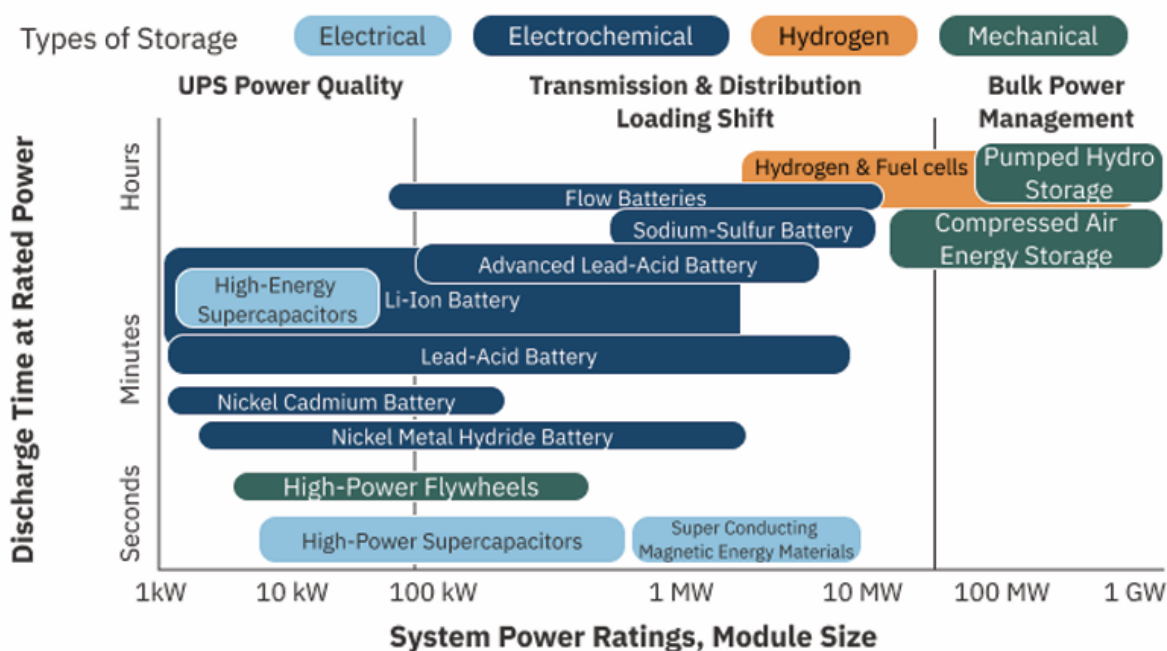
Η μεταβλητότητα των ΑΠΕ μπορεί να οδηγήσει είτε σε ανεπάρκεια κάλυψης της ζήτησης είτε σε υπερπροσφορά ηλεκτρικής ενέργειας, συνθήκη κατά την οποία η παραγωγή υπερβαίνει το συνολικό φορτίο, επηρεάζοντας αρνητικά τη σταθερότητα του ηλεκτρικού δικτύου. Χαρακτηριστική περίπτωση αποτελεί η παραγωγή από φωτοβολταϊκά, η οποία κορυφώνεται τις μεσημβρινές ώρες, με την αιχμή ζήτησης να παρατηρείται κυρίως τις απογευματινές ώρες. Για την εξομάλυνση των διακυμάνσεων προσφοράς-ζήτησης και επομένως των προβλημάτων που δημιουργούνται, χρήζει ιδιαίτερης σημασίας η άμεση και ουσιαστική ενσωμάτωση αποδοτικών συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας (12), (17).

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να προσφέρει τόσο ανοδική όσο και καθοδική ευελιξία στο σύστημα, απορροφώντας την πλεονάζουσα ενέργεια σε περιόδους χαμηλής ζήτησης ή υψηλής παραγωγής και απελευθερώνοντας την σε μεταγενέστερη χρονική στιγμή, όταν η ζήτηση υπερβαίνει την προσφορά (18). Σε αντίθεση με τα συμβατικά καύσιμα, όπου η ποσότητα ενέργειας μπορεί να ρυθμιστεί άμεσα μέσω της τροφοδοσίας καυσίμου, στις ΑΠΕ απαιτείται ενδιάμεση διαχείριση μέσω αποθήκευσης, ώστε να διατηρηθεί η ισορροπία στο δίκτυο (17).



Εικόνα 1.2.1 Αρχή λειτουργίας συστήματος αποθήκευσης ενέργειας σε ημερήσια βάση (18)

Οι τεχνολογίες αποθήκευσης ενέργειας ποικίλουν ως προς τη μορφή, τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τη διάρκεια ζωής, την αποδοτικότητα, το μέγεθος και κατηγοριοποιούνται με βάση την αρχή λειτουργίας τους σε χημικές, ηλεκτροχημικές, μηχανικές, ηλεκτρικές και θερμικές. Ανάλογα με το χρονικό ορίζοντα χρήσης και τη διάρκεια αποθήκευσης διακρίνονται και σε βραχυπρόθεσμες, μεσοπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες προσφέροντας δυνατότητα αποθήκευσης για ώρες, μέρες και μήνες αντίστοιχα. Η πιο διαδεδομένη τεχνολογία είναι η αντλησιοταμίευση υδροηλεκτρικών σταθμών, η οποία εκμεταλλεύεται το δυναμικό των υδάτων και προσφέρει δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας ενώ καλύπτει σχεδόν το 96% της παγκόσμιας εγκατεστημένης χωρητικότητας αποθήκευσης. Ωστόσο, οι μπαταρίες αναδεικνύονται πλέον ως οι πιο προσιτές και σχετικά οικονομικές μορφές αποθήκευσης, διαθέσιμες σε μεγάλη ποικιλία μεγεθών, με την προσοχή να στρέφεται κυρίως στις μπαταρίες ιόντων λιθίου (19), (18).



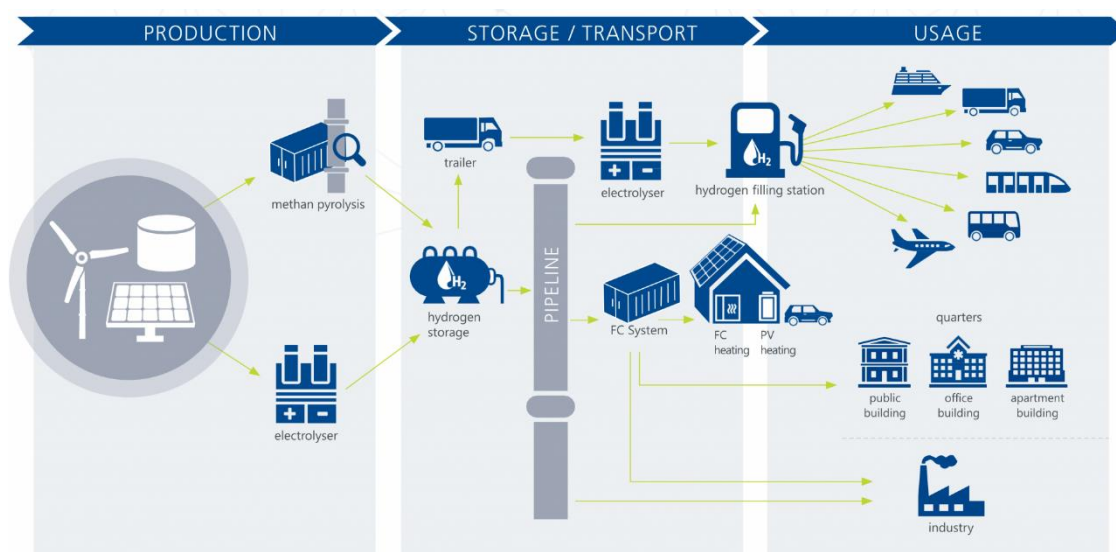
Εικόνα 1.2.2 Τεχνολογίες αποθήκευσης ως προς διάρκεια αποθήκευσης και χωρητικότητα (18)

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχουν προσελκύσει τον τελευταίο καιρό οι τεχνολογίες power-to-x, οι οποίες μετατρέπουν την πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια σε άλλες μορφές, χωρίς να την ανατροφοδοτούν άμεσα στο δίκτυο, ενισχύοντας με αυτό τον τρόπο την ισορροπία του ενεργειακού συστήματος με την προσθήκη ευέλικτων φορτίων. Ειδικότερα, η τεχνολογία power-to-gas, χρησιμοποιεί το ηλεκτρικό ρεύμα για την ενεργοποίηση χημικών αντιδράσεων, λαμβάνοντας ως αποτέλεσμα αέρια προϊόντα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η ηλεκτρόλυση του νερού προς παραγωγή υδρογόνου, το οποίο ακολούθως μπορεί να χρησιμοποιηθεί εκ νέου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, εξυπηρετώντας τη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας σε μακροπρόθεσμη βάση. Το υδρογόνο δύναται να απασχολήσει πολύ στο μέλλον τον ενεργειακό τομέα, αποτελώντας μία ελκυστική επιλογή στο δρόμο προς ένα βιώσιμο και πράσινο ενεργειακό σύστημα (19).

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζουν στο σύνολο τους πολλαπλά οφέλη, όπως η μετατόπιση φορτίου από περιόδους αιχμής σε περιόδους χαμηλής ζήτησης, η παροχή εφεδρειών, η βελτίωση της αξιοπιστίας και ευελιξίας με τη μείωση των διακυμάνσεων ισχύος, αλλά και η αποτελεσματική απόκριση στη ζήτηση (18), λαμβάνοντας κυρίαρχο ρόλο στη διεύθυνση των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα. Για την επίτευξη, επομένως, των στόχων μείωσης των εκπομπών αλλά και της επιτυχής ενεργειακής μετάβασης με πυλώνα τις ΑΠΕ είναι αναγκαία η περαιτέρω ανάπτυξη της αποθήκευσης, η οποία προϋποθέτει ταυτόχρονα την αντιμετώπιση ορισμένων εμποδίων, όπως το κόστος, η απόδοση, ο χρόνος ζωής καθώς και η ανακύκλωση των υλικών, ειδικά όσον αφορά τις μπαταρίες (19).

1.3 Ο ρόλος του υδρογόνου στην ενεργειακή μετάβαση

Η απανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα και η επιτυχημένη διεύθυνση των ΑΠΕ σε μεγάλη κλίμακα προϋποθέτουν την ενσωμάτωση, πέρα από την αποθήκευση, ευέλικτων και βιώσιμων τεχνολογιών που μπορούν να εξισορροπήσουν την παραγωγή και να συμβάλλουν ταυτόχρονα στη βελτίωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Σε αυτό το πλαίσιο, οι τεχνολογίες υδρογόνου αναδύονται ως καταλύτες αυτής της ενεργειακής μετάβασης προσφέροντας ενεργειακές λύσεις σε ποικίλες εφαρμογές. Το ευρύ φάσμα χρήσεων του αποτυπώνεται στην ακόλουθη εικόνα, ως ένα πιθανό οικοσύστημα (20).



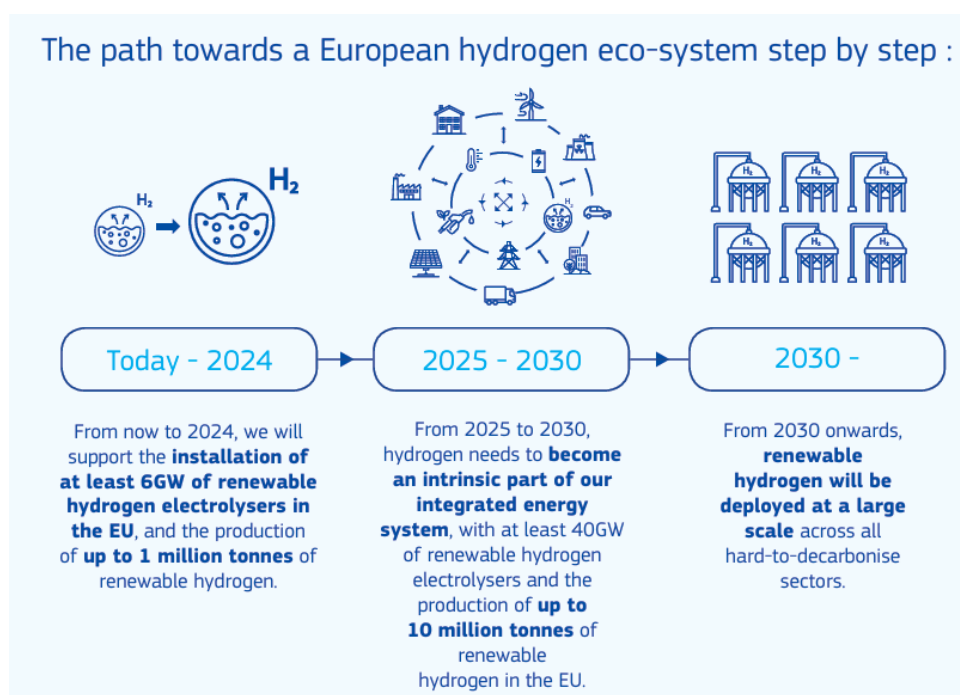
Εικόνα 1.3.1 Οικοσύστημα υδρογόνου (20)

Το υδρογόνο μπορεί να λειτουργήσει τόσο ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας όσο και ως καύσιμο σε τομείς όπως είναι η ηλεκτροπαραγωγή και οι μεταφορές, παρέχοντας υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά την κατανάλωση του. Ως τεχνολογία αποθήκευσης με ημερήσια έως εποχιακή δυναμικότητα αποθήκευσης, power – to – hydrogen, συμβάλλει στην εξομάλυνση της μεταβλητότητας των ΑΠΕ και στη σταθεροποίηση του δικτύου, αξιοποιώντας την πλεονάζουσα ανανεώσιμη ενέργεια σε περιόδους χαμηλής

ζήτησης, για την παραγωγή υδρογόνου μέσω της ηλεκτρόλυσης του νερού, λειτουργώντας στην ουσία ως ένα ελεγχόμενο και ευέλικτο φορτίο.

Επιπλέον, το υδρογόνο έχει τη δυνατότητα να υποκαταστήσει τα ορυκτά καύσιμα αναφορικά με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου καθώς σε τομείς όπου ο εξηλεκτρισμός είναι δύσκολος, όπως η βιομηχανία, η θέρμανση, οι μεταφορές και η ναυτιλία. Ένα ακόμα πλεονέκτημα που παρουσιάζει είναι η σχετικά εύκολη ενσωμάτωση του σε υφιστάμενες υποδομές, όπως είναι το δίκτυο φυσικού αερίου, μέσω ανάμειξης ή καθαρής ροής υδρογόνου, διευκολύνοντας την ενεργειακή μετάβαση με χαμηλό κόστος προσαρμογής (20), (21).

Η αξιοποίηση, λοιπόν, του υδρογόνου ενισχύει τη διασφάλιση της ενεργειακής αυτάρκειας και ασφάλειας αλλά και της ανθεκτικότητας των ενεργειακών συστημάτων. Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, έχουν τεθεί ήδη φιλόδοξα σχέδια για την ανάπτυξη τεχνολογιών υδρογόνου που στοχεύουν σε μία Ευρώπη μηδενικών εκπομπών άνθρακα. Μέχρι το 2030 η εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ηλεκτρόλυσης αναμένεται να αγγίξει τα 40GW με την παραγωγή ανανεώσιμου υδρογόνου να υπολογίζεται σε περίπου 10 εκατομμύρια τόνους, ενώ μετά το 2030 προβλέπεται πως το υδρογόνο θα αναπτυχθεί σε μεγάλη κλίμακα σε πολυάριθμους τομείς (21).



Εικόνα 1.3.2 Πορεία προς ένα Ευρωπαϊκό οικοσύστημα υδρογόνου (21)

Επομένως, η παρουσία του υδρογόνου στο ενεργειακό μείγμα είναι ζωτικής σημασίας και διαδραματίζει ολοένα και σημαντικότερο ρόλο στην επίτευξη των διεθνών στόχων για την κλιματική αλλαγή και της αυξανόμενης διείσδυσης των ΑΠΕ. Η ανάπτυξη όμως των τεχνολογιών υδρογόνου πρέπει να βασιστεί κυρίως στο ανανεώσιμο υδρογόνο που παράγεται με τη χρήση αιολικής και ηλιακής ενέργειας, και όχι τόσο σε άλλες μορφές υδρογόνου χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, καθώς αποτελεί τη μόνη πλήρως συμβατή με τους στόχους επιλογή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΤΟ ΥΔΡΟΓΟΝΟ ΩΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟΣ ΦΟΡΕΑΣ

2.1 Γενικά στοιχεία

Το υδρογόνο είναι ένα χημικό στοιχείο γνωστό περισσότερο από 200 χρόνια, με την πρώτη του αναφορά να χρονολογείται στα τέλη του 18^{ου} αιώνα, όταν παρατηρήθηκε η παραγωγή ενός άγνωστου αερίου κατά την αντίδραση του σιδήρου με θειικό οξύ. Μετά από πολλές έρευνες και μελέτες, το 1776 το υδρογόνο αναγνωρίστηκε ως διακριτό στοιχείο, παίρνοντας το όνομα του, ενώ το 1800 χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά η ηλεκτρόλυση του νερού προς παραγωγή καθαρού υδρογόνου. Κατά τις επόμενες δεκαετίες, το υδρογόνο βρήκε ποικίλες εφαρμογές κυρίως στις αέριες μεταφορές και στις διαστημικές τεχνολογίες, ωστόσο η ενεργειακή του σπουδαιότητα ενισχύθηκε περισσότερο μετά την παγκόσμια ενεργειακή κρίση του 1974 (22).

Σήμερα, το υδρογόνο αναγνωρίζεται ως ένας κρίσιμος ενεργειακός φορέας, με τη δυνατότητα να συμβάλλει ουσιαστικά στην απανθρακοποίηση του ενεργειακού συστήματος, πρωτίστως λόγω των σπουδαίων ιδιοτήτων που το χαρακτηρίζουν. Η ευελιξία στη χρήση του, ως καύσιμο, πρώτη ύλη και μέσο αποθήκευσης ενέργειας, το καθιστά κατάλληλο για χρήση σε ποικίλους τομείς, όπως οι μεταφορές, η ηλεκτροπαραγωγή και η βιομηχανία.

2.1.1 Ιδιότητες υδρογόνου

Το υδρογόνο (H) είναι το πρώτο στοιχείο του Περιοδικού Πίνακα και το πιο άφθονο χημικό στοιχείο πάνω στον πλανήτη, διαδραματίζοντας ζωτικό ρόλο στη διατήρηση της ζωής στη Γη. Είναι το ελαφρύτερο και απλούστερο στοιχείο, που αποτελείται από ένα ηλεκτρόνιο και ένα πρωτόνιο, με ατομικό βάρος 1.008 g/mol. Παρά την αυξημένη διαθεσιμότητα του στη φύση, δεν συναντάται ελεύθερο, αλλά εντοπίζεται σε συνδυασμένη, με άλλα στοιχεία, μορφή, όπως στο νερό (H₂O), στους υδρογονάνθρακες και σε πλήθος οργανικών και ανόργανων ενώσεων.

Στη μοριακή του δομή (H₂) αποτελείται από δύο άτομα υδρογόνου ενωμένα με απλό ομοιοπολικό δεσμό. Είναι άχρωμο, άοσμο, άγευστο και μη τοξικό αέριο. Σε συνθήκες περιβάλλοντος είναι ιδιαίτερα ελαφρύ, με πυκνότητα μικρότερη από αυτή του αέρα και χαρακτηρίζεται από υψηλή πτητικότητα και ευφλεκτότητα. Παρότι είναι ιδιαίτερα εύφλεκτο, η καύση του δεν παράγει τοξικά υποπροϊόντα, γεγονός που ενισχύει το προφίλ ασφαλείας του σε περιπτώσεις πυρκαγιάς, μειώνοντας τα ποσοστά ασφυξίας. Παρουσιάζει επιπλέον σημαντική ευαισθησία στην έκρηξη, με την τεχνολογία και τους κανονισμούς ασφαλείας να είναι ήδη διαθέσιμοι προς αποφυγή ενός ανεπιθύμητου προβλήματος. (22), (23).

Αξιοσημείωτο είναι, επίσης, ότι όταν βομβαρδίζεται από νετρόνια, μπορούν να προκύψουν ισότοπα υδρογόνου ²H και ³H, τα οποία είναι γνωστά για το ραδιενεργό τους χαρακτήρα, ενώ χρησιμοποιούνται και σε πυρηνικές εφαρμογές. Στον παρακάτω πίνακα παρατίθενται ορισμένες βασικές φυσικοχημικές ιδιότητες του υδρογόνου.

Πίνακας 2.1.1 Φυσικοχημικές ιδιότητες υδρογόνου (23)

Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Όνομα, σύμβολο	Υδρογόνο, H	-
Κατηγορία	Μη μεταλλικό	-
Ατομικό βάρος	1.008	g/mol
Μοριακό βάρος H ₂	2.016	g/mol
Φάση	Αέριο	
Πυκνότητα αερίου	0.089	g/l
Πυκνότητα υγρού	0.07	g/cm ³
Ιονίζουσα ακτινοβολία	13.5989	eV
Σημείο τήξης	-259.14	°C
Σημείο βρασμού	-252.87	°C
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (LHV)	118.8	MJ/kg
Ανώτερη θερμογόνος δύναμη (HHV)	142	MJ/kg
Θερμοκρασία αδιαβατικής φλόγας	2107	°C
Εύρος αναφλεξιμότητας στον αέρα	4 έως 75	%
Ταχύτητα φλόγας	3.06	m/s
Σημείο ανάφλεξης	-253	°C
Σημείο αυτανάφλεξης	585	°C
Αριθμός οκτανίων (RON)	> 130	-

2.1.2 Υδρογόνο ως καύσιμο

Το υδρογόνο έχει αναδειχθεί ως ένα πολλά υποσχόμενο καύσιμο του μέλλοντος, προσελκύοντας το ενδιαφέρον της επιστημονικής και τεχνολογικής κοινότητας, εξαιτίας των μοναδικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων του καθώς και της δυνατότητας του να λειτουργεί ως φορέας καθαρής ενέργειας. Αποτελεί ήδη ένα αποδοτικό μέσο αποθήκευσης ενέργειας ενώ ως καύσιμο είναι ιδιαίτερα ελκυστικό λόγω των μηδενικών εκπομπών που παράγονται κατά την καύση του. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί βασικό κίνητρο και εργαλείο για την ανάπτυξη μιας οικονομίας υδρογόνου στο πλαίσιο της παγκόσμιας προσπάθειας απαλλαγής από τον άνθρακα.

Παρά το γεγονός ότι το υδρογόνο είναι μία τεχνολογία μηδενικών εκπομπών κατά το στάδιο χρήσης, η συνολική περιβαλλοντική του αποδοτικότητα εξαρτάται τόσο από την τεχνολογία παραγωγής του όσο και από την πηγή ενέργειας που αξιοποιείται σε αυτή τη διαδικασία. Μπορεί να παραχθεί από μία πληθώρα τεχνολογιών και πρώτων υλών, όπως το φυσικό αέριο, ο άνθρακας, το νερό ή η βιομάζα. Ορισμένες από τις μεθόδους παραγωγής του θεωρούνται «πράσινες», με χαρακτηριστικό παράδειγμα την ηλεκτρόλυση νερού με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Μεταξύ των σημαντικότερων πλεονεκτημάτων που παρουσιάζει το υδρογόνο συγκαταλέγεται το υψηλό ενεργειακού του περιεχόμενο ανά μονάδα μάζας, σχεδόν τριπλάσιο από εκείνο των συμβατικών καυσίμων, καθώς και η μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα του. Η χρήση του συνοδεύεται από μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αερίων του θερμοκηπίου, με μοναδικό προϊόν του το νερό, ανεξαρτήτως τεχνολογίας αξιοποίησης. Από την άλλη, τα ορυκτά καύσιμα είναι περιορισμένοι φυσικοί πόροι που κατά την καύση τους απελευθερώνουν σημαντικές ποσότητες θερμικών και αέριων ρύπων στην ατμόσφαιρα.

Ως καύσιμο μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο σε κυψέλες καυσίμου όσο και απευθείας σε κατάλληλα διαμορφωμένους κινητήρες εσωτερικής καύσης ή τουρμπίνες. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί σε μείγμα με άλλα καύσιμα, προσφέροντας μία μεταβατική λύση προς τη σταδιακή απανθρακοποίηση. Το υδρογόνο διαθέτει ευρύ φάσμα ευφλεκτότητας και χαμηλή θερμοκρασία ανάφλεξης, χαρακτηριστικά που επιτρέπουν την εύκολη και ταχεία καύση του με μικρότερες απαιτήσεις σε εξοπλισμό εκκίνησης και ανάφλεξης, συγκριτικά με τα ορυκτά καύσιμα. Ο υψηλός αριθμός οκτανίου του το καθιστά ιδανικό για χρήση σε κινητήρες υψηλής απόδοσης, ενώ η γρήγορη διασπορά του στην ατμόσφαιρα σε περίπτωση διαρροής το αναδεικνύει ως, σχετικά, ασφαλέστερο σε σύγκριση με άλλα καύσιμα, υπό την προϋπόθεση ότι τηρούνται αυστηρά οι κανονισμοί ασφαλείας.

Παρά τα παραπάνω πλεονεκτήματα, η αξιοποίηση του υδρογόνου ως καύσιμο συνοδεύεται από σημαντικές τεχνολογικές και οικονομικές προκλήσεις. Το μικρό μοριακό του μέγεθος επιτρέπει τη διάχυση του μέσω των υλικών, φαινόμενο γνωστό ως ευθραυστότητα υδρογόνου, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μηχανική υποβάθμιση ή ακόμα και αστοχία ορισμένων υλικών σε σημείο διαρροής. Η επιλογή κατάλληλων υλικών και ο ειδικός σχεδιασμός των συστημάτων αποθήκευσης και μεταφοράς, αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ασφάλεια και αξιοπιστία των σχετικών τεχνολογιών.

Επιπλέον, το υδρογόνο παρουσιάζει χαμηλή ενεργειακή πυκνότητα ανά μονάδα όγκου, ακόμα και σε συμπιεσμένη ή υγροποιημένη μορφή και ως εκ τούτου απαιτείται μεγαλύτερη χωρητικότητα και δεξαμενές για την αποθήκευση του, συγκριτικά με τους υδρογονάνθρακες. Η υψηλή πτητικότητα που το χαρακτηρίζει, δυσχεραίνει την αποθήκευση και μεταφορά του καθιστώντας αυτές τις διαδικασίες τεχνικά απαιτητικές. Επιπρόσθετα, η υγροποίησή του απαιτεί εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες κάτι που συνεπάγεται υψηλό ενεργειακό κόστος και πολύπλοκες υποδομές. Συνεπώς, είναι φανερό ότι η πλήρης ένταξη του υδρογόνου στο ενεργειακό μείγμα χρήζει περαιτέρω τεχνολογικής προόδου, στοχευμένων επενδύσεων σε κατάλληλες υποδομές και ολοκληρωμένων πολιτικών υποστήριξης, ώστε να ξεπεραστούν τα σημερινά εμπόδια και να αξιοποιηθούν πλήρως τα πλεονεκτήματα του ως καθαρό καύσιμο του μέλλοντος (22), (23).

2.1.3 Χρώματα υδρογόνου

Παρόλο που το υδρογόνο θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη ενεργειακή επιλογή, η περιβαλλοντική βιωσιμότητα του εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το στάδιο παραγωγής του, τόσο από την τεχνολογία όσο και από τις πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, οι οποίες συνεπάγονται

διαφορετικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Σήμερα, η πλειονότητα της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου εξακολουθεί να βασίζεται σε ρυπογόνες μεθόδους με αξιοποίηση ορυκτών καυσίμων, οδηγώντας σε σημαντικές εκπομπές CO₂. Συνεπώς, η προσδοκία ότι το υδρογόνο θα συμβάλει καθοριστικά στη μείωση των εκπομπών δεν πρέπει να θεωρείται δεδομένη.

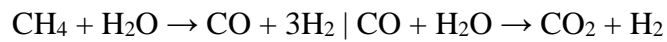
Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από μία πληθώρα πρωτογενών πηγών ενέργειας, πρώτων υλών και τεχνολογικών διαδρομών. Για τη διαφοροποίηση των τύπων υδρογόνου με βάση τις μεθόδους παραγωγής τους, έχει καθιερωθεί ένα άτυπο σύστημα «χρωματικής κωδικοποίησης». Το κάθε χρώμα αποτυπώνει βασικές πληροφορίες σχετικά με την πηγή ενέργειας, την πρώτη ύλη καθώς και το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της κάθε διεργασίας. Είναι προφανές ότι οι ποικίλες μέθοδοι παραγωγής συμβάλλουν διαφορετικά στο ανθρακικό αποτύπωμα, επηρεάζοντας το περιβαλλοντικό ισοζύγιο του τελικού προϊόντος (24).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζονται τα βασικά «χρώματα» του υδρογόνου καθώς και πληροφορίες σχετικά με τις μεθόδους παραγωγής τους και τις αντίστοιχες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα.

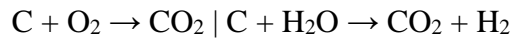
	Terminology	Technology	Feedstock/ Electricity source	GHG footprint*
PRODUCTION VIA ELECTRICITY	Green Hydrogen	Electrolysis	Wind Solar Hydro Geothermal Tidal	Minimal
	Purple/Pink Hydrogen		Nuclear	
	Yellow Hydrogen		Mixed-origin grid energy	Medium
PRODUCTION VIA FOSSIL FUELS	Blue Hydrogen	Natural gas reforming + CCUS Gasification + CCUS	Natural gas coal	Low
	Turquoise Hydrogen	Pyrolysis	Natural gas	Solid carbon (by-product)
	Grey Hydrogen	Natural gas reforming		Medium
	Brown Hydrogen	Gasification	Brown coal (lignite)	High
	Black Hydrogen		Black coal	

Εικόνα 2.1.1 Χρώματα υδρογόνου - Μέθοδοι παραγωγής και ανθρακικό αποτύπωμα (24)

Το γκρι υδρογόνο αποτυπώνει την παραγωγή του υδρογόνου μέσω της αναμόρφωσης του φυσικού αερίου με ατμό (steam methane reforming – SMR). Η τεχνολογία αυτή καταναλώνει περίπου το 6% του εξορυσσόμενου φυσικού αερίου παγκοσμίως και αποτελεί τη βασική μέθοδο παραγωγής υδρογόνου μέχρι και σήμερα. Αν και είναι μία από τις φθηνότερες διαθέσιμες διεργασίες, συνοδεύεται από σημαντικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Περιλαμβάνει την προεπεξεργασία του φυσικού αερίου, τη θέρμανση του νερού και τη μετατροπή του μεθανίου σε υδρογόνο και μονοξείδιο του άνθρακα, μέσω των εξής αντιδράσεων :

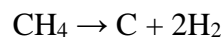


Για την παραγωγή του *καφέ και μαύρου υδρογόνου* λαμβάνει χώρα η διεργασία αεριοποίησης του άνθρακα (coal gasification), κατά την οποία χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη λιγνίτης ή μαύρος άνθρακας, αντίστοιχα, με τις ποσότητες αυτών να αγγίζουν το 2% του εξορυσσόμενου άνθρακα σε παγκόσμιο επίπεδο. Ο ξηρός και κονιοποιημένος άνθρακας εισάγεται στον αεριοποιητή και αντιδρά υπό υψηλή θερμοκρασία με οξυγόνο και ατμό, παράγοντας διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο, κατά τις παρακάτω αντιδράσεις :



Το *μπλε υδρογόνο* παράγεται μέσω αναμόρφωσης μεθανίου, όπως το γκρι υδρογόνο, με τη διαφορά ότι ενσωματώνει τεχνολογία δέσμευσης, αποθήκευσης και χρήσης άνθρακα (Carbon Capture and Utilization and Storage - CCUS). Η εφαρμογή CCUS μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO₂ κατά περίπου 50%, δεσμεύοντας το παραγόμενο διοξείδιο του άνθρακα. Ωστόσο η συνολική διαδικασία δεν είναι περιβαλλοντικά ουδέτερη, καθώς κατά τη μεταφορά και παραγωγή του φυσικού αερίου εκλύονται σημαντικές ποσότητες μεθανίου, γεγονός που δεν πρέπει να υποβιβάζεται. Το *μπλε υδρογόνο* θεωρείται ως γέφυρα από τη σταδιακή προς την πλήρη μετάβαση στο πράσινο υδρογόνο, προσφέροντας μεγαλύτερες ποσότητες παραγωγής με χαμηλότερο κόστος.

Σε αντίθεση με τις παραπάνω μεθόδους, το *τιρκουάζ υδρογόνο* παράγεται μέσω πυρόλυσης μεθανίου, διαδικασία κατά την οποία προκύπτει υδρογόνο ως προϊόν και στερεός άνθρακας ως παραπροϊόν, είτε σε μορφή ινών είτε σε νανοσωλήνες άνθρακα. Το παραγόμενο υλικό άνθρακα μπορεί να αξιοποιηθεί περαιτέρω σε άλλες εφαρμογές, ή να αποθηκευτεί, μειώνοντας το ανθρακικό αποτύπωμα της διεργασίας.



Ανάμεσα στις πιο καθαρές τεχνολογίες παραγωγής συγκαταλέγεται η ηλεκτρόλυση του νερού, κατά την οποία το νερό διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο με τη χρήση ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδρογόνο που προκύπτει χαρακτηρίζεται από υψηλή καθαρότητα (>99.95%) και χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Είναι αξιοσημείωτο ότι η ηλεκτρόλυση του νερού καλύπτει μόλις το 0.03% της παγκόσμιας παραγωγής υδρογόνου. Η χρωματική διαφοροποίηση των μορφών υδρογόνου εξαρτάται από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται κατά την ηλεκτρόλυση.

Το *κίτρινο υδρογόνο* παράγεται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, το οποίο δεν είναι πλήρως απανθρακοποιημένο και συνεπώς συνοδεύεται από σημαντικές εκπομπές CO₂. Το *ροζ ή μωβ υδρογόνο* χρησιμοποιεί ως πρωτογενή πηγή ενέργειας την πυρηνική. Αν και δεν προκαλεί άμεσες εκπομπές CO₂, η πυρηνική ενέργεια σχετίζεται με τη δημιουργία πυρηνικών αποβλήτων, μειώνοντας έτσι τα περιβαλλοντικά οφέλη. Η συγκεκριμένη προσέγγιση δεν προωθείται ιδιαίτερα στην ΕΕ, αλλά εφαρμόζεται σε χώρες όπως η Κίνα και η Ρωσία. Το *πράσινο υδρογόνο*, γνωστό και ως ανανεώσιμο, παράγεται από ηλεκτρόλυση με αποκλειστική χρήση ηλεκτρικής ενέργειας

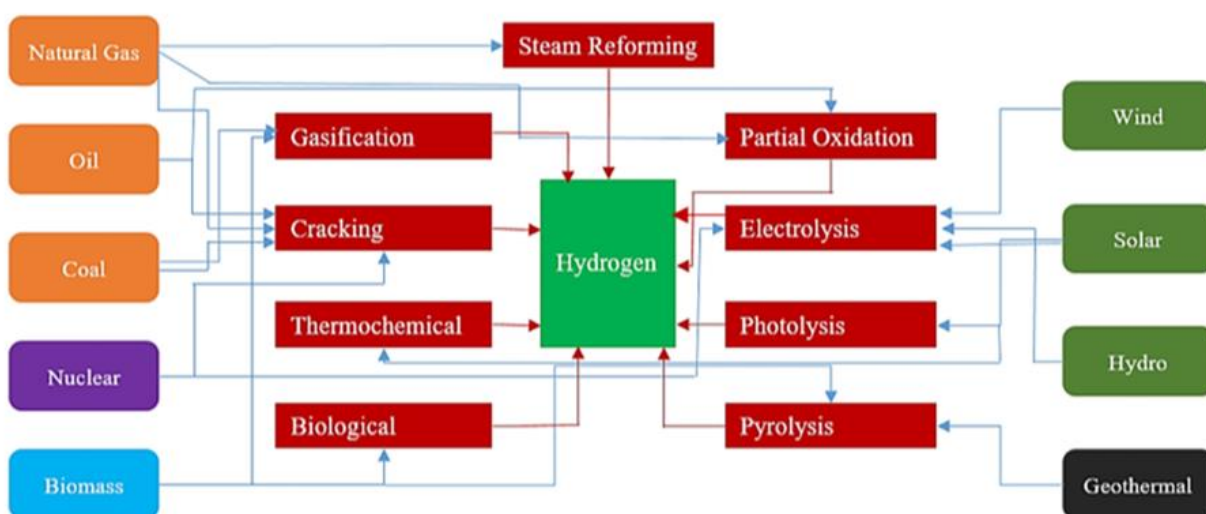
από ανανεώσιμες πηγές, όπως ηλιακή, αιολική και υδροηλεκτρική. Θεωρείται ως η πιο βιώσιμη επιλογή για μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα απαλλαγμένο από τον άνθρακα.

Ορισμένες από τις παραπάνω τεχνολογίες είναι ήδη ώριμες τεχνολογικά και έχουν ήδη βιομηχανική εφαρμογή, ενώ άλλες παραμένουν σε ερευνητικό ή πιλοτικό στάδιο. Εκτός αυτών, το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί και από βιομάζα, η οποία είναι ουδέτερη ως προς το διοξείδιο του άνθρακα, αφού τα παραγόμενο διοξείδιο είχε προηγουμένως δεσμευτεί από το περιβάλλον. Επιπλέον, υπάρχουν και άλλες, λιγότερο διαδεδομένες, μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου, στις οποίες έχουν αποδοθεί νέα χρώματα, όπως το γαλάζιο υδρογόνο, που παράγεται από πετρέλαιο μέσω καθαρών διεργασιών και το λευκό υδρογόνο, που παράγεται μέσω απευθείας διάσπασης του νερού με ηλιακή ενέργεια.

Συνολικά, μόνο το πράσινο υδρογόνο που παράγεται με ηλεκτρόλυση και χρήση ΑΠΕ παρουσιάζει πραγματικά χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα. Παρόλο που το ενδιαφέρον της επιστημονικής κοινότητας στρέφεται πλέον στην παραγωγή ανανεώσιμου/πράσινου υδρογόνου, η ευρεία υιοθέτηση καθαρών τεχνολογιών περιορίζεται επί του παρόντος από το υψηλότερο κόστος παραγωγής, συγκριτικά με τις συμβατικές και ώριμες μεθόδους (25), (26).

2.2 Παραγωγή υδρογόνου

Η παραγωγή του υδρογόνου μπορεί να επιτευχθεί μέσω ποικίλων τεχνικών και μεθόδων, αξιοποιώντας διαφορετικές πρώτες ύλες και πηγές ενέργειας, οι οποίες εξυπηρετούν την ανάγκη για καθαρές και βιώσιμες ενεργειακές λύσεις. Οι τεχνολογικές προσεγγίσεις παραγωγής ταξινομούνται γενικά σε τέσσερις βασικές κατηγορίες: θερμοχημικές, ηλεκτροχημικές, βιολογικές και φωτοκαταλυτικές (27). Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται μια συνοπτική επισκόπηση των διαφορετικών προσεγγίσεων παραγωγής υδρογόνου.



Εικόνα 2.2.1 Επισκόπηση προσεγγίσεων παραγωγής υδρογόνου (27)

Οι *θερμοχημικές μέθοδοι* βασίζονται σε χημικές αντιδράσεις οι οποίες πραγματοποιούνται υπό υψηλές θερμοκρασίες και έχουν ως αποτέλεσμα το μετασχηματισμό των πρώτων υλών σε αέριο υδρογόνο. Οι πιο διαδεδομένες διεργασίες είναι η αναμόρφωση μεθανίου με ατμό (SMR) και η αεριοποίηση του άνθρακα, όπως έχουν ήδη αναφερθεί (βλ. Ενότητα 2.1.3). Πρόκειται για ώριμες τεχνολογίες μεγάλης κλίμακας, οι οποίες είναι συμβατές με τις υφιστάμενες ενεργειακές υποδομές, προσφέροντας συγκριτικά χαμηλότερο αρχικό κόστος επένδυσης. Ωστόσο, οι περισσότερες παρουσιάζουν σημαντική εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα και ως εκ τούτου συνεπάγονται αυξημένες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, γεγονός που τις καθιστά περιβαλλοντικά επιβαρυντικές (27).

Οι *ηλεκτροχημικές μέθοδοι* αξιοποιούν την ηλεκτρική ενέργεια για την ενεργοποίηση διάφορων ηλεκτροχημικών αντιδράσεων προς παραγωγή υδρογόνου. Η πιο διαδεδομένη διεργασία είναι η ηλεκτρόλυση του νερού, κατά την οποία το νερό διασπάται σε μόρια υδρογόνου και οξυγόνου μέσω της διέλευσης ηλεκτρικού ρεύματος. Οι προσεγγίσεις αυτές μπορούν να θεωρηθούν φιλικές προς το περιβάλλον, ειδικά όταν η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια τροφοδοτείται από ανανεώσιμες πηγές, παράγοντας το γνωστό ως πράσινο ή ανανεώσιμο υδρογόνο (27), (28).

Όσον αφορά την ηλεκτρόλυση του νερού, έχουν αναπτυχθεί διάφορες τεχνολογίες, με τις κυριότερες την αλκαλική ηλεκτρόλυση (Alkaline Water Electrolysis – AWE), την ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Polymer Electrolyte Membrane - PEM) και την ηλεκτρολυτική κυψέλη στερεού οξειδίου (Solid Oxide Electrolyzer – SOE). Οι παραπάνω τεχνολογίες διαφοροποιούνται μεταξύ τους ως προς τις συνθήκες λειτουργίας, τους χρησιμοποιούμενους ηλεκτρολύτες καθώς και την αποδοτικότητα παραγωγής. Παρότι προσφέρουν προσαρμοστικότητα και υψηλή καθαρότητα υδρογόνου, συνοδεύονται από υψηλό επενδυτικό και λειτουργικό κόστος, κυρίως λόγω της χρήσης πολύτιμων καταλυτών και των υψηλών ενεργειακών απαιτήσεων.

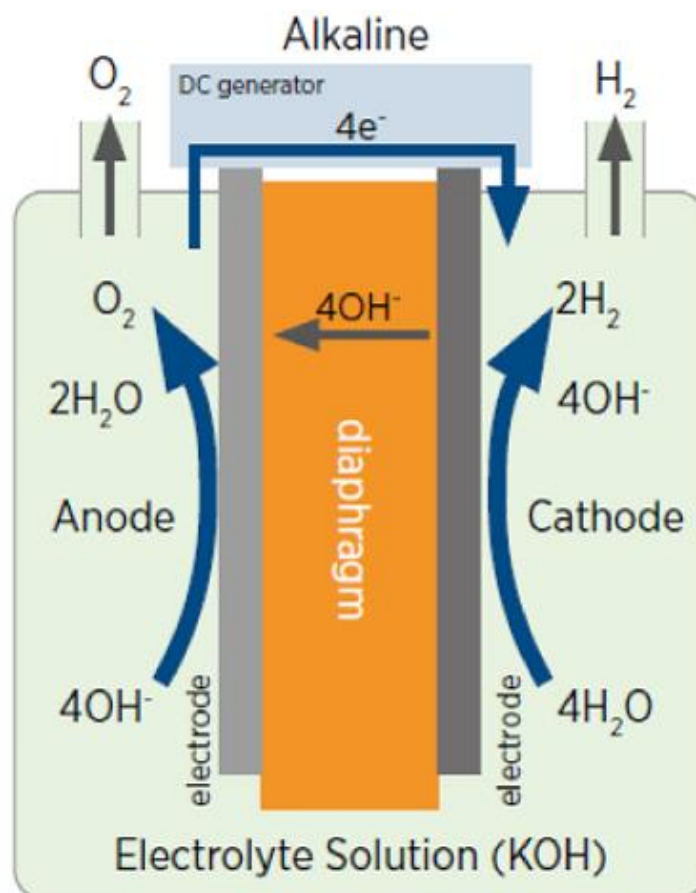
Οι *βιολογικές μέθοδοι* βασίζονται στη δράση μικροοργανισμών και ενζύμων, οι οποίοι λειτουργούν ως βιοκαταλύτες για τη μετατροπή οργανικών υποστρωμάτων σε υδρογόνο, μέσω φυσικών διεργασιών. Πρόκειται ίσως και για τις πιο περιβαλλοντικά φιλικές τεχνολογίες, καθώς λειτουργούν σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος με χαμηλές ενεργειακές ανάγκες και έχουν περιορισμένες βλαβερές εκπομπές. Ωστόσο, βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και χαρακτηρίζονται από μειωμένη απόδοση και αργό ρυθμό παραγωγής.

Τέλος, οι *φωτοκαταλυτικές μέθοδοι* χρησιμοποιούν φωτοκαταλύτες, υλικά ικανά να απορροφούν φως, για την αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας με στόχο τη διάσπαση του νερού προς παραγωγή υδρογόνου. Παρά το υψηλό τους δυναμικό ως μία βιώσιμη τεχνολογία παραγωγής, αντιμετωπίζουν ακόμη σημαντικές τεχνικές προκλήσεις, όπως η διάβρωση και απενεργοποίηση των καταλυτών με την πάροδο του χρόνου καθώς και η διαλείπουσα φύση της ηλιακής ενέργειας (27).

2.2.1 Αλκαλική ηλεκτρόλυση νερού

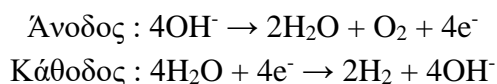
Η αλκαλική ηλεκτρόλυση του νερού αποτελεί μία από τις παλαιότερες και πιο ώριμες τεχνολογικά μεθόδους για την παραγωγή υδρογόνου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, είναι η τεχνολογία που επιλέγεται προς ανάλυση, ως μέθοδος παραγωγής ανανεώσιμου υδρογόνου. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται στη διάσπαση του νερού μέσω τροφοδότησης ηλεκτρικού ρεύματος, με τη βοήθεια ενός αλκαλικού ηλεκτρολύτη. Το συνολικό σύστημα αποτελείται από δύο βασικά μέρη, τη μονάδα ηλεκτρόλυσης (stack) και τον περιφερειακό εξοπλισμό υποστήριξης (Balance of Plant – BoP).

Ειδικότερα για τη μονάδα ηλεκτρόλυσης, περιλαμβάνει ένα ηλεκτρόδιο ανόδου και ένα ηλεκτρόδιο καθόδου, τα οποία διαχωρίζονται από ένα διάφραγμα και είναι βυθισμένα σε ένα αλκαλικό υδατικό διάλυμα, συνήθως υδροξειδίου του καλίου (KOH) ή πιο σπάνια υδροξειδίου του νατρίου (NaOH). Ο ηλεκτρολύτης αυτός αυξάνει την αγωγιμότητα του νερού, διευκολύνοντας τη κυκλοφορία του ηλεκτρικού ρεύματος. Κατά τη λειτουργία του συστήματος, το απιονισμένο νερό στην άνοδο υφίσταται οξείδωση, αποδίδοντας οξυγόνο και ιόντα υδροξειδίου (OH^-), τα οποία μετακινούνται, μέσω του ηλεκτρολύτη, προς την κάθοδο όπου και ανάγονται για να σχηματίσουν υδρογόνο. Οι θερμοκρασίες που επικρατούν είναι σχετικά χαμηλές, μεταξύ 65°C και 100°C , ενώ τα παραγόμενα αέρια, υδρογόνο και οξυγόνο διαχωρίζονται και συλλέγονται για αποθήκευση και μεταφορά (27), (28).



