

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

Χ. Κορωναίος, Α. Ντόμπρος, Γ. Ρούμπας, Ν. Μουσιόπουλος

Εργαστήριο Μετάδοσης Θερμότητας και Περιβαλλοντικής Μηχανικής, Αριστοτέλειο
Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, Τ.Θ. 483, 541 24 Θεσσαλονίκη

KEYWORDS: Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Παραγωγή Υδρογόνου, Εναλλακτικά Καύσιμα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η εργασία έχει ως στόχο να διερευνήσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την παραγωγή υδρογόνου χρησιμοποιώντας ως εργαλείο την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Εξετάζονται η παραγωγή από φυσικό αέριο με αναμόρφωση ατμού και η παραγωγή με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Ένας πολύ μεγάλος αριθμός περιβαλλοντικών επιπτώσεων προκύπτει από τις διαφορετικές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου. Επιχειρείται πλήρης και ακριβής προσδιορισμός και ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η χρήση της αιολικής, της υδροηλεκτρικής και της ηλιακής ενέργειας για την παραγωγή του υδρογόνου αποτελούν τις πιο περιβαλλοντικά ήπιες μεθόδους. Παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των ανταγωνιστικών συστημάτων παραγωγής υδρογόνου.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF HYDROGEN FUEL PRODUCTION PROCESSES

C. Koroneos, A. Dompros, G. Roumbas, N. Moussiopoulos

Laboratory of Heat Transfer and Environmental Engineering, Aristotle University of Thessaloniki,
P.O. Box 483, 541 24 Thessaloniki, Greece

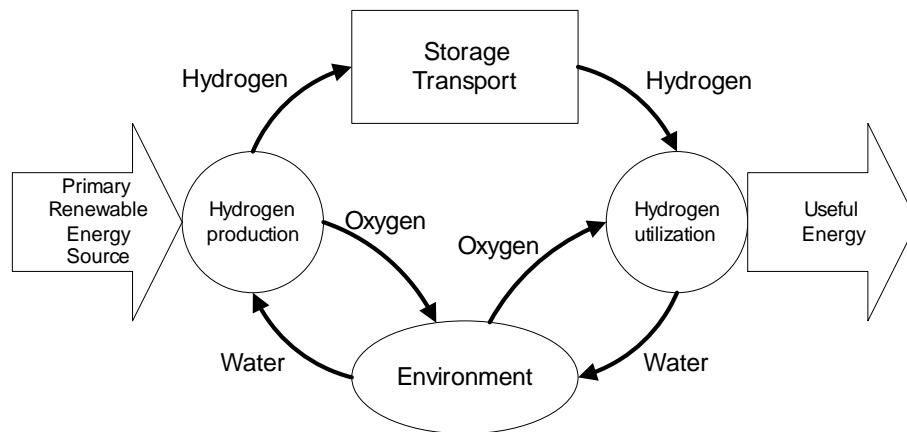
KEYWORDS: Life Cycle Assessment, Hydrogen Production, Alternative Fuels

ABSTRACT

A Life Cycle Assessment (LCA) study has been carried out to investigate the environmental aspects of hydrogen production. Production by natural gas steam reforming and production upon renewable energy sources are examined. A very large number of environmental burdens result from the operation of the different hydrogen production routes. A complete and accurate identification and quantification of the environmental emissions has been attempted. The use of wind, hydropower and solar thermal energy for the production of hydrogen are the most environmental benign methods. The benefits and the drawbacks of the competing hydrogen production systems are presented.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το υδρογόνο (H_2) αναμένεται να αποτελέσει ένα βασικό θεμέλιο λίθο για την δημιουργία ενός ολοκληρωμένου ενεργειακού συστήματος το οποίο θα βασίζεται στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ). Το υδρογόνο είναι το ελαφρότερο και το πιο άφθονο στοιχείο στη φύση αλλά σε ελεύθερη μορφή υπάρχει μόνο σε ελάχιστες ποσότητες στη γη. Για αυτό το λόγο, το H_2 δεν μπορεί να παίξει ρόλο πρωτεύοντος καυσίμου όπως το φυσικό αέριο, το πετρέλαιο και οι ορυκτοί άνθρακες. Το H_2 μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ως ενεργειακός φορέας όπως χρησιμοποιείται ο ηλεκτρισμός. Το περισσότερο υδρογόνο σήμερα παράγεται (97%) από την αναμόρφωση με ατμό του φυσικού αερίου ενώ η παραγωγή του με ηλεκτρόλυση ή μέσω φωτοχημικών αντιδράσεων αποτελεί μακροχρόνια προοπτική [1]. Όταν καίγεται το H_2 απελευθερώνεται ενέργεια με μορφή θερμότητας και παράγεται μόνο νερό. Οπότε η χρήση H_2 από ΑΠΕ ή πυρηνική ενέργεια ως ενεργειακός φορέας μπορεί να εξαλείψει τις εκπομπές CO και CO_2 και έτσι να οδηγήσει σε μείωση των εκπομπών αερίων που προκαλούν το φαινόμενο του θερμοκηπίου (Σχήμα 1). Απευθείας καύση, όμως, μπορεί να παράγει μικρές ποσότητες οξειδίων του αζώτου.