Εικόνα 2.2.2 Σχηματική απεικόνιση της μονάδας αλκαλικής ηλεκτρόλυσης (28)

Οι επιμέρους αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο είναι οι εξής :



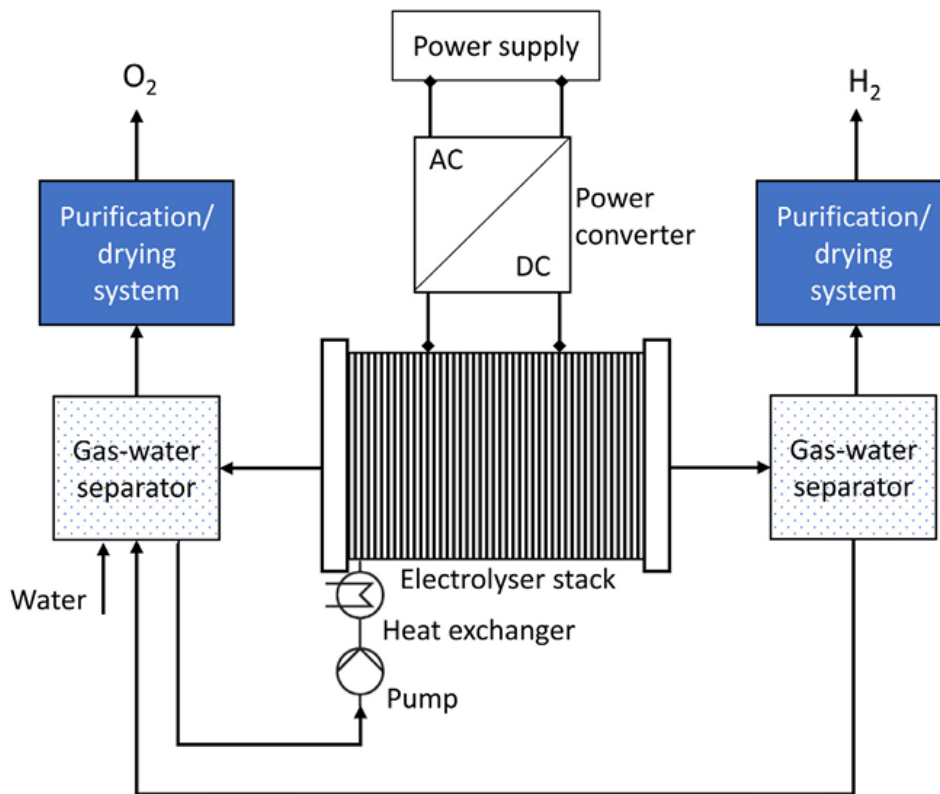
Όσον αφορά το κατασκευαστικό μέρος, η κάθε μονάδα αποτελείται από επαναλαμβανόμενες κυψέλες συνδεδεμένες σε σειρά και περιλαμβάνει τα εξής εξαρτήματα, καθένα από τα οποία έχει τη δικιά του λειτουργία (28), (29) :

- **Διαχωριστής** : επιτρέπει τη μεταφορά ιόντων, διαχωρίζει τα αέρια προϊόντα και παρέχει ηλεκτρική μόνωση στα ηλεκτρόδια. Είναι συνήθως κατασκευασμένος από κεραμικά οξειδία ή πολυμερή υλικά.
- **Ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου** : χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή των ηλεκτροχημικών αντιδράσεων. Κατασκευάζονται από οξειδία μετάλλων, όπως το νικέλιο και το κοβάλτιο, χωρίς ανάγκη για χρήση πολύτιμων καταλυτών, όπως η πλατίνα.
- **Στεγανοποίηση** : στοχεύει στην αποτροπή διαφυγής αερίων, διασφαλίζοντας την αεροστεγή λειτουργία του συστήματος.
- **Στρώμα στήριξη – συμπίεσης** : αποτελείται από στρώματα μεταλλικών φύλλων και βρίσκεται μεταξύ της διπολικής πλάκας και των ηλεκτροδίων με στόχο τη μείωση της τάσης στα ηλεκτρόδια και το διαχωριστής, την κατανομή της πίεσης και την αποτροπή ζημιών στα επιμέρους στοιχεία.
- **Διπολική πλάκα** : εξασφαλίζει την ηλεκτρική σύνδεση μεταξύ των κυψελών της μονάδας και τη μηχανική τους σταθερότητα.
- **Τερματικές πλάκες** : αποτελούν το εξωτερικό μέρος των μονάδων και ασκούν την απαιτούμενη συμπίεση στις επιμέρους κυψέλες για τη διατήρηση της δομής και την αποτροπή διαρροών.

Εκτός της μονάδα ηλεκτρόλυσης, όπου γίνεται η παραγωγή του υδρογόνου, για να καταστεί το σύστημα λειτουργικό απαιτείται επιπλέον περιφερειακός εξοπλισμός υποστήριξης. Αυτός περιλαμβάνει αντλίες, για την κυκλοφορία του ηλεκτρολύτη εντός των κυψελών, εναλλάκτες θερμότητας, για τη ρύθμιση της επιθυμητής θερμοκρασίας λειτουργίας και συστήματα διαχωρισμού υγρού – αερίου. Εκτός αυτών, περιλαμβάνονται και ηλεκτρονικά ισχύος, όπως μετασχηματιστές και ανορθωτές, τα οποία είναι υπεύθυνα για την τροφοδοσία του ηλεκτρικού ρεύματος στη μονάδα. Η σχηματική αναπαράσταση του συνολικού συστήματος ηλεκτρόλυσης, μονάδα ηλεκτρόλυσης (electrolyser stack) και τμήματα του περιφερειακού εξοπλισμού, φαίνεται στην εικόνα 2.2.3 (30).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι το αρχικό χαμηλό κόστος επένδυσης και η προσαρμοστικότητα της σε διάφορα επίπεδα παραγωγής, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική για ποικίλες εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Συνδυάζει τεχνολογική ωριμότητα, απλότητα σχεδιασμού και μεγάλη διάρκεια ζωής, ενώ παρέχει υψηλή καθαρότητα παραγόμενου υδρογόνου με λειτουργία σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επιπλέον, δεν απαιτεί τη χρήση πολύτιμων ή σπάνιων καταλυτικών υλικών, όπως η πλατίνα, αλλά βασίζεται κυρίως σε μη ευγενή μέταλλα, συμβάλλοντας θετικά στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, λόγω του μικρότερου περιβαλλοντικού

κόστους των πρώτων υλών. Προσφέρει, επίσης, τη δυνατότητα αξιοποίησης της πλεονάζουσας ενέργειας από ΑΠΕ συμβάλλοντας στην αποθήκευση ενέργειας και στην ενίσχυση της ευελιξίας των ενεργειακών συστημάτων.



Εικόνα 2.2.3 Σχηματική απεικόνιση του συνολικού συστήματος ηλεκτρόλυσης - Μονάδα ηλεκτρόλυσης και περιφερειακός εξοπλισμός (30)

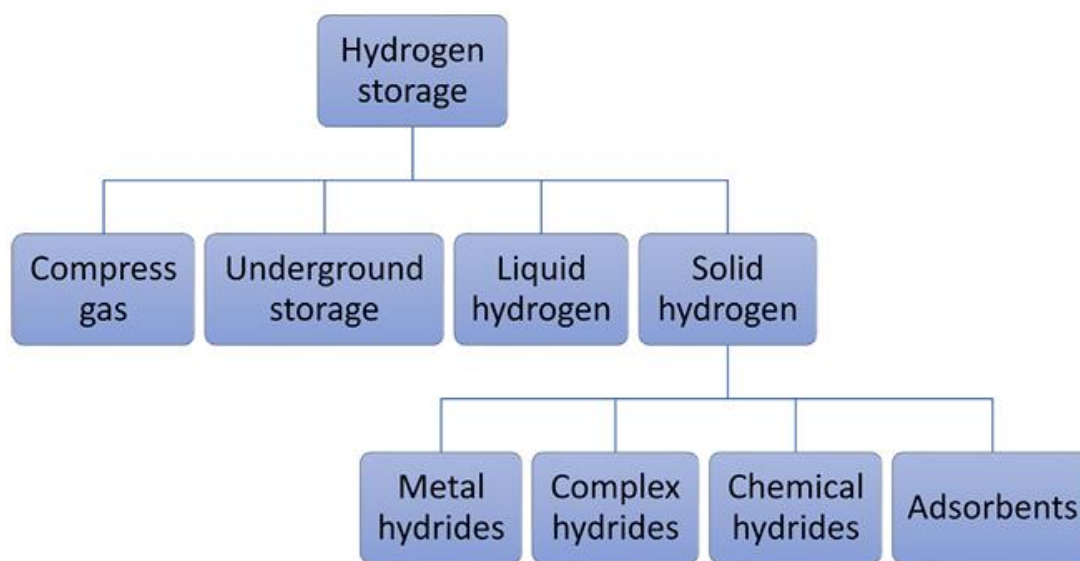
Ωστόσο, η τεχνολογία αυτή συνοδεύεται και από ορισμένα μειονεκτήματα. Η απόδοση μετατροπής της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο κυμαίνεται σε σχετικά μέτρια επίπεδα, από 60 έως 80%, οδηγώντας σε αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις κατά τη λειτουργία. Επίσης, η χρήση αλκαλικών διαλυμάτων ως ηλεκτρολύτες, μπορεί να προκαλέσει διάβρωση των ηλεκτροδίων και άλλων εξαρτημάτων, γεγονός που αυξάνει σημαντικά τις ανάγκες συντήρησης και αξιοποίησης ανθεκτικών και ενδεχομένως πιο ακριβών υλικών. Επιπλέον, παρουσιάζει χαμηλές πυκνότητες ρεύματος ($<0.5 \text{ A/cm}^2$) με αποτέλεσμα να παρουσιάζει μεγαλύτερη αποτύπωμα και χρήση γης σε σχέση με άλλες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης, όπως η PEM, ενώ παρουσιάζει και μειωμένη δυναμική απόκριση σε μεταβλητά φορτία λειτουργίας.

Για τη βιωσιμότητα της μεθόδου και τη διατήρηση χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, είναι καθοριστικής σημασίας η χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών του συστήματος. Η τροφοδότηση από το δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής, ακόμα και αν αυτό παρουσιάζει σημαντικά ποσοστά ενσωμάτωσης ΑΠΕ, ενδέχεται να μειώσει τα περιβαλλοντικά οφέλη του παραγόμενου υδρογόνου, εξαιτίας της συνεχιζόμενης εξάρτησης του από συμβατικές ρυπογόνες πηγές, όπως τα ορυκτά καύσιμα. Συνολικά, η αλκαλική ηλεκτρόλυση αποτελεί μία ανταγωνιστική λύση για την παραγωγή ανανεώσιμου υδρογόνου, αρκεί να

εξασφαλιστεί η παροχή καθαρής ενέργειας και να αντιμετωπιστούν οι τεχνικές προκλήσεις που τη συνοδεύουν (27), (28).

2.3 Αποθήκευση υδρογόνου

Η περαιτέρω αξιοποίηση του υδρογόνου προϋποθέτει την ανάπτυξη αποδοτικών και ασφαλών τεχνολογιών αποθήκευσης, οι οποίες θεωρούνται κρίσιμες για την αξιόπιστη διατήρηση του έως τη στιγμή της τελικής χρήσης. Οι τεχνολογίες αυτές περιλαμβάνουν ένα ευρύ φάσμα μεθόδων και τεχνικών, διαφοροποιούμενες ανάλογα με τη φυσική κατάσταση στην οποία αποθηκεύεται το υδρογόνο: αέρια, υγρή ή στερεά.



Εικόνα 2.3.1 Τεχνολογίες αποθήκευσης υδρογόνου (30)

Η αποθήκευση του υδρογόνου σε *αέρια μορφή* επιτυγχάνεται κυρίως με δύο τρόπους, την αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου και την υπόγεια αποθήκευση. Στην πρώτη προσέγγιση, το υδρογόνο αποθηκεύεται υπό υψηλή πίεση σε ειδικά σχεδιασμένες δεξαμενές, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, αξιοποιούνται φυσικοί ή τεχνητοί γεωλογικοί σχηματισμοί καθώς και υπάρχουσες υποδομές, όπως εγκαταστάσεις φυσικού αερίου. Αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν χαμηλό κόστος, μειωμένες ενεργειακές απαιτήσεις και διατήρηση της καθαρότητας του υδρογόνου. Ωστόσο, η αποθήκευση υδρογόνου υπό πίεση εγείρει σοβαρά ζητήματα ασφαλείας, λόγω της εύφλεκτης φύσης του αερίου και των φαινομένων ευθραυστότητας, που μπορεί να οδηγήσει σε υποβάθμιση των υλικών, γεγονός που απαιτεί την χρήση κατάλληλων και ανθεκτικών υλικών καθώς και την αυστηρή συμμόρφωση με τους κανονισμούς ασφαλείας. Αξίζει να σημειωθεί, ωστόσο, ότι η ενέργεια που απαιτείται για τη συμπίεση του υδρογόνου μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη συνολική απόδοση του ως ενεργειακός φορέας.

Για την αποθήκευση του υδρογόνου σε *υγρή μορφή*, απαιτείται η εφαρμογή κρυογονικών διεργασιών, κατά τις οποίες το αρχικά αέριο υδρογόνο υγροποιείται μέσω ψύξης σε θερμοκρασίας της τάξης των -253°C . Το παραγόμενο υγρό υδρογόνο αποθηκεύεται σε δεξαμενές που

χαρακτηρίζονται ως υψηλής μόνωσης και είναι ικανές να αντέχουν στις ακραίες αυτές θερμοκρασίες, περιορίζοντας τις θερμικές απώλειες και διασφαλίζοντας, ως εκ τούτου, την αποτελεσματική αποθήκευση του. Βασικό πλεονέκτημα της μεθόδου είναι η υψηλή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα, η οποία μειώνει τον απαιτούμενο όγκο αποθήκευσης και διευκολύνει την επακόλουθη μεταφορά. Παρ' όλα αυτά, η συγκεκριμένη τεχνική συνοδεύεται από υψηλό ενεργειακό κόστος, τόσο για τη διαδικασία υγροποίησης όσο και για τη διατήρηση της χαμηλής θερμοκρασίας.

Η αποθήκευση του υδρογόνου σε *στερεά μορφή* βασίζεται στην ικανότητα ορισμένων υλικών, όπως τα μεταλλικά υβρίδια και τα πορώδη υλικά, να δεσμεύουν το υδρογόνο είτε μέσω φυσικοχημικών διεργασιών είτε μέσω χημικής απορρόφησης. Το υδρογόνο αλληλεπιδρά με μέταλλα ή κράματα σχηματίζοντας σταθερούς αλλά αναστρέψιμους δεσμούς ή προσροφάται στην επιφάνεια των πορώδη υλικών και ακολούθως απελευθερώνεται με θέρμανση ή μείωση της πίεσης. Με αυτή την προσέγγιση προσφέρεται αυξημένη ασφάλεια, υψηλή ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα και περιορισμένες απαιτήσεις σε υποδομές, συγκριτικά με τις προηγούμενες μεθόδους. Παρά τα θετικά αυτά στοιχεία, η συγκεκριμένη τεχνολογία συνοδεύεται από προκλήσεις όπως η αργή κινητική των διεργασιών απορρόφησης και απελευθέρωσης, το υψηλό κόστος των χρησιμοποιούμενων υλικών και η πολυπλοκότητα των διαδικασιών σύνθεσης (27), (30).

2.3.1 Αποθήκευση συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου σε δεξαμενές υψηλής πίεσης

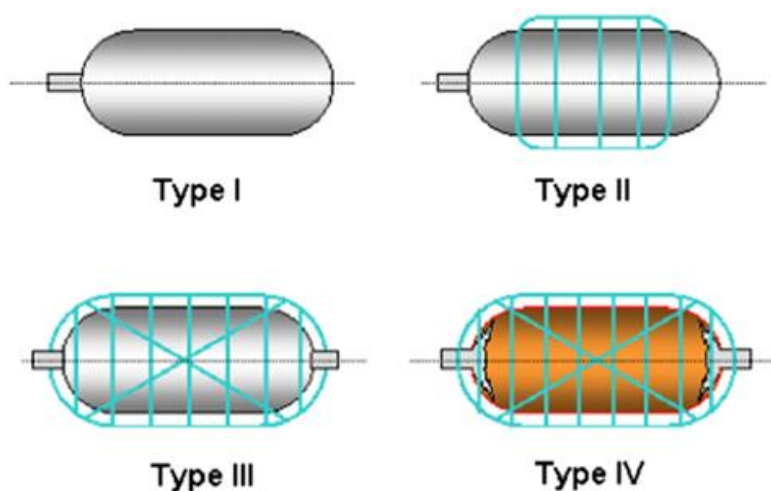
Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, για το στάδιο αποθήκευσης του υδρογόνου επιλέγεται η τεχνολογία αποθήκευσης σε αέρια μορφή και ειδικότερα σε δεξαμενές υψηλής πίεσης. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αποτελεί την πιο διαδεδομένη τεχνολογία, κυρίως λόγω της απλότητας στην υλοποίησή της, συγκριτικά με τις υπόλοιπες, καθώς και της δυνατότητας ενσωμάτωσης της σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών.

Το παραγόμενο υδρογόνο συμπιέζεται μηχανικά σε πίεση που κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 200 και 700 bar, προκειμένου να μειωθεί ο όγκος του και να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα αποθήκευσης. Η διαδικασία συμπίεσης πραγματοποιείται με χρήση κατάλληλων συμπιεστών ή αντλιών υψηλής απόδοσης. Αν και πρόκειται για τη λιγότερο δαπανηρή και τεχνικά ευέλικτη μέθοδο, συνοδεύεται από σημαντικές ενεργειακές απαιτήσεις (31).

Το συμπιεσμένο υδρογόνο αποθηκεύεται ακολούθως σε ειδικά σχεδιασμένες κυλινδρικές δεξαμενές, οι οποίες είναι κατασκευασμένες έτσι ώστε να αντέχουν τις πολύ υψηλές πιέσεις. Υπάρχουν διάφοροι τύποι δεξαμενών, οι οποίοι κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τα υλικά κατασκευής και τα χαρακτηριστικά τους (32), (33) :

- **Τύπος I** : Είναι κατασκευασμένες εξ ολοκλήρου από ανθεκτικά μεταλλικά υλικά, όπως ο χάλυβας και το αλουμίνιο, ενώ αντέχουν πιέσεις της τάξης των 200 – 300 bar. Έχουν μεγάλο βάρος λόγω του πάχους των τοιχωμάτων τους, αλλά αποτελούν την πιο οικονομική λύση. Χρησιμοποιούνται κυρίως σε βιομηχανικές εφαρμογές.

- **Τύπος II** : Η κατασκευή τους περιλαμβάνει μεταλλική εσωτερική επένδυση, ενισχυμένη εξωτερικά με ίνες άνθρακα ή ίνες γυαλιού. Υποστηρίζουν αποθήκευση υδρογόνου σε πίεση έως 300 bar, ενώ έχουν μικρότερο βάρος και μεγαλύτερο κόστος από τις δεξαμενές τύπου I.
- **Τύπος III** : Αποτελούνται από συνθετικά υλικά, όπως ανθρακόνημα, με εσωτερική επίστρωση μετάλλου, συνήθως αλουμινίου. Έχουν υψηλή αντοχή και είναι σημαντικά ελαφρύτερες, καθιστώντας τις κατάλληλες για χρήση σε οχήματα. Μπορούν να αποθηκεύσουν υδρογόνο σε πιέσεις έως 450 bar, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις έως και 700 bar. Ωστόσο, παρουσιάζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα, λόγω των σύνθετων υλικών, που μπορεί να προκαλέσει προβλήματα κατά τη διάρκεια της συμπίεσης.
- **Τύπος IV** : Πρόκειται για την πιο εξελιγμένη κατηγορία δεξαμενών αποθήκευσης. Η κατασκευή τους αποτελείται αποκλειστικά από σύνθετα υλικά με πολυμερική επένδυση, από υλικά όπως πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (HDPE), με ελάχιστη έως μηδενική περιεκτικότητα σε μέταλλα. Συχνά χρησιμοποιούνται και ανθρακόνηματα για την ενίσχυση της μηχανικής τους αντοχής με ταυτόχρονη μείωση του βάρους τους. Μπορούν να αντέξουν πιέσεις από 700 έως 1000 bar, αποτελώντας ιδανική λύση για εφαρμογές όπου απαιτείται ελαφρύ αλλά ανθεκτικό σύστημα, όπως σε οχήματα κυψελών καυσίμου. Παρά τα πλεονεκτήματά τους, παρουσιάζουν το υψηλότερο κόστος κατασκευής.



Εικόνα 2.3.2 Τύποι δεξαμενών αποθήκευσης αέριου υδρογόνου (33)

Οι δεξαμενές υψηλής πίεσης, ανεξαρτήτως τύπου, σχεδιάζονται σύμφωνα με τα πρότυπα ασφαλείας που έχουν τεθεί και υπόκεινται σε αυστηρούς ελέγχους, λόγω της φύσης του υδρογόνου ως ένα ιδιαίτερα εύφλεκτο και αντιδραστικό αέριο. Η επιλογή του κατάλληλου τύπου εξαρτάται από το πεδίο εφαρμογής, τις απαιτήσεις πίεσης, το κόστος αλλά και τους περιορισμούς που μπορεί να προκύψουν λόγω βάρους. Σημαντική προσοχή απαιτείται εξίσου σε περιπτώσεις μακροχρόνιας αποθήκευσης, καθώς το υδρογόνο έχει την τάση να προκαλεί φαινόμενα ευθραυστότητας, υποβαθμίζοντας τα υλικά και να διαφεύγει μέσω μικροδιαρροών, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο ατυχημάτων και ως εκ τούτου απαιτούνται αυστηρές συνθήκες φύλαξης και εξειδικευμένα υλικά (31), (32).

2.4 Μεταφορά υδρογόνου

Η ασφαλής και αποτελεσματική μεταφορά του υδρογόνου από τις μονάδες παραγωγής στους τελικούς χρήστες αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για την ευρεία και βιώσιμη ένταξη του στο ενεργειακό σύστημα. Οι μέθοδοι μεταφοράς παρουσιάζουν ομοιότητες με τις αντίστοιχες τεχνικές αποθήκευσης και κατηγοριοποιούνται, εξίσου, ανάλογα με τη φυσική κατάσταση στην οποία βρίσκεται το υδρογόνο σε αέρια, υγρή ή ενσωματωμένη σε φορείς υδρογόνου.

Η μεταφορά υδρογόνου σε *αέρια μορφή* είναι η πιο διαδεδομένη μέθοδος. Σε αυτή την περίπτωση το υδρογόνο συμπιέζεται σε υψηλή πίεση και διακινείται είτε μέσω αγωγών είτε με χρήση φορητών με δεξαμενές υψηλής πίεσης, τύπου tube trailers, εξυπηρετώντας οδικές, θαλάσσιες και σιδηροδρομικές μεταφορές. Οι αγωγοί, αν και προσφέρουν συνεχή και μεγάλης κλίμακας μεταφορά, προϋποθέτουν σημαντικές επενδύσεις για την ανάπτυξη και συντήρηση των σχετικών υποδομών καθώς και εξειδικευμένα συστήματα παρακολούθησης και πρόληψης διαρροών. Σε κάθε προσέγγιση, η εγγενής ευφλεκτότητα του αερίου υδρογόνου καθιστά επιτακτική τη λήψη αυστηρών μέτρων ασφαλείας.

Στην περίπτωση μεταφοράς σε *υγρή μορφή*, το υδρογόνο πρωτίστως υγροποιείται σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες, ώστε να μειωθεί ο όγκος του και να διευκολυνθεί η μεταφορά μεγαλύτερων ποσοτήτων. Η διανομή του γίνεται με τη βοήθεια ειδικών κρυογονικών βυτιοφόρων, τα οποία είναι εξοπλισμένα, μεταξύ άλλων, με μηχανισμούς ελέγχου της πίεσης και της θερμοκρασίας για τη διατήρηση των απαιτούμενων συνθηκών. Με τη χρήση των βυτιοφόρων επιτρέπονται κυρίως οδικές μεταφορές και σε πιο σπάνιες περιπτώσεις, ανάλογα τις απαιτήσεις, σιδηροδρομικές ή θαλάσσιες. Αν και η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για μεταφορές σε μεγάλες αποστάσεις, συνοδεύεται από υψηλή ενεργειακή κατανάλωση τόσο για την υγροποίηση όσο και για τη διατήρηση των χαμηλών θερμοκρασιών, γεγονός που αυξάνει το οικονομικό και περιβαλλοντικό κόστος.

Μία εναλλακτική προσέγγιση είναι η μεταφορά υδρογόνου μέσω *χημικών φορέων*. Το υδρογόνο ενσωματώνεται προσωρινά σε ενώσεις όπως η αμμωνία, τα μεταλλικά υβρίδια ή οι υγροί οργανικοί φορείς (Liquid Organic Hydrogen Carriers – LOHCs), οι οποίοι επιτρέπουν την αποθήκευση και μεταφορά σε συνθήκες περιβάλλοντος. Η διανομή τους πραγματοποιείται με συμβατικά μέσα, όπως φορτηγά, πλοία και τρένα, προσφέροντας αυξημένη ασφάλεια και ενεργειακή πυκνότητα. Ωστόσο, η απελευθέρωση του υδρογόνου από τις συγκεκριμένους φορείς απαιτεί πολύπλοκες και ενεργοβόρες διεργασίες.

Σε όλες τις παραπάνω μεθόδους, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από το μέσο μεταφοράς και το είδος καυσίμου που αυτό χρησιμοποιεί, ενώ επηρεάζεται εξίσου από τις ενεργειακές ανάγκες των εκάστοτε τεχνολογικών σταδίων. Η επιλογή της βέλτιστης μεθόδου διανομής εξαρτάται από ένα συνδυασμό παραμέτρων όπως η απόσταση, η απαιτούμενη ποσότητα υδρογόνου καθώς και το κόστος (27).

2.4.1 Μεταφορά συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου με φορητά tube trailers

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, ως μέθοδος διανομής του παραγόμενου υδρογόνου επιλέγεται η μεταφορά σε αέρια μορφή με τη χρήση δεξαμενών υψηλής πίεσης τοποθετημένων σε φορητά τύπου tube trailers, μέσω οδικών μεταφορών. Η επιλογή αυτή κρίνεται κατάλληλη λόγω της ωριμότητας της συγκεκριμένης τεχνολογία, λαμβάνοντας υπόψη τις προδιαγραφές των υπόλοιπων σταδίων της μελέτης.

Η διαδικασία περιλαμβάνει τη συμπίεση του υδρογόνου και την αποθήκευση του σε κυλινδρικές δεξαμενές υψηλής πίεσης, οι οποίες είναι εφοδιασμένες σε ειδικά διαμορφωμένα ρυμουλκούμενα οχήματα tube trailer. Κάθε φορητό όχημα αποτελείται από ένα σύστημα πολλαπλών δεξαμενών συνδεδεμένων μεταξύ τους και ενσωματωμένων σε ένα ειδικό πλαίσιο ή εμπορευματοκιβώτιο (container), επιτρέποντας τη μεταφορά μέσω οδικών, θαλάσσιων και σιδηροδρομικών διαδρομών, ανάλογα τις εκάστοτε ανάγκες και συνθήκες. Το υδρογόνο ακολούθως μεταφέρεται σε κατάλληλες εγκαταστάσεις αποθήκευσης είτε χρησιμοποιείται απευθείας σε τελικές υποδομές, όπως βιομηχανικές μονάδες ή σταθμούς ανεφοδιασμού υδρογόνου.

Οι δεξαμενές που χρησιμοποιούνται στα tube trailers διακρίνονται σε τέσσερις κατηγορίες, τύπου I έως IV, ανάλογα με τα υλικά κατασκευής και τις μηχανικές τους ιδιότητες, όπως περιγράφονται αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα (βλ. Ενότητα 2.3.1). Ο τύπος των δεξαμενών επηρεάζει καθοριστικά ορισμένες παραμέτρους μεταφοράς και τη διαμόρφωση των φορητών, όπως το επιτρεπόμενο όριο πίεσης, το καθαρό βάρος αυτών και συνεπώς το ωφέλιμο φορτίο μεταφοράς υδρογόνου. Τα tube trailers μπορούν να μεταφέρουν ωφέλιμα φορτία υδρογόνου έως και 1000 kg, με πίεση λειτουργίας που φτάνει μέχρι τα 700 bar, ανάλογα με τον τύπο των δεξαμενών. Αν και η πραγματική ικανότητα μεταφοράς εξαρτάται από τον αριθμό, τον όγκο και την πίεση μεταφοράς των επιμέρους δεξαμενών, το ωφέλιμο φορτίο καθώς και ο τρόπος συσκευασίας των δεξαμενών περιορίζεται συνήθως από τις προδιαγραφές του χώρου του εμπορευματοκιβωτίου, που ορίζεται από τα διεθνή πρότυπα μεταφορών, όπως αυτά του ISO.

Ενδεικτικά, ένα tube trailer που είναι εφοδιασμένο με χαλύβδινες δεξαμενές, τύπου I, μπορεί να μεταφέρει έως 270 kg υδρογόνου, λόγω του υψηλού βάρους των δοχείων. Αντιθέτως, η χρήση σύνθετων υλικών, παραδείγματος χάρη τύπου III ή IV, μειώνει το βάρος του συστήματος και επιτρέπει, επομένως, τη μεταφορά σημαντικά μεγαλύτερων ποσοτήτων. Η επιλογή της κατάλληλης διαμόρφωσης εξαρτάται από το επιθυμητό ισοζύγιο χωρητικότητας, βάρους, κόστους και απαιτήσεων ασφαλείας. Αξίζει να σημειωθεί, ότι η συγκεκριμένη μέθοδος μεταφοράς θεωρείται ιδιαίτερα ελκυστική, ειδικά αν ληφθούν υπόψη οι υπάρχουσες υποδομές και η μικρή ζήτηση υδρογόνου σε τελικές εφαρμογές, για περιοχές όπου δεν υπάρχει ακόμα ανεπτυγμένο δίκτυο αγωγών υδρογόνου ή άλλων τεχνολογιών, καθώς προσφέρει ευελιξία, δυνατότητα άμεσης εφαρμογής και οικονομικό κόστος ειδικότερα για σχετικά σύντομες αποστάσεις και μέτριες ποσότητες διανομής (27), (34).

2.5 Τελική χρήση υδρογόνου

Η ευελιξία του υδρογόνου ως ενεργειακός φορέας επιτρέπει την αξιοποίηση του σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών, μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται η αποθήκευση ενέργειας, η ηλεκτροπαραγωγή, οι μεταφορές και οι βιομηχανικές διεργασίες. Οι εφαρμογές αυτές διευκολύνουν τη διείσδυση του υδρογόνου σε πολλαπλούς τομείς, ενισχύοντας τη μετάβαση προς ένα περιβαλλοντικά φιλικό και βιώσιμο ενεργειακό σύστημα.

Μία από τις βασικές χρήσεις του υδρογόνου αφορά τις κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells), οι οποίες μετατρέπουν τη χημική του ενέργεια σε ηλεκτρική και θερμική, χωρίς την ανάγκη καύσης, παράγοντας αποκλειστικά νερό ως παραπροϊόν. Ανάλογα με το είδος του ηλεκτρολύτη και τις συνθήκες λειτουργίας, υπάρχουν διάφοροι τύποι κυψελών, όπως οι κυψέλες μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cells - PEMFCs), οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells – SOFCs) και οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (Alkaline Fuel Cells – AFC). Παρότι προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά και λειτουργικά οφέλη, όπως υψηλή ενεργειακή απόδοση και μηδενικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η ευρύτερη εμπορική τους ανάπτυξη περιορίζεται από το υψηλό κόστος και την ανάγκη για εξειδικευμένα και συχνά σπάνια υλικά.

Το υδρογόνο μπορεί επίσης να αξιοποιηθεί απευθείας ως καύσιμο σε μηχανές εσωτερικής καύσης και αεριοστρόβιλους. Σε αυτή την περίπτωση, η αντίδραση του υδρογόνου με έναν οξειδωτικό παράγοντα, όπως το οξυγόνο, παρουσία φλόγας, απελευθερώνει θερμότητα και παράγει ταυτόχρονα ηλεκτρική ενέργεια. Αν και οι εφαρμογές αυτές είναι λιγότερο αποδοτικές συγκριτικά με τα συμβατικά καύσιμα, η περιβαλλοντική τους επιβάρυνση είναι σαφώς κατώτερη. Στο βιομηχανικό τομέα, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε ως καύσιμο, είτε ως πρώτη ύλη σε χημικές και θερμικές διεργασίες, αναλόγως τις ανάγκες και τις συνθήκες της εκάστοτε εγκατάστασης. Η ενσωμάτωση του σε υφιστάμενες ή νέες βιομηχανικές λειτουργίες προσφέρει μειωμένες εκπομπές, βελτιωμένη απόδοση και σε πολλές περιπτώσεις, αναβάθμιση της ποιότητας του τελικού προϊόντος, όπως για παράδειγμα μειωμένη περιεκτικότητα θείου στο προϊόν του πετρελαίου.

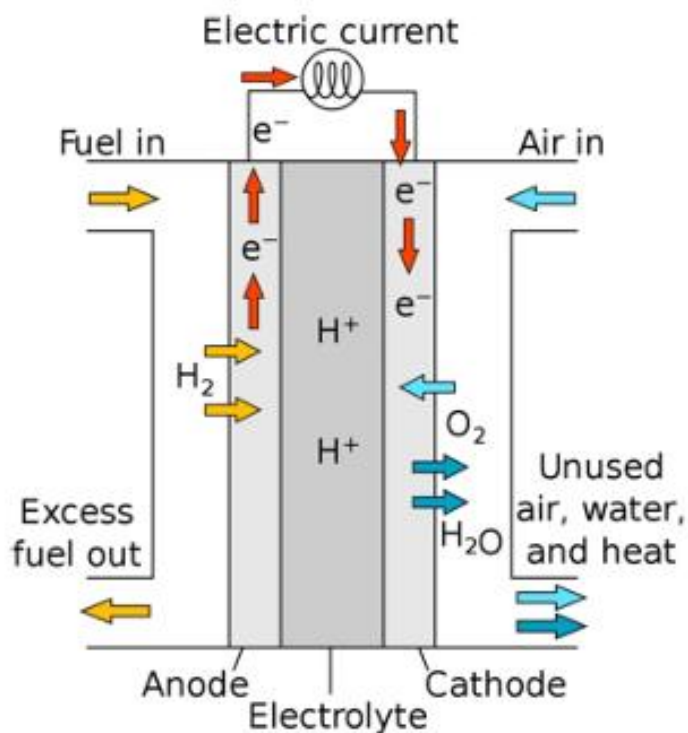
Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η χρήση του ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας. Ειδικότερα, σε περιόδους πλεονάζουσας παραγωγής των ΑΠΕ, το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί μέσω ηλεκτρόλυσης, να αποθηκευτεί και να επαναχρησιμοποιηθεί σε μεταγενέστερο χρόνο ως οικολογικός φορέας, καλύπτοντας αιχμές ζήτησης. Επιπλέον, μπορεί να αναμειχθεί με φυσικό αέριο ή να μετατραπεί, μέσω της διεργασίας μεθανοποίησης, σε συνθετικό μεθάνιο, διευρύνοντας τη διασύνδεση διαφορετικών ενεργειακών τομέων και ενισχύοντας τη δυνατότητα μακροπρόθεσμης αποθήκευσης. Παρ' όλα αυτά, το υψηλό κόστος εφαρμογής των τεχνολογιών αυτών εξακολουθεί να αποτελεί πρόκληση για την πλήρη εμπορική του αξιοποίηση, καθώς δεν προσδίδει την απαραίτητη ανταγωνιστικότητα απέναντι στις συμβατικές μεθόδους αποθήκευσης (27), (31).

2.5.1 Ηλεκτροπαραγωγή με κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, για το στάδιο της τελικής χρήσης του υδρογόνου στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής επιλέγεται η τεχνολογία της κυψέλης καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC), ως μία προηγμένη και περιβαλλοντικά φιλική μέθοδος.

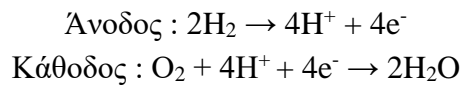
Σε γενικό επίπεδο, οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις, ικανές να μετατρέπουν τη χημική ενέργεια ενός καυσίμου, όπως το υδρογόνο, σε ηλεκτρική και θερμική ενέργεια, μέσω μιας ελεγχόμενης χημικής αντίδρασης, χωρίς καύση. Η βασική αρχή λειτουργίας τους βασίζεται στην αντίδραση του υδρογόνου με το οξυγόνο, με τελικά προϊόντα ηλεκτρική ενέργεια, θερμότητα και νερό και αποτελεί την αντίστροφη διαδικασία από αυτή της ηλεκτρόλυσης. Το συνολικό σύστημα περιλαμβάνει δύο βασικά μέρη, τη μονάδα της κυψέλης καυσίμου (stack) και τον περιφερειακό εξοπλισμό υποστήριξης (Balance of Plant – BoP) (27), (31).

Ειδικότερα για τη μονάδα κυψέλης καυσίμου, περιλαμβάνει τρία βασικά στοιχεία : τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου και τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος είναι μία πολυμερική μεμβράνη. Κατά τη λειτουργία του συστήματος, η άνοδος τροφοδοτείται με υδρογόνο, το οποίο διασπάται προς απελευθέρωση ηλεκτρονίων και πρωτονίων (H^+) και η κάθοδος με αέρα για την παραγωγή αρνητικών ιόντων οξυγόνου. Τα πρωτόνια, μέσω της ηλεκτρολυτικής μεμβράνης, μετακινούνται προς την κάθοδο, ενώ τα ηλεκτρόνια κινούνται εξωτερικά, μέσω ηλεκτρικού κυκλώματος, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Παράλληλα, στην κάθοδο τα πρωτόνια και τα ηλεκτρόνια ενώνονται με τα μόρια οξυγόνου σχηματίζοντας νερό (35).



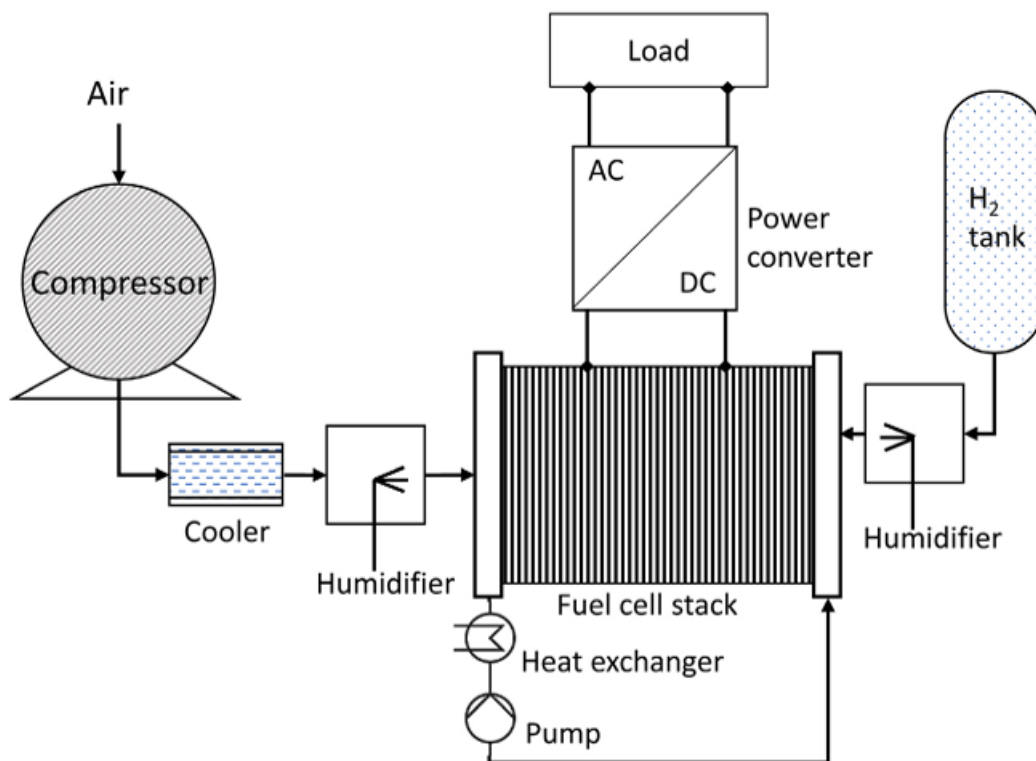
Εικόνα 2.5.1 Σχηματική απεικόνιση της μονάδας κυψέλης καυσίμου PEMFC (27)

Οι επιμέρους αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο είναι οι εξής :



Οι κυψέλες καυσίμου τύπου PEMFC χρησιμοποιούν ως ηλεκτρολύτη μία πολυμερική μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων, συνήθως βασισμένη στο υλικό Nafion, όπου επιτρέπει στα ιόντα να κινούνται μεταξύ ανόδου και καθόδου, ενώ ταυτόχρονα χωρίζει τα ηλεκτρόδια. Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η παρουσία του καταλύτη, η δράση του οποίου διευκολύνει την παραπάνω διαδικασία και συνήθως είναι κατασκευασμένος από πλατίνα. Η λειτουργία της μονάδας πραγματοποιείται συνήθως υπό χαμηλές θερμοκρασίες της τάξης 50 έως 100°, γεγονός που επιτρέπει γρήγορη εκκίνηση και καθιστά την τεχνολογία κατάλληλη για ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών (27).

Εκτός από τη βασική μονάδα της κυψέλης καυσίμου (stack), όπου γίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το συνολικό σύστημα περιλαμβάνει και τον απαραίτητο βοηθητικό εξοπλισμό, ο οποίος διασφαλίζει την ομαλή και αποδοτική λειτουργία. Σε αυτόν εντάσσονται η δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου, αντλίες, αεροσυμπιεστές, σύστημα ψύξης, εναλλάκτες θερμότητας, ηλεκτρονικά ισχύος και συστήματα διαχείρισης ενέργειας. Η παραγόμενη ισχύς συνεχούς ρεύματος (DC) μετατρέπεται σε εναλλασσόμενο ηλεκτρικό ρεύμα (AC) μέσω αντιστροφών, προκειμένου να διανεμηθεί στο δίκτυο ή να τροφοδοτήσει τοπικά φορτία (30).



Εικόνα 2.5.2 Σχηματική απεικόνιση του συνολικού συστήματος της κυψέλης καυσίμου PEMFC - Μονάδα και περιφερειακός εξοπλισμός (30)

Οι κυψέλες καυσίμου PEM, διακρίνονται για την υψηλή ενεργειακή απόδοση και το μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Καθώς δεν εκπέμπουν βλαβερούς ρύπους κατά τη λειτουργία τους και το μοναδικό παραπροϊόν τους είναι το νερό, προσφέρουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη έναντι των συμβατικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, χαρακτηρίζονται από χαμηλά επίπεδα θορύβου, γεγονός που τις καθιστά ιδανικές για εγκατάσταση σε αστικά και οικιστικά περιβάλλοντα (31).

Ωστόσο, η ανάπτυξη και ευρεία εφαρμογή της συγκεκριμένης τεχνολογίας συνοδεύεται από ορισμένες προκλήσεις. Η χρήση πολύτιμων και εξειδικευμένων υλικών για την κατασκευή των επιμέρους εξαρτημάτων, όπως η πλατίνα, αυξάνει το αρχικό κόστος επένδυσης. Επιπλέον, σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρείται περιορισμένη διάρκεια ζωής και επιδείνωση της απόδοσης με την πάροδο του χρόνου, επηρεάζοντας τη μακροχρόνια αξιοπιστία και την οικονομική βιωσιμότητα των συστημάτων. Συνολικά, όμως, η τεχνολογία της PEMFC θεωρείται ως ένας από τους βασικότερους πυλώνες για την ενεργειακή μετάβαση και την ενσωμάτωση του υδρογόνου στο μελλοντικό ενεργειακό μείγμα παραγωγής, υπό την προϋπόθεση ότι θα ξεπεραστούν τα παραπάνω εμπόδια (27).

2.5.2 Μεταφορές με οχήματα κυψέλης καυσίμου

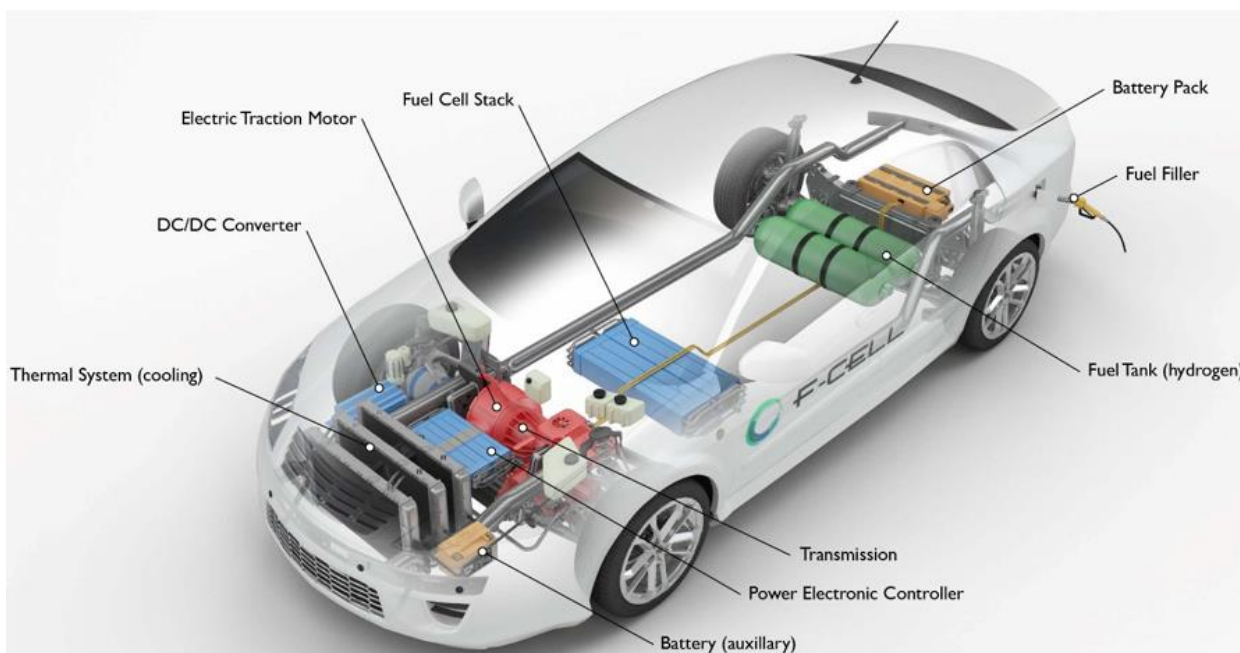
Η χρήση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους πυλώνες της παγκόσμιας στρατηγικής για την απαλλαγή από τα ορυκτά καύσιμα και τη μετάβαση σε ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα μεταφορών. Στο πλαίσιο αυτής της διπλωματικής εργασίας, εξετάζεται η αξιοποίηση του υδρογόνου ως καύσιμο για επιβατικά οχήματα (Fuel Cell Electric Vehicles – FCEVs) και αστικά λεωφορεία κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell Electric Buses – FCEBs).