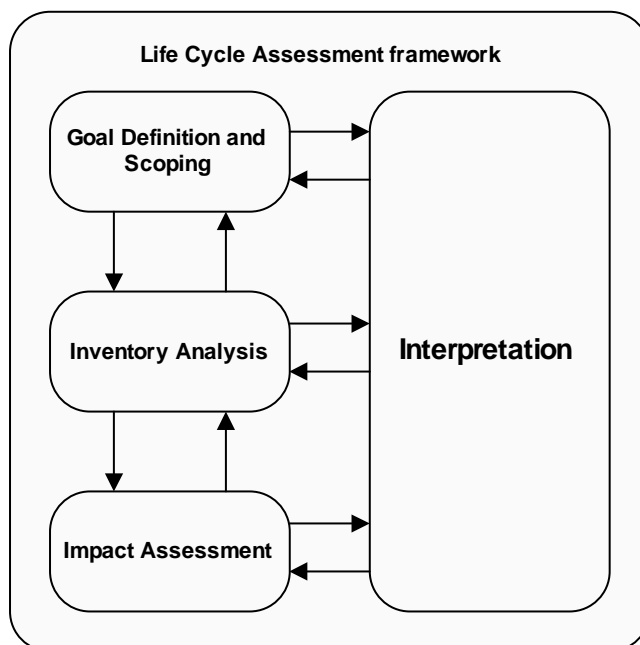
Σχήμα 1. Ο κύκλος ζωής του H_2 από ΑΠΕ

Ο κύριος σκοπός αυτής της μελέτης είναι μία πλήρη ΑΚΖ των μεθόδων παραγωγής υδρογόνου. Η ΑΚΖ είναι μία συστηματική αναλυτική μέθοδος η οποία βοηθάει στην καταγραφή και εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων μίας διεργασίας ή ενός προϊόντος. Για κάθε διεργασία στον κύκλο ζωής γίνεται αναλυτική απογραφή των ισοζυγίων μάζας και ενέργειας [2,3] ώστε να υπολογιστούν όλες οι εκπομπές. Οι λειτουργική μονάδα η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία και πάνω στην οποία βασίζονται όλοι οι υπολογισμοί είναι 1 MJ ενέργειας από υδρογόνο (1 kg H_2 έχει ανώτερη θερμογόνο δύναμη 142 MJ). Η λειτουργική μονάδα επιλέχθηκε έτσι ώστε να διευκολύνεται η σύγκριση μεταξύ των σεναρίων παραγωγής. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής H_2 από την αναμόρφωση με ατμό του φυσικού αερίου συγκρίνονται με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις διαφόρων μεθόδων παραγωγής από ΑΠΕ. Επίσης, παρουσιάζονται τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των διαφόρων συστημάτων [4]. Τα συστήματα τα οποία εξετάζονται είναι:

1. Παραγωγή H_2 από την αναμόρφωση με ατμό του φυσικού αερίου
2. Παραγωγή H_2 από ηλιακή ενέργεια με φωτοβολταϊκά (PV)
3. Παραγωγή H_2 από ηλιακή θερμική ενέργεια (Solar Thermal)
4. Παραγωγή H_2 από αιολική ενέργεια
5. Παραγωγή H_2 από υδροηλεκτρική ενέργεια
6. Παραγωγή H_2 από βιομάζα

2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ (ΑΚΖ)