Ο τομέας των μεταφορών θεωρείται ως η δεύτερη σημαντικότερη πηγή εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα και ευθύνεται για περίπου το 37% των συνολικών εκπομπών παγκοσμίως. Η αντικατάσταση των συμβατικών οχημάτων με οχήματα κυψέλης καυσίμου προσφέρει ουσιαστικά περιβαλλοντικά οφέλη, λαμβάνοντας υπόψη ότι τα FCEVs κατά τη λειτουργία τους παράγουν μόνο υδρατμούς και θερμότητα, επιτυγχάνοντας σχεδόν μηδενικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (27), (33).

Αν και έχουν αναπτυχθεί διάφοροι τύποι κυψελών καυσίμου, η κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), η λειτουργίας της οποίας έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, θεωρείται ως η βέλτιστη επιλογή για χρήση σε οχήματα, λόγω των χαρακτηριστικών της, όπως η σχετικά υψηλή απόδοση, οι χαμηλές θερμοκρασίες λειτουργίας, η υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και η δυνατότητα ταχείας εκκίνησης, που εκμεταλλεύονται στο έπακρο τα δυνητικά πλεονεκτήματα του υδρογόνου. Οι PEMFC επιτυγχάνουν αποδόσεις μετατροπής που σε ορισμένες περιπτώσεις προσεγγίζουν το 80%, ενώ η άμεση μετατροπή της χημικής ενέργειας του υδρογόνου σε ηλεκτρική μειώνει σημαντικά τις ενεργειακές απώλειες, σε αντίθεση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης.

Τα ηλεκτρικά οχήματα κυψέλης καυσίμου διατηρούν πολλά κοινά εξαρτήματα και τεχνολογικά χαρακτηριστικά με τα αμιγώς ηλεκτρικά οχήματα (Battery Electric Vehicles – BEVs) συμπεριλαμβανομένου των ηλεκτρονικών ισχύος, των μετατροπέων και των ηλεκτρικών κινητήρων. Η ειδοποιός διαφορά τους έγκειται στην πηγή ενέργειας. Ενώ τα BEVs βασίζονται στην αποθηκευμένη ηλεκτρική ενέργεια των μπαταριών, τα FCEVs παράγουν επιτόπου ηλεκτρισμό μέσω της κυψέλης καυσίμου, καθιστώντας τα καταλληλότερα για μεγαλύτερες αποστάσεις και ταχύτερους ανεφοδιασμούς.

Η αρχιτεκτονική ενός οχήματος κυψέλης καυσίμου αποτελείται από πλήθος εξαρτημάτων, καθένα από τα οποία εκτελεί κρίσιμες και συγκεκριμένες λειτουργίες για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας του οχήματος. Η κυψέλη καυσίμου αποτελεί την καρδιά του συστήματος, μετατρέποντας το καύσιμο υδρογόνο σε ηλεκτρική ενέργεια. Το σύστημα πρόωσης περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, δύο μπαταρίες, μία κύρια υψηλής τάσης που αποθηκεύει ενέργεια από την αναγεννητική πέδηση και υποστηρίζει την παροχή εφεδρειών του ηλεκτροκινητήρα σε περιόδους υψηλής ζήτησης ισχύος, όπως κατά την επιτάχυνση και μία βοηθητική που εξυπηρετεί κυρίως τα ηλεκτρονικά υποσυστήματα και την εκκίνηση του οχήματος. Συμπληρωτικά, οι μετατροπείς DC/DC ρυθμίζουν τις τάσεις, μετατρέποντας το συνεχές ρεύμα υψηλής τάσης σε χαμηλή ώστε η κύρια μπαταρία να επαναφορτίσει τη βοηθητική, ενώ ο ηλεκτροκινητήρας τροφοδοτείται από την κυψέλη καυσίμου και την κύρια μπαταρία μεταδίδοντας την κίνηση στους τροχούς του οχήματος.



Εικόνα 2.5.3 Εξαρτήματα ενός ηλεκτρικού οχήματος κυψέλης καυσίμου FCEV (33)

Κομβικό στοιχείο αποτελεί εξίσου η δεξαμενή αποθήκευσης του υδρογόνου, η οποία είναι συνήθως υψηλής πίεσης και τύπου IV, κατασκευασμένη από σύνθετα υλικά ώστε να προσφέρει χαμηλό βάρος και υψηλή ανθεκτικότητα σε συνθήκες πίεσης έως 700 bar. Η φύση του υδρογόνου ως εξαιρετικά εύφλεκτο και διαχυτικό αέριο επιβάλλει αυστηρές προδιαγραφές ασφαλείας για το σύστημα αποθήκευσης και διαχείρισης του καυσίμου, ενώ σπουδαίας σημασίας είναι και ο σωστός σχεδιασμός ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη αυτονομία. Ενδεικτικά μοντέλα

FCEVs που έχουν ήδη αναπτυχθεί και κυκλοφορούν στην αγορά είναι το Toyota Mirai, το Hyundai Nexo και το Honda Clarity (30), (33).

Η τεχνολογία των κυψελών καυσίμου επεκτείνεται και στον τομέα των δημοσίων συγκοινωνιών, με τα αστικά λεωφορεία κυψέλης καυσίμου να αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη λύση για την απανθρακοποίηση των αστικών κέντρων. Τα FCEBs χρησιμοποιούν τις ίδιες βασικές αρχές λειτουργίας και τεχνικά χαρακτηριστικά με τα επιβατικά οχήματα, ωστόσο προσαρμόζονται για μεγαλύτερες ενεργειακές ανάγκες, όπως ορίζουν οι πόλεις. Παρότι η διείσδυσή τους παραμένει σχετικά περιορισμένη, κυρίως λόγω του υψηλού κόστους και της τεχνικής πολυπλοκότητας του συστήματος, αρκετές εταιρείες έχουν παρουσιάσει εμπορικά μοντέλα όπως τα Mercedes-Benz EvoBus, Van Hool, APTS και New Flyer (36).

Κρίσιμος παράγοντας για την ευρεία υιοθέτηση των FCEVs και FCEBs αποτελεί η ανάπτυξη ενός κατάλληλου δικτύου υποδομών ανεφοδιασμού υδρογόνου. Οι σταθμοί ανεφοδιασμού υδρογόνου (Hydrogen Refueling Stations – HRS) σχεδιάζονται ώστε να εξυπηρετούν τα επιβατικά οχήματα και τα λεωφορεία με ταχεία και ασφαλή διαδικασία ανεφοδιασμού. Η πλήρωση ενός FCEV διαρκεί περίπου 3 έως 5 λεπτά, ενώ η πίεση ανεφοδιασμού είναι συνήθως 700 bar για τα επιβατικά οχήματα και 350 bar για τα λεωφορεία, αν και σε αρκετές περιπτώσεις τα τελευταία ενδέχεται να απαιτούν και υψηλότερες πιέσεις για αποδοτικότερη αποθήκευση. Οι σταθμοί αυτοί, ενσωματώνουν επιπλέον συστήματα συμπίεσης, αποθήκευσης ή και ψύξης του υδρογόνου, ενώ πρέπει να συμμορφώνονται με τα αυστηρά πρότυπα ασφαλείας λόγω των ιδιοτήτων που παρουσιάζει το υδρογόνο.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το υδρογόνο εμφανίζει υψηλότερη ενεργειακή πυκνότητα κατά βάρος σε σύγκριση με τα συμβατικά καύσιμα και τις μπαταρίες, γεγονός που καθιστά τα FCEVs ιδιαίτερα ελκυστικά για εφαρμογές μεγάλης αυτονομίας και βαρέων οχημάτων, όπου οι ενεργειακές απαιτήσεις είναι αυξημένες και οι περιορισμοί βάρους και όγκου είναι κρίσιμοι. Συνοψίζοντας, η τεχνολογία κυψελών καυσίμου για οχήματα παρουσιάζει μία ώριμη τεχνολογική βάση και ένα σημαντικό δυναμικό για την επίτευξη της απανθρακοποίησης και βιωσιμότητας του τομέα των μεταφορών, με σαφή περιβαλλοντικά και τεχνικά πλεονεκτήματα. Οι προκλήσεις για την ευρεία και εμπορική εφαρμογή τους, υπό το πρίσμα της ενεργειακής μετάβασης, εστιάζεται πλέον στην ανάπτυξη των απαραίτητων υποδομών και στη μείωση του κόστους παραγωγής και συντήρησης (30), (33).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ

3.1 Ιστορική αναδρομή

Τα τελευταία χρόνια, υπό το πρίσμα της κλιματικής αλλαγής, η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με προσέγγιση κύκλου ζωής αναπτύσσεται με γοργούς ρυθμούς, καταλαμβάνοντας εξέχουσα θέση στην επιστημονική έρευνα και την περιβαλλοντική πολιτική. Παρά το γεγονός ότι η ευρεία εφαρμογή μεθόδων ανάλυσης περιβαλλοντικού αποτυπώματος είναι σχετικά πρόσφατη, η αρχή της ιστορίας χρονολογείται κάποιες δεκαετίες πίσω. Ειδικότερα, η ιδέα της ΑΚΖ γεννήθηκε τη δεκαετία του 1960, σε μία εποχή όπου οι ανησυχίες για τη ρύπανση του περιβάλλοντος και την εξάντληση των φυσικών πόρων άρχισαν να εντείνονται και να προκαλούν σημαντική ανησυχία, με στόχο τη συνολική περιβαλλοντική σκιαγράφηση ποικίλων προϊόντων.

Οι πρώτες μελέτες επικεντρώθηκαν κυρίως στον τομέα της συσκευασίας προϊόντων, με έμφαση στην ενεργειακή κατανάλωση σε εταιρικό επίπεδο, στις γεωγραφικές περιοχές της Αμερικής και της Βόρειας Ευρώπης. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980 και ιδίως τη δεκαετία του 1990, η ΑΚΖ γνώρισε σημαντική μεθοδολογική πρόοδο, με την ανάπτυξη προτύπων, βάσεων δεδομένων και μεθόδων εκτίμησης επιπτώσεων, κυρίως από ακαδημαϊκά ιδρύματα και διεθνής οργανισμούς. Εκείνη την περίοδο καθιερώθηκε και επίσημα ο όρος «Ανάλυση Κύκλου Ζωής - ΑΚΖ (Life Cycle Assessment – LCA)», ενώ η μοντελοποίηση ολοένα και πιο πολύπλοκων συστημάτων σε συνδυασμό με τον πολλαπλασιασμό των δεδομένων, έδωσε το έναυσμα για τη δημιουργία των πρώτων εξειδικευμένων λογισμικών μελέτης, όπως το SimaPro και GaBi.

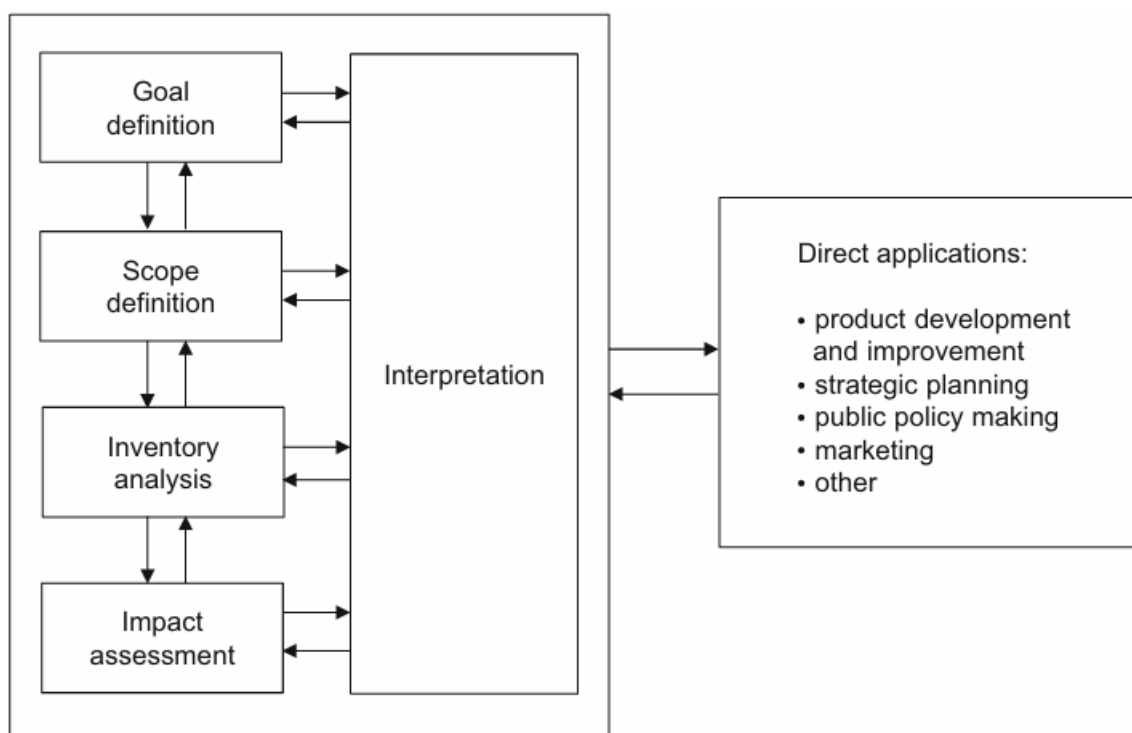
Με την πάροδο του χρόνου και την εδραίωση της βασικής μεθοδολογίας, διευρύνθηκε το πεδίο εφαρμογών της ΑΚΖ, πέρα από μεμονωμένα προϊόντα, σε σύνθετα συστήματα και στρατηγικές πολιτικής. Κυβερνήσεις, βιομηχανίες και διεθνής οργανισμοί άρχισαν να ενσωματώνουν την ΑΚΖ στο σχεδιασμό προϊόντων και υπηρεσιών με σκοπό την επίτευξη περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Παρά τη σύντομη ιστορία της, με 50 χρόνια θεωρητικής ανάπτυξης και λιγότερο από 30 χρόνια ευρείας εφαρμογής, είναι διεθνώς αναγνωρισμένη ως μία ολοκληρωμένη μέθοδο περιβαλλοντικής διαχείρισης. Σήμερα, η ΑΚΖ αναγνωρίζεται διεθνώς και ορίζεται ως ένα εργαλείο για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας μιας διαδικασίας, ενώ η εφαρμογή της καλύπτει πλέον ένα ευρύ φάσμα τομέων, όπως η ενέργεια, οι μεταφορές, η γεωργία, η βιομηχανία κτλ. (37)

3.2 Γενικά στοιχεία

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί μία δομημένη, επιστημονικά τεκμηριωμένη και ποσοτική μεθοδολογία για την αξιολόγηση των δυνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της κατανάλωσης πόρων που χρησιμοποιούνται καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή συστήματος, από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως την τελική διάθεση και διαχείριση αποβλήτων. Βασίζεται σε διεθνή πρότυπα, ειδικότερα τα ISO 14040 και ISO 14044,

τα οποία καθορίζουν τη μεθοδολογική δομή και τις απαιτήσεις για την διεξαγωγή μίας μελέτης. Οι μεθοδολογικές φάσεις της AKZ αποτελούνται από τα εξής τέσσερα κύρια στάδια (38):

- **Καθορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής (Goal and Scope Definition)** : Σε αυτό το πρώτο στάδιο, ορίζεται ο σκοπός της μελέτης, τα ερωτήματα που επιχειρεί να απαντήσει και αναφέρονται οι προβλεπόμενες εφαρμογές αλλά και οι αποδέκτες της μελέτης. Το πεδίο εφαρμογής της περιλαμβάνει όλες τις πληροφορίες που στοιχειοθετούν το εξεταζόμενο σύστημα. Η σαφής διατύπωση αυτών των στοιχείων είναι κρίσιμη για τα επόμενα βήματα, τον τρόπο διεξαγωγής της μελέτης καθώς και την εγκυρότητα της.
- **Απογραφή Κύκλου Ζωής (Life Cycle Inventory – LCI)** : Περιλαμβάνει τη συλλογή των απαραίτητων πληροφοριών σχετικά με τις εισροές και εκροές, όπως πρώτες ύλες, ενέργεια, εκπομπές, απόβλητα, που σχετίζονται με κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του υπό μελέτη συστήματος.
- **Εκτίμηση Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment – LCIA)** : Σε αυτό το στάδιο, τα δεδομένα της απογραφής μεταφράζονται σε ενδεχόμενες επιπτώσεις στο περιβάλλον με απώτερο σκοπό την κατανόηση της περιβαλλοντικής σημασίας των φυσικών ροών του συστήματος.
- **Ερμηνεία Αποτελεσμάτων (Interpretation)** : Το τελικό στάδιο περιλαμβάνει την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της μελέτης προκειμένου να εξαχθούν ασφαλή και επιστημονικά τεκμηριωμένα συμπεράσματα. Τα ευρήματα εξετάζονται υπό το πρίσμα των αρχικών στόχων, ενώ αναδεικνύονται οι κρίσιμες φάσεις του κύκλου ζωής και προτείνονται ενδεχόμενες βελτιώσεις.



Εικόνα 3.2.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο και στάδια ανάλυσης κύκλου ζωής (38)

Όπως γίνεται φανερό και από την εικόνα 3.2.1, η AKZ αποτελεί μία επαναληπτική και αλληλεπιδραστική διαδικασία, με την εξέλιξη ενός σταδίου να μπορεί να οδηγήσει σε αναθεώρηση ή εμπλουτισμό των υπολοίπων. Για παράδειγμα, η αναγνώριση διεργασιών αυξημένης περιβαλλοντικής βαρύτητας κατά την αξιολόγηση των επιπτώσεων μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την αναθεώρηση του καταλόγου απογραφής ή/και τον επαναπροσδιορισμό των ορίων του συστήματος.

Μία πλήρης μελέτη κύκλου ζωής λαμβάνει υπόψη όλη την αλυσίδα αξίας του υπό μελέτη συστήματος ή προϊόντος, από την κατασκευή και μεταφορά των προϊόντων έως την τελική διάθεση και απόρριψη τους. Σε ορισμένες περιπτώσεις για λόγους σκοπιμότητας, δεν λαμβάνονται υπόψη όλα τα στάδια του κύκλου ζωής και η ανάλυση μπορεί να λαμβάνει διάφορες μορφές ανάλογα τα όρια του συστήματος που εξετάζονται, με τις διάφορες προσεγγίσεις να ορίζονται παρακάτω (38) :

- **Cradle-to-grave** : Περιλαμβάνει όλα τα στάδια ζωής, από την εξόρυξη πρώτων υλών έως τη χρήση και την τελική διάθεση του προϊόντος. Αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση.
- **Cradle-to-gate** : Εξετάζει μόνο το στάδιο απόκτησης των υλικών και της κατασκευής του προϊόντος. Χρήσιμο για συγκριτικές αναλύσεις μεταξύ παραγωγών.
- **Gate-to-gate** : Εστιάζει σε ένα συγκεκριμένο στάδιο ή αποκλειστικά στη φάση της παραγωγής, χωρίς να λαμβάνει υπόψη προηγούμενα ή επόμενα στάδια.
- **Gate-to-grave** : Λαμβάνεται υπόψη το στάδιο της χρήσης και της τελικής απόρριψης του εκάστοτε προϊόντος, αγνοώντας το στάδιο παραγωγής.
- **Well-to-wheel** : Χρησιμοποιείται σε ενεργειακές μελέτες, καλύπτοντας το σύνολο της αλυσίδας αξίας από την παραγωγή καυσίμου μέχρι την τελική κατανάλωσή του.

Η επιλογή της κατάλληλης προσέγγισης εξαρτάται από το σκοπό της μελέτης, τη διαθεσιμότητα των δεδομένων καθώς και τις απαιτήσεις των εμπλεκόμενων φορέων. Η σαφής τεκμηρίωση των υποθέσεων και των ορίων του συστήματος είναι καθοριστικής σημασίας για την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

3.3 Καθορισμός στόχου και πεδίου εφαρμογής

Ο προσδιορισμός του στόχου μελέτης και του πεδίου εφαρμογής είναι το αρχικό και το πιο σημαντικό στάδιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, καθώς επηρεάζει καθοριστικά όλες τις επόμενες φάσεις της μελέτης και την τελική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, πρωταρχικός στόχος του σταδίου είναι η διασφάλιση ότι η AKZ διεξάγεται με συνέπεια και ακρίβεια, με γνώμονα τις ανάγκες των ενδιαφερόμενων παραγόντων και τις ιδιαιτερότητες του υπό εξέταση συστήματος.

Κατά τον καθορισμό του στόχου, πρέπει να δηλώνονται με σαφήνεια και λεπτομέρεια οι λόγοι εκπόνησης της μελέτης καθώς και οι προβλεπόμενες εφαρμογές των αποτελεσμάτων της.

Σημαντικό εξίσου, για επικοινωνιακούς λόγους, είναι να αναφέρονται οι περιορισμοί λόγω μεθοδολογικών αποφάσεων, το κοινό στο οποίο απευθύνεται η μελέτη καθώς και τα στοιχεία του κύριου υπεύθυνου της έρευνας και των εμπλεκόμενων φορέων ή οργανισμών. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια της ανάλυσης, πρέπει να ικανοποιούν τον αρχικά ορισμένο στόχο, ενώ αντίστροφα, εάν προκύψουν νέα δεδομένα ή περιορισμοί ενδέχεται να απαιτηθεί επανεξέταση του στόχου (39).

Το επόμενο βήμα, είναι ο προσδιορισμός του πεδίου εφαρμογής, ο οποίος περιλαμβάνει τη λεπτομερή περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος, τον τρόπο διεξαγωγής της ανάλυσης, τις μεθόδους και τα κριτήρια αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που εφαρμόζονται, καθώς και τις υποθέσεις και τους περιορισμούς που διέπουν τη μοντελοποίηση. Ορισμένα από τα βασικά μέρη που απαρτίζουν αυτό το στάδιο και είναι σημαντικό να αναφερθούν είναι τα εξής (39), (40) :

- **Υπό εξέταση σύστημα (Product system)** : Αποτελεί το σύνολο των επιμέρους διεργασιών (unit processes) που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για την εκτέλεση μίας ή περισσότερων λειτουργιών. Το σύστημα διαμορφώνεται κατάλληλα έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει τον πλήρη κύκλο ζωής του προϊόντος ή της υπηρεσίας που αξιολογείται.
- **Όρια συστήματος (System boundaries)** : Η οριοθέτηση του εξεταζόμενου συστήματος καθορίζει ποιες διεργασίες περιλαμβάνονται και ποιες εξαιρούνται από την ανάλυση. Ο τρόπος καθορισμού των ορίων επηρεάζει σημαντικά την πληρότητα και την ακρίβεια της μοντελοποίησης καθώς και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, αφού προσδιορίζει τις μοναδιαίες διεργασίες για τις οποίες ποσοτικοποιούνται οι σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Τα όρια επιλέγονται με τέτοιο τρόπο προκειμένου να εξυπηρετούν τον σκοπό της μελέτης, διασφαλίζοντας επαρκή κάλυψη όλων των σημαντικών ροών.
- **Λειτουργική μονάδα (Functional unit)** : Ο ορισμός της λειτουργικής μονάδας αποτελεί βασική προϋπόθεση για την διεξαγωγή της ΑΚΖ. Καθορίζει τα ποιοτικά και ποσοτικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του συστήματος, λειτουργώντας ως σημείο αναφοράς για τη συσχέτιση των εισροών και εκροών, επιτρέποντας παράλληλα τη σύγκριση μεταξύ εναλλακτικών σεναρίων. Η επιλογή της πρέπει να είναι σαφής, μετρήσιμη και σχετική με τη λειτουργία που επιτελεί το σύστημα. Ενδεικτικά ερωτήματα που βοηθούν στον καθορισμό της λειτουργικής μονάδας είναι : Τι παρέχεται; Πόσο; Για πόσο χρονικό διάστημα; Σε ποιο πλαίσιο;
- **Μέθοδος κατανομής επιπτώσεων σε πολυλειτουργικές διεργασίες (Multifunctional processes)** : Σε περιπτώσεις όπου μία διεργασία έχει ως αποτέλεσμα την παραγωγή περισσότερων από ενός προϊόντος (πολυλειτουργικές διεργασίες), καθίσταται αναγκαία η κατανομή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στα επιμέρους προϊόντα. Για αυτό το σκοπό προτείνονται ορισμένες μεθοδολογικές προσεγγίσεις με σειρά προτεραιότητας. Αρχικά εφαρμόζεται η υποδιαίρεση της διεργασίας (subdivision), κατά την οποία η αρχική διεργασία διασπάται σε επιμέρους τμήματα, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί αποκλειστικά σε ένα προϊόν. Εάν αυτό δεν είναι εφικτό, πραγματοποιείται επέκταση των ορίων του συστήματος (system expansion), ώστε να συμπεριληφθούν τυχόν υποπροϊόντα. Σε περίπτωση μη ικανοποιητικής εφαρμογής των παραπάνω, επιλέγεται η κατανομή

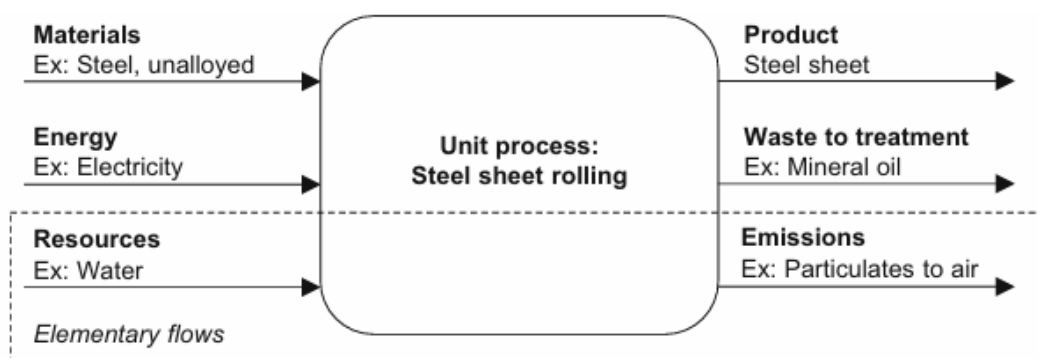
(allocation) των επιπτώσεων με βάση έναν κατάλληλο συντελεστή, όπως η μάζα ή η ενεργειακή πυκνότητα.

3.4 Απογραφή κύκλου ζωής

Το στάδιο της απογραφής κύκλου ζωής αποτελείται από τη συλλογή, οργάνωση και ποσοτικοποίηση όλων των δεδομένων που συνθέτουν το σύνολο της αλυσίδας αξίας ενός προϊόντος ή συστήματος. Η διαδικασία αυτή περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση των στοιχειωδών ροών προς, από και διαμέσου του υπό μελέτη συστήματος, με σκοπό την κατασκευή ενός αναλυτικού καταλόγου απογραφής. Ο συγκεντρωτικός κατάλογος απογραφής περιέχει όλες τις σχετικές ροές υλικών, ενέργειας και εκπομπών που διασχίζουν τα όρια του συστήματος, ανάγοντας τα δεδομένα στη λειτουργική μονάδα που έχει καθοριστεί σε προηγούμενο στάδιο. Οι πληροφορίες που παρέχονται χρησιμοποιούνται ως βάση για την επόμενη φάση, της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (41).

Πληροφορίες για την κατασκευή του σχετικού καταλόγου μπορεί να προέρχονται από έναν συνδυασμό ποικίλων πηγών, όπως βάσεις δεδομένων (π.χ. Ecoinvent), βιβλιογραφικές αναφορές ή πρωτογενή δεδομένα από κατασκευαστές. Ανάλογα την προέλευση τους, τα δεδομένα κατηγοριοποιούνται σε εξειδικευμένα (foreground data), που σχετίζονται άμεσα με τις διεργασίες του συστήματος και δεδομένα υποβάθρου (background data), τα οποία αφορούν γενικά στοιχεία για την παραγωγή υλικών, ενέργειας και είναι συνήθως διαθέσιμα στις έτοιμες βάσεις δεδομένων των λογισμικών ανάλυσης ή στη βιβλιογραφία. Επιπλέον, οι φυσικές ροές των διεργασιών του συστήματος διακρίνονται σε εισροές (inputs), που σχετίζονται με πρώτες ύλες, πόρους, ενέργεια και εκροές (outputs), αναφορικά με τα προϊόντα, τα απορρίμματα προς επεξεργασία και τις εκπομπές σε αέρα, νερό, έδαφος (39).

Στην παρακάτω εικόνα παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό διάγραμμα μίας βασικής διεργασίας έλασης φύλλων χάλυβα, στο οποίο αποτυπώνονται οι πιθανές εισροές και εκροές που τη διέπουν. Το διάγραμμα αυτό αντικατοπτρίζει τον τρόπο καταγραφής και οργάνωσης των δεδομένων σε αυτό το στάδιο της ΑΚΖ (41).



Εικόνα 3.4.1 Παράδειγμα μίας βασικής διεργασίας με απεικόνιση των εισροών και εκροών (41)

Τις περισσότερες φορές, το στάδιο αυτό αποτελεί το πιο απαιτητικό και χρονοβόρο σε μία μελέτη ΑΚΖ λόγω της έλλειψης επαρκών στοιχείων αλλά και της δυσκολίας πρόσβασης σε πλήρη και αξιόπιστα δεδομένα υψηλής ποιότητας. Σπανίως είναι πρακτικά εφικτό να συλλεχθούν όλα τα απαραίτητα στοιχεία που απαρτίζουν το σύστημα μελέτης με την επιθυμητή ακρίβεια, εξαιτίας χρονικών και οικονομικών περιορισμών. Για αυτό το λόγο, είναι κρίσιμο να υιοθετείται μία δομημένη και στρατηγική προσέγγιση, με έμφαση κυρίως στα τμήματα που αναμένεται να έχουν τη μεγαλύτερη συμβολή στις συνολικές επιπτώσεις. Έτσι, επιτυγχάνεται βέλτιστη ακρίβεια και ρεαλιστικότητα, ενώ διασφαλίζεται η επιστημονική εγκυρότητα και αξιοπιστία της μελέτης. Η ποιότητα των δεδομένων που έχουν συλλεχθεί αποτελεί θεμέλιο λίθο για την ακρίβεια των τελικών αποτελεσμάτων.

3.5 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Το στάδιο της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment – LCIA) αποσκοπεί στη μετατροπή των ποσοτικών δεδομένων της απογραφής σε ποιοτικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα, τα οποία μπορούν να αξιολογηθούν, να συγκριθούν και να αποτελέσουν τη βάση για τη λήψη αποφάσεων. Η διαδικασία επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής κατάλληλων μεθόδων και δεικτών και περιλαμβάνει το συσχετισμό των εισροών και εκροών του συστήματος με ποικίλες κατηγορίες επιπτώσεων καθώς και την ποσοτική εκτίμηση της συμβολής κάθε ροής σε αυτές. Σε αντίθεση με τα υπόλοιπα στάδια, η LCIA είναι σε μεγάλο βαθμό αυτοματοποιημένη από τα λογισμικά ΑΚΖ, ωστόσο η κατανόηση και η σαφής διατύπωση των μοντέλων, των μεθόδων και των περιορισμών κάθε μελέτης παραμένουν κρίσιμες για τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040/14044, το στάδιο αυτό χωρίζεται στα παρακάτω βήματα (42):

- **Επιλογή κατηγοριών και δεικτών επιπτώσεων** : Καθορίζονται οι περιβαλλοντικές κατηγορίες για τις οποίες εξάγονται τα αποτελέσματα, όπως κλιματική αλλαγή, ευτροφισμός, τοξικότητα κτλ. Οι κατηγορίες που επιλέγονται πρέπει να είναι αντιπροσωπευτικές των παραμέτρων που έχουν επιλεγθεί στο πρώτο στάδιο της ΑΚΖ. Η κάθε κατηγορία συνοδεύεται από ένα δείκτη και ένα μοντέλο χαρακτηρισμού, το οποίο υπολογίζει την επίπτωση σε κοινές μονάδες.
- **Κατηγοριοποίηση (Classification)** : Οι ροές της απογραφής αντιστοιχίζονται στις επιλεγμένες κατηγορίες επιπτώσεων στις οποίες συμβάλλουν, σύμφωνα με τον μηχανισμό δράσης τους στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, οι εκπομπές CO₂, CH₄ και N₂O κατηγοριοποιούνται στην «κλιματική αλλαγή».
- **Χαρακτηρισμός (Characterisation)** : Οι ροές αξιολογούνται σύμφωνα με το βαθμό στον οποίο συμβάλλουν σε μία κατηγορία επίπτωσης. Η συμβολή κάθε ροής ποσοτικοποιείται με χρήση συντελεστών χαρακτηρισμού (characterization factors). Το αποτέλεσμα είναι η συνολική επίπτωση ανά κατηγορία, εκφρασμένη σε κοινές μονάδες (π.χ. kg CO₂-eq για την κλιματική αλλαγή).

Τα επόμενα βήματα είναι προαιρετικά, ωστόσο προσφέρουν περαιτέρω ερμηνευτική αξία :

- **Ομαδοποίηση (Grouping)** : Οι κατηγορίες επιπτώσεων ομαδοποιούνται σε ευρύτερες θεματικές ενότητες, όπως ανθρώπινη υγεία, ποιότητα οικοσυστημάτων, οι οποίες είναι άμεσα συνδεδεμένες με το στόχο και το πεδίο εφαρμογής. Επιπλέον, μπορούν να καταταχθούν ιεραρχικά ανάλογα με τη σημασία τους, είτε με βάση την επίδραση τους σε παγκόσμιο και τοπικό επίπεδο.
- **Κανονικοποίηση (Normalization)** : Τα αποτελέσματα διαφορετικών κατηγοριών επιπτώσεων συγκρίνονται με βάση κανονικοποιημένες τιμές αναφοράς (π.χ. ετήσιες εκπομπές ανά κάτοικο ή ανά χώρα), με στόχο τη διευκόλυνση της ερμηνείας τους και την κατανόηση της σχετικής σπουδαιότητάς τους ως προς το σύστημα αναφοράς.
- **Στάθμιση (Weighting)** : Σε αυτή την περίπτωση, η οποία έπεται της κανονικοποίησης, ανατίθεται ένας συντελεστής βαρύτητας σε κάθε κατηγορία επιπτώσεων, ανάλογα την περιβαλλοντική ή κοινωνική σημασία τους. Το στάδιο όμως αυτό δεν βασίζεται σε επιστημονικές αρχές αλλά εμπεριέχει υποκειμενικότητα για το ποιες επιπτώσεις είναι πιο σημαντικές από άλλες και για αυτό το λόγο αποφεύγεται συχνά σε επιστημονικές μελέτες που προορίζονται για δημοσίευση.

3.5.1 Μέθοδοι ανάλυσης και κατηγορίες επιπτώσεων

Η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων βασίζεται στη χρήση καθιερωμένων μεθοδολογιών, οι οποίες διαφέρουν ως προς την επιστημονική προσέγγιση, το επίπεδο λεπτομέρειας και τις γεωγραφικές ή χρονικές παραδοχές. Οι πιο διαδεδομένες μέθοδοι είναι οι CML, TRACI, ILCD και ReCiPe, καθεμία από τις οποίες διαθέτει διαφορετικά σύνολα κατηγοριών επιπτώσεων και χρησιμοποιεί ξεχωριστά μοντέλα χαρακτηρισμού. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τη διαθεσιμότητα των δεδομένων, το πεδίο εφαρμογής και το είδος της επικείμενης ανάλυσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος ReCiPe 2016 Midpoint (H), η οποία αποτελεί μία από τις πιο ολοκληρωμένες και επιστημονικά τεκμηριωμένες μεθόδους LCIA. Η μέθοδος ReCiPe προσφέρει δύο πλαίσια προσέγγισης των κατηγοριών επιπτώσεων, σε επίπεδο midpoint, όπου και επιλέχθηκε, και σε επίπεδο endpoint. Σε επίπεδο midpoint, η αξιολόγηση επικεντρώνεται στην ποσοτικοποίηση των ισοδύναμων εκπομπών που σχετίζονται με συγκεκριμένες κατηγορίες σε 18 περιβαλλοντικούς δείκτες παρέχοντας υψηλό βαθμό λεπτομέρειας και επιστημονικής ακρίβειας, ενώ σε επίπεδο endpoint οι επιβαρύνσεις ομαδοποιούνται και αναλύονται σε τρεις βασικές κατηγορίες, στην ανθρώπινη υγεία, στα οικοσυστήματα και στη διαθεσιμότητα των φυσικών πόρων. Ως προς τον χρονικό ορίζοντα της ανάλυσης υπάρχουν τρεις επιλογές : ατομικιστική (Individualist), ιεραρχική (Hierarchist) και ισότιμη (Egalitarian), αναφορικά με βραχυπρόθεσμο, μεσοπρόθεσμο και μακροπρόθεσμο διάστημα, αντίστοιχα (42), (43).

Είναι σημαντικό να αναφερθεί πως τα αποτελέσματα της φάσης LCIA δεν πρέπει να ερμηνεύονται ως προβλέψεις για πραγματικές επιπτώσεις ή κινδύνους στο περιβάλλον και στην ανθρώπινη

υγεία, αλλά ως ενδείξεις πιθανής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, οι οποίες διευκολύνουν την κατανόηση της σχετικής σημασίας των ροών του συστήματος στο κύκλο ζωής του.

Στην παρούσα μελέτη χρησιμοποιούνται και οι 18 περιβαλλοντικοί δείκτες midpoint της ReCiPe 2016, οι οποίοι καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα περιβαλλοντικών θεμάτων. Οι δείκτες αυτοί παρουσιάζονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα (43), (44).

Πίνακας 3.5.1 Περιβαλλοντικοί δείκτες μεθόδου ReCiPe 2016 Midpoint (43)

Ελληνική ορολογία	Αγγλική ορολογία	Συντομογραφία	Μονάδα μέτρησης
Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη	Global Warming Potential	GWP	kg CO ₂ eq
Εξάντληση όζοντος	Stratospheric Ozone Depletion	SOD	kg CFC ₁₁ eq
Ιονίζουσα ακτινοβολία	Ionizing Radiation	IR	kBq Cobalt-60 eq
Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία	Ozone Formation, Human Health	OFHH	kg NO _x eq
Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων	Fine Particulate Matter Formation	FPMF	kg PM _{2.5} eq
Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	Ozone Formation, Terrestrial Ecosystem	OFTE	kg NO _x eq
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	Terrestrial Acidification	TA	kg SO ₂ eq
Ευτροφισμός γλυκού νερού	Fresh Water Eutrophication	FEU	kg P eq
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων	Marine Eutrophication	MEU	kg N eq
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	Terrestrial Ecotoxicity	TET	kg 1.4-DCB
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	Fresh Water Ecotoxicity	FET	kg 1.4-DCB
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστημάτων	Marine Ecotoxicity	MET	kg 1.4-DCB
Ανθρώπινη καρκινογενής τοξικότητα	Human Carcinogenic Toxicity	HCT	kg 1.4-DCB
Ανθρώπινη μη καρκινογενής τοξικότητα	Human Non-Carcinogenic Toxicity	HNCT	kg 1.4-DCB
Χρήση γης	Land Use	LU	m ² a crop eq
Εξάντληση ορυκτών πόρων	Mineral Resource Scarcity	MRS	kg Cu eq
Εξάντληση ορυκτών καυσίμων	Fossil Resource Scarcity	FRS	kg Oil eq
Κατανάλωση νερού	Water Consumption	WC	m ³

Οι κατηγορίες επιπτώσεων και οι αντίστοιχοι περιβαλλοντικοί δείκτες χαρακτηρισμού περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω, προκειμένου να γίνει κατανοητό τι πρεσβεύει η καθεμία (43), (44) :

- **Κλιματική αλλαγή** : Ο δείκτης χαρακτηρισμού, με βάση την έκθεση της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την κλιματική αλλαγή, θεωρείται το Δυναμικό Υπερθέρμανσης του Πλανήτη. Ποσοτικοποιεί την ικανότητα ενός αερίου του θερμοκηπίου να παγιδεύει υπέρυθρη ακτινοβολία στην ατμόσφαιρα. Εκφράζεται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα.
- **Εξάντληση όζοντος** : Αξιολογεί το δυναμικό καταστροφής του στρώματος όζοντος της στρατόσφαιρας από ανθρωπογενείς εκπομπές ουσιών που καταστρέφουν το όζον. Εκφράζεται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών τριχλωροφθορομεθανίου.
- **Ιονίζουσα ακτινοβολία** : Αναφέρεται στα επίπεδα έκθεσης του παγκόσμιου πληθυσμού στην ιονίζουσα ακτινοβολία λόγω των εκπομπών ενός ραδιονουκλιδίου. Μετριέται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών του ραδιενεργού ισότοπου κοβαλτίου-60 στον αέρα.
- **Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία** : Αντιπροσωπεύει τις επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία από την αύξηση του όζοντος (ή άλλων δραστικών ενώσεων οξυγόνου), η οποία σχετίζεται με τις εκπομπές οξειδίων του αζώτου και πτητικών οργανικών ενώσεων πλην του μεθανίου (NMVOC). Εκφράζεται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών οξειδίων του αζώτου.
- **Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων** : Λαμβάνει υπόψη τις εκπομπές και το κλάσμα πρόσληψης αιωρούμενων μικροσωματιδίων μεγέθους μικρότερο από 2.5μm (PM2.5). Μετριέται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών σωματιδίων PM2.5.
- **Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα** : Αντίστοιχα με την κατηγορία «Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία», αλλά σχετικά με τις επιδράσεις στα χερσαία οικοσυστήματα.
- **Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων** : Εκφράζει το δυναμικό όξινης του εδάφους λόγω της επίδρασης όξινων ενώσεων, με βάση τον παράγοντα μέσου παγκόσμιου ποσοστού εκπομπών διοξειδίου του θείου. Μετριέται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του θείου.
- **Ευτροφισμός γλυκού νερού** : Αντιπροσωπεύει τις επιπτώσεις της απελευθέρωσης φωσφορικών ενώσεων στα γλυκά ύδατα που οδηγούν σε υπερτροφία. Εκφράζεται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών φωσφόρου.
- **Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων** : Σχετίζεται με τις εκπομπές αζωτούχων ενώσεων στη θάλασσα και με την επακόλουθη ευτροφία. Εκφράζεται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών.
- **Τοξικότητα και οικοτοξικότητα** : Περιλαμβάνει πέντε επιμέρους κατηγορίες, οικοτοξικότητα γλυκού νερού, χερσαίων και θαλάσσιων οικοσυστημάτων και ανθρώπινη καρκινογενή και μη καρκινογενή τοξικότητα. Οι κατηγορίες αυτές αποτιμούν την έκθεση των ανθρώπων και των οικοσυστημάτων σε τοξικές χημικές ουσίες καθώς και τις σχετικές τους επιδράσεις. Εκφράζονται σε κιλά ισοδύναμων εκπομπών 1.4-διχλωροβενζολίου.
- **Χρήση γης** : Αντιπροσωπεύει την έκταση της γης που καταλαμβάνεται ή της οποίας η χρήση αλλάζει. Μετριέται σε τετραγωνικά μέτρα.

- **Εξάντληση ορυκτών πόρων** : Ποσοτικοποιεί τη σπανιότητα των ορυκτών πόρων, με βάση το πλεονάζον μεταλλευτικό δυναμικό. Εκφράζεται σε κιλά ισοδύναμου χαλκού που εξορύσσεται.
- **Εξάντληση ορυκτών καυσίμων** : Αξιολογεί την κατανάλωση και το δυναμικό των ορυκτών καυσίμων με βάση την ανώτερη θερμογόνο ικανότητα. Εκφράζεται σε κιλά ισοδύναμου πετρελαίου που χρησιμοποιείται.
- **Κατανάλωση νερού** : Αντιπροσωπεύει την ποσότητα γλυκού νερού που χρησιμοποιείται. Μετρείται σε κυβικά μέτρα.

3.6 Ερμηνεία αποτελεσμάτων

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων αποτελεί την τελική φάση μίας AKZ και στοχεύει στην εξαγωγή κατανοητών, τεκμηριωμένων και χρήσιμων συμπερασμάτων. Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται υπό το πρίσμα της αβεβαιότητας που συνοδεύει την κάθε μελέτη, λαμβάνοντας υπόψη τα ευρήματα των φάσεων απογραφής και εκτίμησης επιπτώσεων καθώς και τους στόχους και περιορισμούς που έχουν τεθεί στο στάδιο καθορισμού του πεδίου εφαρμογής, σε σχέση με τη λειτουργική μονάδα. Κατά την ερμηνεία, εντοπίζονται και αξιολογούνται οι σημαντικές ροές και διεργασίες που συνεισφέρουν στις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και ελέγχεται η πληρότητα και συνέπεια των δεδομένων που απαρτίζουν το σύστημα. Αναλυτικότερα, η διαδικασία περιλαμβάνει τα εξής βασικά στάδια (39), (45) :

- **Ανάλυση ευαισθησίας (Sensitivity analysis)** : Εξετάζεται ο βαθμός επίδρασης των αποτελεσμάτων από πιθανές αλλαγές σε σημαντικές παραμέτρους ή παραδοχές ώστε να αξιολογηθεί η αξιοπιστία των συμπερασμάτων.
- **Ανάλυση συνεισφοράς (Contribution analysis)** : Πραγματοποιείται ποσοτική ανάλυση για να εντοπιστούν οι διεργασίες ή τα στάδια του υπό μελέτη συστήματος με τη μεγαλύτερη επίδραση σε κάθε κατηγορία περιβαλλοντικής επίπτωσης.
- **Έλεγχος πληρότητας και συνέπειας** : Διασφαλίζεται ότι όλα τα σημαντικά στοιχεία έχουν συμπεριληφθεί στη μοντελοποίηση και ότι η μεθοδολογική προσέγγιση είναι εναρμονισμένη με τους καθορισμένους στόχους και το πεδίο εφαρμογής της μελέτης.

Η φάση της ερμηνείας συνδέεται άμεσα με τη λήψη αποφάσεων, καθώς παρέχει τη βάση για την αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων, τον εντοπισμό περιβαλλοντικά ευνοϊκότερων επιλογών και τη διαμόρφωση στρατηγικών ή συστάσεων για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων. Τέλος, η διαφάνεια στην παρουσίαση των παραδοχών, των περιορισμών και των αβεβαιοτήτων της μελέτης είναι καθοριστική, προκειμένου τα αποτελέσματα να είναι κατανοητά και αξιοποιήσιμα από τους ενδιαφερόμενους φορείς, διασφαλίζοντας έτσι την αξιοπιστία και την πρακτική χρησιμότητα της μελέτης AKZ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

4.1 Εισαγωγή

Η μετάβαση προς μία πράσινη οικονομία απαιτεί την ανάπτυξη και υιοθέτηση τεχνολογιών που ελαχιστοποιούν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε όλο τον κύκλο ζωής τους. Σε αυτό το πλαίσιο, το υδρογόνο προωθείται ως ένας πολλά υποσχόμενος ενεργειακός φορέας, καθιστώντας επιτακτική την ανάγκη για μία ολοκληρωμένη περιβαλλοντική ανάλυση. Παρότι η αξιοποίηση του δεν συνοδεύεται άμεσα από εκπομπές ρύπων, η συνολική επίδραση του στο οικοσύστημα εξαρτάται εξίσου από τη φάση κατασκευής των χρησιμοποιούμενων συστημάτων και ως εκ τούτου χρειάζεται να διασφαλιστεί η συμβατότητα του με τους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης. Η ανάλυση σε επίπεδο κύκλου ζωής προσφέρει αυτή τη δυνατότητα, μέσω της λεπτομερούς αποτύπωσης των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων, εντοπίζοντας τα στάδια με τη μεγαλύτερη συνεισφορά και επιτρέποντας μία ολιστική μελέτη και αξιολόγηση.

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία μελετάται το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μίας από τις πρώτες Κοιλιάδες Υδρογόνου (Hydrogen Valley) στην Ελλάδα με τη μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment - LCA). Η αξιολόγηση καλύπτει όλα τα στάδια του κύκλου ζωής, από την παραγωγή του υδρογόνου, την κατασκευή και λειτουργία των επιμέρους συστημάτων, έως τη μεταφορά του και την τελική χρήση σε δύο διαφορετικές εφαρμογές, προσφέροντας μία ολοκληρωμένη προσέγγιση μελέτης. Η συγκεκριμένη μεθοδολογία επιτρέπει την ποσοτικοποίηση ποικίλων επιπτώσεων σε όλο το φάσμα της αλυσίδας αξίας, από την εξόρυξη των πρώτων υλών, τη μεταφορά, την κατασκευή και χρήση, με βάση μία κοινή λειτουργική μονάδα, εστιάζοντας όχι μόνο στις εκπομπές CO₂ αλλά και σε πλήθος άλλων περιβαλλοντικών δεικτών. Τα αποτελέσματα της AKZ χρησιμοποιούνται επιπλέον για τη σύγκριση των σχετικών επιπτώσεων με τις συμβατικές τεχνολογίες που κατέχουν πρωταρχική θέση στους αντίστοιχους τομείς μέχρι και σήμερα. Η ανάλυση διεξάγεται σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044 και υλοποιείται με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού SimaPro, ενώ τα απαραίτητα δεδομένα καλύπτονται από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζεται αναλυτικά το σύστημα μελέτης καθώς η μεθοδολογία που εφαρμόζεται.

Βασικός πυλώνας της εργασίας αποτελεί το έργο TRIERES, το οποίο υλοποιείται σε συνεργασία με τη Motor Oil Hellas και αποσκοπεί στη δημιουργία μίας «Κοιλιάδας Υδρογόνου Μικρής Κλίμακας», με γεωγραφική αναφορά το διυλιστήριο πετρελαίου στους Αγίους Θεοδώρους στην Κόρινθο. Το έργο επιδιώκει την ανάπτυξη ενός αποτελεσματικού και ανθεκτικού διασυνδεδεμένου οικοσυστήματος που αφορά την πλήρη αλυσίδα αξίας του πράσινου υδρογόνου, σχετικά με την παραγωγή, αποθήκευση, μεταφορά και διανομή του σε εφαρμογές τελικών χρηστών όπως είναι οι μεταφορές, οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας και η ναυτιλία. Η Κοιλιάδα του έργου TRIERES διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην εθνική στρατηγική για την καθαρή ενέργεια και την ενσωμάτωση των τεχνολογιών υδρογόνου στο ενεργειακό μείγμα, ενώ είναι

απόλυτα ευθυγραμμισμένη με το πλαίσιο στόχων που έχει θέσει η ΕΕ για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 (46).

4.2 Στόχος μελέτης (Goal definition)

4.2.1 Προβλεπόμενη εφαρμογή και απευθυνόμενο κοινό

Η παρούσα μελέτη κύκλου ζωής πραγματοποιείται στα πλαίσια εκπόνησης της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας του ΔΠΜΣ «Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας» του ΕΜΠ. Το περιεχόμενο καθώς και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτή, απευθύνονται κυρίως στην πανεπιστημιακή κοινότητα, με στόχο την ενίσχυση του επιστημονικού υποβάθρου σε θέματα περιβαλλοντικής αξιολόγησης και τεχνολογιών υδρογόνου. Παράλληλα, δύναται να αποτελέσουν χρήσιμο θεμέλιο για μελλοντικές εφαρμογές ή σχετικές αναλύσεις σε ερευνητικό ή βιομηχανικό πλαίσιο.

4.2.2 Σκοπός εργασίας

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εκτίμηση και αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε επίπεδο κύκλου ζωής ενός ολοκληρωμένου συστήματος ανανεώσιμου υδρογόνου, το οποίο περιλαμβάνει τα στάδια παραγωγής, αποθήκευσης, διανομής και τελικής χρήσης στις μεταφορές και την παραγωγή ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη τις φάσεις κατασκευής και λειτουργίας των επιμέρους υποσυστημάτων. Επιπλέον, εξετάζεται συγκριτικά το περιβαλλοντικό αντίκτυπο του παραπάνω συστήματος σε σχέση με τις συμβατικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις αντίστοιχες εφαρμογές.

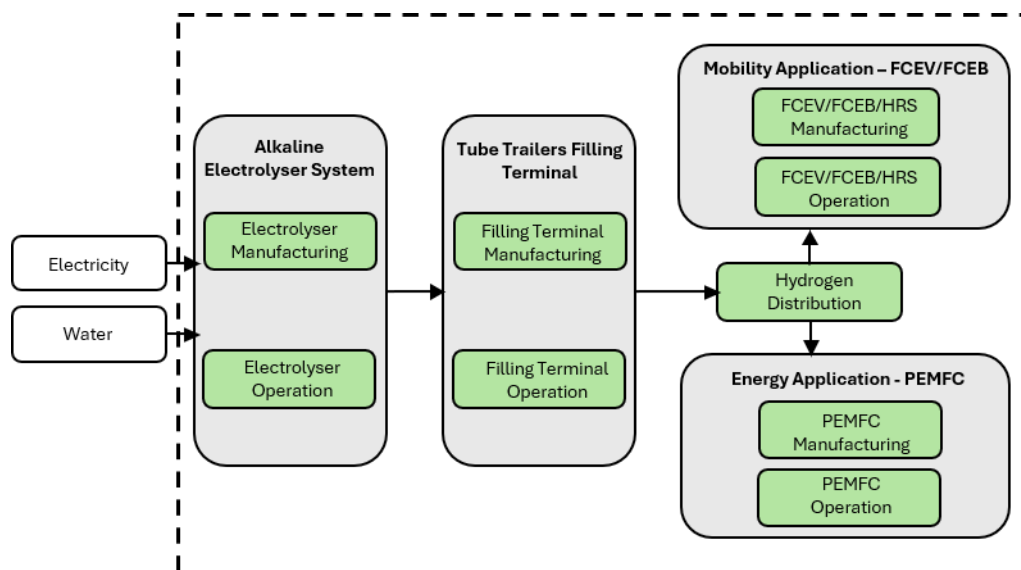
4.3 Πεδίο εφαρμογής (Scope definition)

4.3.1 Όρια συστήματος μελέτης

Η συγκεκριμένη μελέτη καλύπτει ολόκληρη την αλυσίδα αξίας του ανανεώσιμου υδρογόνου, από την παραγωγή έως και την τελική χρήση του, ακολουθώντας τη προσέγγιση cradle-to-grave. Σε αυτή την προσέγγιση λαμβάνονται υπόψη δεδομένα για την απόκτηση των πρώτων υλών, την παραγωγή, διανομή και χρήση των τελικών προϊόντων. Στο υπό εξέταση σύστημα εντάσσονται τόσο οι φάσεις κατασκευής του απαραίτητου εξοπλισμού όσο και οι φάσεις λειτουργίας του εκάστοτε σταδίου. Τα όρια του συστήματος αναλύονται ακολούθως και αποτυπώνονται επιγραμματικά στην παρακάτω εικόνα.

Συγκεκριμένα, το στάδιο παραγωγής του υδρογόνου περιλαμβάνει την κατασκευή της μονάδας αλκαλικής ηλεκτρόλυσης καθώς και τη λειτουργία της. Η αποθήκευση και διανομή του παραγόμενου υδρογόνου, που πραγματοποιείται μέσω φορτηγού τύπου tube trailer, αναλύεται ως προς την κατασκευή των αποθηκευτικών δεξαμενών και ως προς τη μεταφορά τους στις τελικές

εφαρμογές. Η αξιοποίηση του ανανεώσιμου υδρογόνου επικεντρώνεται σε δύο τελικές χρήσεις, στις μεταφορές και στην ηλεκτροπαραγωγή. Ειδικότερα, για την ηλεκτροπαραγωγή η ανάλυση αφορά την κατασκευή και λειτουργία της μονάδας κυψέλης καυσίμου PEM Fuel Cell (PEMFC), ενώ για τις μεταφορές η ανάλυση στηρίζεται στην κατασκευή και λειτουργία επιβατικών οχημάτων Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs), λεωφορείων Fuel Cell Electric Buses (FCEBs) και σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου (Hydrogen Refueling Station – HRS).



Εικόνα 4.3.1 Όρια συστήματος μελέτης

4.3.2 Λειτουργική μονάδα

Ως λειτουργική μονάδα ορίζεται 1kg υδρογόνου που παράγεται ή/και καταναλώνεται κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος (1kg hydrogen produced/consumed over the lifetime of the system). Η επιλογή της συγκεκριμένης λειτουργικής μονάδας επιτρέπει την ορθότερη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μεταξύ τόσο των εξεταζόμενων σταδίων όσο και των συμβατικών τεχνολογιών στις αντίστοιχες εφαρμογές καθώς και τη σαφή κατανομή των εισροών και εκροών στα στάδια μελέτης.

4.3.3 Παραδοχές

Για τη σύσταση του εξεταζόμενου μοντέλου υιοθετούνται ορισμένες παραδοχές, που αποσκοπούν στην απλοποίηση και στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργίας του συνολικού συστήματος.

- Η απόδοση των επιμέρους υποσυστημάτων θεωρείται ότι παραμένει σταθερή σε όλη τη διάρκεια ζωής τους, χωρίς υποβάθμιση ή ανάγκη για συντήρηση και αντικατάσταση των εκάστοτε εξαρτημάτων.
- Όσον αφορά τα παραπροϊόντα της ηλεκτρόλυσης, δηλαδή το παραγόμενο οξυγόνο και τη θερμότητα, δεν αξιοποιούνται περαιτέρω και δεν υπολογίζονται ως συμπροϊόντα, αλλά εισάγονται στο λογισμικό ως εκπομπές.
- Η αποθήκευση και μεταφορά του υδρογόνου είναι άμεσα συνδεδεμένες και αντιμετωπίζονται ως ένα ενιαίο στάδιο. Συγκεκριμένα, η αποθήκευση θεωρείται

προσωρινή και επιτυγχάνεται εικονικά μέσω φορτηγών τύπου tube trailers, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διανομή του παραγόμενου υδρογόνου στις τελικές χρήσεις.

- Από τη συνολική ποσότητα υδρογόνου που προορίζεται για τις μεταφορές, θεωρείται ότι το 10% καταναλώνεται από τα επιβατικά οχήματα, ενώ το 90% από τα αστικά λεωφορεία.
- Τέλος, τα δεδομένα σχετικά με τις ποσότητες του παραγόμενου και καταναλισκόμενου υδρογόνου είναι καθορισμένα από το έργο TRIERES, το οποίο, όπως έχει ήδη αναφερθεί, αποτελεί τη βάση για τη διαμόρφωση του υπό μελέτη συστήματος.

4.3.4 Περιορισμοί

Λόγω της έλλειψης εξειδικευμένων δεδομένων από κατασκευαστές και σχετικές εργαστηριακές βιβλιοθήκες, το σύνολο των δεδομένων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία, τόσο για τα στάδια κατασκευής των σχετικών συστημάτων όσο και για ορισμένα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας, προέρχονται από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία καθώς και τη βάση δεδομένων Ecoinvent 3 του λογισμικού SimaPro. Η χρήση αυτών των δεδομένων ενδέχεται να εισάγει ορισμένες αβεβαιότητες στα αποτελέσματα, οι οποίες λαμβάνονται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Επιπλέον, η μελέτη δεν περιλαμβάνει το τέλος ζωής του συνόλου του εξοπλισμού (end-of-life), εξαιτίας της περιορισμένης διαθεσιμότητας αντίστοιχων δεδομένων.

4.3.5 Μέθοδος ανάλυσης και κατηγορίες επιπτώσεων

Για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος χρησιμοποιείται η μέθοδος ReCiPe 2016 Midpoint (H). Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ευρέως γνωστή στη διεθνή βιβλιογραφία και προσφέρει λεπτομερή εικόνα των πιθανών επιβαρύνσεων στο περιβάλλον. Όσον αφορά τις κατηγορίες επιπτώσεων, αξιολογούνται και οι 18 περιβαλλοντικοί δείκτες που περιλαμβάνονται στη ReCiPe 2016 Midpoint, όπως έχουν οριστεί στον Πίνακα 3.5.1 (βλ. Κεφάλαιο 4) με στόχο την όσο το δυνατόν πληρέστερη ανάλυση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος του υπό εξέταση συστήματος.

4.3.6 Εξεταζόμενα σενάρια

Πέραν του βασικού σεναρίου, που περιλαμβάνει το σύνολο της αλυσίδας αξίας, δηλαδή παραγωγή, αποθήκευση και διανομή καθώς και τελική χρήση υδρογόνου, εξετάζονται επιπλέον ορισμένες παραλλαγές για το στάδιο της παραγωγής.

- Συγκεκριμένα, αναλύεται η λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης νερού με διαφορετικές πηγές ενέργειας, αφενός με αποκλειστική χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων και αφετέρου με συνδυασμό ηλιακής και αιολικής ενέργειας με υποστήριξη από το ελληνικό δίκτυο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Παράλληλα αξιολογείται και η επίδραση του συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας (Capacity Factor – CF) στη συνολική παραγωγή υδρογόνου. Συγκρίνονται δύο περιπτώσεις, η πρώτη με $CF = 53.62\%$ που αντιστοιχεί σε ετήσια παραγωγή 2410 τόνων υδρογόνου και η δεύτερη με $CF = 95\%$ που αντιστοιχεί σε ετήσια παραγωγή 4493 τόνων υδρογόνου.

4.4 Περιγραφή συστήματος μελέτης

Το υδρογόνο παράγεται μέσω αλκαλικής ηλεκτρόλυσης νερού, η οποία λαμβάνει χώρα στα διυλιστήρια Κορίνθου της Motor Oil. Το σύστημα ηλεκτρόλυσης αποτελείται από έξι μονάδες (stacks), καθεμία με ονομαστική ισχύ 5MW, συνολικής εγκατεστημένης ισχύος 30MW. Περιλαμβάνει επίσης κατάλληλο περιφερειακό εξοπλισμό (Balance of Plant - BoP), όπως ηλεκτρονικά ισχύος για τη διασύνδεση με το δίκτυο μέσης τάσης, αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας και συστήματα διαχωρισμού υγρού – αερίου. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία του συστήματος καλύπτεται αποκλειστικά από φωτοβολταϊκά. Ο αλκαλικός ηλεκτρολύτης ισχύος 30MW λειτουργεί με συντελεστή εκμετάλλευσης 53.62% και αποδίδει σε ετήσια βάση 2410 τόνους πεπιεσμένου υδρογόνου, καθαρότητας 99.99%, σε πίεση 20bar. Η μέγιστη δυναμικότητα του συστήματος σε πλήρες φορτίο ανέρχεται σε 540kg/h υδρογόνου.

Το παραγόμενο υδρογόνο στη συνέχεια συμπιέζεται στα 380bar και εφοδιάζεται σε tube trailer μέγιστης χωρητικότητας 995kg, το οποίο λειτουργεί τόσο ως μέσο μεταφοράς όσο και ως φορητή μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου. Το υδρογόνο μεταφέρεται οδικώς με φορητά πετρελαίου από τα διυλιστήρια της Κορίνθου προς δύο τελικούς προορισμούς : στο λιμάνι του Πειραιά, για σκοπούς ηλεκτροπαραγωγής και στο σταθμό ανεφοδιασμού υδρογόνου, ο οποίος βρίσκεται εντός των εγκαταστάσεων της Motor Oil. Οι αποστάσεις μεταφοράς είναι 68km και 2.6km αντίστοιχα, ενώ μετά την εκφόρτωση, το κάθε φορητό επιστρέφει άδειο στην τοποθεσία της παραγωγής. Για την κάλυψη των αναγκών ζήτησης υδρογόνου πραγματοποιούνται 20 διαδρομές προς το λιμάνι του Πειραιά και 28 διαδρομές προς το σταθμό ανεφοδιασμού, λαμβάνοντας υπόψη πως σε κάθε περίπτωση, η ωφέλιμη ποσότητα υδρογόνου που προορίζεται για κατανάλωση είναι 900kg, λόγω περιορισμών ασφαλείας.

Οι τελικές χρήσεις του υδρογόνου αφορούν τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής και τον τομέα των μεταφορών. Ειδικότερα, όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή, στο λιμάνι του Πειραιά πρόκειται να εγκατασταθεί μία μονάδα κυψέλης καυσίμου, τύπου PEM Fuel Cell ισχύος 100kW, η οποία θα καλύπτει μέρος των ηλεκτρικών αναγκών του λιμανιού, με ετήσια ζήτηση 18 τόνων υδρογόνου. Στον τομέα των μεταφορών, ο σταθμός ανεφοδιασμού υδρογόνου HRS, που θα εγκαινιαστεί τον Ιούνιο του 2025, θα τροφοδοτεί δύο επιβατικά οχήματα κυψέλης καυσίμου FCEVs και δύο αστικά λεωφορεία κυψέλης καυσίμου FCEBs. Η ετήσια κατανάλωση του υδρογόνου ανέρχεται σε 25 τόνους, με το σταθμό να έχει μέγιστη ημερήσια δυναμικότητα ανεφοδιασμού 150kg/day.

Τέλος, για λόγους σύγκρισης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κατανάλωσης υδρογόνου με τις συμβατικές τεχνολογίες, θεωρούνται ορισμένες παραδοχές σχετικά με την αντικαθιστούμενη ενέργεια. Συγκεκριμένα, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου υποκαθιστά την ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από το ελληνικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Τα επιβατικά οχήματα και τα λεωφορεία κυψέλης καυσίμου αντικαθιστούν τα αντίστοιχα συμβατικά οχήματα πετρελαίου.

4.5 Κατάλογος απογραφής (Life Cycle Inventory)

Ο κατάλογος απογραφής (Life Cycle Inventory – LCI) του υπό μελέτη συστήματος κατασκευάζεται με δεδομένα από τη διεθνή βιβλιογραφία και με χρήση της βάσης δεδομένων Ecoinvent 3 που περιλαμβάνεται στο λογισμικό SimaPro. Για τα τεχνικά χαρακτηριστικά των επιμέρους υποσυστημάτων κάθε σταδίου της αλυσίδας αξίας αξιοποιούνται δεδομένα του έργου TRIERES καθώς και συμπληρωματικές πληροφορίες, όπου δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία, από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία.

4.5.1 Παραδοχές

Για τη σύσταση του καταλόγου απογραφής καθώς και την εισαγωγή των δεδομένων στο λογισμικό SimaPro λαμβάνονται υπόψη οι εξής παραδοχές :

- Η μοντελοποίηση των διεργασιών στο λογισμικό SimaPro πραγματοποιείται με χρήση του σετ δεδομένων “Allocation, cut-off by classification, unit” της Ecoinvent 3.
- Για τα υλικά των κατασκευών, τις πηγές ενέργειας καθώς και ορισμένα δεδομένα για τη μεταφορά χρησιμοποιείται η κατηγορία “Market for”, της οποίας τα δεδομένα είναι μοντελοποιημένα σε παγκόσμιο επίπεδο, για συγκριτικούς λόγους. Όπου αξιοποιούνται δεδομένα άλλης γεωγραφικής περιοχής γίνεται αναφορά στην αντίστοιχη ενότητα.
- Η αναγωγή των ποσοτήτων των υλικών, ώστε να ανταποκρίνονται στα αντίστοιχα μεγέθη των συστημάτων όπου απαιτείται, γίνεται με τη χρήση της εξίσωσης αναγωγής (scaling formula), θεωρώντας συντελεστή αναγωγής ίσο με 0.9. Όπου χρησιμοποιείται διαφορετικός συντελεστής γίνεται αναφορά στην αντίστοιχη ενότητα.
- Τα δεδομένα που εισάγονται στο λογισμικό SimaPro ως ροές είναι ανηγμένα στη λειτουργική μονάδα που έχει οριστεί, 1kg παραγόμενου ή/και καταναλισκόμενου υδρογόνου στη διάρκεια ζωής του εκάστοτε συστήματος.
- Οι εισροές και εκροές της λειτουργίας του κάθε σταδίου διαχωρίζονται από τις αντίστοιχες της φάσης κατασκευής προκειμένου να μελετηθούν ξεχωριστά, προσφέροντας πιο λεπτομερή ανάλυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Στις επόμενες ενότητες παρουσιάζονται τα δεδομένα εισροών για τα υλικά κατασκευής, για την ηλεκτρική ενέργεια και ό,τι άλλο λαμβάνεται υπόψη για τα στάδια παραγωγής, αποθήκευσης – διανομής και τελικής χρήσης, μαζί με τις παραμέτρους λειτουργίας.

4.5.2 Στάδιο παραγωγής υδρογόνου

Η παραγωγή του υδρογόνου βασίζεται στην τεχνολογία της αλκαλικής ηλεκτρόλυσης του νερού (Alkaline Water Electrolysis). Κατά τη φάση λειτουργίας εισάγεται απιονισμένο νερό, το οποίο, με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο. Το παραγόμενο οξυγόνο και η θερμότητα, σε αντίθεση με το υδρογόνο που αξιοποιείται περαιτέρω, απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Σε αυτή τη μελέτη, η παραγωγή του υδρογόνου ανέρχεται σε 2410 τόνους ετησίως, ενώ η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται εξ’ ολοκλήρου από

φωτοβολταϊκά. Η μοντελοποίηση της ηλιακής ενέργειας στο SimaPro γίνεται με βάση φωτοβολταϊκά συστήματα ονομαστικής ισχύος 570 kWp, τα οποία είναι εγκατεστημένα στην Ιταλία. Η επιλογή αυτή έγινε εξαιτίας της έλλειψης επαρκών στοιχείων για την Ελλάδα καθώς και λόγω της παρόμοιας ηλιακής ακτινοβολίας των δύο χωρών και της γεωγραφικής τους σύνδεσης. Συγκεκριμένα, για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών, θεωρείται μία μέση ειδική κατανάλωση ηλιακής ενέργειας ίση με 0.05 MWh/kg H₂. Η τιμή αυτή προκύπτει λαμβάνοντας υπόψη το συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας 53.62%, ο οποίος αντανάκλα τη δυναμική λειτουργία του ηλεκτρολύτη στο χρόνο ζωής του και όχι τη στατική λειτουργία του σε πλήρες φορτίο. Ακόμη, αξίζει να σημειωθεί πως ο βαθμός απόδοσης με το φορτίο λειτουργίας μεταβάλλονται μη γραμμικά. Όσον αφορά τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας του συστήματος, προέρχονται από το TRIERES project και παρουσιάζονται στον πίνακα.

Πίνακας 4.5.1 Τεχνικά χαρακτηριστικά συστήματος αλκαλικής ηλεκτρόλυσης

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Ονομαστική ισχύς	30	MW
Παραγωγή H ₂ σε ονομαστική ισχύ και μέγιστη διαθεσιμότητα	540	kg/ώρα
Πίεση παραγόμενου υδρογόνου	20	barg
Καθαρότητα παραγόμενου υδρογόνου	99.99	%
Τεχνική διαθεσιμότητα	95	%
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μονάδας σε ονομαστική ισχύ	49.45	kWh/kg H ₂
Κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας συστήματος σε ονομαστική ισχύ	53.90	kWh/kg H ₂
Ρυθμός υποβάθμισης (Degradation)	0.1	%/1000hr
Ελάχιστο φορτίο λειτουργίας ανά μονάδα (turndown ratio per stack)	40	%
Διάρκεια ζωής μονάδας (stack)	10	έτη
Διάρκεια ζωής περιφερειακού εξοπλισμού (BoP)	20	έτη
Συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας (capacity factor - CF)	53.62	%
Κατανάλωση απιονισμένου νερού	11.11	kg H ₂ O/kg H ₂
Ετήσια παραγωγή H ₂	2410	ton/έτος

Το σύστημα αλκαλικής ηλεκτρόλυσης συνολικής ισχύος 30MW αποτελείται από έξι μονάδες (stacks) των 5MW η κάθε μία, καθώς και τον βοηθητικό και ηλεκτρονικό εξοπλισμό (Balance of Plant - BoP). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των επιμέρους συστημάτων προκύπτουν από τη βιβλιογραφία και παρουσιάζονται στους παρακάτω πίνακες. Αξίζει να σημειωθεί ότι εξαιτίας της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρόλυσης υπό αυξημένη πίεση, απαιτούνται υλικά υψηλής μηχανικής αντοχής. Ως εκ τούτου, για τα εξαρτήματα των πλαισίων (frames), της στεγανοποίησης (gasket) και του στρώματος υποστήριξης (mattress) των μονάδων επιλέγονται πιο προηγμένα υλικά. Οι ποσότητες των υλικών κανονικοποιούνται ως προς τη λειτουργική μονάδα 1kg παραγόμενου υδρογόνου λαμβάνοντας υπόψη τη διάρκεια ζωής των εκάστοτε συστημάτων (29).

Πίνακας 4.5.2 Κατάλογος υλικών κατασκευής μονάδων ηλεκτρόλυσης (stacks) 30MW

Υλικό	Ποσότητα	Μονάδα
Διαχωριστής (Separator)		
Σουλφίδιο πολυφαινυλενίου (Polyphenylene sulfide - PPS)	3.60E-05	kg/kg H ₂
Πολυσουλφόνη (Polysulfone - PSF)	2.40E-05	kg/kg H ₂
Διοξείδιο του ζιρκονίου (Zirconium dioxide)	1.08E-04	kg/kg H ₂
Ηλεκτρόδιο καθόδου (Cathode electrode)		
Ανθρακούχος χάλυβας (Carbon steel)	1.51E-02	kg/kg H ₂
Νικέλιο (Nickel)	2.52E-04	kg/kg H ₂
Ηλεκτρόδιο ανόδου (Anode electrode)		
Ανθρακούχος χάλυβας (Carbon steel)	1.51E-02	kg/kg H ₂
Νικέλιο (Nickel)	7.00E-04	kg/kg H ₂
Στρώμα στήριξης (Mattress)		
Νικέλιο (Nickel)	5.56E-04	kg/kg H ₂
Πλαίσια (Frames)		
Πολυσουλφόνη με 30% ίνες γυαλιού (PSU 30% glass fibre)	1.06E-04	kg/kg H ₂
Στεγανοποίηση (Gasket)		
Τετραφθοροαιθυλένιο (Tetrafluoroethylene - PTFE)	6.33E-05	kg/kg H ₂
Διπολική πλάκα (Bipolar plate)		
Ανθρακούχος χάλυβας (Carbon steel)	3.03E-02	kg/kg H ₂
Νικέλιο (Nickel)	1.11E-03	kg/kg H ₂
Τερματικές πλάκες (End plates)		
Ανθρακούχος χάλυβας (Carbon steel)	3.94E-03	kg/kg H ₂
Σύνολο	6.74E-02	kg/kg H ₂

Πίνακας 4.5.3 Κατάλογος υλικών κατασκευής περιφερειακού εξοπλισμού (BoP) 30MW

Υλικό	Ποσότητα	Μονάδα
Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (Low alloy steel)	2.13E-03	kg/kg H ₂
Χάλυβας υψηλής κραμάτωσης (High alloy steel)	8.42E-04	kg/kg H ₂
Αλουμίνιο (Aluminium)	4.43E-05	kg/kg H ₂
Χαλκός (Copper)	4.43E-05	kg/kg H ₂
Πλαστικό PVC (Polyvinylchloride)	1.33E-04	kg/kg H ₂
Ηλεκτρονικό υλικό (Electronic material)	4.87E-04	kg/kg H ₂
Υλικό διεργασίας (Process material)	8.86E-05	kg/kg H ₂
Σκυρόδεμα (Concrete)	2.48E-03	kg/kg H ₂
Σύνολο	6.25E-03	kg/kg H ₂

4.5.3 Στάδιο αποθήκευσης και διανομής υδρογόνου

Η αποθήκευση και η διανομή του παραγόμενου υδρογόνου μελετιούνται ως ένα ενιαίο στάδιο, καθώς οι δεξαμενές μεταφοράς λειτουργούν ταυτόχρονα ως προσωρινός αποθηκευτικός χώρος - εφεδρείες. Για την κάλυψη των αναγκών αυτού του σταδίου επιλέγεται η τεχνολογία συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου υψηλής πίεσης σε δεξαμενές τύπου III, οι οποίες μεταφέρονται με τρία βυτιοφόρα οχήματα, τύπου tube trailer. Η διαδικασία συμπίεσης του υδρογόνου σε πίεση 380bar, όπως και ο εφοδιασμός του στις δεξαμενές, πραγματοποιείται στο χώρο παραγωγής και η απαιτούμενη ενέργεια για τη συμπίεση καλύπτεται από την ίδια πηγή ενέργειας που χρησιμοποιείται για την ηλεκτρόλυση, μέσω φωτοβολταϊκών συστημάτων.

Πίνακας 4.5.4 Πληροφορίες αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Πίεση υδρογόνου	380	barg
Ενέργεια για συμπίεση	2.5	kWh/kg H ₂
Μέγιστη χωρητικότητα αποθήκευσης H ₂ ανά φορτηγό	995	kg H ₂
Μέγιστη ωφέλιμη ποσότητα H ₂ ανά φορτηγό	900	kg H ₂
Αριθμός δεξαμενών αποθήκευσης ανά φορτηγό	112	τεμάχια
Διάρκεια ζωής δεξαμενών αποθήκευσης	20	έτη
Αριθμός φορτηγών (tube trailers)	3	τεμάχια
Ετήσια μεταφορά H ₂	1095	ton/έτος

Οι δεξαμενές που χρησιμοποιούνται ανά φορτηγό είναι συνολικής χωρητικότητας 995kg υδρογόνου. Για την αναγωγή των ποσοτήτων των υλικών κατασκευής, που προέρχονται από τη βιβλιογραφία, θεωρείται συντελεστής αναγωγής ίσος με 0.9622, ενώ ταυτόχρονα οι ποσότητες τους κανονικοποιούνται ως προς τη λειτουργική μονάδα, 1kg καταναλισκόμενου υδρογόνου (47).

Πίνακας 4.5.5 Κατάλογος υλικών κατασκευής δεξαμενών μεταφοράς

Υλικό	Ποσότητα	Μονάδα
Φύλλα αλουμινίου (Rolling aluminium sheets)	6.87E-05	kg/kg H ₂
Αλουμίνιο (Aluminium)	6.87E-05	kg/kg H ₂
Φύλλα χρωμιούχου χάλυβα (Rolling of chromium steel sheets)	1.03E-04	kg/kg H ₂
Χρωμιούχος χάλυβας (Chromium steel)	1.03E-04	kg/kg H ₂
Ανθρακόνημα (Carbon fiber)	8.18E-04	kg/kg H ₂
Εποξική ρητίνη (Epoxy resin)	3.51E-04	kg/kg H ₂
Φύλλα χάλυβα (Rolling steel sheets)	1.03E-04	kg/kg H ₂
Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (Low alloy steel)	1.03E-04	kg/kg H ₂
Σύνολο	1.72E-03	kg/kg H ₂

Για λόγους πληρότητας των προδιαγραφών του έργου TRIERES, θεωρείται ότι τα τρία tube trailers καλύπτουν ετήσια ζήτηση 1095 τόνων υδρογόνου για όλες τις προβλεπόμενες εφαρμογές, εκ των οποίων μόνο οι δύο μελετώνται στην παρούσα διπλωματική. Η μεταφορά του παραγόμενου υδρογόνου πραγματοποιείται με φορτηγά EURO6 ωφέλιμου φορτίου 16 - 32 τόνων, τα οποία καταναλώνουν πετρέλαιο. Αυτή η διεργασία μοντελοποιείται στο λογισμικό SimaPro, σύμφωνα με τα αντίστοιχα δεδομένα της Ecoinvent 3, με μονάδα μέτρησης tonnes·km. Η διαδικασία της μεταφοράς υπολογίζεται επίσης ανά kg H₂, λαμβάνοντας υπόψη την απόσταση και το φορτίο διανομής προς τους δύο τελικούς προορισμούς για την αξιοποίηση του υδρογόνου. Συγκεκριμένα, το ένα δρομολόγιο κατευθύνεται προς το Λιμάνι του Πειραιά για χρήση στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής και το άλλο κινείται εντός των εγκαταστάσεων της Motor Oil στα πλαίσια του τομέα των μεταφορών. Σημαντικό να αναφερθεί είναι πως η κάθε διαδρομή πραγματοποιείται με τη μέγιστη χωρητικότητα σε υδρογόνο, δηλαδή 995kg, ωστόσο μόνο τα 900kg προορίζονται για κατανάλωση, λόγω περιορισμών ασφαλείας. Οι σχετικές λεπτομέρειες διανομής στις τελικές χρήσεις παρουσιάζονται στον πίνακα.

Πίνακας 4.5.6 Πληροφορίες διανομής υδρογόνου στις τελικές χρήσεις

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Ηλεκτροπαραγωγή		
Ετήσια ζήτηση H ₂	18	ton/έτος
Απόσταση	68	km
Διαδρομές	20	-
Μεταφερόμενο H ₂	7.52E-02	ton*km/kg H ₂
Μεταφορές		
Ετήσια ζήτηση H ₂	25	ton/έτος
Απόσταση	2.6	km
Διαδρομές	28	-
Μεταφερόμενο H ₂	2.87E-03	ton*km/kg H ₂

4.5.4 Τελική χρήση υδρογόνου στην ηλεκτροπαραγωγή

Στην πρώτη εφαρμογή, το παραγόμενο υδρογόνο χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία κυψέλης καυσίμου που θα εγκατασταθεί στο Λιμάνι του Πειραιά, με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη μέρος των ενεργειακών αναγκών του λιμανιού. Η τεχνολογία που επιλέγεται είναι κυψέλη καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων PEM Fuel Cell και ονομαστικής ισχύος 100kW. Η ετήσια κατανάλωση σε υδρογόνο ανέρχεται σε 18 τόνους, ενώ η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με βάση τόσο τη θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου όσο και το βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης της κυψέλης καυσίμου, εκτιμάται σε 17.33 kWh/kg H₂. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου PEM, σύμφωνα με τα δεδομένα από το Clean Hydrogen Partnership (48) στα πλαίσια του έργου TRIERES, παρουσιάζονται στον πίνακα.

Πίνακας 4.5.7 Τεχνικά χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου PEM Fuel Cell

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Ονομαστική ισχύς κυψέλης καυσίμου	100	kW
Ετήσια κατανάλωση H ₂	18	ton/έτος
Διάρκεια ζωής κυψέλης καυσίμου	10	έτη
Ηλεκτρική απόδοση	52	%
Κατανάλωση H ₂ σε ονομαστική ισχύ (mH ₂)	5.78	kg H ₂ /ώρα
Ετήσιες ώρες λειτουργίας	3114	ώρες/έτος
Τεχνική διαθεσιμότητα	98	%
Ρυθμός υποβάθμισης (Degradation)	0.2	%/1000h
Κατώτερη θερμογόνος δύναμη (LHV) υδρογόνου	33.33	kWh/kg H ₂
Κατανάλωση O ₂	8	kg O ₂ /kg H ₂
Παραγόμενο νερό	9	kg H ₂ O/kg H ₂
Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια	17.33	kWh/kg H ₂
Αντικαθιστούμενη ενέργεια από το δίκτυο	17.33	kWh

Η κυψέλη καυσίμου PEM ισχύος 100kW αποτελείται από μία μονάδα (stack) καθώς και τον περιφερειακό εξοπλισμό (Balance of Plant - BoP). Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των παραπάνω υποσυστημάτων προκύπτουν από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία και παρουσιάζονται στους ακόλουθους πίνακες (35). Οι ποσότητες των υλικών αναγράφονται ως προς τη λειτουργική μονάδα 1kg καταναλισκόμενου υδρογόνου στη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

Πίνακας 4.5.8 Κατάλογος υλικών κατασκευής μονάδας (stack) PEMFC 100kW

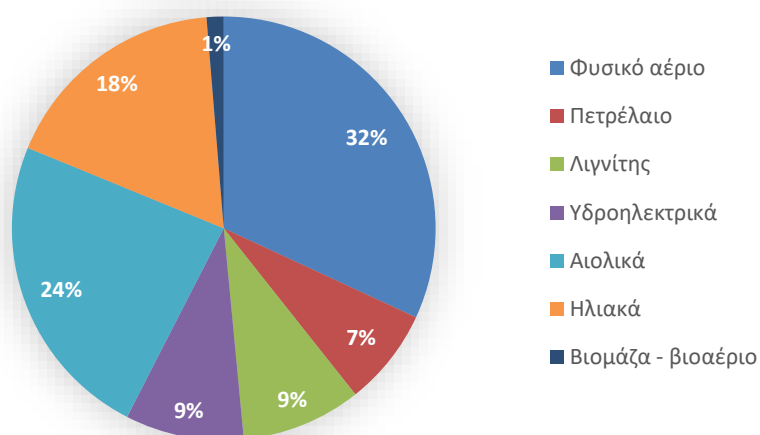
Υλικό	Ποσότητα	Μονάδα
Γραφίτης (Graphite)	1.58E-03	kg/kg H ₂
Πλαστικό PVdC (Polyvinylidene chloride)	3.86E-04	kg/kg H ₂
Αλουμίνιο (Aluminium)	1.05E-04	kg/kg H ₂
Χρωμιούχος χάλυβας (Chromium steel)	3.51E-05	kg/kg H ₂
Ίνες γυαλιού (Glass fibers)	3.51E-05	kg/kg H ₂
Υπερφθοροσουλφονικό οξύ (Perfluorosulfonic acid - Nafion)	2.45E-05	kg/kg H ₂
Μαύρος άνθρακας (Carbon black)	2.80E-07	kg/kg H ₂
Πλατίνα - Λευκόχρυσος (Platinum)	2.63E-07	kg/kg H ₂
Σύνολο	2.16E-03	kg/kg H ₂

Πίνακας 4.5.9 Κατάλογος υλικών κατασκευής περιφερειακού εξοπλισμού (BoP) PEMFC 100kW

Υλικό	Ποσότητα	Μονάδα
Προϊόν χάλυβα (Steel product)	1.30E-03	kg/kg H ₂
Πολυαιθυλένιο υψηλής πυκνότητας (Polyethylene high density)	5.26E-04	kg/kg H ₂
Χρωμιούχος χάλυβας (Chromium steel)	3.86E-04	kg/kg H ₂
Χυτοσίδηρος (Cast iron)	2.80E-04	kg/kg H ₂
Αλουμίνιο (Aluminium)	2.63E-04	kg/kg H ₂
Κόκκοι πολυπροπυλενίου (Polypropylene granulate - PP)	8.76E-05	kg/kg H ₂
Σύνολο	2.84E-03	kg/kg H ₂

Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου, αντικαθιστά την ηλεκτρική ενέργεια που προέρχεται από το ελληνικό διασυνδεδεμένο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής. Ειδικότερα, όπως αναγράφεται στον πίνακα 4.5.9, κάθε 1kg υδρογόνου αποδίδει 17.33 kWh, οι οποίες στην παρούσα φάση παρέχονται από το δίκτυο. Για τη σύγκριση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος μεταξύ της τεχνολογίας υδρογόνου και της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας από το δίκτυο, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του ενεργειακού μείγματος παραγωγής της Ελλάδας για το έτος 2023, όπως αυτά ορίζονται από το Διαχειριστή ΑΠΕ και Εγγυήσεων Προέλευσης - ΔΑΠΕΕΠ (49).

Ενεργειακό μείγμα παραγωγής 2023



Γράφημα 4.5.1 Ενεργειακό μείγμα παραγωγής Ελλάδας 2023 (49)

4.5.5 Τελική χρήση υδρογόνου στις μεταφορές

Η δεύτερη τελική χρήση του υδρογόνου αφορά την αξιοποίηση του ως καύσιμο στον τομέα των μεταφορών. Το παραγόμενο υδρογόνο μεταφέρεται στο σταθμό ανεφοδιασμού (Hydrogen Refuelling Station - HRS), ο οποίος βρίσκεται εντός των εγκαταστάσεων της Motor Oil και εξυπηρετεί τόσο επιβατικά οχήματα όσο και αστικά λεωφορεία, με συνολική ετήσια κατανάλωση 25 τόνων υδρογόνου.

Πίνακας 4.5.10 Πληροφορίες χρήσεις υδρογόνου στις μεταφορές

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Ετήσια κατανάλωση H ₂	25	ton/έτος
Δυναμικότητα σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου (HRS)	150	kg/μέρα
Διάρκεια ζωής σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου (HRS)	20	έτη
Διάρκεια ζωής οχημάτων κυψέλης καυσίμου FCEVs - FCEBs	15	έτη
Ετήσια κατανάλωση H ₂ για επιβατικά οχήματα FCEVs	2.5	ton/έτος
Ετήσια κατανάλωση H ₂ για αστικά λεωφορεία FCEBs	22.5	ton/έτος

Τα υλικά για την κατασκευή του σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου, συνολική δυναμικότητας ανεφοδιασμού 150kg/day, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα, με τις ποσότητες αυτών να αναφέρονται ως προς τη λειτουργική μονάδα 1kg καταναλισκόμενου υδρογόνου στη διάρκεια ζωής της υποδομής (47).

Πίνακας 4.5.11 Κατάλογος υλικών κατασκευής σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου (HRS)

Υλικό	Ποσότητα	Μονάδα
Χάλυβας χαμηλής κραμάτωσης (Low alloy steel)	9.39E-03	kg/kg H ₂
Χάλυβας υψηλής κραμάτωσης (High alloy steel)	1.84E-03	kg/kg H ₂
Χυτοσίδηρος (Cast iron)	1.04E-03	kg/kg H ₂
Χαλκός (Copper)	4.16E-04	kg/kg H ₂
Αλουμίνιο (Aluminium)	1.76E-04	kg/kg H ₂
Πολυμερές (Polymer)	1.31E-04	kg/kg H ₂
Ηλεκτρονικά εξαρτήματα (Electronics)	2.26E-05	kg/kg H ₂
Σκυρόδεμα (Concrete)	7.41E-02	kg/kg H ₂
Σύνολο	8.71E-02	kg/kg H ₂

Ο σταθμός τροφοδοτεί συγκεκριμένα δύο επιβατικά οχήματα κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell Electric Vehicles - FCEVs) και δύο αστικά λεωφορεία κυψέλης καυσίμου (Fuel Cell Electric Buses - FCEBs). Για τα επιβατικά ΙΧ, χρησιμοποιείται ως πρότυπο το Toyota Mirai (50), ενώ για τα αστικά λεωφορεία το μοντέλο Van Hool (36), (51). Τα υλικά κατασκευής των οχημάτων καθώς

και τα τεχνικά χαρακτηριστικά τους φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες, όπως αυτά προκύπτουν από τη διαθέσιμη βιβλιογραφία. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά λειτουργίας των δύο τύπων οχημάτων χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ποσότητας καυσίμου που αντικαθίσταται στα αντίστοιχα συμβατικά πετρελαιοκίνητα οχήματα.

Πίνακας 4.5.12 Κατάλογος υλικών κατασκευής επιβατικών οχημάτων FCEVs

Υλικό	Ποσότητα	Μονάδα
Χάλυβας (Steel)	5.49E-02	kg/kg H ₂
Ανοξείδωτος χάλυβας (Stainless steel)	3.69E-04	kg/kg H ₂
Σίδηρος (Iron)	1.52E-03	kg/kg H ₂
Έλασμα αλουμινίου (Aluminium wrought)	5.37E-03	kg/kg H ₂
Χυτό αλουμίνιο (Aluminium cast)	2.85E-03	kg/kg H ₂
Χαλκός (Copper)	4.41E-03	kg/kg H ₂
Μαγνήσιο (Magnesium)	1.60E-05	kg/kg H ₂
Πλαστικό (Plastic)	1.00E-02	kg/kg H ₂
Καουτσούκ (Rubber)	2.45E-03	kg/kg H ₂
Ενισχυμένο γυαλί (Tempered glass)	2.67E-03	kg/kg H ₂
Ανθρακόνημα (Carbon fiber)	8.88E-03	kg/kg H ₂
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE)	9.55E-05	kg/kg H ₂
Πλατίνα - Λευκόχρυσος (Platinum)	6.93E-06	kg/kg H ₂
Οργανικά υλικά (Organic)	1.18E-03	kg/kg H ₂
Χρώματα βαφής (Paint)	7.87E-04	kg/kg H ₂
Ψευδάργυρος (Zinc)	6.40E-06	kg/kg H ₂
Μπαταρία λιθίου (Lithium battery - LiMn ₂ O ₄)	1.49E-03	kg/kg H ₂
Σύνολο	9.70E-02	kg/kg H ₂

Πίνακας 4.5.13 Τεχνικά χαρακτηριστικά οχήματος FCEV Toyota Mirai

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Καύσιμο	Υδρογόνο	-
Τύπος οχήματος	Επιβατικό όχημα	-
Συνολική ισχύς συστήματος	136	kW
Χωρητικότητα αποθήκευσης υδρογόνου	5.6	kg
Χωρητικότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	1.24	kWh
Κατανάλωση καυσίμου H ₂	115.18	km/kg H ₂
Κατανάλωση O ₂	8	kg O ₂ /kg H ₂
Παραγόμενο νερό	9	kg H ₂ O/kg H ₂
Αντικαθιστούμενο καύσιμο (diesel)	5.76	l πετρελαίου (diesel)

Πίνακας 4.5.14 Κατάλογος υλικών κατασκευής λεωφορείων FCEBs

Υλικό	Ποσότητα	Μονάδα
Χάλυβας (Steel)	3.54E-02	kg/kg H ₂
Χάλυβας υψηλής αντοχής (Steel high strength)	1.72E-02	kg/kg H ₂
Ανοξειδωτος χάλυβας (Stainless steel)	1.88E-03	kg/kg H ₂
Έλασμα αλουμινίου (Aluminium wrought)	7.02E-03	kg/kg H ₂
Χυτό αλουμίνιο (Aluminium cast)	4.68E-03	kg/kg H ₂
Χαλκός (Copper)	5.07E-03	kg/kg H ₂
Ψευδάργυρος (Zinc)	2.37E-04	kg/kg H ₂
Μαγνήσιο (Magnesium)	3.08E-04	kg/kg H ₂
Ενισχυμένο γυαλί (Tempered glass)	2.41E-03	kg/kg H ₂
Καουτσούκ (Rubber)	5.30E-03	kg/kg H ₂
Πλαστικό (Plastic)	9.36E-03	kg/kg H ₂
Ανθρακόνημα (Carbon fibre)	9.67E-03	kg/kg H ₂
Νικέλιο (Nickel)	4.56E-04	kg/kg H ₂
Πολυτετραφθοροαιθυλένιο (PTFE)	1.17E-05	kg/kg H ₂
Πλατίνα - Λευκόχρυσος (Platinum)	8.30E-07	kg/kg H ₂
Μπαταρία λιθίου (Lithium battery - Li-ion)	9.01E-04	kg/kg H ₂
Σύνολο	9.99E-02	kg/kg H ₂

Πίνακας 4.5.15 Τεχνικά χαρακτηριστικά λεωφορείου FCEB Van Hool

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα
Καύσιμο	Υδρογόνο	-
Τύπος οχήματος	Αστικό λεωφορείο	
Συνολική ισχύς συστήματος	150	kW
Χωρητικότητα αποθήκευσης υδρογόνου	35	kg
Χωρητικότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας	17.4	kWh
Συνολικό μήκος οχήματος	13.2	m
Μέγιστη χωρητικότητα επιβατών	76	επιβάτες
Μέση πληρότητα	40	επιβάτες
Κατανάλωση καυσίμου H ₂	9	kg H ₂ /100km
Κατανάλωση O ₂	8	kg O ₂ /kg H ₂
Παραγόμενο νερό	9	kg H ₂ O/kg H ₂
Αντικαθιστούμενο καύσιμο (diesel)	4.44	l πετρελαίου (diesel)

Συγκεκριμένα, το επιβατικό όχημα FCEV παρέχει αυτονομία 115.18 km ανά 1kg υδρογόνου, απόσταση που απαιτεί 5.76 λίτρα πετρελαίου, θεωρώντας ένα συμβατικό όχημα μέσης κατανάλωσης 5l/100km. Το αστικό λεωφορείο FCEB καταναλώνει 9kg υδρογόνου ανά 100km, δηλαδή 11.11km/kg H₂, απόσταση που απαιτεί 4.44 λίτρα πετρελαίου, θεωρώντας συμβατικό λεωφορείο μέσης κατανάλωσης 40l/100km.

Για τη σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τεχνολογιών υδρογόνου και των πετρελαιοκίνητων οχημάτων, μοντελοποιούνται οι διεργασίες μετακίνησης των συμβατικών οχημάτων στο λογισμικό SimaPro, όπως αυτές ορίζονται από τη βάση δεδομένων Ecoinvent 3. Ως μονάδα μέτρησης χρησιμοποιείται το person·km, λαμβάνοντας υπόψη το μέσο αριθμό επιβατών ανά όχημα. Η επιλογή αυτή προσφέρει πιο ακριβή και ρεαλιστικά αποτελέσματα καθώς περιλαμβάνει και τις εκπομπές καύσης του πετρελαίου, σε αντίθεση με άλλες διεργασίες που καλύπτουν αποκλειστικά την παραγωγή ή μεταφορά του καυσίμου.

4.5.6 Εξεταζόμενα σενάρια

Εκτός του βασικού σεναρίου, εξετάζονται δύο διαφορετικά σενάρια αναφορικά με το στάδιο παραγωγής υδρογόνου, όπως αυτά έχουν αναφερθεί στην υποενότητα 4.3.6. Στο πρώτο σενάριο, η λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης τροφοδοτείται από συνδυασμό πηγών ενέργειας, οι οποίες περιλαμβάνουν χερσαία αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος 22MW, φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος 14MW καθώς και υποστήριξη από το ελληνικό διασυνδεδεμένο δίκτυο ηλεκτροπαραγωγής, το ενεργειακό μείγμα του οποίου παρουσιάζεται στο γράφημα 4.5.1. Η μοντελοποίηση των παραπάνω ενεργειακών πηγών πραγματοποιείται στο λογισμικό SimaPro με επιλογή, από τη βάση δεδομένων Ecoinvent 3, χερσαίων ανεμογεννητριών ισχύος 1-3MW και φωτοβολταϊκά συστήματα ισχύος 570kWp στην περιοχή της Ιταλίας. Οι σχετικές πληροφορίες των πηγών ενέργειας συνοψίζονται στον πίνακα.

Πίνακας 4.5.16 Πηγές ενέργειας για τη λειτουργία του συστήματος ηλεκτρόλυσης

Πηγή ενέργειας	Μερίδιο	Ποσότητα	Μονάδα
Αιολική ενέργεια (Onshore Wind - 22MW)	50.48%	2.51E-02	MWh/kg H ₂
Ηλιακή ενέργεια (Solar - 14MW)	17.32%	8.60E-03	MWh/kg H ₂
Ηλεκτρική ενέργεια δικτύου Ελλάδας	32.20%	1.60E-02	MWh/kg H ₂

Επιπλέον, εξετάζεται και ένα εναλλακτικό σενάριο μέγιστης παραγωγής υδρογόνου, όπου θεωρείται συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας 95% (τεχνικό ελάχιστο), που αντιστοιχεί σε 4493 τόνους υδρογόνου ετησίως. Σε αυτή την περίπτωση, η σύνθεση και ο τύπος των υλικών κατασκευής των μονάδων (stacks) και του περιφερειακού εξοπλισμού (BoP) παραμένουν τα ίδια, ωστόσο οι ποσότητες τους αναπροσαρμόζονται, λόγω αυξημένης παραγωγής, με βάση τη λειτουργική μονάδα 1kg παραγόμενου υδρογόνου στη διάρκεια ζωής των συστημάτων. Η απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια καλύπτεται αποκλειστικά από φωτοβολταϊκά συστήματα και αντιστοιχεί σε 0.0539MWh/kg H₂, σύμφωνα με την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας όταν το σύστημα λειτουργεί σε ονομαστικό φορτίο λειτουργίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της φάσης εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment – LCIA) για το υπό μελέτη σύστημα υδρογόνου, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Η αξιολόγηση καλύπτει τόσο τη φάση κατασκευής όσο και τη φάση λειτουργίας των επιμέρους σταδίων, ενώ περιλαμβάνει επιπλέον τη συνολική περιβαλλοντική αποτίμηση του κύκλου ζωής του συστήματος καθώς και τη συγκριτική ανάλυση με συμβατικές τεχνολογίες και εναλλακτικά σενάρια παραγωγής.

Η εκτίμηση πραγματοποιείται με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού SimaPro και της μεθόδου ReCiPe 2016 Midpoint (H), με την αξιολόγηση και των 18 περιβαλλοντικών δεικτών που περιλαμβάνονται σε αυτή. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής, μέσω του δείκτη υπερθέρμανσης του πλανήτη (GWP), δεδομένης της σπουδαιότητας και της καθοριστικής σημασίας του φαινομένου στην περιβαλλοντική πολιτική και στη βιώσιμη ανάπτυξη. Τα αποτελέσματα εκφράζονται σύμφωνα με την κοινή λειτουργική μονάδα, 1kg παραγόμενου ή/και καταναλισκόμενου υδρογόνου.

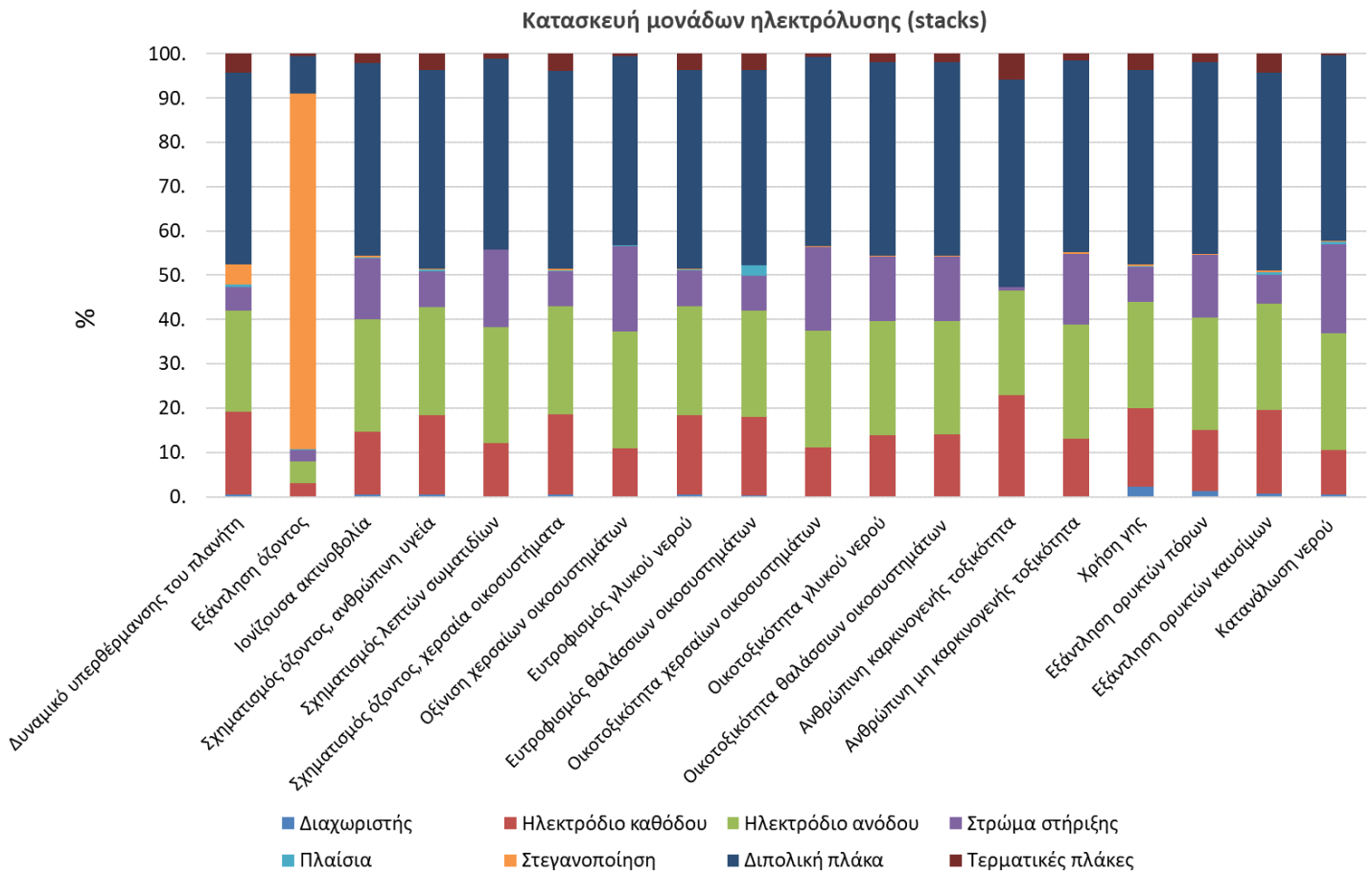
Το περιεχόμενο του κεφαλαίου περιλαμβάνει με σειρά τα εξής :

- Ποσοτική και ποιοτική ανάλυση της συμβολής των επιμέρους σταδίων της αλυσίδας αξίας του υδρογόνου (παραγωγή, αποθήκευση – μεταφορά, τελική χρήση) στις επιμέρους κατηγορίες επιπτώσεων επιπέδου midpoint.
- Σύγκριση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος του ανανεώσιμου υδρογόνου με τις αντίστοιχες συμβατικές τεχνολογίες, στην ηλεκτροπαραγωγή αλλά και στις μεταφορές.
- Αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων παραγωγής υδρογόνου, με διαφορετικές πηγές ενέργειας και διαφορετικό επίπεδο δυναμικότητας παραγωγής.

5.1 Αποτελέσματα σταδίου παραγωγής υδρογόνου

Το στάδιο παραγωγής υδρογόνου περιλαμβάνει την ανάλυση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων της κατασκευής των μονάδων ηλεκτρόλυσης (stacks), του περιφερειακού εξοπλισμού (BoP) καθώς και τη λειτουργία του συνολικού συστήματος ηλεκτρόλυσης ονομαστικής ισχύος 30MW, όπως αυτά περιγράφονται στη μεθοδολογία και στον κατάλογο απογραφής.

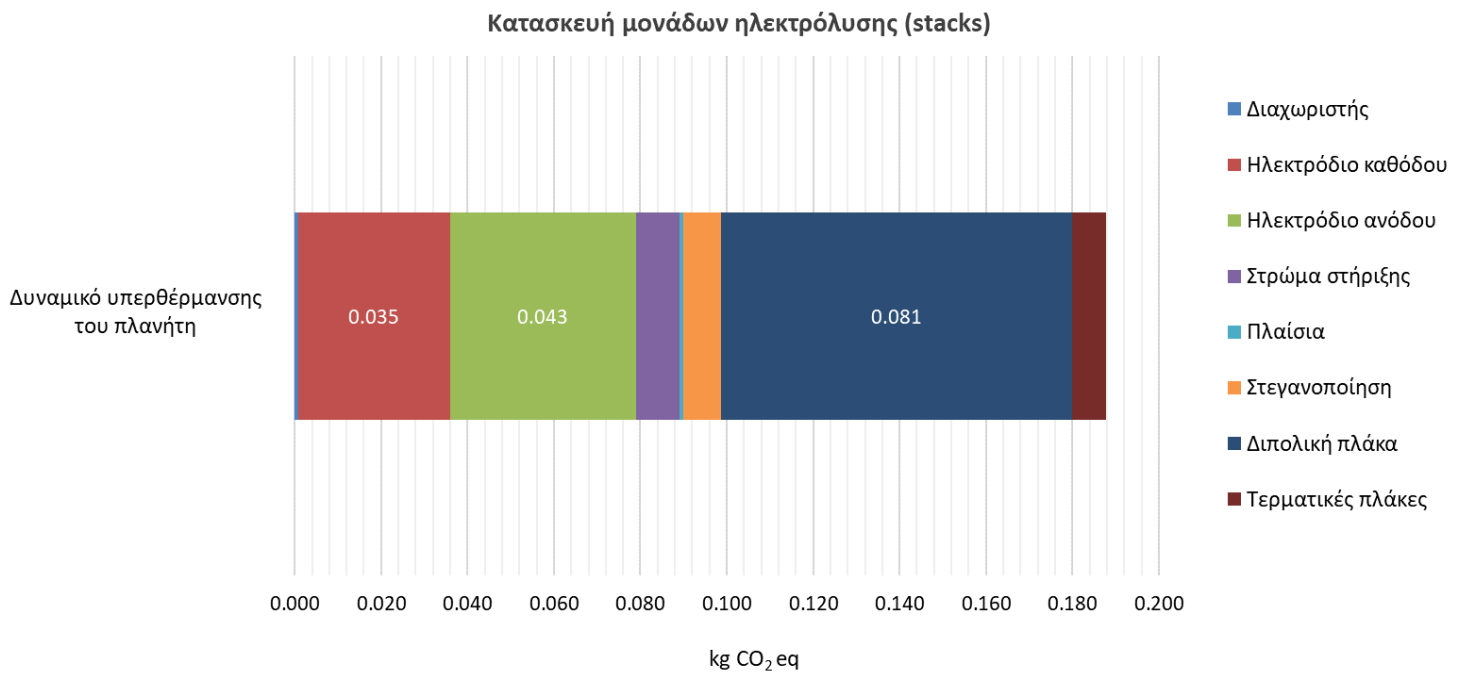
Στο παρακάτω γράφημα παρατίθενται τα αποτελέσματα χαρακτηρισμού για την κατασκευή των μονάδων ηλεκτρόλυσης, με βάση τα επιμέρους εξαρτήματα.



Γράφημα 5.1.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής των μονάδων ηλεκτρόλυσης (stacks)

Από την ανάλυση προκύπτει πως η κατασκευή του τμήματος της διπολικής πλάκας παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στις περισσότερες κατηγορίες επιπτώσεων, με ποσοστά που υπερβαίνουν ελαφρώς το 40%. Η υψηλή αυτή επιβάρυνση αποδίδεται κυρίως στις εφοδιαστικές αλυσίδες των υλικών που τη συνθέτουν. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί η κατηγορία εξάντλησης όζοντος, στην οποία κυριαρχεί η συμβολή του υλικού στεγανοποίησης, κατά 80%. Άλλα τμήματα με σημαντική επίδραση στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα είναι τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου, τα οποία αν και αποτελούνται από τα ίδια υλικά με τη διπολική πλάκα (ανθρακούχος χάλυβας και νικέλιο), έχουν σχετικά χαμηλότερο αντίκτυπο λόγω της μικρότερης ποσότητας χρήσης αυτών των υλικών.

Ακολούθως, εξετάζεται η συμβολή κάθε εξαρτήματος στο δείκτη υπερθέρμανσης του πλανήτη.



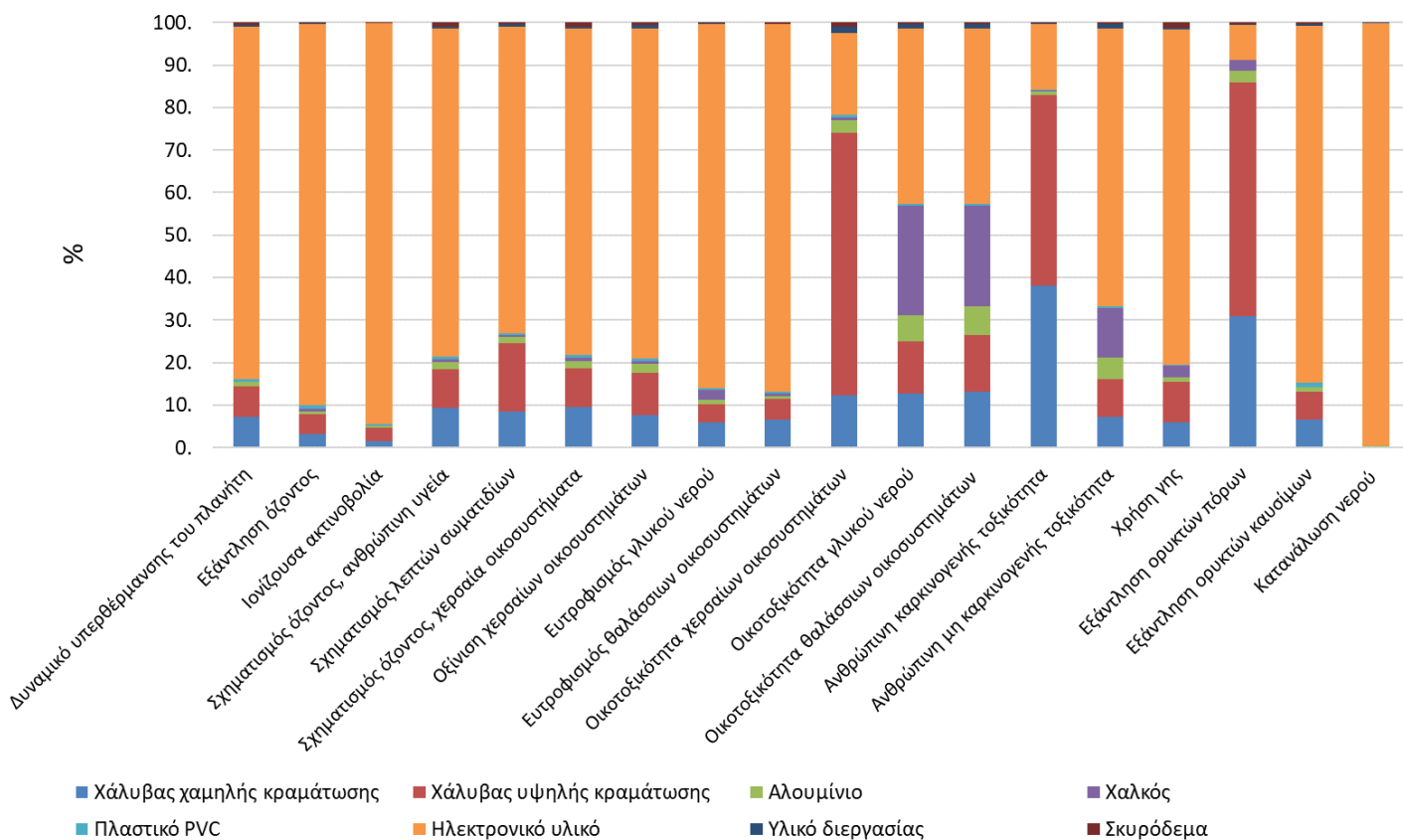
Γράφημα 5.1.2 Συμβολή της κατασκευής των μονάδων ηλεκτρόλυσης στην υπερθέρμανση του πλανήτη

Ειδικότερα για την κατηγορία υπερθέρμανσης του πλανήτη, η διπολική πλάκα παρουσιάζει τη μεγαλύτερη συνεισφορά με 0.081 kg CO₂ eq ανά kg παραγόμενου H₂. Τα ηλεκτρόδια ανόδου και καθόδου ακολουθούν με 0.043 και 0.035 kg CO₂ eq, αντίστοιχα. Συνεπώς, η κατασκευή της διπολικής πλάκας αναδεικνύεται ως το πλέον περιβαλλοντικά επιβαρυντικό τμήμα των μονάδων ηλεκτρόλυσης.

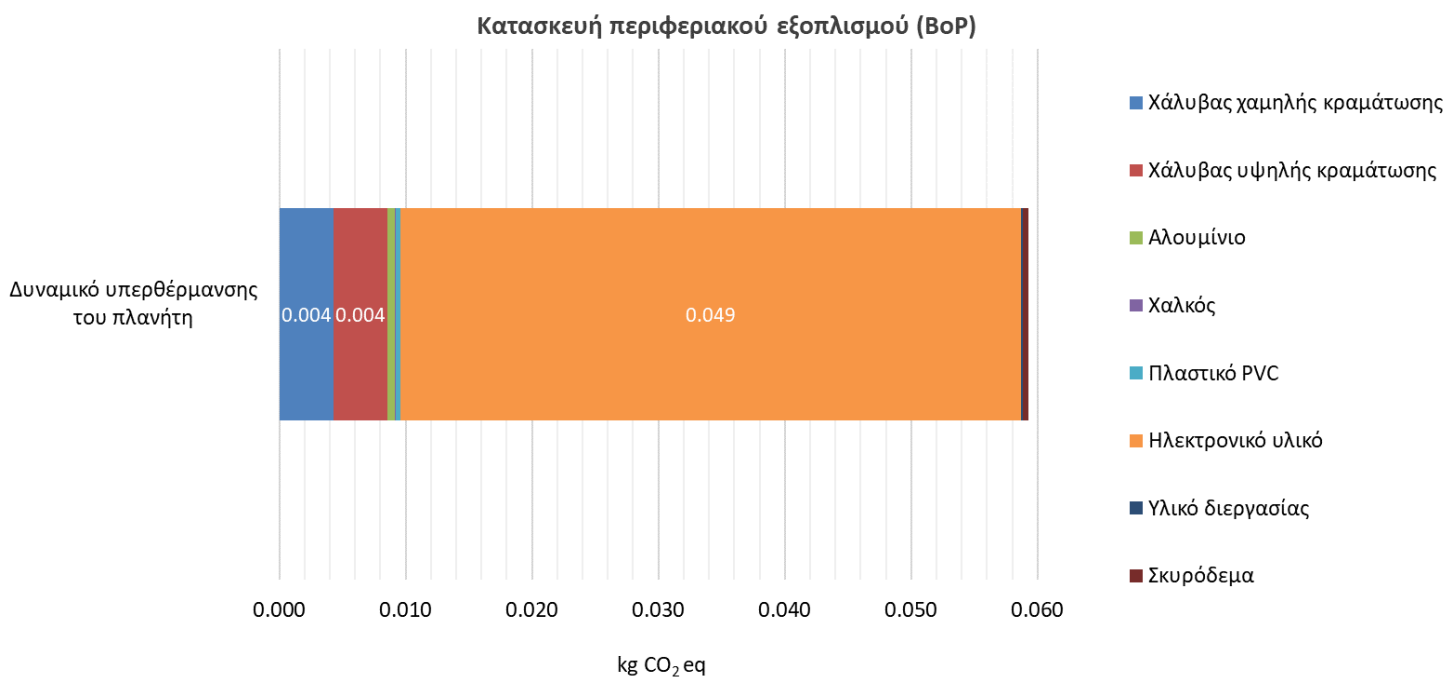
Ο περιφερειακός εξοπλισμός περιλαμβάνει ηλεκτρονικά ισχύος, αντλίες, εναλλάκτες θερμότητας και συστήματα διαχωρισμού υγρού – αερίου. Λόγω της έλλειψης αναλυτικών δεδομένων στη βιβλιογραφία για κάθε εξάρτημα ξεχωριστά, η αξιολόγηση βασίζεται στις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις των υλικών κατασκευής του.

Τα ηλεκτρονικά υλικά και συγκεκριμένα το πυρίτιο, το οποίο χρησιμοποιείται στους μετασχηματιστές των ηλεκτρονικών ισχύος ευθύνεται για τη μεγαλύτερη επιβάρυνση στους περισσότερους δείκτες, αντιπροσωπεύοντας κατά μέσο το 80% της συνεισφοράς. Εξαιρέση αποτελούν οι κατηγορίες οικοτοξικότητας χερσαίων οικοσυστημάτων, ανθρώπινης καρκινογόνους τοξικότητας και εξάντλησης ορυκτών πόρων, στις οποίες κυρίαρχο ρόλο διαδραματίζει η χρήση χάλυβα υψηλής και χαμηλής κραμάτωσης. Τα τρία αυτά υλικά παρουσιάζουν τη μεγαλύτερη επιρροή συγκριτικά με τα υπόλοιπα. Όσον αφορά τις κατηγορίες οικοτοξικότητας γλυκού νερού και θαλάσσιων οικοσυστημάτων, σημαντική είναι και η συμμετοχή του χαλκού, με τη δεύτερη μεγαλύτερη συνεισφορά.

Κατασκευή περιφερειακού εξοπλισμού (BoP)



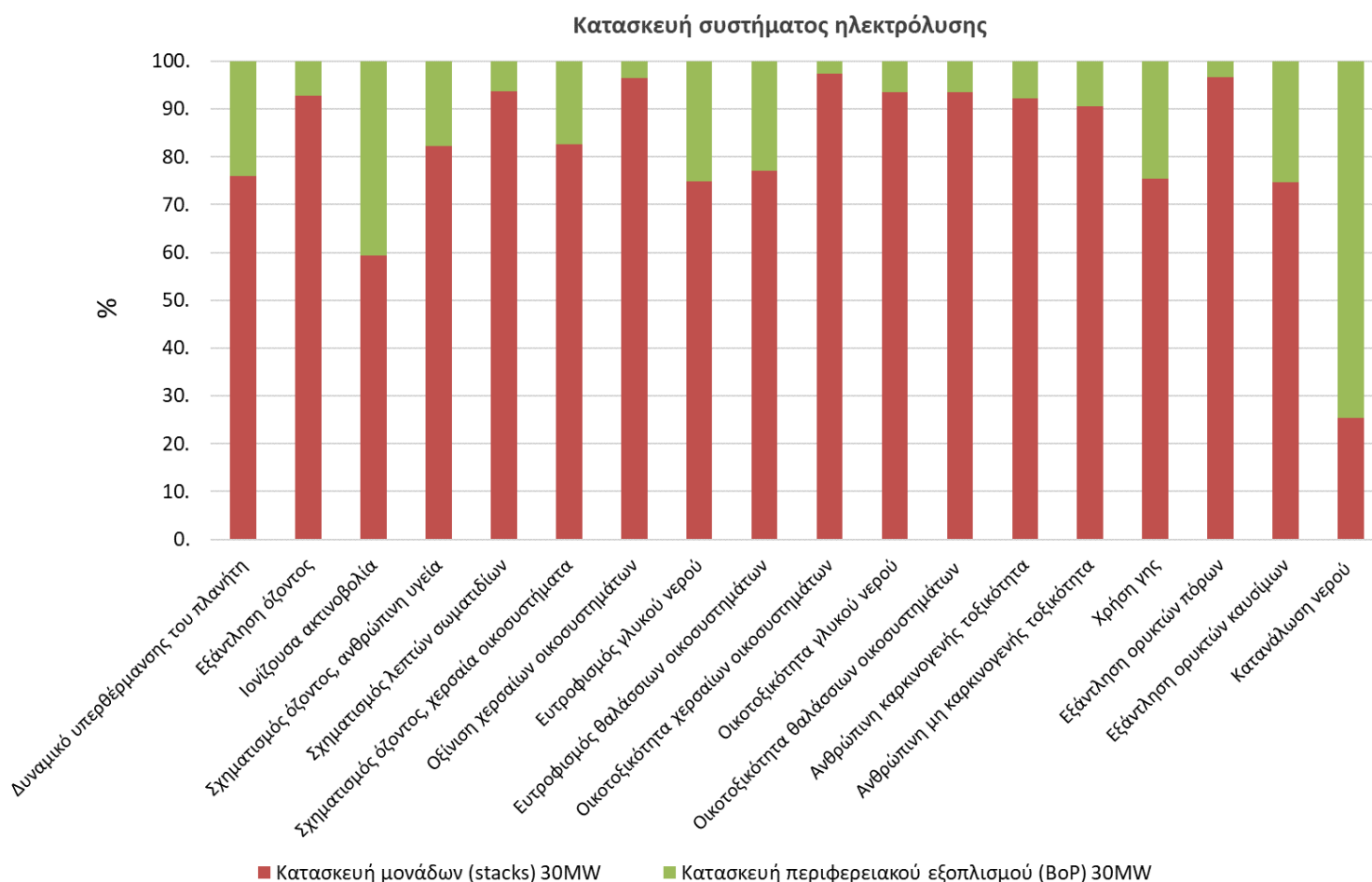
Γράφημα 5.1.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής του περιφερειακού εξοπλισμού (BoP)



Γράφημα 5.1.4 Συμβολή της κατασκευής του περιφερειακού εξοπλισμού στην υπερθέρμανση του πλανήτη

Εξίσου, στην περίπτωση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, η χρήση του πυριτίου ως ηλεκτρονικό υλικό καταγράφει τη μεγαλύτερη συμβολή με 0.049 kg CO₂ eq ανά kg παραγόμενου H₂, δηλαδή σχεδόν δεκαπλάσια από εκείνη του χάλυβα υψηλής και χαμηλής κραμάτωσης, που ακολουθούν αμέσως μετά.

Η φάση κατασκευής των μονάδων και του περιφερειακού εξοπλισμού του συστήματος ηλεκτρόλυσης αποτυπώνονται συγκριτικά στο γράφημα.

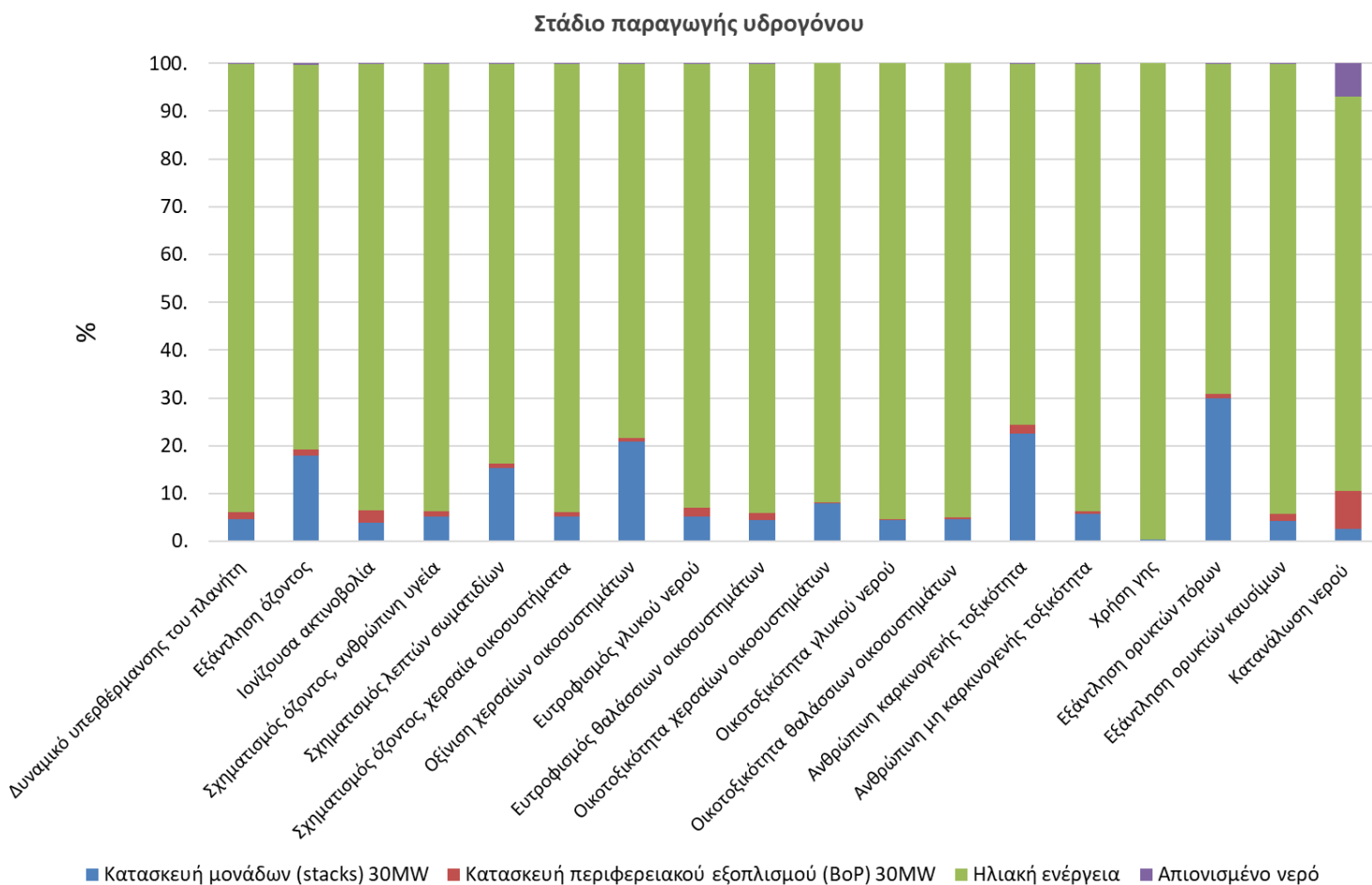


Γράφημα 5.1.5 Συγκριτικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής των μονάδων ηλεκτρόλυσης και του περιφερειακού εξοπλισμού

Η συγκριτική αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κατασκευής των επιμέρους τμημάτων του συστήματος ηλεκτρόλυσης, υποδεικνύει ότι οι μονάδες (stacks) συνεισφέρουν περισσότερο σε όλες τις κατηγορίες, εκτός από την κατανάλωση νερού. Σε αυτή την κατηγορία, υπερτερεί κατά 75% η κατασκευή του περιφερειακού εξοπλισμού, γεγονός που αποδίδεται στην εφοδιαστική αλυσίδα του πυριτίου, ως ηλεκτρονικό υλικό. Η επικράτηση των μονάδων ηλεκτρόλυσης ως βασικού συντελεστή συνεισφοράς στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σχετίζεται με τη χρήση του ανθρακούχου χάλυβα και του νικελίου τόσο στη διπολική πλάκα όσο και στα ηλεκτρόδια. Ο χάλυβας επηρεάζει σημαντικά την υπερθέρμανση του πλανήτη, την εξάντληση ορυκτών πόρων καθώς και την ανθρώπινη καρκινογενή τοξικότητα. Αντίστοιχα, η περιεκτικότητα

αυτών των τμημάτων σε νικέλιο, συμβάλλει σημαντικά στις κατηγορίες οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων και ανθρώπινη μη καρκινογενή τοξικότητα.

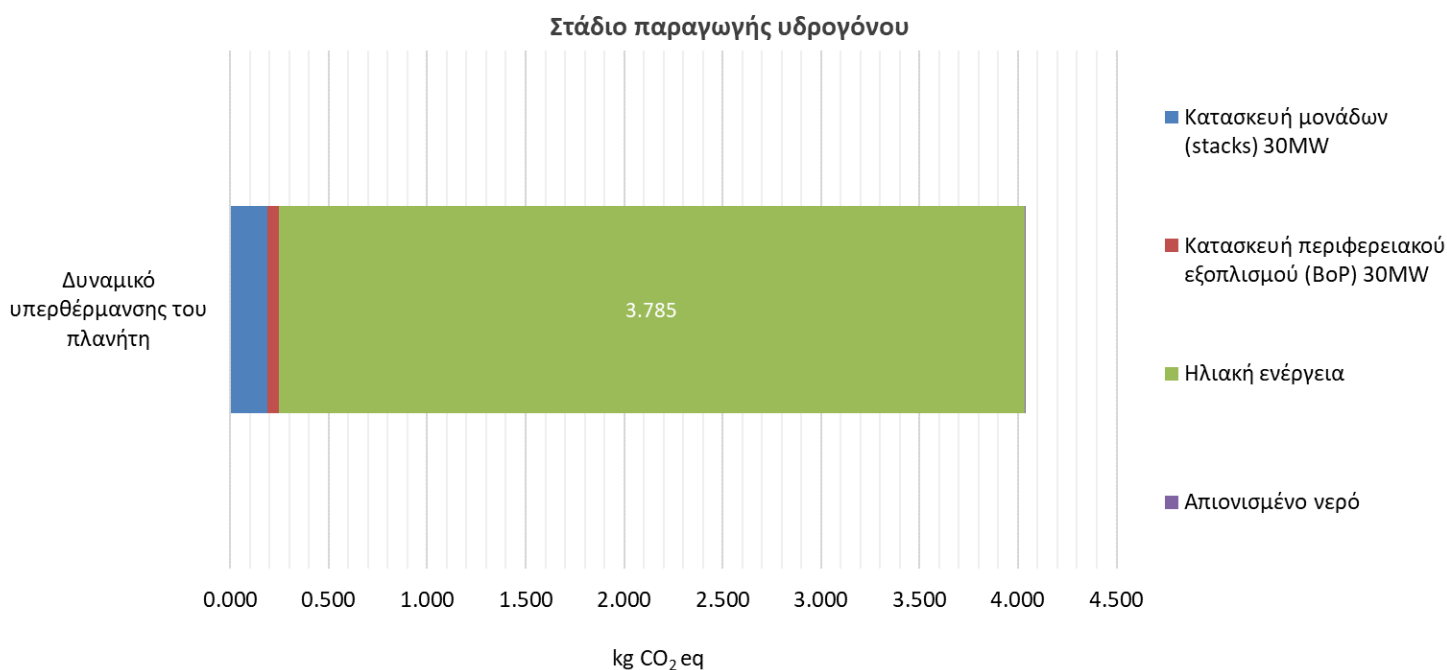
Η λειτουργία του συστήματος ηλεκτρόλυσης πραγματοποιείται με παροχή απιονισμένου νερού και κάλυψη των ηλεκτρικών απαιτήσεων αποκλειστικά μέσω ηλιακής ενέργειας. Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με ολόκληρο το στάδιο παραγωγής υδρογόνου, τόσο για τη φάση λειτουργίας όσο και για τη φάση κατασκευής των επιμέρους υποσυστημάτων, που σχολιάστηκαν προηγουμένως.



Γράφημα 5.1.6 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνολικά για το στάδιο παραγωγής υδρογόνου

Μέσω της ανάλυσης αποδεικνύεται πως η φάση λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρόλυσης αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα επιβάρυνσης όλων των περιβαλλοντικών δεικτών, με ποσοστά συμμετοχής που κυμαίνονται από 75 έως και 95%. Παρά το γεγονός ότι η παροχή ενέργειας για τη λειτουργία προέρχεται εξ ολοκλήρου από ανανεώσιμη πηγή, αυτή ευθύνεται για το σημαντικά υψηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η αμέσως επόμενη υψηλή συνεισφορά στις σχετικές επιπτώσεις προέρχεται από τη φάση κατασκευής ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρόλυσης και όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως κυριότερα της ηλεκτρολυτικής κυψέλης, ενώ η χρήση απιονισμένου νερού συμβάλλει κυρίως στην κατηγορία κατανάλωση νερού με το ποσοστό να αγγίζει το 7%.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν σχετικά με τη λειτουργία, είναι σχετικά υψηλότερα από τα αναμενόμενα, γεγονός που σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά των δεδομένων της βάσης Ecoinvent του λογισμικού SimaPro. Συγκεκριμένα, λαμβάνονται υπόψη οι εκπομπές που αντιστοιχούν στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών συστημάτων και στις απαιτούμενες εργασίες σύνδεσης του στο δίκτυο. Επιπλέον, τα δεδομένα αυτά χρονολογούνται από το 2012 και συνεπώς ενδέχεται να μην απεικονίζουν πλήρως τις τεχνολογικές εξελίξεις ή τη χρήση νέων υλικών με χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η υπερδιαστασιολόγηση των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων, η οποία κρίνεται αναγκαία για την πλήρη και αδιάλειπτη τροφοδότηση του ηλεκτρολύτη με ανανεώσιμη ενέργεια, ενισχύει περαιτέρω τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.



Γράφημα 5.1.7 Συμβολή του σταδίου παραγωγής υδρογόνου στην υπερθέρμανση του πλανήτη

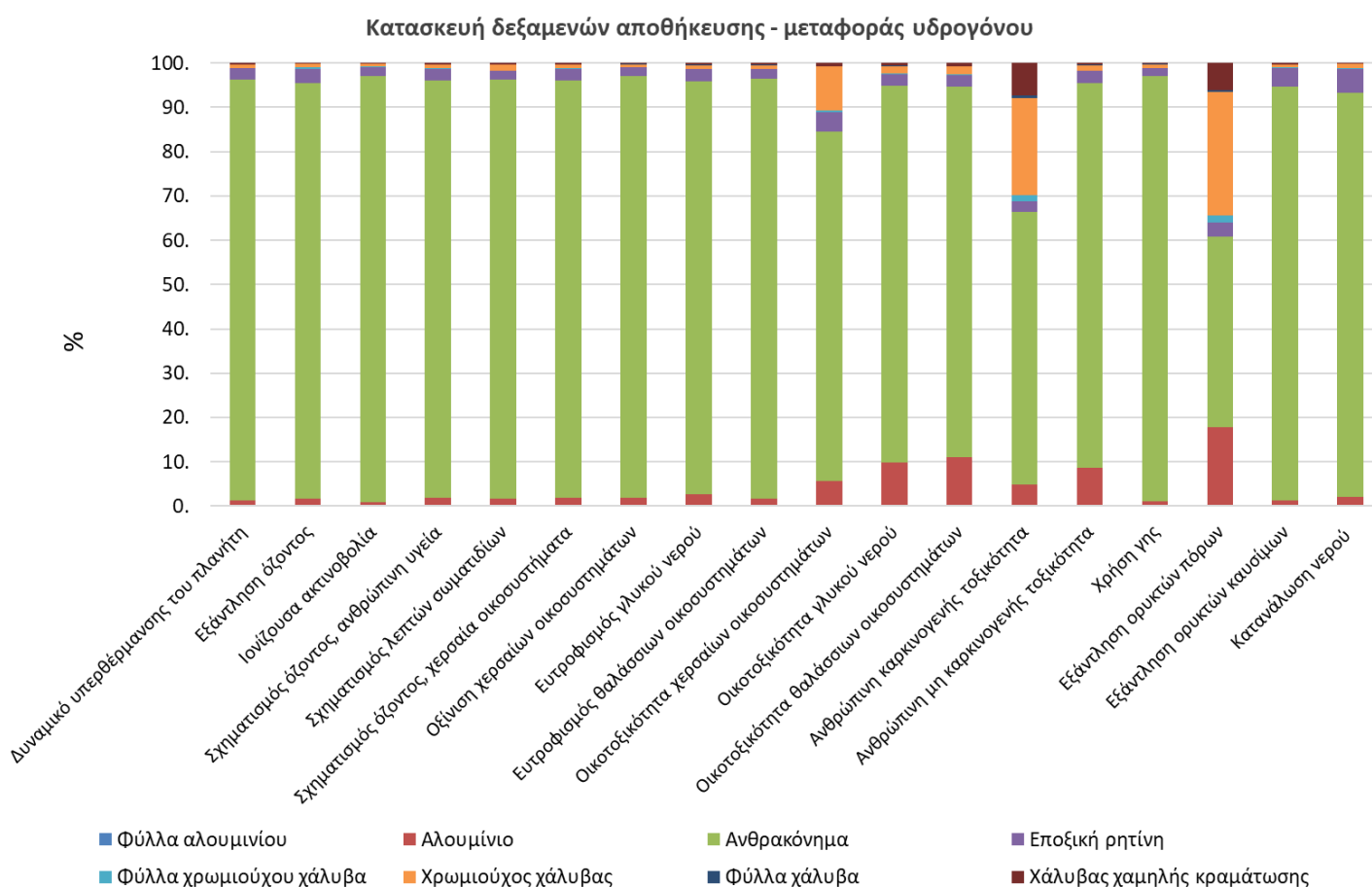
Όσον αφορά το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, η λειτουργία του συστήματος ηλεκτρόλυσης συνεισφέρει κατά 3.79 kg CO₂ eq, συμπεριλαμβανομένης της επίπτωσης 0.005kg CO₂ eq για το απιονισμένο νερό χρήσης. Με σημαντικά μικρότερη συμβολή, ακολουθεί η κατασκευή των μονάδων ηλεκτρόλυσης και ύστερα η κατασκευή του περιφερειακού εξοπλισμού με 0.188 και 0.059 kg CO₂ eq ανά kg παραγόμενου H₂, αντίστοιχα. Η υψηλή κατανάλωση ενέργειας για την ηλεκτρόλυση σε συνδυασμό με την κατασκευή φωτοβολταϊκών συστημάτων μεγάλης κλίμακας, συνεισφέρει καθοριστικά στο συνολικό ανθρακικό αποτύπωμα.

Συγκριτικά με τη διεθνή βιβλιογραφία, η επίπτωση στο δείκτη υπερθέρμανσης του πλανήτη παρουσιάζεται ελαφρώς αυξημένη, με ορισμένες αντίστοιχες ενδεικτικές μελέτες να καταλήγουν σε ανθρακικό αποτύπωμα 3.08 kg CO₂/kg H₂ και 2.5 kg CO₂/kg H₂, όταν η ηλεκτρόλυση συνοδεύεται από χρήση ηλιακής ενέργειας, ενώ σε κάθε περίπτωση τονίζεται η υψηλή περιβαλλοντική επιβάρυνση της κατασκευής των φωτοβολταϊκών (52), (53). Ακόμα και όταν υπάρχει συνδυασμός ανανεώσιμων πηγών, η χρήση ηλιακών συστημάτων υπερισχύει σημαντικά (29).

Συνολικά, το στάδιο της παραγωγής συνεισφέρει στο συγκεκριμένο δείκτη με ισοδύναμες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα της τάξης των 4.037kg. Σύμφωνα με τη σχετική ευρωπαϊκή οδηγία για τα RFNBOs (Renewable Fuels of Non-Biological Origin), το ανώτατο επιτρεπόμενο όριο που έχει τεθεί για να θεωρείται το υδρογόνο ανανεώσιμο είναι 3.38kg CO₂ eq/kg H₂, χωρίς ωστόσο να περιλαμβάνει τις εκπομπές κατασκευής των υποδομών. Λαμβάνοντας υπόψη τόσο ότι η κύρια υπέρβαση του ορίου αποδίδεται στη φάση κατασκευής των επιμέρους υποσυστημάτων όσο και τις παραδοχές των βάσεων δεδομένων που χρησιμοποιούνται, η πραγματική αποτίμηση ενδέχεται να είναι μικρότερη. Συνεπώς, με βάση τα παραπάνω, το υδρογόνο δύναται να θεωρηθεί ανανεώσιμο.

5.2 Αποτελέσματα σταδίου αποθήκευσης-μεταφοράς υδρογόνου

Το στάδιο της αποθήκευσης και μεταφοράς του παραγόμενου υδρογόνου περιλαμβάνει την ανάλυση της φάσης κατασκευής των δεξαμενών τύπου III καθώς και τη μεταφορά τους στα σημεία τελικής χρήσης με πετρελαιοκίνητα φορτηγά. Η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών που απαρτίζουν τις δεξαμενές αποθήκευσης – μεταφοράς παρουσιάζεται στο παρακάτω γράφημα.

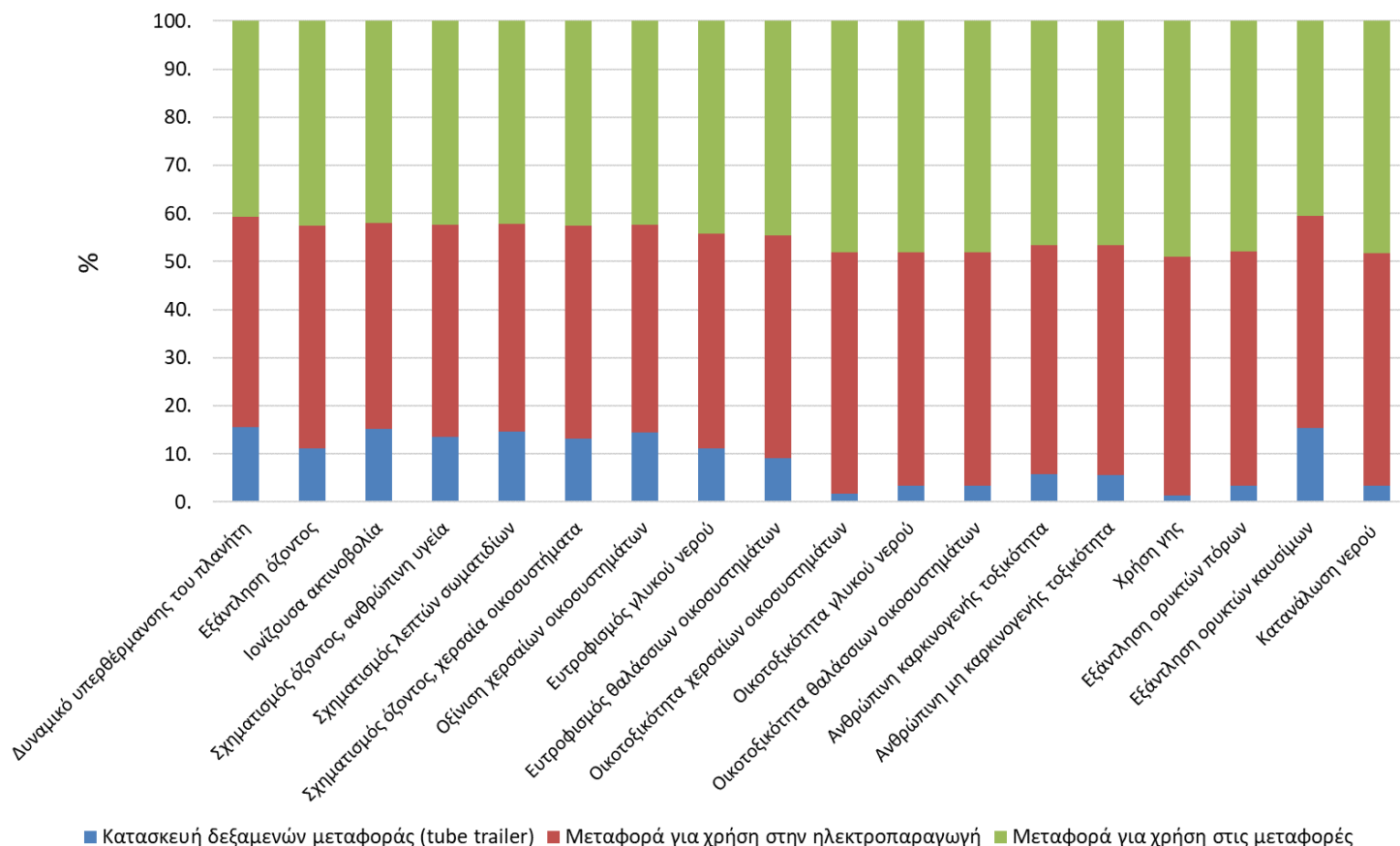


Γράφημα 5.2.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής των δεξαμενών αποθήκευσης - μεταφοράς υδρογόνου

Όπως προκύπτει από την αξιολόγηση, κυρίαρχο ρόλο στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα της κατασκευής διαδραματίζει το ανθρακόνημα, με το ποσοστό συνεισφοράς του να ανέρχεται κατά μέσο όρο στο 90% στους περισσότερους περιβαλλοντικούς δείκτες. Το ανθρακόνημα αποτελεί ένα κρίσιμο δομικό υλικό για τις δεξαμενές αποθήκευσης υδρογόνου υψηλής πίεσης τύπου III (350 – 700bar), προσφέροντας υψηλή αντοχή στην πίεση, χαμηλό βάρος, ανθεκτικότητα στη διάβρωση και μεγάλο χρόνο ζωής. Στις κατηγορίες οικοτοξικότητας χερσαίων οικοσυστημάτων, ανθρώπινης καρκινογενούς τοξικότητας και εξάντλησης ορυκτών πόρων σημαντική είναι και η συνεισφορά του χρωμιούχου χάλυβα και ακολούθως του χάλυβα χαμηλής κραμάτωσης. Τα υπόλοιπα υλικά αποδίδουν σε ελάχιστο βαθμό στο περιβαλλοντικό αντίκτυπο, ανεξαρτήτως κατηγορίας επιπτώσεων.

Το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της φάσης λειτουργίας αφορά τη μεταφορά του υδρογόνου με φορτηγά τύπου tube trailers από το χώρο παραγωγής προς τα σημεία τελικής χρήσης (ηλεκτροπαραγωγή και μεταφορές).

Στάδιο μεταφοράς υδρογόνου

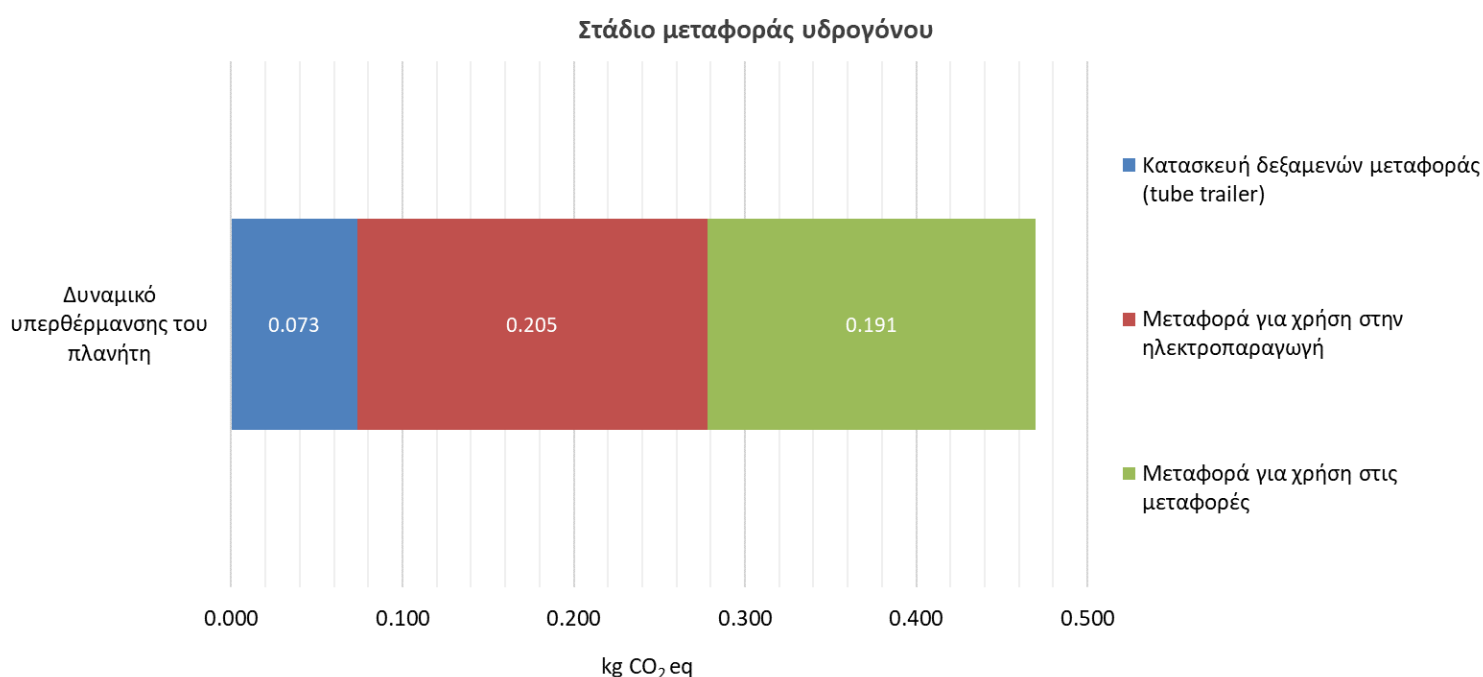


Γράφημα 5.2.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνολικά για το στάδιο αποθήκευσης - μεταφοράς υδρογόνου

Μέσω της ανάλυσης αποτυπώνεται η σημαντική συμβολή της μεταφοράς του υδρογόνου με χρήση πετρελαιοκίνητων φορτηγών σε όλους τους περιβαλλοντικούς δείκτες. Τόσο η μεταφορά για λόγους ηλεκτροπαραγωγής όσο και η μεταφορά στο σταθμό ανεφοδιασμού στο πλαίσιο του τομέα των μεταφορών έχουν σημαντικά υψηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο από την

κατασκευή των δεξαμενών, με τη συνεισφορά τους να κυμαίνεται σε παραπλήσια ποσοστά μεταξύ 40 – 50%. Η φάση της κατασκευής των δεξαμενών συμβάλλει με το χαμηλότερο ποσοστό σε όλους τους δείκτες, επιβεβαιώνοντας ότι η λειτουργική φάση του σταδίου μεταφοράς υπερσιχθεί περιβαλλοντικά.

Σημαντικό είναι το γεγονός ότι στο αποτύπωμα της μεταφοράς συμπεριλαμβάνεται και η ενέργεια που απαιτείται για τη συμπίεση του υδρογόνου στα 380bar. Η ενέργεια αυτή προέρχεται από τα ίδια φωτοβολταϊκά συστήματα που χρησιμοποιούνται στο στάδιο παραγωγής και είναι υπαίτια για τη μεγαλύτερη συμβολή στους περιβαλλοντικούς δείκτες. Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο στάδιο μελέτης, η επιβάρυνση αυτή οφείλεται στα δεδομένα της βάσης Ecoinvent, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής των φωτοβολταϊκών και είναι βασισμένα με έτος αναφοράς το 2012.



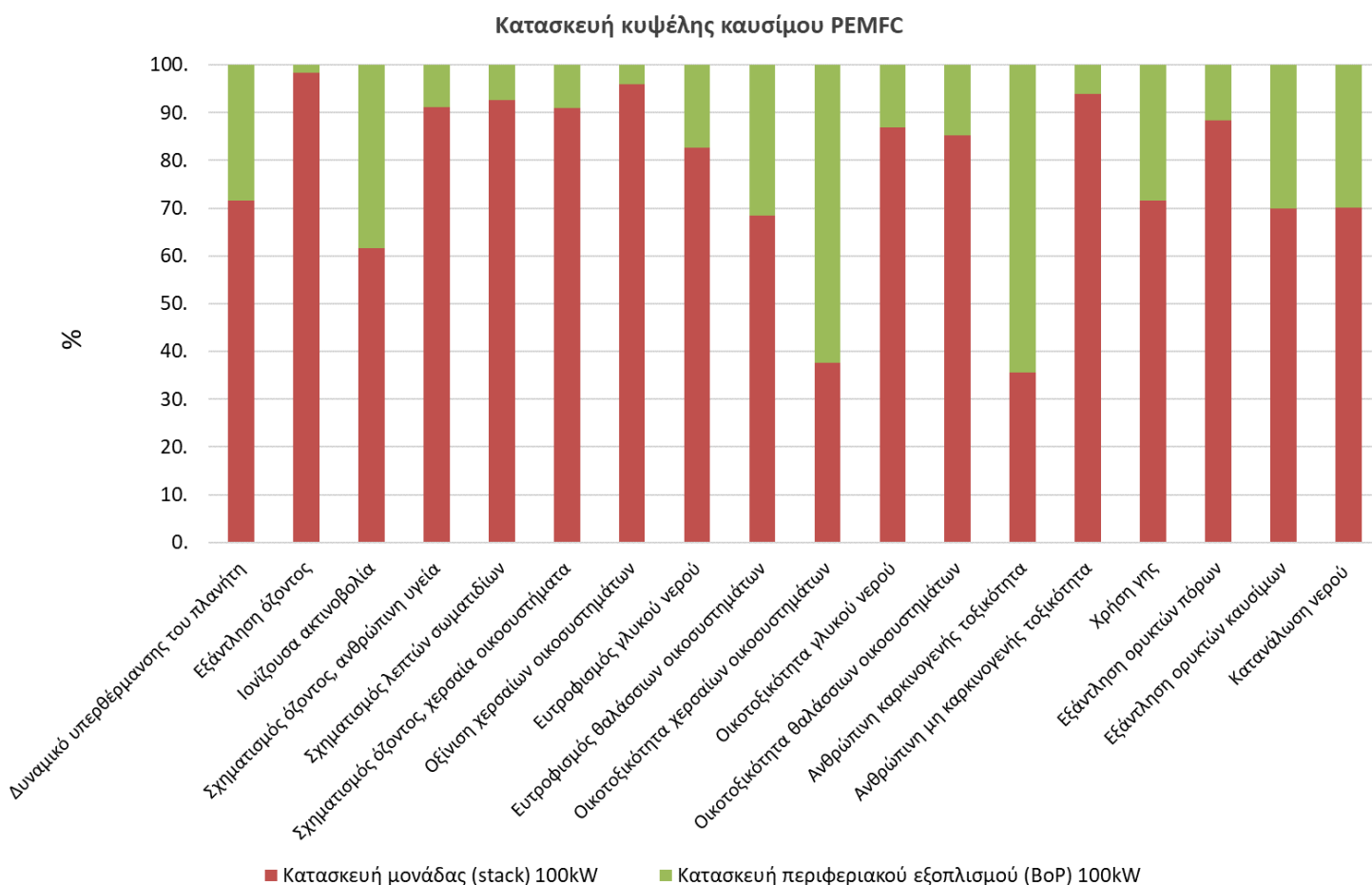
Γράφημα 5.2.3 Συμβολή του σταδίου αποθήκευσης - μεταφοράς υδρογόνου στην υπερθέρμανση του πλανήτη

Πιο αναλυτικά, όσον αφορά το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, η αποτίμηση είναι σύμφωνη με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως. Συνολικά για το στάδιο της μεταφοράς, η συμβολή του στο συγκεκριμένο δείκτη είναι ίση με 0.47 kg CO₂ eq/kg H₂. Η μεγαλύτερη συνεισφορά αποδίδεται στη μεταφορά του υδρογόνου για χρήση στην ηλεκτροπαραγωγή με 0.205 kg CO₂ eq/kg H₂, ακολουθούμενη από τη μεταφορά για χρήση στον τομέα των μεταφορών με 0.191 kg CO₂ eq. Η κατασκευή των δεξαμενών έχει τη χαμηλότερη επίδραση με 0.073 kg CO₂ eq/kg H₂. Αξιοσημείωτη, ωστόσο, είναι η επιβάρυνση της ενέργειας που απαιτείται για τη συμπίεση του υδρογόνου, η οποία περιλαμβάνεται ήδη στο αποτύπωμα της λειτουργικής φάσης της μεταφοράς, συμβάλλοντας κατά 0.1908 kg CO₂ eq ανά kg καταναλισκόμενου υδρογόνου.

Εφόσον αφαιρεθεί η συνεισφορά της συμπίεσης από το συνολικό αποτύπωμα των μεταφορών, διαπιστώνεται ότι η μεταφορά για ηλεκτροπαραγωγή εξακολουθεί να παρουσιάζει υψηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα σε σχέση με τον τομέα των μεταφορών. Το αποτέλεσμα αυτό κρίνεται αναμενόμενο, δεδομένης της μεγαλύτερης απόστασης που διανύεται στην πρώτη περίπτωση, γεγονός που συνεπάγεται περισσότερες εκπομπές λόγω καύσης πετρελαίου. Αξίζει, επίσης, να αναφερθεί ότι οι σχετικά χαμηλές εκπομπές που αποδίδονται στη μεταφορά σχετίζονται με την μοντελοποίηση του τύπου των οχημάτων. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι η μεταφορά πραγματοποιείται με σύγχρονα φορτηγά προδιαγραφών EURO6, τα οποία εμφανίζουν σημαντικά μειωμένες εκπομπές ρύπων και διοξειδίου του άνθρακα, συγκριτικά με παλαιότερα μοντέλα.

5.3 Αποτελέσματα σταδίου χρήσης υδρογόνου στην ηλεκτροπαραγωγή

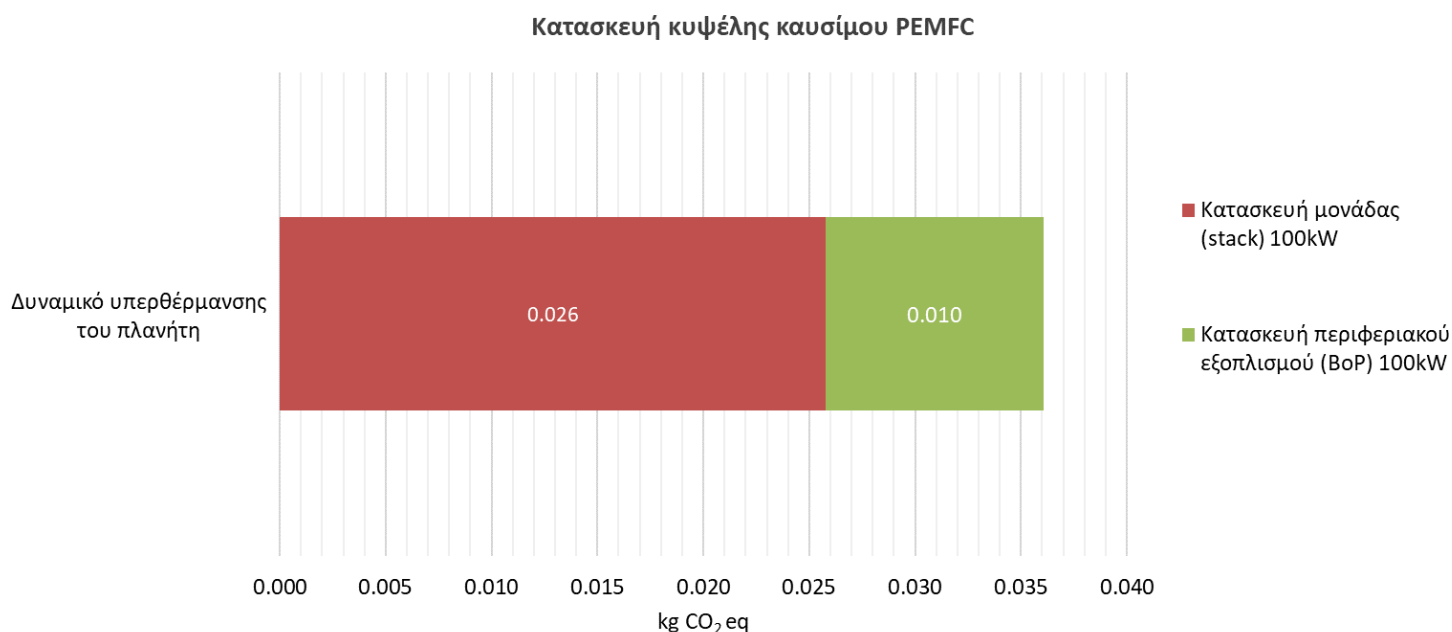
Η μία εκ των δύο τελικών χρήσεων του υδρογόνου, είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψελών καυσίμου τύπου PEM. Η περιβαλλοντική αποτίμηση αυτής της φάσης περιλαμβάνει την κατασκευή του συστήματος, ειδικότερα τη μονάδα κυψέλης καυσίμου και τον περιφερειακό εξοπλισμό, καθώς και τη λειτουργική φάση. Ωστόσο, κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου δεν παράγονται άμεσες εκπομπές, καθώς πρόκειται για μία καθαρή διεργασία από πλευράς ρύπων. Επομένως, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα προέρχεται εξ ολοκλήρου από το στάδιο της κατασκευής.



Γράφημα 5.3.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής της κυψέλης καυσίμου PEM

Η ανάλυση υποδεικνύει πως η κατασκευή της μονάδας της κυψέλης καυσίμου (stack) συνεισφέρει σημαντικά περισσότερο σχεδόν σε όλους του περιβαλλοντικούς δείκτες, κυρίως λόγω της χρήσης υλικών με έντονη περιβαλλοντική επιβάρυνση. Εξαιρέση αποτελούν οι κατηγορίες που αφορούν την οικοτοξικότητα των χερσαίων οικοσυστημάτων και την καρκινογενή τοξικότητα στους ανθρώπους, στις οποίες ο περιφερειακός εξοπλισμός συμβάλει με ποσοστό ελαφρώς ανώτερο από 60%. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην εκτεταμένη χρήση χρωμιούχου χάλυβα, ο οποίος αν και συναντάται εξίσου στην κατασκευή της μονάδας, εντοπίζεται σε σημαντικά μικρότερη ποσότητα.

Το υλικό με τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίδραση, στο οποίο οφείλεται και η μεγάλη συνεισφορά της κατασκευής της μονάδας κυψέλης καυσίμου, στους δείκτες είναι η πλατίνα, η οποία χρησιμοποιείται ως καταλύτης. Παρόλο που το βάρος της αντιστοιχεί σε ένα μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας, η εξόρυξη και επεξεργασία της συνδέονται με υψηλό περιβαλλοντικό κόστος. Σημαντική είναι, επίσης, η συμβολή των πολυμερών και του αλουμινίου, σε αντίθεση με τα υπόλοιπα υλικά που έχουν αμελητέα συνεισφορά στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Αντίστοιχα στην κατασκευή του περιφερειακού εξοπλισμού, οι υψηλότερες επιβαρύνσεις αποδίδονται στο χρωμιούχο χάλυβα, το αλουμίνιο και τα πλαστικά.

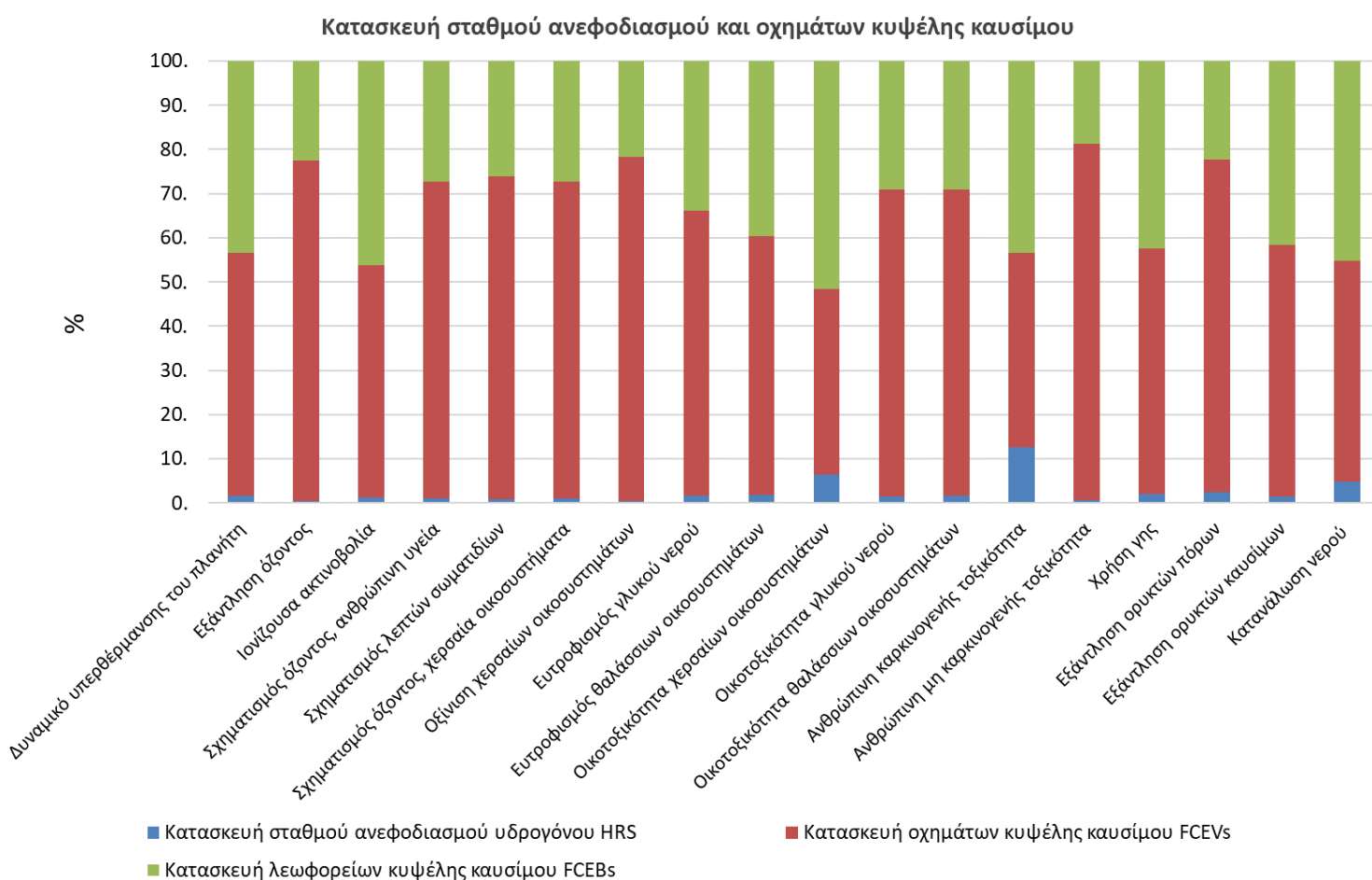


Γράφημα 5.3.2 Συμβολή της κατασκευής της κυψέλης καυσίμου PEM στην υπερθέρμανση του πλανήτη

Σχετικά με το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, η συνεισφορά της κατασκευής της μονάδας κυψέλης καυσίμου PEM, επικρατεί με 0.026 kg CO₂ eq/kg H₂ έναντι του περιφερειακού εξοπλισμού με 0.01 kg CO₂ eq/kg H₂. Συνολικά, το στάδιο της κατασκευής επιβαρύνει το ανθρακικό αποτύπωμα κατά 0.036 kg CO₂ eq ανά kg καταναλισκόμενου υδρογόνου, τιμή αισθητά μικρότερη σε σύγκριση με τις αντίστοιχες των σταδίων παραγωγής και μεταφοράς. Το γεγονός αυτό υπογραμμίζει τη σχετική περιβαλλοντική αποδοτικότητα της τεχνολογίας PEMFC όσον αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

5.4 Αποτελέσματα σταδίου χρήσης υδρογόνου στις μεταφορές

Η δεύτερη τελική χρήση του υδρογόνου αφορά τον τομέα των μεταφορών. Ειδικότερα το υδρογόνο μεταφέρεται σε ένα σταθμό ανεφοδιασμού (HRS), μέσω του οποίου τροφοδοτούνται δύο επιβατικά οχήματα κυψέλης καυσίμου (FCEVs) και δύο αστικά λεωφορεία κυψέλης καυσίμου (FCEBs). Η περιβαλλοντική αποτίμηση περιλαμβάνει τόσο την κατασκευή της απαιτούμενης υποδομής και των οχημάτων όσο και τη φάση λειτουργίας. Ωστόσο, όπως και στην περίπτωση της ηλεκτροπαραγωγής, δεν υφίστανται άμεσες εκπομπές κατά τη λειτουργία, καθώς το υδρογόνο καίγεται καθαρά και χωρίς εκπομπές ρύπων. Συνεπώς, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποδίδονται αποκλειστικά στα στάδια κατασκευής.

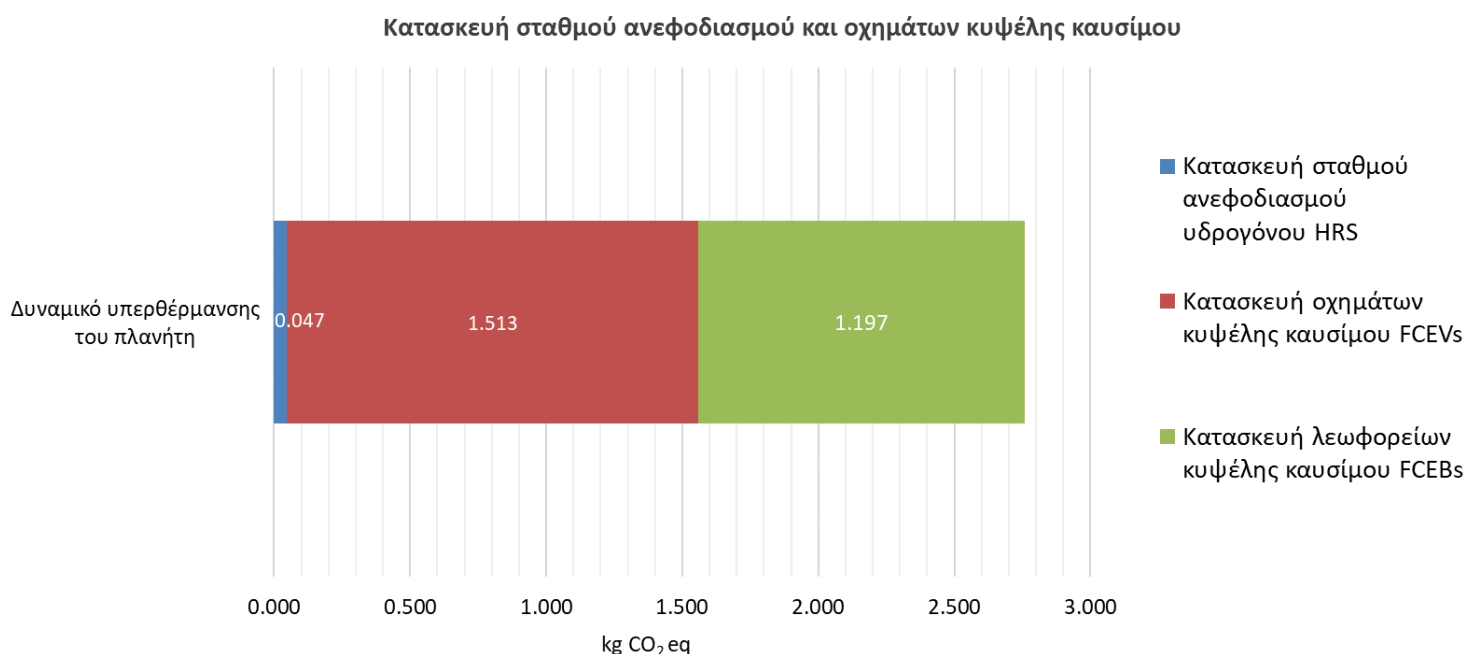


Γράφημα 5.4.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σχετικών κατασκευών του τομέα μεταφορών

Μέσω της ανάλυσης αποτυπώνεται η σημαντική συνεισφορά της κατασκευής των επιβατικών οχημάτων και των αστικών λεωφορείων στις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις, με τα επιβατικά οχήματα να παρουσιάζουν υψηλότερες τιμές στους περισσότερους δείκτες. Εξαιρέση αποτελεί η κατηγορία της οικοτοξικότητας χερσαίων οικοσυστημάτων, όπου τα λεωφορεία εμφανίζουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά. Αντιθέτως, η συμβολή της κατασκευής του σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου είναι περιορισμένη, με το μέγιστο ποσοστό συμμετοχής να αγγίζει το 12% στην κατηγορία της ανθρώπινης καρκινογόνου τοξικότητας.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνδέονται κυρίως με την πολυπλοκότητα των οχημάτων λόγω της ενσωμάτωσης της τεχνολογίας κυψέλης καυσίμου και επομένως των απαιτούμενων υλικών. Σημαντική είναι η επιβάρυνση που προέρχεται από τη χρήση της πλατίνας, η οποία λειτουργεί ως καταλύτης στην κάθοδο της κυψέλης καυσίμου PEM, και του ανθρακονήματος, κυρίως λόγω της υψηλής ενεργειακής και περιβαλλοντικής έντασης των διεργασιών παραγωγής τους. Στα FCEVs, η πλατίνα αποτελεί το κυρίαρχο συντελεστή του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, ενώ στα FCEBs προέχει το ανθρακόνημα, με την πλατίνα να ακολουθεί. Όσον αφορά το σταθμό ανεφοδιασμού HRS, οι σημαντικοί παράγοντες είναι η χρήση χάλυβας και χαλκού, ωστόσο η συνολική τους συμβολή παραμένει αμελητέα συγκριτικά με αυτή των οχημάτων.

Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι αν και τα λεωφορεία απαιτούν μεγαλύτερες ποσότητες υλικών, λόγω του μεγέθους τους, δεν παρουσιάζουν ανάλογη αύξηση στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Αυτό οφείλεται στη λειτουργική μονάδα που έχει οριστεί για το σύστημα μελέτης, 1kg καταναλισκόμενου υδρογόνου. Ειδικότερα, λόγω μεγαλύτερης ζήτησης στα FCEBs, αυτά καταναλώνουν σημαντικά μεγαλύτερες ποσότητες υδρογόνου με αποτέλεσμα οι ανηγμένες τιμές των υλικών που τα συνθέτουν να είναι παραπλήσιες με αυτές των FCEVs και συνεπώς οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κατασκευής τους να κατανέμονται σε μεγαλύτερη ποσότητα καυσίμου. Η αρκετά αυξημένη, ωστόσο, συμβολή που αποδίδουν τα επιβατικά οχήματα οφείλεται κυρίως στην πλατίνα, η οποία αποτελεί μέρος της κυψέλης καυσίμου και όχι του αμαξώματος. Συγκεκριμένα, η ποσότητα της πλατίνας που απαιτείται για την κατασκευή των δύο τύπων οχημάτων είναι παραπλήσια, αφού και τα δύο χαρακτηρίζονται από παρόμοια ισχύ λειτουργίας (136kW για τα επιβατικά και 150kW για τα λεωφορεία). Λαμβάνοντας υπόψη και τη μεγαλύτερη κατανάλωση υδρογόνου των λεωφορείων, τα επιβατικά FCEVs εμφανίζουν μεγαλύτερη αναλογία πλατίνας ανά kg καταναλισκόμενου υδρογόνου, επηρεάζοντας το περιβαλλοντικό αντίκτυπο.

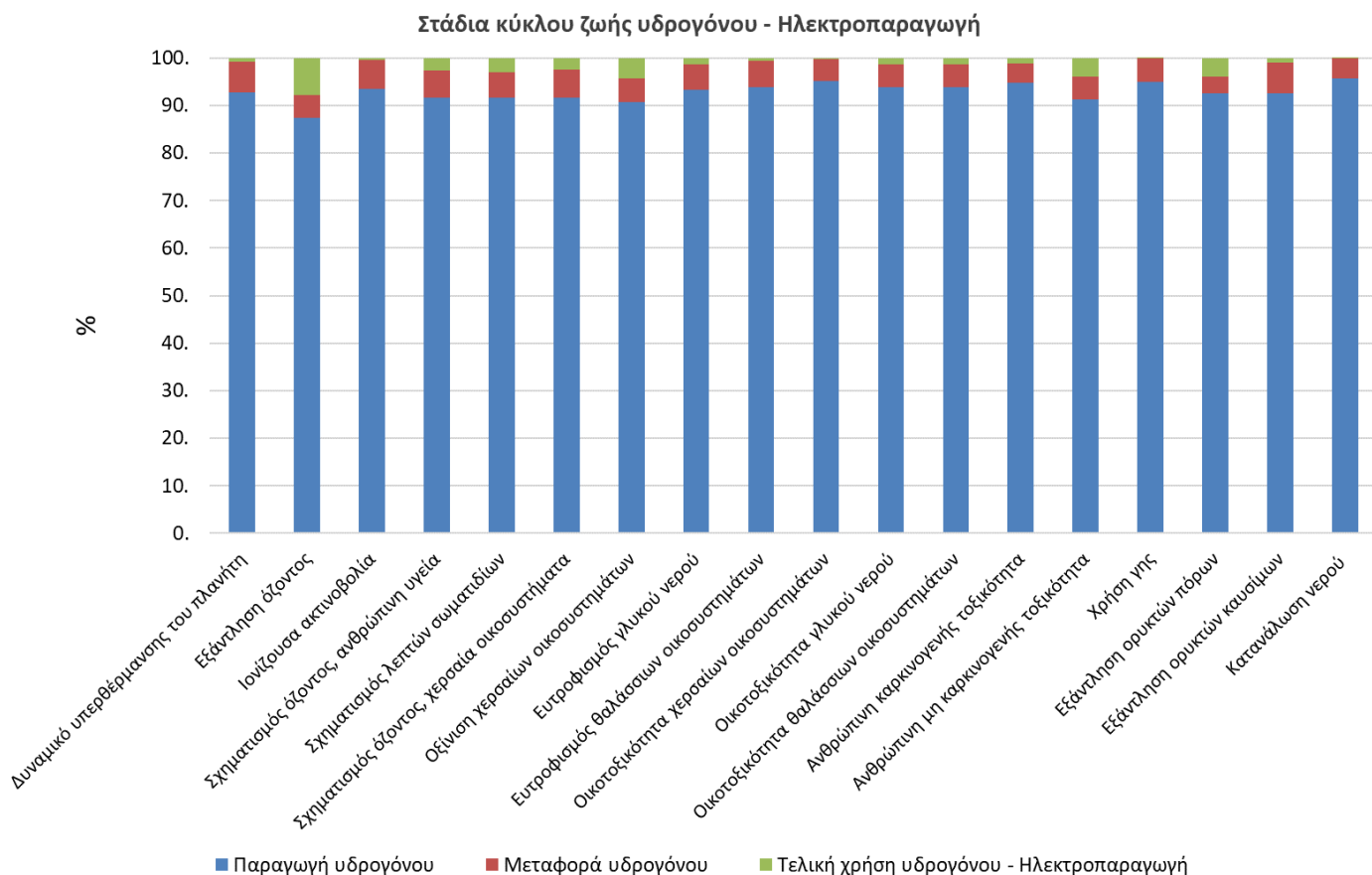


Γράφημα 5.4.2 Συμβολή των σχετικών κατασκευών του τομέα μεταφορών στην υπερθέρμανση του πλανήτη

Όσον αφορά το δείκτη δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη, τα αποτελέσματα ευθυγραμμίζονται με τα παραπάνω ευρήματα. Η κατασκευή των επιβατικών οχημάτων εμφανίζει τη μεγαλύτερη συμβολή με 1.513 kg CO₂ eq/kg H₂, ακολουθούμενη από τα λεωφορεία με 1.197 kg CO₂ eq/kg H₂. Η κατασκευή του σταθμού HRS έχει τη χαμηλότερη επίπτωση, με μόλις 0.047 kg CO₂ eq/kg H₂. Η αυξημένη επιβάρυνση των αυτοκινήτων FCEVs οφείλεται κυρίως στη μεγαλύτερη αναλογία πλατίνας/kg καταναλισκόμενου υδρογόνου, όπως σχολιάστηκε προηγουμένως. Συνολικά, η φάση κατασκευής των σχετικών υποδομών και οχημάτων για τη χρήση του υδρογόνου στις μεταφορές, έχει ανθρακικό αποτύπωμα 2.758 kg CO₂ eq ανά kg καταναλισκόμενου υδρογόνου, τιμή σημαντικά υψηλότερη σε σχέση με την αντίστοιχη για την ηλεκτροπαραγωγή. Η διαφορά αυτή αποδίδεται στο μεγαλύτερο αριθμό των επιμέρους κατασκευαστικών συστημάτων του τομέα των μεταφορών και επομένως και των υλικών που απαιτούνται για την κατασκευή τους.

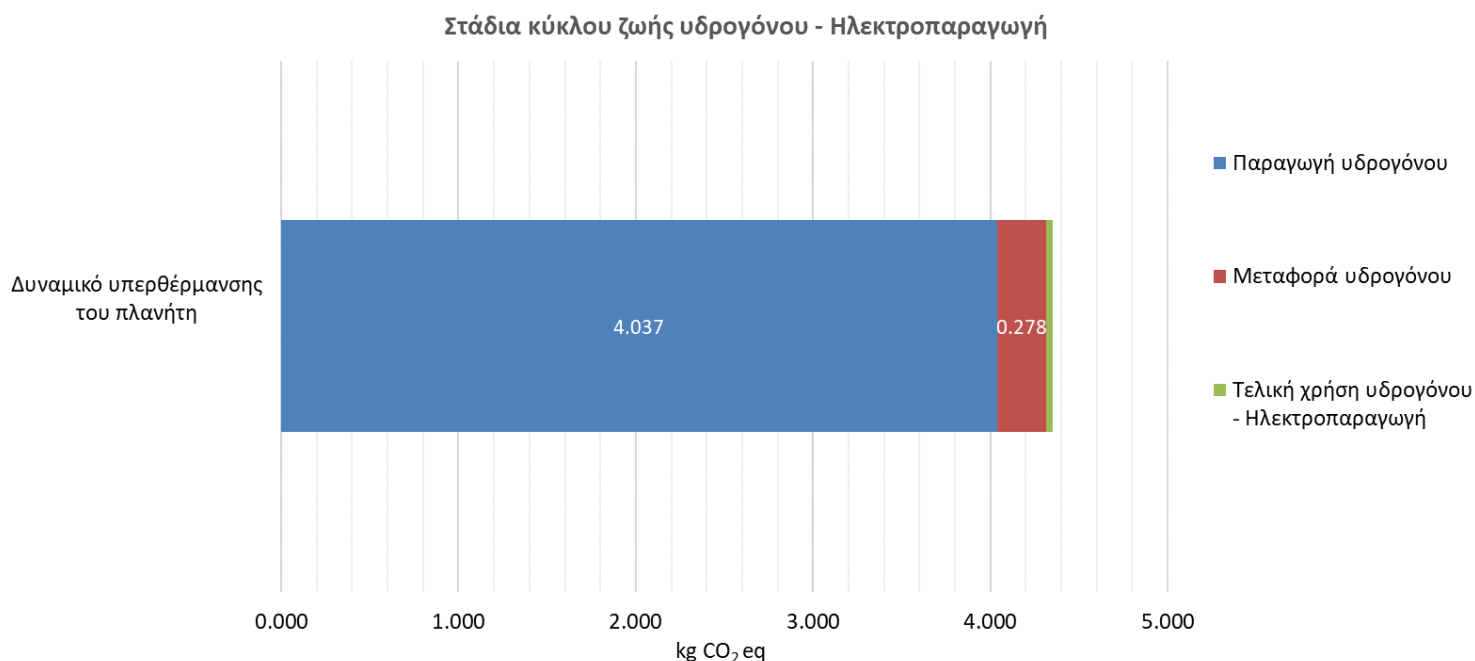
5.5 Συνολικά αποτελέσματα αλυσίδας αξίας υδρογόνου

Η ανάλυση κύκλου ζωής του υδρογόνου περιλαμβάνει συνολικά τρία στάδια : την παραγωγή, την αποθήκευση – μεταφορά και την τελική χρήση του, η οποία σχετίζεται με τον τομέα της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τον τομέα των μεταφορών. Τα αποτελέσματα της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αποτυπώνονται συγκεντρωτικά για το σύνολο του κύκλου ζωής, ενώ παράλληλα γίνεται σύγκριση με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των συμβατικών τεχνολογιών που δύναται να αντικαταστήσει το υδρογόνο.



Γράφημα 5.5.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σταδίων κύκλου ζωής του υδρογόνου στην ηλεκτροπαραγωγή

Στην περίπτωση αξιοποίησης του υδρογόνου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, το κυρίαρχο στάδιο, από άποψη περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, είναι αυτό της παραγωγής. Περιλαμβάνει την κατασκευή των μονάδων ηλεκτρόλυσης, του απαραίτητου εξοπλισμού καθώς και τη λειτουργία του συστήματος και συνεισφέρει κατά μέσο όρο 90% σε όλους τους περιβαλλοντικούς δείκτες. Ακολουθεί το στάδιο της μεταφοράς με μέση συμμετοχή στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα 5%, ενώ η συμβολή του σταδίου χρήσης, δηλαδή η κατασκευή της κυψέλης καυσίμου, είναι σχεδόν αμελητέα.

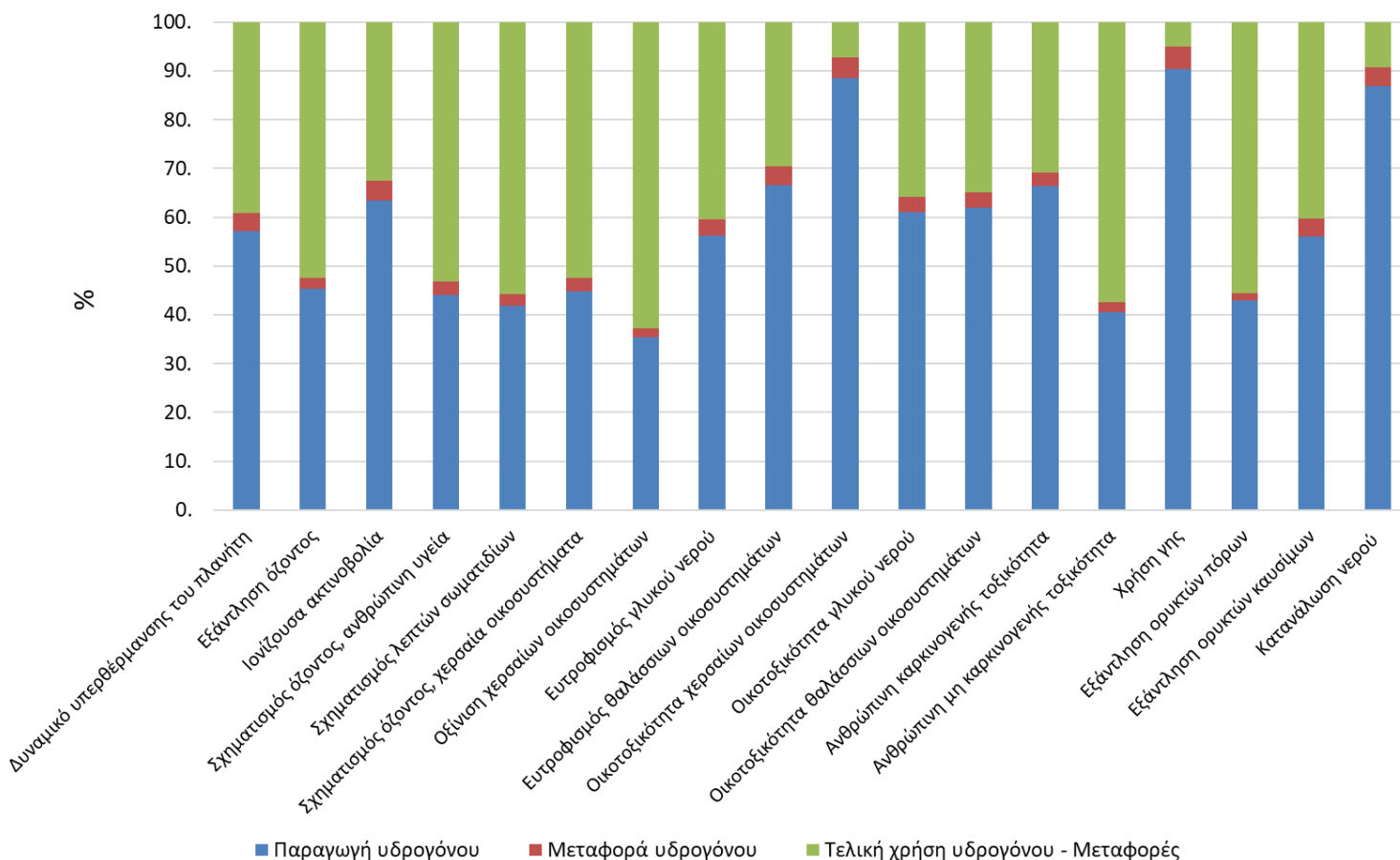


Γράφημα 5.5.2 Συμβολή των σταδίων κύκλου ζωής του υδρογόνου στην υπερθέρμανση του πλανήτη - Ηλεκτροπαραγωγή

Ανάλογη είναι και η εικόνα στη συμβολή των σταδίων στο δείκτη υπερθέρμανσης του πλανήτη. Ειδικότερα, η παραγωγή του υδρογόνου έχει τη μεγαλύτερη επίδραση, με ανθρακικό αποτύπωμα 4.037 kg CO₂ eq/kg H₂. Ακολουθεί το στάδιο αποθήκευσης – μεταφοράς με 0.278 kg CO₂ eq/kg H₂ και το στάδιο χρήσης με 0.036 kg CO₂ eq ανά kg H₂, οδηγώντας σε συνολική επιβάρυνση κατά 4.352 kg CO₂ eq ανά kg παραγόμενου υδρογόνου.

Σχετικά με τη χρήση του υδρογόνου στον τομέα των μεταφορών, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σταδίων του κύκλου ζωής αποτυπώνονται στο γράφημα 5.5.3.

Στάδια κύκλου ζωής υδρογόνου - Μεταφορές

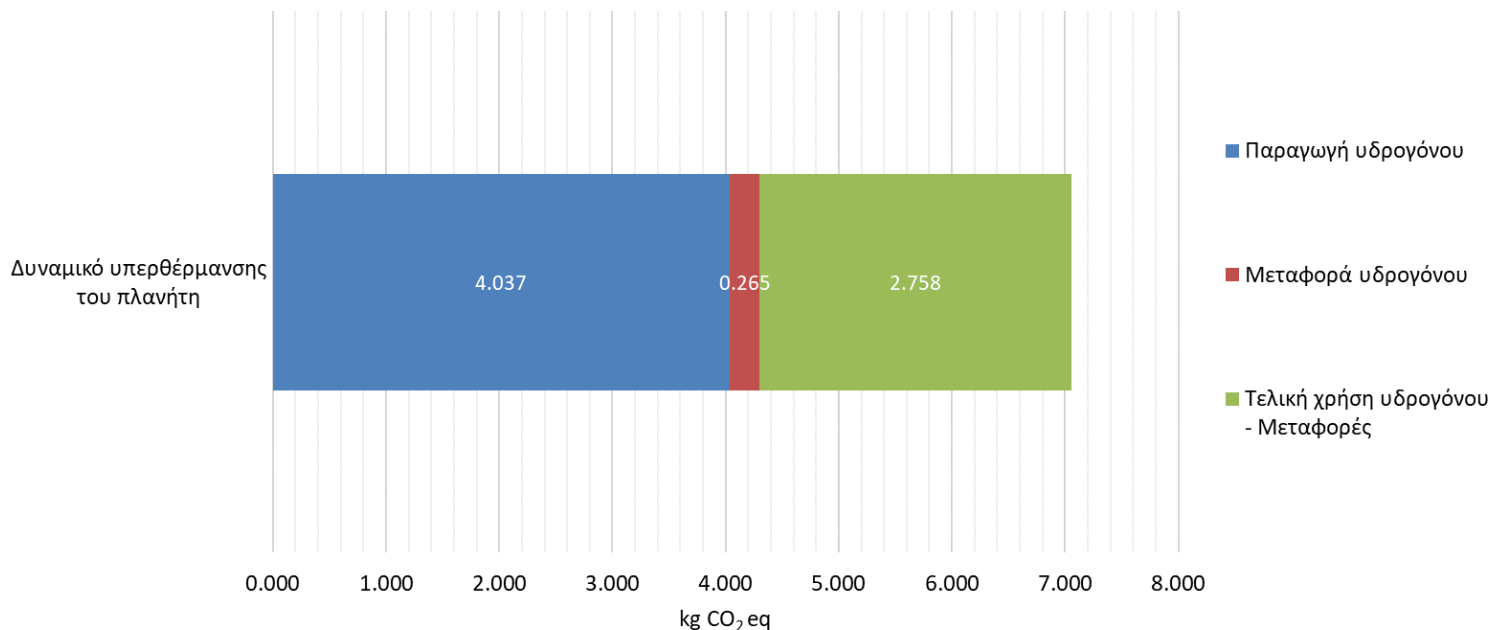


Γράφημα 5.5.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις των σταδίων κύκλου ζωής του υδρογόνου στις μεταφορές

Κυρίαρχη πηγή επιβάρυνσης στους περισσότερους περιβαλλοντικούς δείκτες είναι, και σε αυτή την περίπτωση, το στάδιο παραγωγής του υδρογόνου, με τα ποσοστά συνεισφοράς να κυμαίνονται μεταξύ 55% και 90%. Ωστόσο, σε ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων, όπως η εξάντληση του όζοντος, ο σχηματισμός όζοντος και σωματιδίων, η χερσαία οξίνιση, η ανθρώπινη μη καρκινογενής τοξικότητα και η εξάντληση ορυκτών πόρων, η επιβάρυνση του σταδίου τελικής χρήσης υπερτερεί. Αυτή η φάση περιλαμβάνει την κατασκευή των σχετικών υποδομών και οχημάτων και συμβάλλει, κατά μέσο όρο 38% σε όλους τους εξεταζόμενους δείκτες. Σε αντίθεση με την περίπτωση της ηλεκτροπαραγωγής, το στάδιο της μεταφοράς παρουσιάζει σχεδόν αμελητέες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, γεγονός που αποδίδεται κυρίως στη μικρή απόσταση μεταφοράς μεταξύ των σημείων παραγωγής και κατανάλωσης.

Αντίστοιχη είναι η εικόνα και στο δείκτη του δυναμικού υπερθέρμανσης του πλανήτη. Η παραγωγή του υδρογόνου αποτελεί τη βασική πηγή εκπομπών με 4.037 kg CO₂ eq/kg H₂. Σημαντική είναι και η συμβολή του σταδίου χρήσης, κυρίως εξαιτίας της κατασκευής των οχημάτων, με επιβάρυνση 2.758 kg CO₂ eq/kg H₂, ενώ η συνεισφορά της μεταφοράς και περιορίζεται σε μόλις 0.265 kg CO₂ eq/kg H₂. Συνολικά, το ανθρακικό αποτύπωμα της χρήσης υδρογόνου στις μεταφορές ανέρχεται σε 7.060 kg CO₂ eq ανά kg καταναλισκόμενου υδρογόνου, το οποίο παρουσιάζεται ιδιαίτερα αυξημένο σε σύγκριση με την ηλεκτροπαραγωγή, λόγω των πρόσθετων κατασκευαστικών απαιτήσεων που περιλαμβάνονται στα όρια του συστήματος.

Στάδια κύκλου ζωής υδρογόνου - Μεταφορές



Γράφημα 5.5.4 Συμβολή των σταδίων κύκλου ζωής του υδρογόνου στην υπερθέρμανση του πλανήτη - Μεταφορές

Στο σύνολο τους, οι τεχνολογίες υδρογόνου αποτελούν βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις έναντι των συμβατικών τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής και μεταφορών, προσφέροντας σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Ειδικότερα, η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται μέσω της κυψέλης καυσίμου δύναται να υποκαταστήσει την ενέργεια που παρέχεται από το ελληνικό διασυνδεδεμένο δίκτυο, ενώ το υδρογόνο ως καύσιμο έχει τη δυνατότητα να αντικαταστήσει το πετρέλαιο σε αστικές και ιδιωτικές μετακινήσεις.

Για τη μοντελοποίηση του ελληνικού δικτύου και επομένως τη σύγκριση της υποκατάστασης του από το υδρογόνο, χρησιμοποιούνται τα δεδομένα του έτους 2023, όπως αυτά ορίζονται από τον ΔΑΠΕΕΠ και απεικονίζονται στο Γράφημα 4.5.1 (βλ. Κεφάλαιο 4), ώστε να αποτυπωθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια το πραγματικό ενεργειακό μείγμα παραγωγής της χώρας. Αντίστοιχα, για τον τομέα των μεταφορών, η χρήση υδρογόνου ως καύσιμο προσομοιώνεται ως εναλλακτική των συμβατικών επιβατικών οχημάτων και λεωφορείων πετρελαίου. Η αξιολόγηση των επιπτώσεων, από περιβαλλοντικής άποψης, της μετάβασης από τις συμβατικές τεχνολογίες στις τεχνολογίες υδρογόνου κρίνεται αναγκαία, προκειμένου να τεκμηριωθεί η συνεισφορά τους στη βιώσιμη ανάπτυξη.

Τα αποτελέσματα της σύγκρισης στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις παρουσιάζονται στον πίνακα που ακολουθεί, για τους 18 περιβαλλοντικούς δείκτες της μεθόδου ReCiPe 2016 Midpoint.

Πίνακας 5.5.1 Μεταβολή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω χρήσης υδρογόνου

Περιβαλλοντικός δείκτης	Ποσοστιαία μεταβολή λόγω χρήσης υδρογόνου - Ηλεκτροπαραγωγή	Ποσοστιαία μεταβολή λόγω χρήσης υδρογόνου - Μεταφορές
Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη	-50.25%	-89.37%
Εξάντληση όζοντος	-37.77%	-76.23%
Ιονίζουσα ακτινοβολία	440.03%	-58.97%
Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία	-0.61%	-93.19%
Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων	8.71%	-73.96%
Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	-2.71%	-93.16%
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	-6.53%	-71.72%
Ευτροφισμός γλυκού νερού	-69.36%	-58.86%
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων	-58.46%	-84.35%
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	446.13%	-58.87%
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	222.30%	-64.91%
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστημάτων	207.77%	-64.69%
Ανθρώπινη καρκινογενής τοξικότητα	63.94%	-72.33%
Ανθρώπινη μη καρκινογενής τοξικότητα	26.93%	-45.89%
Χρήση γης	1173.02%	-27.38%
Εξάντληση ορυκτών πόρων	726.95%	-40.66%
Εξάντληση ορυκτών καυσίμων	-61.17%	-91.14%
Κατανάλωση νερού	649.01%	12.24%

Η υιοθέτηση του υδρογόνου παρουσιάζει συνολικά σημαντικά μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ιδίως σε κρίσιμες κατηγορίες επιπτώσεων όπως το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, το οποίο αποτελεί και το πλέον μείζον ζήτημα παγκοσμίως. Συγκεκριμένα, στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, η χρήση υδρογόνου οδηγεί σε αισθητή βελτίωση των επιπτώσεων σε δείκτες, όπως το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, η εξάντληση του όζοντος, ο σχηματισμός όζοντος που σχετίζεται με την ανθρώπινη υγεία και τα χερσαία οικοσυστήματα, η οξίνιση των οικοσυστημάτων, ο ευτροφισμός γλυκού νερού και θαλάσσιων οικοσυστημάτων, καθώς και η εξάντληση ορυκτών καυσίμων.

Η μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος ανέρχεται σε ποσοστό 50.25%, ακόμη και με την ενσωμάτωση των εκπομπών που σχετίζονται με την κατασκευή των επιμέρους συστημάτων και τις ανάγκες μεταφοράς, σε σχέση με το ελληνικό δίκτυο, το οποίο εξακολουθεί να βασίζεται σε ρυπογόνες πηγές ενέργειας. Η συμβολή του υδρογόνου στην απανθρακοποίηση ενισχύεται από την απουσία άμεσης καύσης ορυκτών καυσίμων και την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την ηλεκτρόλυση. Η βελτίωση της επιβάρυνσης στην εξάντληση των ορυκτών καυσίμων επιτυγχάνεται δεδομένου ότι η ηλεκτροπαραγωγή μέσω υδρογόνου δεν βασίζεται άμεσα σε πρωτογενή καύσιμα, ενώ οι εκπομπές που σχετίζονται με τους δείκτες ευτροφισμού, οξίνισης και σχηματισμού όζοντος προέρχονται κυρίως από την καύση σε θερμικούς σταθμούς του δικτύου και απουσιάζουν από τις τεχνολογίες υδρογόνου, οι οποίες δεν είναι εξαρτημένες από συμβατικούς ρυπογόνους πόρους.

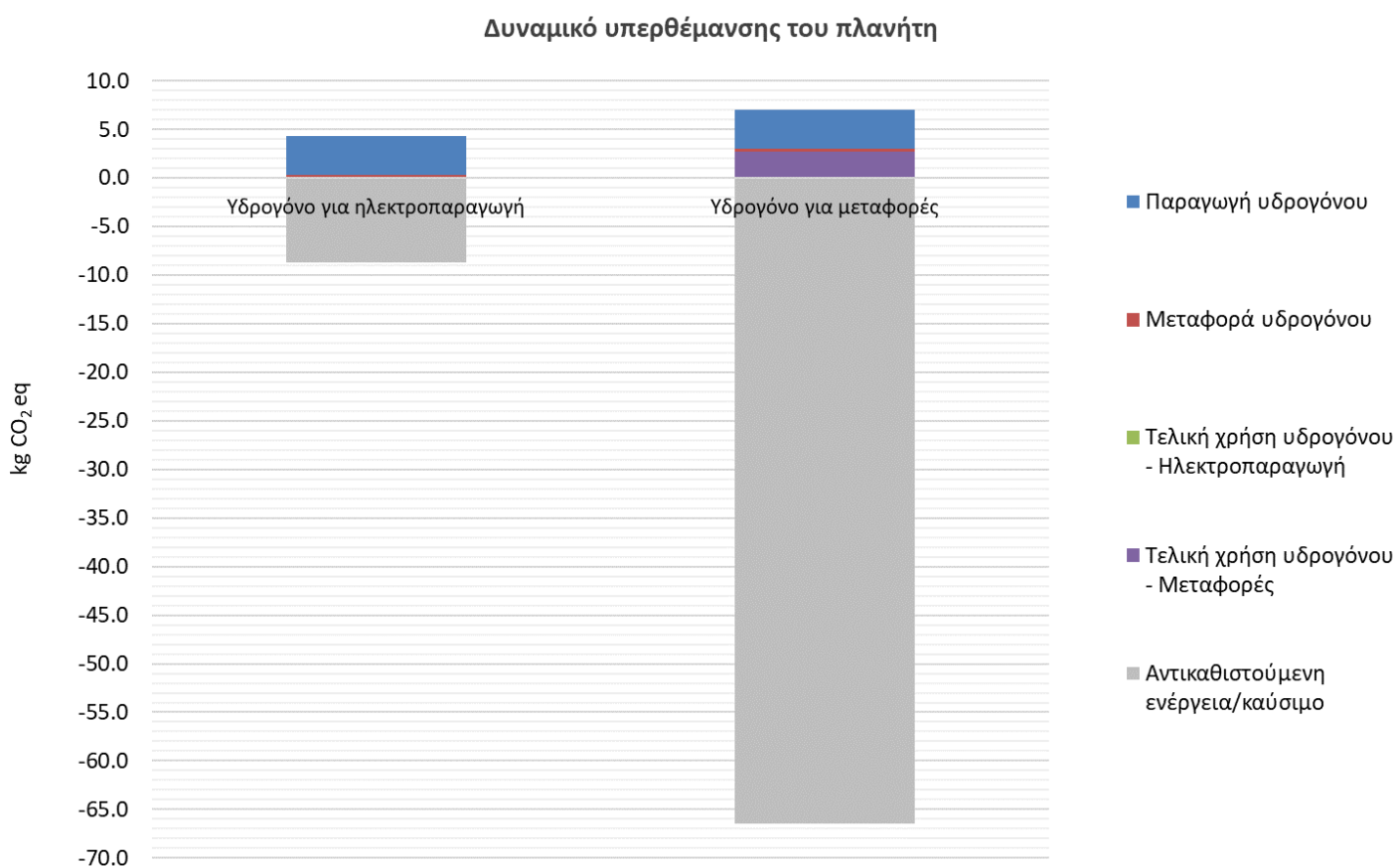
Ωστόσο σε ορισμένες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων καταγράφεται αύξηση κατά τη χρήση του υδρογόνου για σκοπούς ηλεκτροπαραγωγής. Οι επιβαρύνσεις αυτές αποδίδονται πρωτίστως στο αποτύπωμα των χρησιμοποιούμενων υποδομών και υλικών που συνδέονται με τον κύκλο ζωής του υδρογόνου και όχι με το ίδιο το υδρογόνο ως ενεργειακό φορέα, συγκριτικά με την υφιστάμενη δομή του δικτύου. Ειδικότερα, στην περίπτωση της ιονίζουσας ακτινοβολίας, ο δείκτης επιβαρύνεται λόγω της κατασκευής των φωτοβολταϊκών πάνελ που απαιτούν υλικά, όπως το πυρίτιο και οι σπάνιες γαίες. Οι κατηγορίες τοξικότητας και οικοτοξικότητας επηρεάζονται άμεσα από τα στάδια κατασκευής των επιμέρους συστημάτων, τα οποία περιλαμβάνουν χρήση βαρέων μετάλλων, οργανικών διαλυτών και άλλων χημικών. Αναφορικά με την κατηγορία χρήση γης, σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα φωτοβολταϊκά, όπου απαιτούν μεγαλύτερες επιφάνειες εγκατάστασης ανά μονάδα παραγόμενης ενέργεια σε σχέση με τους συμβατικούς θερμικούς σταθμούς. Η επιβάρυνση του δείκτη εξάντλησης των ορυκτών πόρων αποδίδεται στην εκτεταμένη αξιοποίηση κρίσιμων υλικών, όπως ο χαλκός και η πλατίνα, για την κατασκευή των φωτοβολταϊκών πάνελ και των συστημάτων υδρογόνου. Επιπλέον, η κατανάλωση του νερού φαίνεται να αυξάνεται καθώς η ηλεκτρόλυση απαιτεί νερό υψηλής καθαρότητας, ενώ η πιθανή ανάκτηση νερού κατά τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου δεν συνυπολογίζεται στην παρούσα μελέτη.

Αξίζει να σημειωθεί ότι το ελληνικό ενεργειακό δίκτυο έχει σημειώσει σημαντική πρόοδο ως προς τη διείσδυση των ΑΠΕ τα τελευταία χρόνια, γεγονός που συμβάλει στη μείωση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος. Ως εκ τούτου, η σύγκριση μεταξύ των τεχνολογιών δεν καταδεικνύει πάντα την απόλυτη υπεροχή του υδρογόνου και για αυτό καθιστά ορισμένες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις συγκριτικά αυξημένες στην περίπτωση του υδρογόνου, κυρίως λόγω της υψηλής τεχνολογικής πολυπλοκότητας και του αποτυπώματος των εφοδιαστικών αλυσίδων των υλικών που το συνοδεύουν.

Από την άλλη πλευρά, η αντικατάσταση των πετρελαιοκίνητων οχημάτων με οχήματα που λειτουργούν με υδρογόνο ως καύσιμο, συμβάλει ουσιαστικά στη μείωση όλων των περιβαλλοντικών δεικτών, με μόνη εξαίρεση την κατανάλωση του νερού. Αναφορικά με την υπερθέρμανση του πλανήτη καταγράφεται μείωση κατά 89.37%. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στις μηδενικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα κατά τη λειτουργία των οχημάτων κυψελών

καυσίμου, σε αντίθεση με τα πετρελαιοκίνητα, των οποίων τόσο η καύση όσο και ο κύκλος ζωής του πετρελαίου, περιλαμβανομένου της εξόρυξης και της διύλισης, επιβαρύνουν σημαντικά το περιβάλλον. Αξίζει να αναφερθεί ότι η μείωση για τα επιβατικά αυτοκίνητα κυμαίνεται στο 85%, ενώ για τα αστικά λεωφορεία φτάνει το 79.63%, λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές απαιτήσεις σε υλικά και ποσότητες κατασκευής.

Η μείωση των εκπομπών δεν περιορίζεται μόνο στο διοξείδιο του άνθρακα. Στο σχηματισμό του όζοντος και των σωματιδίων παρατηρείται σημαντική μείωση, η οποία οφείλεται στην απουσία εκπομπών οξειδίων του αζώτου και αιωρούμενων σωματιδίων, για τα οποία τα οχήματα πετρελαίου είναι βασικές πηγές. Παρόμοια εικόνα παρουσιάζεται στην κατηγορία οξίνισης, όπου η απουσία διοξειδίου του θείου στα οχήματα υδρογόνου οδηγεί σε μείωση, ειδικά συγκρινόμενη με τις εκπομπές των παλαιότερων πετρελαιοκίνητων οχημάτων. Στις κατηγορίες τοξικότητας, λαμβάνεται υπόψη το υψηλό περιβαλλοντικό κόστος των διεργασιών εξόρυξης και διύλισης του πετρελαίου που απελευθερώνουν επιβλαβείς ενώσεις στην ατμόσφαιρα, διεργασίες που απουσιάζουν στο κύκλο ζωής του υδρογόνου. Επιπλέον, δεδομένου ότι το πετρέλαιο είναι ορυκτό καύσιμο, η απουσία του μειώνει αισθητά την επιβάρυνση στο δείκτη εξάντλησης ορυκτών καυσίμων. Η μόνη περιβαλλοντική κατηγορία που καταγράφει σχετική αύξηση είναι η κατανάλωση του νερού. Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση της ηλεκτροπαραγωγής, το υδρογόνο που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης απαιτεί σημαντικές ποσότητες νερού, σε αντίθεση με τα πετρελαιοκίνητα οχήματα που δεν παρουσιάζουν άμεση κατανάλωση νερού κατά τη λειτουργία τους.



Γράφημα 5.5.5 Συγκριτική συμβολή του υδρογόνου και των συμβατικών τεχνολογιών στην υπερθέρμανση του πλανήτη

Τα αποτελέσματα στο σύνολο τους κρίνονται εύλογα, λαμβάνοντας υπόψη την τωρινή ενεργειακή πραγματικότητα. Το ελληνικό διασυνδεδεμένο δίκτυο έχει ενσωματώσει υψηλό ποσοστό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, γεγονός που περιορίζει τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ενώ ο τομέας των μεταφορών συνεχίζει να εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τα ορυκτά καύσιμα, που είναι γνωστά για το υψηλό περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα. Αναφορικά με το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη, το γράφημα απεικονίζει συγκριτικά τις επιπτώσεις των τεχνολογιών υδρογόνου στην ηλεκτροπαραγωγή και στις μεταφορές, σε σχέση με τις αντίστοιχες συμβατικές τεχνολογίες.

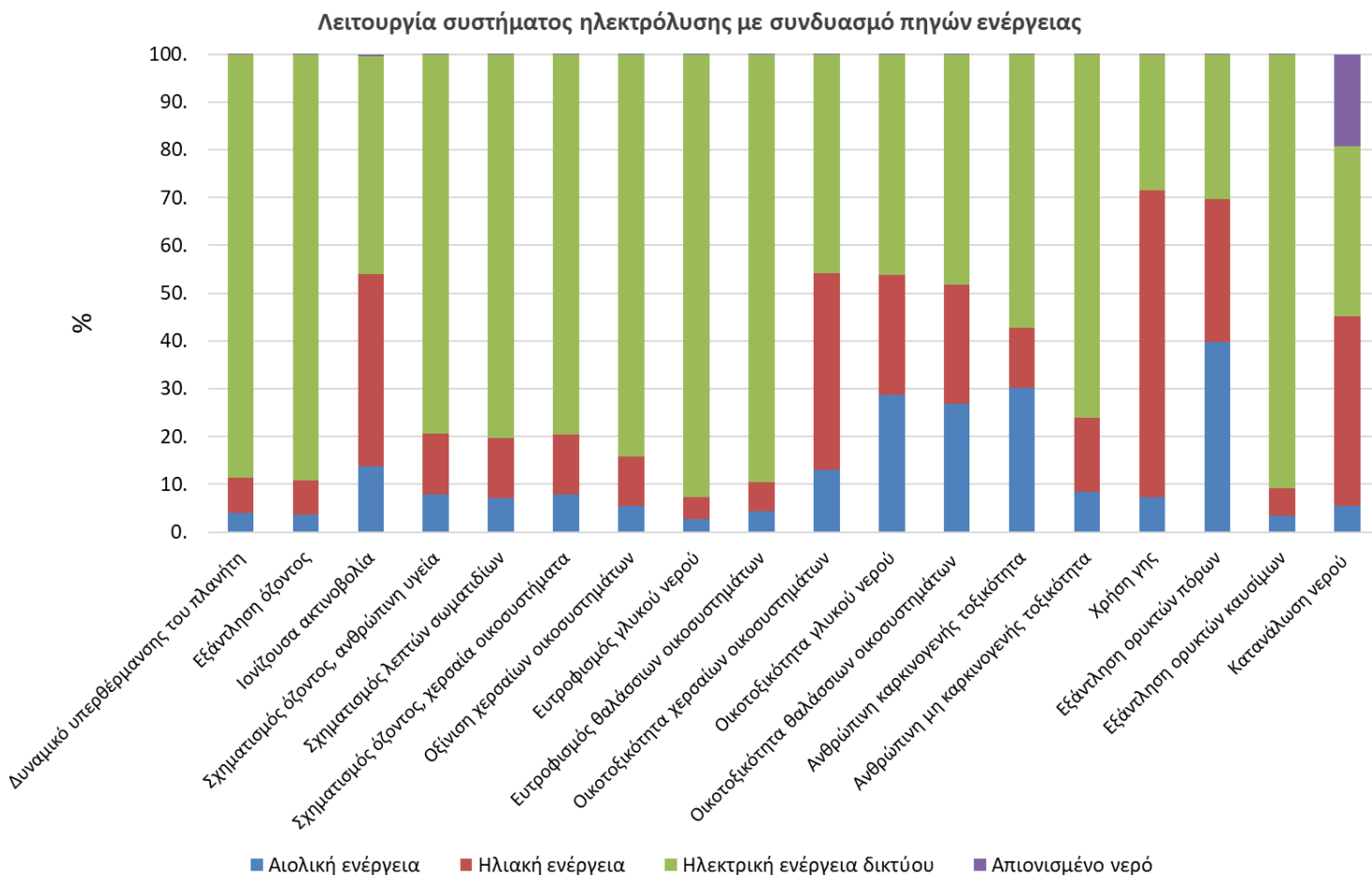
Το υδρογόνο ως ενεργειακός φορέας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει ανθρακικό αποτύπωμα 4.352 kg CO₂ eq/kg H₂, ενώ το αντίστοιχο αποτύπωμα της ηλεκτρικής ενέργειας από το ελληνικό δίκτυο ανέρχεται σε 8.747 kg CO₂ eq/kg H₂. Στον τομέα των μεταφορών το υδρογόνο ως καύσιμο έχει αντίκτυπο 7.060 kg CO₂ eq/kg H₂, ενώ το αντίστοιχο των πετρελαιοκίνητων οχημάτων φτάνει συνολικά τα 66.418 kg CO₂ eq/kg H₂. Οι επιπτώσεις του δείκτη υπερθέρμανσης του πλανήτη από το υδρογόνο στις μεταφορές είναι υψηλότερες συγκριτικά με την ηλεκτροπαραγωγή. Το γεγονός αυτό οφείλεται πρωτίστως στο κατασκευαστικό στάδιο των οχημάτων που περιλαμβάνει πιο σύνθετα και βαριά συστήματα. Παρ' όλα αυτά, η δυνητική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στον τομέα των μεταφορών είναι σημαντικά υψηλότερη, δεδομένου του ιδιαίτερα υψηλού ανθρακικού αποτυπώματος των οχημάτων πετρελαίου.

5.6 Αποτελέσματα εξεταζόμενων σεναρίων

5.6.1 Παραγωγή υδρογόνου με συνδυασμό πηγών ενέργειας

Στο πρώτο εναλλακτικό σενάριο παραγωγής, εξετάζεται η λειτουργία του συστήματος ηλεκτρόλυσης με τροφοδότηση από συνδυασμό πηγών ενέργειας και συγκεκριμένα από αιολική (χερσαίες ανεμογεννήτριες), ηλιακή (φωτοβολταϊκά συστήματα) και ηλεκτρική ενέργεια από το ελληνικό δίκτυο. Η συνολική ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου παραμένει σταθερή και ως εκ τούτου δεν μεταβάλλονται ούτε οι ποσότητες ούτε οι αναλογίες των υλικών ανά λειτουργική μονάδα, kg παραγόμενου υδρογόνου, που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των επιμέρους υποσυστημάτων. Συνεπώς, η επίδραση της φάσης κατασκευής στους περιβαλλοντικούς δείκτες δεν διαφοροποιείται σε σχέση με το βασικό σενάριο. Οι μεταβολές εντοπίζονται αποκλειστικά στη φάση λειτουργίας, λόγω της αλλαγής στο ενεργειακό μείγμα.

Στο παρακάτω γράφημα παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκύπτουν από τη φάση λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρόλυσης, λαμβάνοντας υπόψη τη συμβολή κάθε ενεργειακής πηγής.

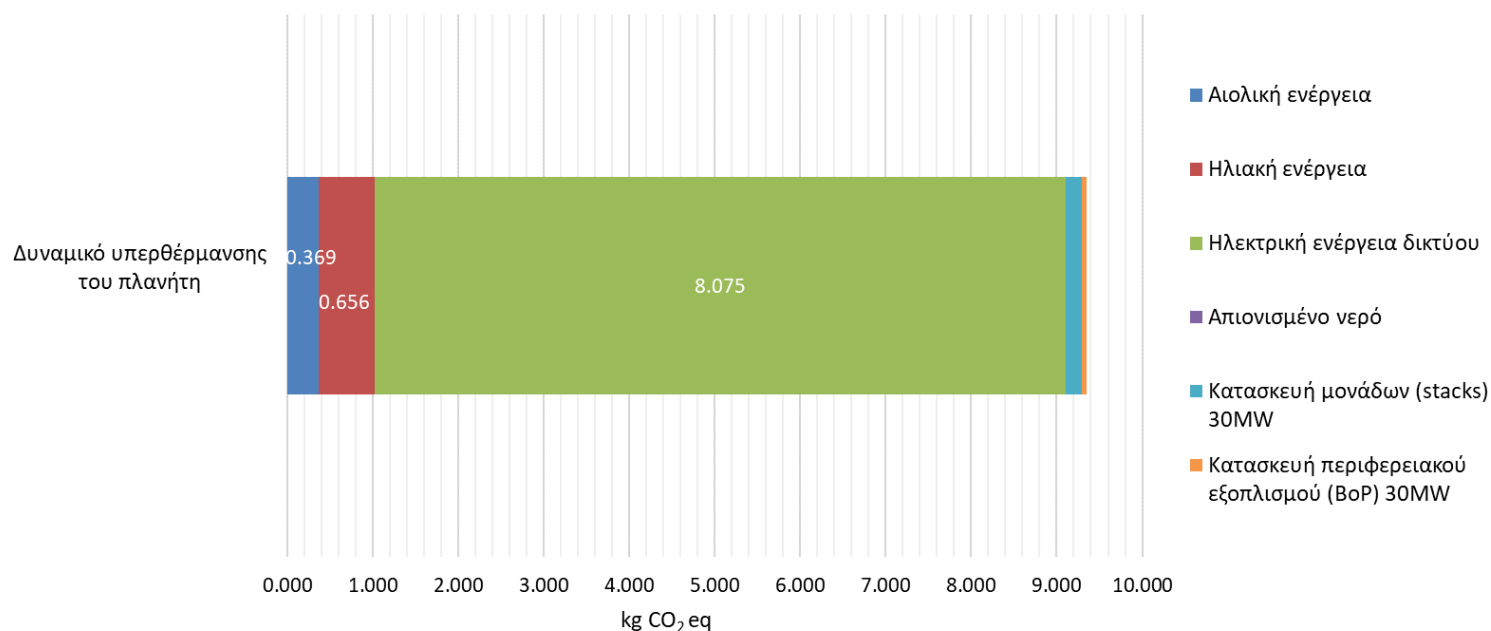


Γράφημα 5.6.1 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρόλυσης με συνδυασμό πηγών ενέργειας

Η ανάλυση αναδεικνύει τη συμμετοχή της ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου ως τον βασικό παράγοντα επιβάρυνσης στους περισσότερους περιβαλλοντικούς δείκτες, με ποσοστά που φτάνουν έως και το 90%, παρά το σχετικά χαμηλό μερίδιο της (32.2%) στην τελική κατανάλωση ενέργειας. Το γεγονός αυτό αποδίδεται στη χρήση συμβατικών καυσίμων, κυρίως λιγνίτη και πετρέλαιο, που εξακολουθούν να αποτελούν μέρος στο εγχώριο ενεργειακό μείγμα, προκαλώντας σημαντικές εκπομπές.

Σε ορισμένους δείκτες, όπως η ιονίζουσα ακτινοβολία, οι κατηγορίες οικοτοξικότητας, η χρήση γης, η εξάντληση ορυκτών πόρων και η κατανάλωση νερού, η επίδραση του δικτύου περιορίζεται και η συμβολή των ΑΠΕ αυξάνεται. Η ηλιακή ενέργεια έχει μεγαλύτερη περιβαλλοντική βαρύτητα από την αιολική, μολονότι αντιστοιχεί στο μικρότερο ποσοστό της καταναλισκόμενης ενέργειας (17.32%). Αυτό οφείλεται στο υψηλό περιβαλλοντικό κόστος της διεργασίας παρασκευής των φωτοβολταϊκών πάνελ, κυρίως λόγω των υλικών όπως το πυρίτιο, αλλά και στο χαμηλό συντελεστή απόδοσης τους, που απαιτεί μεγαλύτερη εγκατεστημένη ισχύ για ισοδύναμη ενεργειακή παραγωγή με τις ανεμογεννήτριες. Η επίδραση της ηλιακής ενέργειας είναι ιδιαίτερα έντονη στη χρήση γης, με το ποσοστό συνεισφοράς να αγγίζει το 64%, λόγω της μεγάλης εδαφικής έκτασης που χρειάζονται οι εγκαταστάσεις των φωτοβολταϊκών ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας σε σύγκριση με τα υπόλοιπα.

Στάδιο παραγωγής υδρογόνου με συνδυασμό πηγών ενέργειας



Γράφημα 5.6.2 Συμβολή του σταδίου παραγωγής υδρογόνου με συνδυασμό πηγών ενέργειας στην υπερθέρμανση του πλανήτη

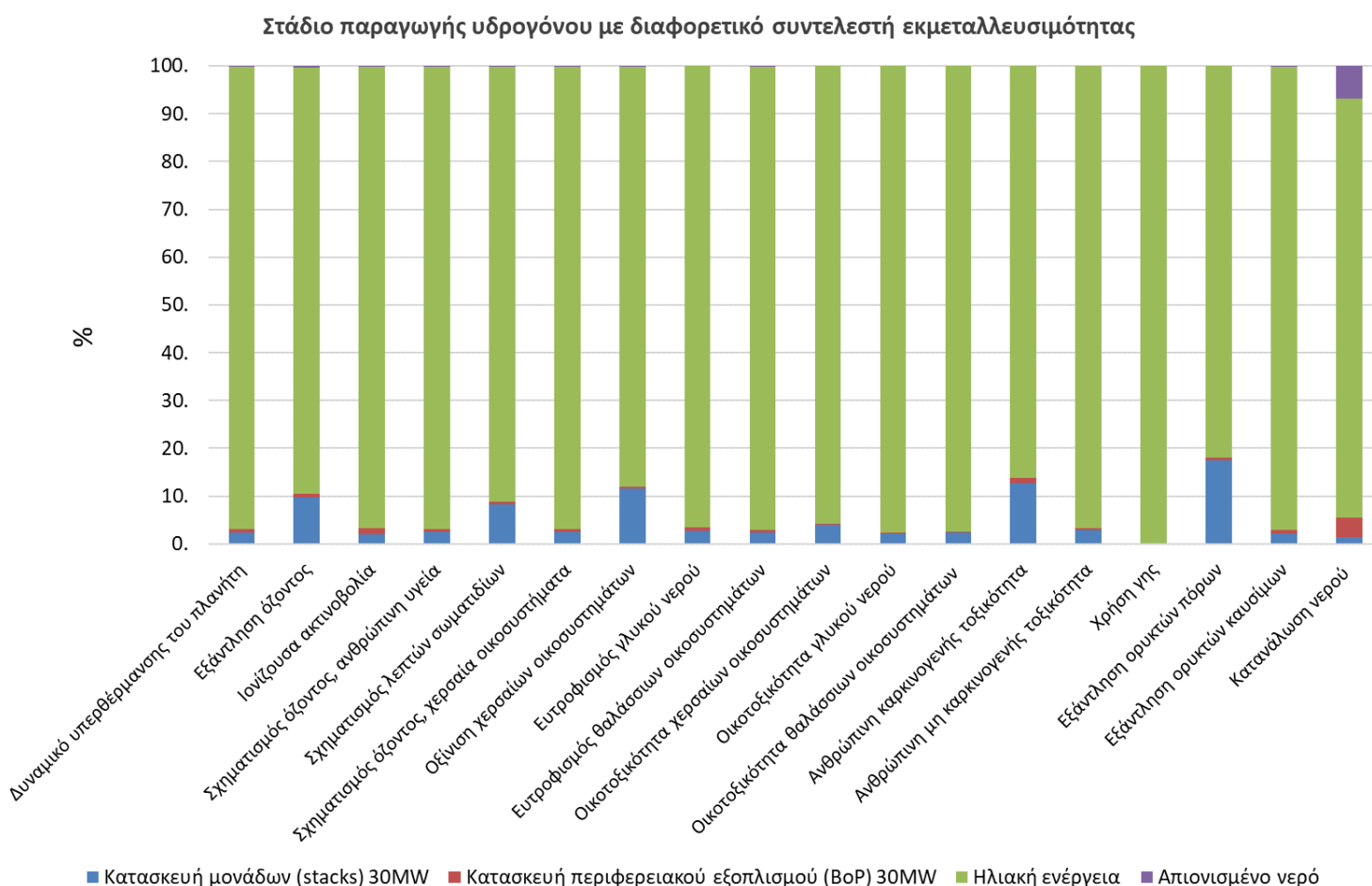
Όσον αφορά το δείκτη υπερθέρμανσης του πλανήτη, η συμβολή των φάσεων κατασκευής παραμένει σταθερή, όπως στο βασικό σενάριο, με 0.188 kg CO₂ eq/kg H₂ για τις μονάδες ηλεκτρόλυσης και 0.059 kg CO₂ eq/kg H₂ για τον περιφερειακό εξοπλισμό. Αντιθέτως, οι εκπομπές που σχετίζονται με τη λειτουργία εμφανίζουν αξιοσημείωτη αύξηση. Η ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου συμβάλλει κατά 8.075 kg CO₂ eq/kg H₂, ενώ η ηλιακή και αιολική ενέργεια συνεισφέρουν κατά 0.656 και 0.369 kg CO₂ eq/kg H₂, αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές περιλαμβάνουν και τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις που προκύπτουν από την κατασκευή των αντίστοιχων ενεργειακών εγκαταστάσεων.

Συνολικά, η φάση της λειτουργίας στο συγκεκριμένο σενάριο παρουσιάζει ανθρακικό αποτύπωμα 9.106 kg CO₂ eq/kg H₂, τιμή σημαντικά υψηλότερη από αυτή του βασικού σεναρίου, η οποία είναι 3.79 kg CO₂ eq ανά kg παραγόμενου υδρογόνου. Η διαφορά αυτή οφείλεται πρωτίστως στο αυξημένο ανθρακικό αντίκτυπο της ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου, το οποίο παρά τη σταδιακή διεύρυνση των ΑΠΕ, διατηρεί σημαντική εξάρτηση από ρυπογόνες πηγές. Επιπλέον, η χρήση του δικτύου συνεπάγεται υψηλή επιβάρυνση και στους υπόλοιπους περιβαλλοντικούς δείκτες σε σχέση με το βασικό σύστημα, ενισχύοντας τη συνολική περιβαλλοντική επίπτωση της φάσης λειτουργίας. Κατά συνέπεια, το παραγόμενο υδρογόνο σε αυτό το σενάριο δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ανανεώσιμο.

5.6.2 Μέγιστη παραγωγή υδρογόνου

Το δεύτερο εναλλακτικό σενάριο παραγωγής, αφορά τη λειτουργία του συστήματος σε καθεστώς μέγιστης παραγωγικής δυναμικότητας, με συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας 95%. Υπό αυτές τις συνθήκες, η ετήσια παραγωγή υδρογόνου ανέρχεται σε 4493 τόνους. Παρότι οι απόλυτες

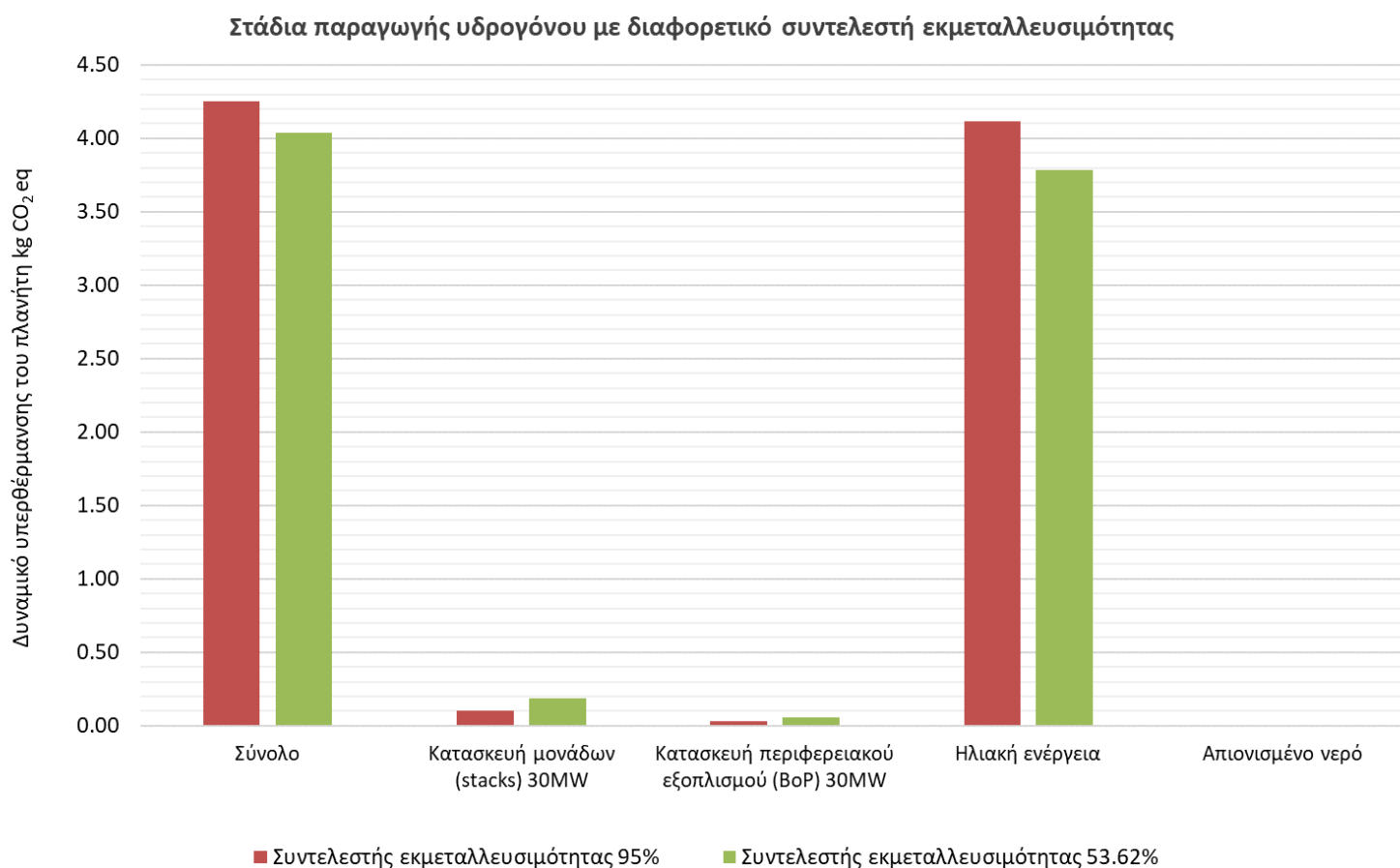
ποσότητες υλικών για την κατασκευή του συστήματος παραμένουν αμετάβλητες, η αυξημένη παραγωγή οδηγεί σε μείωση των αναλογιών τους ως προς τη λειτουργική μονάδα, 1kg παραγόμενου υδρογόνου. Η ίδια μεταβολή ισχύει και για την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία καλύπτεται αποκλειστικά από φωτοβολταϊκά συστήματα, σύμφωνα με τις ανάγκες λειτουργίας σε ονομαστικό φορτίο. Η περιβαλλοντική αποτίμηση του σταδίου παραγωγής, τόσο της φάσης κατασκευής όσο και της λειτουργίας, παρουσιάζει διαφοροποιήσεις σε σχέση με το βασικό σενάριο. Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται η κατανομή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων αυτού του σεναρίου.



Γράφημα 5.6.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις συνολικά για το σενάριο μέγιστης παραγωγής υδρογόνου

Μέσω της ανάλυσης αποδεικνύεται ότι το στάδιο λειτουργίας του αλκαλικού συστήματος ηλεκτρόλυσης αποτελεί τον κυριότερο συντελεστή επιβάρυνσης για όλους τους περιβαλλοντικούς δείκτες, με ποσοστά συμμετοχής που υπερβαίνουν το 85%. Παρά την αποκλειστική χρήση ανανεώσιμη ενέργειας, το περιβαλλοντικό αποτύπωμα παραμένει σημαντικά υψηλό, κυρίως λόγω των εκπομπών που αντιστοιχούν στην κατασκευή των φωτοβολταϊκών εγκαταστάσεων καθώς και της υπερδιαστασιολόγησής τους, προκειμένου να εξασφαλιστεί η συνεχής και επαρκής τροφοδοσία του ηλεκτρολύτη. Αντίθετα, η συμβολή των επιμέρους φάσεων κατασκευής του ηλεκτρολυτικού συστήματος και του περιφερειακού εξοπλισμού είναι σχεδόν αμελητέα. Τα

ευρήματα αυτά ευθυγραμμίζονται πλήρως με εκείνα του βασικού σεναρίου μελέτης, όπου εξίσου η φάση λειτουργίας αναδεικνύεται κυρίαρχη περιβαλλοντικά.



Γράφημα 5.6.4 Συγκριτική συμβολή των σεναρίων παραγωγής με διαφορετικό συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας στην υπερθέρμανση του πλανήτη

Όσον αφορά το δείκτη υπερθέρμανσης του πλανήτη, η συνολική επιβάρυνση του συγκεκριμένου σεναρίου ανέρχεται σε 4.251 kg CO₂ eq/kg H₂, ελαφρώς αυξημένη σε σύγκριση με τα 4.037 kg CO₂ eq/kg H₂ του βασικού σεναρίου. Η φάση λειτουργίας συμβάλλει με 4.118 kg CO₂ eq/kg H₂, ενώ η κατασκευή των μονάδων ηλεκτρόλυσης (stacks) και του περιφερειακού εξοπλισμού συνεισφέρουν με 0.101 και 0.032 kg CO₂ eq/kg H₂, αντίστοιχα.

Συγκριτικά, η λειτουργία του συστήματος με υψηλότερο συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας αποδίδει και υψηλότερο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Αξιοσημείωτο, ωστόσο, είναι το γεγονός ότι οι φάσεις κατασκευής παρουσιάζουν μειωμένη επιβάρυνση, σε σχέση με το βασικό σενάριο, λόγω της μικρότερης αναλογίας υλικών ανά kg παραγόμενου υδρογόνου. Επομένως, η αύξηση του ανθρακικού αποτυπώματα οφείλεται αποκλειστικά στην ενίσχυση της εγκατεστημένης ισχύς των φωτοβολταϊκών μονάδων για την κάλυψη των αυξημένων ενεργειακών απαιτήσεων. Αν και πρόκειται για καθαρή τεχνολογία, η κατασκευή των φωτοβολταϊκών μονάδων, ιδιαίτερα λόγω των κρίσιμων υλικών που χρησιμοποιούνται, ενέχει σημαντικό περιβαλλοντικό κόστος. Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι παρά την αυξημένη παραγωγικότητα, η επιλογή αυτή συνοδεύεται από υψηλότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση, ειδικά όσον αφορά το δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

6.1 Ανακεφαλαίωση – Συμπεράσματα

Στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) του υδρογόνου, με σκοπό την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος ως ενεργειακός φορέας, στο πλαίσιο του έργου TRIERES και της πρώτης Κοιλάδας Υδρογόνου στην Ελλάδα. Η ανάλυση βασίστηκε στη προσέγγιση «cradle – to – grave» και υλοποιήθηκε σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, τα οποία περιλαμβάνουν τον καθορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής, την κατάστρωση του καταλόγου απογραφής καθώς και την ερμηνεία των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για την εκπόνηση της μελέτης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό SimaPro και η μέθοδος ReCiPe 2016 Midpoint (H), η οποία επιτρέπει την ποσοτική εκτίμηση 18 περιβαλλοντικών κατηγοριών επιπτώσεων. Η ανάλυση κάλυψε όλα τα στάδια της αλυσίδας αξίας του υδρογόνου, από την παραγωγή έως την τελική χρήση, περιλαμβάνοντας και τα ενδιάμεσα στάδια αποθήκευσης και μεταφοράς, ενώ ως λειτουργική μονάδα ορίστηκε το 1kg παραγόμενου ή/και καταναλισκόμενου υδρογόνου.

Για το στάδιο της παραγωγής, επιλέχθηκε η τεχνολογία αλκαλικής ηλεκτρόλυσης του νερού, με χρήση ανανεώσιμη ενέργειας αποκλειστικά από φωτοβολταϊκά συστήματα. Η φάση κατασκευής του συστήματος διαχωρίστηκε σε δύο επιμέρους τμήματα, την κατασκευή των έξι μονάδων ηλεκτρόλυσης (stacks) και του περιφερειακού εξοπλισμού (Balance of Plant – BoP). Το στάδιο της αποθήκευσης και μεταφοράς προσεγγίστηκε ως μία ενιαία διαδικασία, λαμβάνοντας υπόψη ότι οι δεξαμενές μεταφοράς λειτουργούν ταυτόχρονα ως προσωρινό μέσο αποθήκευσης. Για τη μελέτη αυτού του σταδίου επιλέχθηκε η τεχνολογία συμπιεσμένου αερίου υδρογόνου και η μεταφορά θεωρήθηκε ότι πραγματοποιείται με χρήση πετρελαιοκίνητων φορτηγών.

Η τελική χρήση του υδρογόνου εξετάστηκε σε δύο εφαρμογές, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω κυψέλης καυσίμου τύπου PEM και στην αξιοποίηση ως καύσιμο σε επιβατικά οχήματα και αστικά λεωφορεία κυψέλης καυσίμου. Τα συνολικά αποτελέσματα της ανάλυσης κύκλου ζωής συγκρίθηκαν με τις αντίστοιχες επιπτώσεις των συμβατικών τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται σήμερα και δύναται να αντικαταστήσει το υδρογόνο. Ειδικότερα για την ηλεκτροπαραγωγή, θεωρήθηκε η τροφοδότηση ηλεκτρικής ενέργειας από το ελληνικό διασυνδεδεμένο δίκτυο, ενώ για τις μεταφορές λήφθηκαν υπόψη συμβατικά αυτοκίνητα και λεωφορεία πετρελαίου. Στόχος της συγκριτικής αξιολόγησης ήταν η διερεύνηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας του υδρογόνου ως εναλλακτική λύση. Επιπλέον, εξετάστηκαν δύο εναλλακτικά σενάρια παραγωγής υδρογόνου, τα οποία διαφοροποιήθηκαν ως προς το ενεργειακό μείγμα λειτουργίας καθώς και το δυναμικό παραγωγής, προκειμένου να αξιολογηθεί η ευαισθησία των αποτελεσμάτων στις μεταβολές των συνθηκών της παραγωγής και να ενισχυθεί η πληρότητα της ανάλυσης.

Με βάση τα αποτελέσματα της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και την αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του εξεταζόμενου συστήματος υδρογόνου, εξάγονται ορισμένα συμπεράσματα τα οποία αποτυπώνουν το αντικείμενο και το στόχο της παρούσας μελέτης, όπως αυτός έχει οριστεί. Στο στάδιο της παραγωγής, η ανάλυση αναδεικνύει ότι, από περιβαλλοντικής άποψης, το πλέον επιβαρυντικό τμήμα κατασκευής είναι οι μονάδες ηλεκτρόλυσης (stacks), σε αντίθεση με τον περιφερειακό εξοπλισμό, ο οποίος παρουσιάζει μικρότερη επίδραση. Το εξάρτημα με τη μεγαλύτερη συμβολή στο συνολικό αποτύπωμα είναι η διπολική πλάκα, λόγω της χρήσης πρώτων υλών όπως ο ανθρακούχος χάλυβας και το νικέλιο, που συνδέονται με υψηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συνολικά, η φάση λειτουργίας του συστήματος καθίσταται η κυριότερη πηγή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, παρά το γεγονός ότι η απαραίτητη ενέργεια προέρχεται αποκλειστικά από ανανεώσιμες πηγές.

Όσον αφορά το στάδιο της αποθήκευσης και μεταφοράς, διαπιστώνεται ότι η μεταφορά του υδρογόνου συμμετέχει με σημαντική συμβολή στο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Αντιθέτως, η συνεισφορά της κατασκευής των αποθηκευτικών δεξαμενών είναι μικρότερη, με το ανθρακόνημα ως βασικό δομικό τους υλικό να ξεχωρίζει για το περιβαλλοντικό του κόστος. Ιδιαίτερη σημασία παρουσιάζει η ενεργειακή κατανάλωση που απαιτείται για τη συμπίεση του υδρογόνου, καθώς και οι εκπομπές από τη καύση του πετρελαίου των μεταφορικών μέσων, οι οποίες επηρεάζονται άμεσα από τις αποστάσεις μεταφοράς.

Το περιβαλλοντικό αντίκτυπο της χρήσης του υδρογόνου σε εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αποδίδεται αποκλειστικά στη φάση κατασκευής της κυψέλης καυσίμου, δεδομένου ότι κατά τη λειτουργία της δεν παράγονται εκπομπές. Όπως και στην περίπτωση της ηλεκτρόλυσης, η κατασκευή της μονάδας (stack) της κυψέλης καυσίμου είναι υπεύθυνη για το μεγαλύτερο ποσοστό επιβάρυνσης, συγκριτικά με τον περιφερειακό εξοπλισμό (BoP), με την πλατίνα, απαραίτητο καταλυτικό υλικό για τα ηλεκτρόδια, να παρουσιάζει τη σημαντικότερη επίδραση, παρά την περιορισμένη ποσότητα της.

Αντίστοιχα, στον τομέα των μεταφορών η περιβαλλοντική επιβάρυνση προκύπτει εξ ολοκλήρου από την κατασκευή της απαραίτητης υποδομής του σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου και των οχημάτων κυψέλης καυσίμου. Η αξιοποίηση του υδρογόνου ως καύσιμο οδηγεί σε μηδενικές εκπομπές κατά τη φάση λειτουργίας, ενισχύοντας το θετικό περιβαλλοντικό του αποτύπωμα. Η κατασκευή των επιβατικών οχημάτων και λεωφορείων συνεισφέρει με σημαντικά ποσοστά στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, περισσότερο από την κατασκευή του σταθμού ανεφοδιασμού, γεγονός που αποδίδεται στην τεχνική πολυπλοκότητα και στις ποσότητες των απαιτούμενων υλικών. Η χρήση πλατίνας και ανθρακονημάτων αλλά και η αναλογία των ποσοτήτων τους ανά λειτουργική μονάδα, για τη σύνθεση των οχημάτων κυψέλης καυσίμου αποτελεί κρίσιμους παράγοντες επιβάρυνσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Σε επίπεδο ολιστικής αξιολόγησης του κύκλου ζωής του υδρογόνου, το στάδιο παραγωγής εμφανίζει σαφώς τη μεγαλύτερη επίδραση στο περιβάλλον, ιδιαίτερα στην εφαρμογή της ηλεκτροπαραγωγής, όπου η αντίστοιχη υποδομή δεν έχει σημαντική περιβαλλοντική συνεισφορά. Ωστόσο, η υιοθέτηση του υδρογόνου, σε σύγκριση με τις συμβατικές τεχνολογίες, αποφέρει

ουσιαστικά περιβαλλοντικά οφέλη, ιδίως στο δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη που σχετίζεται με το μείζον ζήτημα της κλιματικής αλλαγής. Παρόλα αυτά, η χρήση του υδρογόνου για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, επιδεινώνει ορισμένους δείκτες, σε σύγκριση με την υφιστάμενη δομή του δικτύου, το οποίο ενσωματώνει ήδη υψηλά ποσοστά ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα, επηρεάζοντας τις συνολικές επιπτώσεις και μειώνοντας το συγκριτικό όφελος. Αντιθέτως, στον τομέα των μεταφορών που βασίζεται σε ιδιαιτέρως ρυπογόνα καύσιμα, όπως το πετρέλαιο, η ενσωμάτωση του υδρογόνου προσφέρει ξεκάθαρη περιβαλλοντική υπεροχή σε όλους σχεδόν τους δείκτες.

Ακόμη, από την ανάλυση των εναλλακτικών σεναρίων παραγωγής αναδεικνύεται ότι η φάση λειτουργίας του ηλεκτρολύτη έχει καθοριστική επίδραση στο συνολικό αποτύπωμα. Η πηγή ενέργειας που τροφοδοτεί το σύστημα επηρεάζει δραστικά το αποτέλεσμα, με την ηλεκτρική ενέργεια του δικτύου να επιβαρύνει τους περιβαλλοντικούς δείκτες και ιδίως το ανθρακικό αποτύπωμα, πολύ περισσότερο από την αντίστοιχη συμβολή των φωτοβολταϊκών. Επιπλέον, καθίσταται σαφές ότι η αύξηση της ποσότητας του παραγόμενου υδρογόνου δεν συνεπάγεται απαραίτητα μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα ανά kg παραγόμενου υδρογόνου, καθώς η ενίσχυση της παραγωγής συνοδεύεται από αυξημένες ενεργειακές απαιτήσεις, οι οποίες μπορεί να εντείνουν το συνολικό αντίκτυπο.

Συνοψίζοντας τα παραπάνω προκύπτουν ορισμένα χρήσιμα συμπεράσματα :

- Το στάδιο λειτουργίας του συστήματος ηλεκτρόλυσης είναι περιβαλλοντικά η πιο επιβαρυντική φάση σε όλο τον κύκλο ζωής, συνεισφέροντας πάνω από 85% των συνολικών επιπτώσεων στους περισσότερους περιβαλλοντικούς δείκτες, ανεξαρτήτου συνθηκών παραγωγής. Αυτό οφείλεται στις υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις της διεργασίας, ακόμα και όταν καλύπτονται από ανανεώσιμες πηγές και επομένως αναδεικνύει τη σημασία βελτιστοποίησης της ενεργειακής απόδοσης αλλά και του σχεδιασμού του ενεργειακού μείγματος
- Η αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων, παρότι εντάσσεται στις βιώσιμες λύσεις, αυξάνει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της παραγωγής υδρογόνου, κυρίως λόγω των επιπτώσεων που σχετίζονται με την κατασκευή των φωτοβολταϊκών πάνελ και της ανάγκης για υπερδιαστασιολόγηση για την αντιμετώπιση της διαλείπουσας φύσης των ΑΠΕ.
- Η αποθήκευση και μεταφορά του υδρογόνου παρουσιάζει σχετικά χαμηλό περιβαλλοντικό κόστος, ιδιαίτερα όταν οι αποστάσεις μεταφοράς είναι μικρές. Αντίθετα, η συμπίεση του υδρογόνου αποτελεί ένα σημαντικό ενεργειακό φορτίο, επηρεάζοντας αρνητικά τους δείκτες, όπως το δυναμικό υπερθέρμανσης.
- Η τελική χρήση του υδρογόνου σε κυψέλες καυσίμου, είτε για ηλεκτροπαραγωγή, είτε για κίνηση οχημάτων, παρουσιάζει ενθαρρυντικά αποτελέσματα καθώς οδηγεί σε σημαντική μείωση των εκπομπών, συγκριτικά με τις συμβατικές τεχνολογίες. Το ανθρακικό αποτύπωμα μειώνεται κατά 50% στην ηλεκτροπαραγωγή και έως 89% στον τομέα των μεταφορών, ενισχύοντας τη θέση του υδρογόνου ως μέσο απανθρακοποίησης κρίσιμων τομέων.

- Η φάση κατασκευής των επιμέρους τμημάτων και υποδομών έχει περιορισμένο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε σχεδόν όλους τους δείκτες. Πάραυτα, επισημαίνεται ότι υλικά όπως η πλατίνα, το ανθρακόνημα, το νικέλιο και ο χάλυβας, παρουσιάζουν σημαντική βαρύτητα, αποτελώντας δυνητικούς στόχους βελτιστοποίησης στο μέλλον.
- Παρά τα πολλαπλά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα του υδρογόνου, ορισμένες κατηγορίες επιπτώσεων, όπως κατανάλωση νερού, χρήση γης και εξάντληση ορυκτών πόρων, ενδέχεται να επιδεινωθούν, ιδιαίτερα κατά την ανάπτυξη εφαρμογών μεγάλης κλίμακας.

Κλείνοντας, αν και το υδρογόνο δεν είναι μία τεχνολογία εγγενώς μηδενικών εκπομπών, έχει τη δυναμική να αποτελέσει ένα καθαρό και βιώσιμο ενεργειακό φορέα στο μέλλον, ιδιαίτερα όταν παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η επένδυση στο πράσινο υδρογόνο και η αντικατάσταση των συμβατικών τεχνολογιών σε ρυπογόνους τομείς με υψηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, όπως οι μεταφορές και η ηλεκτροπαραγωγή, που παρουσιάζουν μέχρι και σήμερα σημαντικά εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, προσφέρει μία περιβαλλοντικά τεκμηριωμένη και αποτελεσματική εναλλακτική λύση.

Τόσο οι δυνατότητες όσο και οι τεχνολογικές και περιβαλλοντικές προκλήσεις που συνοδεύουν την αξιοποίηση του υδρογόνου, υπογραμμίζουν την ανάγκη για μία ολιστική προσέγγιση στο σχεδιασμό της ενεργειακής μετάβασης. Η βελτιστοποίηση των κρίσιμων φάσεων του κύκλου ζωής, με έμφαση κυρίως στην παραγωγή του υδρογόνου, αποτελεί καθοριστικό παράγοντα για τη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.

Η ενσωμάτωση, λοιπόν, του υδρογόνου σε ορθά σχεδιασμένα και αποδοτικά ενεργειακά συστήματα μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας που έχουν τεθεί σε παγκόσμιο επίπεδο. Στο πλαίσιο αυτό, η Ελλάδα, αξιοποιώντας το υψηλό ηλιακό και αιολικό δυναμικό της, διαθέτει τις προϋποθέσεις να διαδραματίσει πρωταγωνιστικό ρόλο στην ανάπτυξη πράσινων αλυσίδων υδρογόνου με ανταγωνιστικό περιβαλλοντικό προφίλ, θέτοντας τα θεμέλια για ένα καθαρότερο και ενεργειακά ασφαλές μέλλον.

6.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα ανάλυση ανέδειξε κρίσιμα σημεία του κύκλου ζωής του υδρογόνου που χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης, ενώ προέκυψαν ορισμένες κατευθύνσεις που παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για μελλοντική έρευνα. Ενδεικτικά, προτείνονται τα ακόλουθα :

- Εκπόνηση της ανάλυσης με βάση εξειδικευμένα πρωτογενή δεδομένα κατασκευής για τα επιμέρους υποσυστήματα, με στόχο την ακριβέστερη αποτύπωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
- Ανάλυση κύκλου ζωής λαμβάνοντας υπόψη το ρυθμό υποβάθμισης του συστήματος ηλεκτρόλυσης, προκειμένου να αποτυπωθούν πιο ρεαλιστικά οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις σε βάθος χρόνου. Η σταδιακή μείωση της απόδοσης του ηλεκτρολύτη

και η ανάγκη συντήρησης ενδέχεται να επηρεάζουν το συνολικό αποτύπωμα. Λόγω αυτού, τα αποτελέσματα στην παρούσα ανάλυση ίσως υποεκτιμούν το πραγματικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε ρεαλιστικές συνθήκες.

- Βελτιστοποίηση της φάσης λειτουργίας της παραγωγής υδρογόνου, η οποία αναδείχθηκε ως η πιο επιβαρυντική, με έμφαση στην προέλευση και την απόδοση των ενεργειακών συστημάτων τροφοδοσίας.
- Διεύρυνση των ορίων του συστήματος, με την ενσωμάτωση του σταδίου τέλους ζωής (end – of – life), ώστε να εξεταστεί η δυνατότητα ανακύκλωσης και ανάκτησης πολύτιμων υλικών από τον επιμέρους εξοπλισμό αλλά και η συνεισφορά της κυκλικής οικονομίας στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος.
- Ανάλυση της δυνατότητας αξιοποίησης του παραγόμενου νερού από τις κυψέλες καυσίμου, προκειμένου να αξιολογηθεί μία πιθανή μείωση στον αντίστοιχο περιβαλλοντικό δείκτη, κατανάλωσης νερού.
- Ανάλυση της δυνατότητας ανάκτησης και αξιοποίησης της απορριπτόμενης θερμότητας κατά την ηλεκτρόλυση μέσω του οργανικού κύκλου Rankine (Organic Rankine Cycle – ORC), με στόχο τη ψύξη του συστήματος ηλεκτρόλυσης αλλά και την ταυτόχρονη παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας για την κάλυψη μέρους των ηλεκτρικών απαιτήσεων του περιφερειακού εξοπλισμού. Η προσέγγιση αυτή ενδέχεται να μειώσει το περιβαλλοντικό αποτύπωμα, καθώς μειώνεται η κατανάλωση ενέργειας και βελτιώνεται ο βαθμός απόδοσης της ηλεκτρόλυσης.
- Διερεύνηση της χρήσης ανακυκλώσιμων ή χαμηλού αποτυπώματος υλικών σε βασικά κρίσιμα τμήματα του εξοπλισμού, για τη μείωση της επιβάρυνσης σε σημαντικές περιβαλλοντικές κατηγορίες, όπως η ανθρώπινη τοξικότητα.
- Επέκταση της ανάλυσης σε επίπεδο κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων (Social LCA, Life Cycle Costing), προκειμένου να εξεταστεί η συνολική βιωσιμότητα της τεχνολογίας, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντας όπως το κόστος, η κοινωνική αποδοχή, η δημιουργία θέσεων εργασίας και η ισότητα.
- Συγκριτική αξιολόγηση εναλλακτικών τεχνολογιών ηλεκτρόλυσης, όπως μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) και στερεού οξειδίου (SOEC), με σκοπό την εκτίμηση των περιβαλλοντικών και ενεργειακών διαφορών μεταξύ των τεχνολογιών.
- Διεύρυνση της εφαρμογής του υδρογόνου και σε άλλους τομείς με υψηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, όπως η ναυτιλία, ώστε να αξιολογηθεί η περιβαλλοντική αποτελεσματικότητα πιθανών σεναρίων υποκατάστασης.

Βιβλιογραφία

1. **Olabi, A.G. and Abdelkareem, M.A.** Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, 158.
2. **Ritchie, Hannah.** Our World in Data. *How have the world's energy sources changed over the last two centuries?* [Online] [Cited: 4 12, 2025.] <https://ourworldindata.org/global-energy-200-years>.
3. **Filonchyk, M., et al.** Greenhouse gases emissions and global climate change: Examining the influence of CO₂, CH₄, and N₂O. *Science of the Total Environment*. 2024, 935.
4. **Keshani, A., et al.** Renewable energy as a solution to climate change : Insights from a comprehensive study across nations. *PLOS One*. 2024, 19.
5. **Science NASA - Climate Change.** *Carbon Dioxide*. [Online] [Cited: 4 12, 2025.] <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?intent=121>.
6. **Gabric, A. J.** The Climate Change Crisis: A Review of Its Causes and Possible Responses. *Atmosphere*. 2023, 14.
7. **Rawat, A., Kumar, D. and Khati, B. S.** A review on climate change impacts, models, and its consequences on different sectors: a systematic approach. *Journal of Water & Climate Change*. 2024, 15.
8. **United Nations Climate Change.** *The Paris Agreement*. [Online] [Cited: 4 12, 2025.] <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement>.
9. **European Council.** *Paris Agreement on climate change*. [Online] [Cited: 4 12, 2025.] <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/paris-agreement-climate/>.
10. —. *European Green Deal*. [Online] [Cited: 4 12, 2025.] <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/european-green-deal/>.
11. —. *Fit for 55*. [Online] [Cited: 4 12, 2025.] <https://www.consilium.europa.eu/en/policies/fit-for-55/>.
12. **Olabi, A.G., et al.** Renewable energy systems: Comparisons, challenges and barriers, sustainability indicators, and the contribution to UN sustainable development goals. *International Journal of Thermofluids*. 2023, 20.
13. **European Commission.** *Renewable energy targets*. [Online] [Cited: 4 15, 2025.] https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive-targets-and-rules/renewable-energy-targets_en.
14. **Eurostat.** *Electricity from renewable sources reaches 47% in 2024*. [Online] 3 2025. [Cited: 4 15, 2025.] <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250319-1>.
15. —. *2023: record-breaking increase in renewable electricity*. [Online] 2 2025. [Cited: 4 15, 2025.] <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250221-3>.
16. **AAMHE.** [Online] 01 30, 2024. [Cited: 4 15, 2025.] <https://www.admie.gr/kentro-typoy/deltia-typoy/hronia-rekor-2023-gia-tin-kathari-energeia-stin-ellada>.
17. **Jafari, M., Botterud, A. and Sakti, A.** Decarbonizing power systems: A critical review of the role of energy storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, 158.
18. **University of Michigan.** *U.S. Grid Energy Storage Factsheet*. [Online] 2024. [Cited: 5 1, 2025.] <https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/us-grid-energy-storage-factsheet#references>.

19. **Schischke, E., et al.** Overview of Energy Storage Technologies Besides Batteries. *Emerging Battery Technologies to Boost the Clean Energy Transition*. s.l. : Springer, 2024.
20. **ITK Engineering.** *The hydrogen ecosystem*. [Online] [Cited: 5 20, 2025.] <https://www.itk-engineering.de/en/story/hydrogen-ecosystem/>.
21. **European Commission.** *A Hydrogen Strategy for a climate neutral Europe*. [Online] 7 8, 2020. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_20_1296.
22. **Dawood, F., Anda, M. and Shafiullah, G.M.** Hydrogen production for energy: An overview. *international journal of hydrogen energy*. 2020, 45.
23. **Mazloomi, K. and Gomes, C.** Hydrogen as an energy carrier : Prospects and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, 16.
24. **Cheng, W. and Lee, S.** How Green Are the National Hydrogen Strategies? *Sustainability*. 2022, 14.
25. **Ajanovic, A., Sayer, M. and Haas, R.** The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International journal of hydrogen energy*. 2022, 47.
26. **Valverde, J.I., et al.** “Colors” of hydrogen: Definitions and carbon intensity. *Energy conversion and management* . 2023, 291.
27. **Sadeq, A.M., et al.** Hydrogen energy systems : Technologies, trends, and future prospects. *Science of the Total Environment*. 2024, 939.
28. **El Shafie, M.** Hydrogen production by water electrolysis technologies : A review. *Results ing Engineering*. 2023, 20.
29. **Krishnan, S., et al.** Prospective LCA of alkaline and PEM electrolyser systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2024, 55.
30. **Yue, M., et al.** Hydrogen energy systems : A critical review of the technologies, applications, trends and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021, 146.
31. **Le, T.T., et al.** Fueling the future: A comprehensive review of hydrogen energy systems and their challenges. *International journal of hydrogen energy*. 2024, 54.
32. **Elberry, A.M., et al.** Large-scale compressed hydrogen storage as part of renewable electricity storage systems. *International journal of hydrogen energy*. 2021, 46.
33. **Gomez, J.A. and Santos, D.M.F.** The status of on-board hydrogen storage in fuel cell electric vehicles. *Designs*. 2023, 7.
34. **Reddi, K., et al.** Techno-economic analysis of conventional and advanced high-pressure tube trailer configurations for compressed hydrogen gas transportation and refueling. *International journal of hydrogen energy*. 2018, 43.
35. **Stropnik, R., et al.** Critical materials in PEMFC systems and a LCA analysis for the potential reduction of environmental impacts with EoL strategies. *Energy Science and Engineering*. 2019, 7.
36. **Lozanovski, A., et al.** Sustainability Assessment of Fuel Cell Buses in Public Transport. *Sustainability*. 2018, 10.
37. **Bjorn, A., et al.** LCA History. *Life Cycle Assessment Theory and Practice*. s.l. : Springer, 2018.
38. **Hauschild, M.Z.** Chapter 6 Introduction to LCA Methodology. *Life Cycle Assessment Theory and Practise*. s.l. : Springer, 2018.
39. **PRe, et al.** *Introduction to LCA with SimaPro*. s.l. : PRe sustainability, 2016.

40. **Bjorn, A., et al.** Chapter 8 Scope Definition. *Life Cycle Assessment Theory and Practise*. s.l. : Springer, 2018.
41. **Bjorn, A., et al.** Chapter 9 Life Cycle Inventory Analysis. *Life Cycle Assessment Theory and Practise*. s.l. : Springer, 2018.
42. **Rosenbaum, R., et al.** Chapter 10 Life Cycle Impact Assessment. *Life Cycle Assessment Theory and Practise*. s.l. : Springer, 2018.
43. **Pre Sustainability.** *SimaPro Database Manual Methods Library*. 2020.
44. **Huibregts, M.A.J., et al.** ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 2017, 22.
45. **Hauschild, M.Z., Bonou, A. and Olsen, S.I.** Chapter 12 Life Cycle Interpretation. *Life Cycle Assessment Theory and Practise*. s.l. : Springer, 2018.
46. **TRIERES.** *The Greek Hydrogen Valley*. [Online] [Cited: 5 19, 2025.] <https://trieres-h2.eu/>.
47. **Wulf, C., et al.** Life Cycle Assessment of hydrogen transport and distribution options. *Journal of Cleaner Production*. 2018, 199.
48. **Clean Hydrogen Partnership.** *Clean Hydrogen JU - SRIA Key Performance Indicators (KPIs)*. [Online] [Cited: 5 19, 2025.] https://www.clean-hydrogen.europa.eu/knowledge-management/strategy-map-and-key-performance-indicators/clean-hydrogen-ju-sria-key-performance-indicators-kpis_en.
49. **Διαχειριστής ΑΠΕ & Εγγυήσεων Προέλευσης (ΔΑΠΕΕΠ).** *Ενεργειακό Μείγμα 2023*. 2024.
50. **Shet, H.N. and Moholkar, V.S.** Comparative life cycle analysis of hydrogen fuel cell electric vehicles and battery electric vehicles: An Indian perspective. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2025, 103.
51. **Gazda, M., Grzywacz, P. and Burmistrz, P.** Environmental Benefits of Hydrogen-Powered Buses: A Case Study of Coke Oven Gas. *Energies*. 2024, 17.
52. **Sadeghi, S., Ghandeharium, S. and Rosen, M.A.** Comparative economic and life cycle assessment of solar-based hydrogen production for oil and gas industries. *Energy*. 2020, 208.
53. **Bhandari, R., Trudewind, C.A. and Zapp, P.** Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis - a review. *Journal of Cleaner Production*. 2014, 85.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Α.1 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων σταδίου παραγωγής

Περιβαλλοντικός δείκτης	Μονάδα	Σύνολο	Κατασκευή μονάδων (stacks) 30MW	Κατασκευή περιφερειακού εξοπλισμού (BoP) 30MW	Ηλιακή ενέργεια	Απιονισμένο νερό
Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη	kg CO ₂ eq	4.04E+00	1.88E-01	5.93E-02	3.79E+00	4.99E-03
Εξάντληση όζοντος	kg CFC ₁₁ eq	1.71E-06	3.06E-07	2.37E-08	1.38E-06	4.58E-09
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Cobalt-60 eq	2.74E-01	1.05E-02	7.19E-03	2.56E-01	4.47E-04
Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία	kg NO _x eq	1.08E-02	5.50E-04	1.18E-04	1.01E-02	1.05E-05
Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων	kg PM _{2.5} eq	9.30E-03	1.42E-03	9.50E-05	7.77E-03	1.41E-05
Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	kg NO _x eq	1.14E-02	5.81E-04	1.23E-04	1.07E-02	1.08E-05
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	2.08E-02	4.35E-03	1.61E-04	1.63E-02	3.77E-05
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	2.18E-03	1.13E-04	3.81E-05	2.03E-03	1.87E-06
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg N eq	1.95E-04	8.78E-06	2.62E-06	1.83E-04	1.78E-07
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	kg 1.4-DCB	1.00E+02	7.90E+00	2.16E-01	9.21E+01	3.38E-02
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1.4-DCB	8.37E-01	3.68E-02	2.56E-03	7.97E-01	3.31E-04
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg 1.4-DCB	1.10E+00	5.10E-02	3.51E-03	1.05E+00	4.40E-04
Ανθρώπινη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1.4-DCB	8.45E-01	1.91E-01	1.59E-02	6.38E-01	5.32E-04
Ανθρώπινη μη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1.4-DCB	1.01E+01	5.80E-01	6.02E-02	9.41E+00	7.15E-03
Χρήση γης	m ² a crop eq	1.34E+00	4.44E-03	1.44E-03	1.33E+00	1.12E-04
Εξάντληση ορυκτών πόρων	kg Cu eq	7.09E-02	2.12E-02	7.27E-04	4.90E-02	3.52E-05
Εξάντληση ορυκτών καυσίμων	kg Oil eq	1.00E+00	4.34E-02	1.48E-02	9.45E-01	1.19E-03
Κατανάλωση νερού	m ³	1.54E-01	4.11E-03	1.20E-02	1.27E-01	1.07E-02

Πίνακας Α.2 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων σταδίου αποθήκευσης – μεταφοράς

Περιβαλλοντικός δείκτης	Μονάδα	Σύνολο	Κατασκευή δεξαμενών μεταφοράς (tube trailer)	Μεταφορά για χρήση στην ηλεκτροπαραγωγή	Μεταφορά για χρήση στις μεταφορές
Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη	kg CO ₂ eq	4.70E-01	7.34E-02	2.05E-01	1.91E-01
Εξάντληση όζοντος	kg CFC ₁₁ eq	1.64E-07	1.83E-08	7.58E-08	6.96E-08
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Cobalt-60 eq	3.07E-02	4.68E-03	1.31E-02	1.29E-02
Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία	kg NO _x eq	1.20E-03	1.62E-04	5.31E-04	5.09E-04
Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων	kg PM _{2.5} eq	9.31E-04	1.37E-04	4.02E-04	3.92E-04
Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	kg NO _x eq	1.27E-03	1.66E-04	5.63E-04	5.38E-04
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	1.94E-03	2.82E-04	8.40E-04	8.21E-04
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	2.31E-04	2.56E-05	1.03E-04	1.02E-04
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg N eq	2.08E-05	1.90E-06	9.63E-06	9.26E-06
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	kg 1,4-DCB	9.69E+00	1.67E-01	4.87E+00	4.65E+00
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	8.36E-02	2.87E-03	4.05E-02	4.02E-02
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg 1,4-DCB	1.10E-01	3.77E-03	5.34E-02	5.29E-02
Ανθρώπινη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1,4-DCB	6.91E-02	4.01E-03	3.29E-02	3.22E-02
Ανθρώπινη μη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1,4-DCB	1.02E+00	5.65E-02	4.85E-01	4.75E-01
Χρήση γης	m ² a crop eq	1.37E-01	1.95E-03	6.78E-02	6.72E-02
Εξάντληση ορυκτών πόρων	kg Cu eq	5.15E-03	1.73E-04	2.51E-03	2.47E-03
Εξάντληση ορυκτών καυσίμων	kg Oil eq	1.18E-01	1.81E-02	5.21E-02	4.78E-02
Κατανάλωση νερού	m ³	1.33E-02	4.39E-04	6.43E-03	6.40E-03

Πίνακας Α.3 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων σταδίων τελικής χρήσης

Περιβαλλοντικός δείκτης	Μονάδα	Κατασκευή μονάδας PEMFC	Κατασκευή περιφερειακού εξοπλισμού PEMFC	Κατασκευή σταθμού ανεφοδιασμού υδρογόνου	Κατασκευή οχημάτων κυψέλης καυσίμου	Κατασκευή λεωφορείων κυψέλης καυσίμου
Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη	kg CO ₂ eq	2.58E-02	1.03E-02	4.75E-02	1.51E+00	1.20E+00
Εξάντληση όζοντος	kg CFC ₁₁ eq	1.52E-07	2.59E-09	1.07E-08	1.52E-06	4.44E-07
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Cobalt-60 eq	8.02E-04	5.01E-04	1.71E-03	7.38E-02	6.50E-02
Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία	kg NO _x eq	2.74E-04	2.68E-05	1.33E-04	9.30E-03	3.52E-03
Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων	kg PM _{2.5} eq	2.80E-04	2.23E-05	9.81E-05	9.05E-03	3.22E-03
Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	kg NO _x eq	2.81E-04	2.78E-05	1.40E-04	9.54E-03	3.63E-03
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	9.62E-04	4.03E-05	1.50E-04	2.87E-02	7.98E-03
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	2.47E-05	5.15E-06	2.43E-05	1.01E-03	5.32E-04
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg N eq	9.61E-07	4.42E-07	1.59E-06	5.07E-05	3.42E-05
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	kg 1,4-DCB	7.04E-02	1.16E-01	5.16E-01	3.44E+00	4.21E+00
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	1.00E-02	1.51E-03	7.29E-03	3.41E-01	1.43E-01
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg 1,4-DCB	1.28E-02	2.20E-03	9.74E-03	4.32E-01	1.81E-01
Ανθρώπινη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1,4-DCB	3.53E-03	6.40E-03	4.92E-02	1.72E-01	1.70E-01
Ανθρώπινη μη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1,4-DCB	4.02E-01	2.63E-02	9.39E-02	1.15E+01	2.67E+00
Χρήση γης	m ² a crop eq	6.02E-04	2.40E-04	1.55E-03	4.04E-02	3.10E-02
Εξάντληση ορυκτών πόρων	kg Cu eq	2.67E-03	3.52E-04	2.29E-03	6.90E-02	2.05E-02
Εξάντληση ορυκτών καυσίμων	kg Oil eq	7.08E-03	3.05E-03	1.03E-02	4.10E-01	3.01E-01
Κατανάλωση νερού	m ³	1.38E-04	5.92E-05	8.07E-04	8.24E-03	7.46E-03

Πίνακας Α.4 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων συμβατικής ενέργειας/καυσίμου

Περιβαλλοντικός δείκτης	Μονάδα	Ηλεκτρική ενέργεια από δίκτυο Ελλάδας	Επιβατικό όχημα πετρελαίου	Αστικό λεωφορείο πετρελαίου
Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη	kg CO ₂ eq	8.75E+00	3.92E+01	2.72E+01
Εξάντληση όζοντος	kg CFC ₁₁ eq	3.15E-06	9.93E-06	5.96E-06
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Cobalt-60 eq	5.43E-02	7.23E-01	3.31E-01
Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία	kg NO _x eq	1.18E-02	1.36E-01	2.22E-01
Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων	kg PM _{2.5} eq	9.33E-03	4.33E-02	4.19E-02
Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	kg NO _x eq	1.28E-02	1.44E-01	2.28E-01
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	2.46E-02	1.04E-01	1.04E-01
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	7.63E-03	7.26E-03	2.17E-03
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg N eq	5.01E-04	1.21E-03	6.59E-04
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	kg 1.4-DCB	1.93E+01	2.17E+02	5.87E+01
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1.4-DCB	2.77E-01	3.47E+00	4.39E-01
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg 1.4-DCB	3.82E-01	4.45E+00	5.98E-01
Ανθρώπινη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1.4-DCB	5.44E-01	3.62E+00	9.76E-01
Ανθρώπινη μη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1.4-DCB	8.69E+00	3.82E+01	7.70E+00
Χρήση γης	m ² a crop eq	1.11E-01	1.02E+00	1.02E+00
Εξάντληση ορυκτών πόρων	kg Cu eq	9.26E-03	2.32E-01	4.67E-02
Εξάντληση ορυκτών καυσίμων	kg Oil eq	2.79E+00	1.17E+01	8.49E+00
Κατανάλωση νερού	m ³	2.15E-02	1.16E-01	4.22E-02

Πίνακας Α.5 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων 1ου εναλλακτικού σεναρίου παραγωγής

Περιβαλλοντικός δείκτης	Μονάδα	Σύνολο	Αιολική ενέργεια	Ηλιακή ενέργεια	Ηλεκτρική ενέργεια δικτύου	Απιονισμένο νερό
Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη	kg CO ₂ eq	9.11E+00	3.69E-01	6.56E-01	8.08E+00	4.99E-03
Εξάντληση όζοντος	kg CFC ₁₁ eq	3.26E-06	1.15E-07	2.39E-07	2.91E-06	4.58E-09
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Cobalt-60 eq	1.10E-01	1.51E-02	4.44E-02	5.02E-02	4.47E-04
Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία	kg NO _x eq	1.38E-02	1.09E-03	1.75E-03	1.09E-02	1.05E-05
Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων	kg PM _{2.5} eq	1.07E-02	7.58E-04	1.35E-03	8.61E-03	1.41E-05
Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	kg NO _x eq	1.48E-02	1.16E-03	1.85E-03	1.18E-02	1.08E-05
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	2.70E-02	1.45E-03	2.82E-03	2.27E-02	3.77E-05
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	7.60E-03	2.03E-04	3.51E-04	7.04E-03	1.87E-06
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg N eq	5.17E-04	2.25E-05	3.18E-05	4.62E-04	1.78E-07
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	kg 1,4-DCB	3.89E+01	5.09E+00	1.60E+01	1.78E+01	3.38E-02
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1,4-DCB	5.53E-01	1.59E-01	1.38E-01	2.55E-01	3.31E-04
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg 1,4-DCB	7.32E-01	1.97E-01	1.82E-01	3.53E-01	4.40E-04
Ανθρώπινη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1,4-DCB	8.78E-01	2.65E-01	1.11E-01	5.02E-01	5.32E-04
Ανθρώπινη μη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1,4-DCB	1.05E+01	8.77E-01	1.63E+00	8.02E+00	7.15E-03
Χρήση γης	m ² a crop eq	3.60E-01	2.61E-02	2.31E-01	1.02E-01	1.12E-04
Εξάντληση ορυκτών πόρων	kg Cu eq	2.83E-02	1.13E-02	8.49E-03	8.55E-03	3.52E-05
Εξάντληση ορυκτών καυσίμων	kg Oil eq	2.84E+00	9.82E-02	1.64E-01	2.58E+00	1.19E-03
Κατανάλωση νερού	m ³	5.56E-02	3.05E-03	2.20E-02	1.98E-02	1.07E-02

Πίνακας Α.6 Αποτελέσματα εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων 2ου εναλλακτικού σεναρίου παραγωγής

Περιβαλλοντικός δείκτης	Μονάδα	Σύνολο	Κατασκευή μονάδων (stacks) 30MW	Κατασκευή περιφερειακού εξοπλισμού (BoP) 30MW	Ηλιακή ενέργεια	Απιονισμένο νερό
Δυναμικό υπερθέρμανσης του πλανήτη	kg CO ₂ eq	4.25E+00	1.01E-01	3.18E-02	4.11E+00	4.99E-03
Εξάντληση όζοντος	kg CFC ₁₁ eq	1.68E-06	1.65E-07	1.27E-08	1.50E-06	4.58E-09
Ιονίζουσα ακτινοβολία	kBq Cobalt-60 eq	2.88E-01	5.64E-03	3.85E-03	2.78E-01	4.47E-04
Σχηματισμός όζοντος, ανθρώπινη υγεία	kg NO _x eq	1.13E-02	2.95E-04	6.35E-05	1.10E-02	1.05E-05
Σχηματισμός λεπτών σωματιδίων	kg PM _{2.5} eq	9.27E-03	7.62E-04	5.09E-05	8.44E-03	1.41E-05
Σχηματισμός όζοντος, χερσαία οικοσυστήματα	kg NO _x eq	1.20E-02	3.12E-04	6.59E-05	1.16E-02	1.08E-05
Οξίνιση χερσαίων οικοσυστημάτων	kg SO ₂ eq	2.02E-02	2.34E-03	8.63E-05	1.77E-02	3.77E-05
Ευτροφισμός γλυκού νερού	kg P eq	2.28E-03	6.08E-05	2.04E-05	2.20E-03	1.87E-06
Ευτροφισμός θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg N eq	2.06E-04	4.72E-06	1.40E-06	1.99E-04	1.78E-07
Οικοτοξικότητα χερσαίων οικοσυστημάτων	kg 1.4-DCB	1.05E+02	4.24E+00	1.16E-01	1.00E+02	3.38E-02
Οικοτοξικότητα γλυκού νερού	kg 1.4-DCB	8.88E-01	1.98E-02	1.37E-03	8.66E-01	3.31E-04
Οικοτοξικότητα θαλάσσιων οικοσυστημάτων	kg 1.4-DCB	1.17E+00	2.74E-02	1.88E-03	1.14E+00	4.40E-04
Ανθρώπινη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1.4-DCB	8.05E-01	1.02E-01	8.53E-03	6.93E-01	5.32E-04
Ανθρώπινη μη καρκινογενής τοξικότητα	kg 1.4-DCB	1.06E+01	3.12E-01	3.23E-02	1.02E+01	7.15E-03
Χρήση γης	m ² a crop eq	1.45E+00	2.38E-03	7.74E-04	1.45E+00	1.12E-04
Εξάντληση ορυκτών πόρων	kg Cu eq	6.50E-02	1.14E-02	3.90E-04	5.32E-02	3.52E-05
Εξάντληση ορυκτών καυσίμων	kg Oil eq	1.06E+00	2.33E-02	7.91E-03	1.03E+00	1.19E-03
Κατανάλωση νερού	m ³	1.57E-01	2.21E-03	6.44E-03	1.38E-01	1.07E-02