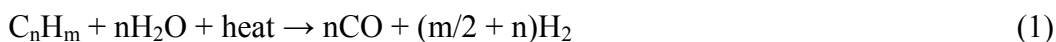
Η ΑΚΖ αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται συχνά στη λήψη αποφάσεων στη βιομηχανία και στη πολιτική. Η ΑΚΖ αποτελεί το θεμέλιο λίθο στο τομέα της βιομηχανικής οικολογίας [5,6]. Η μέθοδος της ΑΚΖ αποτελείται από τέσσερα στάδια: καθορισμός σκοπού της μελέτης, αναλυτική απογραφή των εκπομπών στο περιβάλλον, αποτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων και ερμηνεία (Σχήμα 2). Στο στάδιο του καθορισμού σκοπού της μελέτης ΑΚΖ περιγράφεται το προϊόν ή η παραγωγική διαδικασία η οποία θα μελετηθεί και καθορίζεται το πλαίσιο πάνω στο οποίο θα βασιστεί η αποτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και καθορίζονται τα όρια του συστήματος υπό εξέταση. Στο στάδιο της απογραφής καθορίζονται και ποσοτικοποιούνται η χρήση ενέργειας, νερού και πρώτων υλών και οι εκπομπές στο περιβάλλον. Οι διαδικασίες για την διεξαγωγή της απογραφής περιγράφονται αναλυτικά από την Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC) και την International Organization for Standardization (ISO) [2,7]. Στο στάδιο της αποτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα της απογραφής και μεταφράζονται σε επιπτώσεις στον άνθρωπο και στο περιβάλλον. Στο στάδιο της ερμηνείας γίνεται εκτίμηση και στάθμιση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ώστε να γίνουν συγκρίσεις.



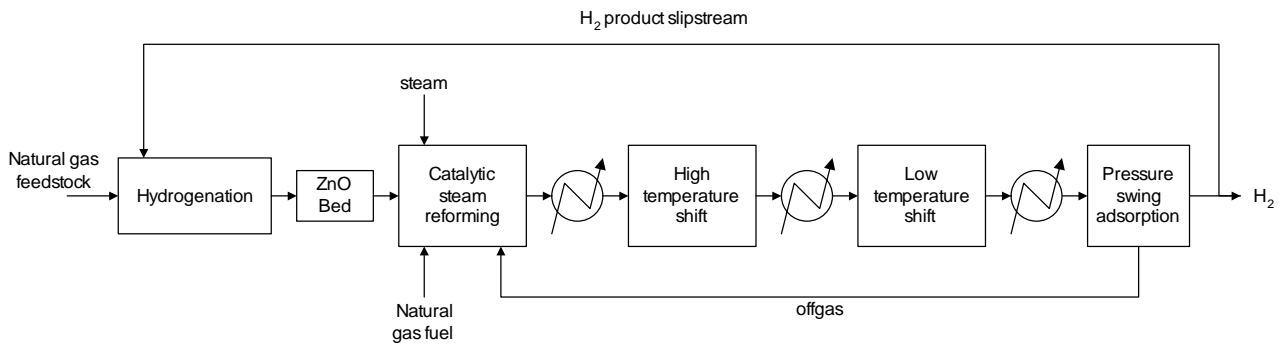
Σχήμα 2. Το πλαίσιο της ΑΚΖ [3]

3. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ

Η αναμόρφωση με ατμό αποτελεί σήμερα (και πολύ πιθανόν και στο μέλλον) τη σημαντικότερη και οικονομικότερη μέθοδο για την παραγωγή υδρογόνου. Κατά τη διεργασία αναμόρφωσης με ατμό οι υδρογονάνθρακες διασπώνται καταλυτικά παρουσία ατμού σε θερμοκρασίες 800 έως 900 °C (Σχήμα 3) [8]. Ο καταλύτης που χρησιμοποιείται είναι συνήθως νικέλιο. Κατά την καταλυτική διάσπαση παράγεται αέριο σύνθεσης. Οι κυριότερες διεργασίες που λαμβάνουν χώρα είναι μια αντίδραση αναμόρφωσης με ατμό (1) όπου το μεθάνιο και οι ανώτεροι υδρογονάνθρακες, μετατρέπονται σε CO και H₂ και μια αντίδραση του CO με H₂O (shift reaction (2)) για την παραγωγή H₂. Οι αντιδράσεις δίδονται παρακάτω:



Στον κύριο αναμορφωτή μετατρέπονται το μεθάνιο και οι ανώτεροι υδρογονάνθρακες, σε CO και H₂ (Αντίδραση 1) και λαμβάνει χώρα μεγάλο μέρος της αντίδρασης CO με H₂O (Αντίδραση 2). Στους αντιδραστήρες υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας (high and low temperature shift reactors) ολοκληρώνεται η αντίδραση του CO με το H₂O παρουσία οξειδίου του σιδήρου. Το αέριο που παράγεται καθαρίζεται και εμπλουτίζεται σε H₂ στην διεργασία PSA (Pressure Swing Adsorption). Τα απαέρια από την μονάδα PSA χρησιμοποιούνται ως καύσιμο για τον αναμορφωτή ατμού. Στον Πίνακα 1 παρουσιάζονται οι κυριότερες αέριες εκπομπές από την συνολική διεργασία [8].



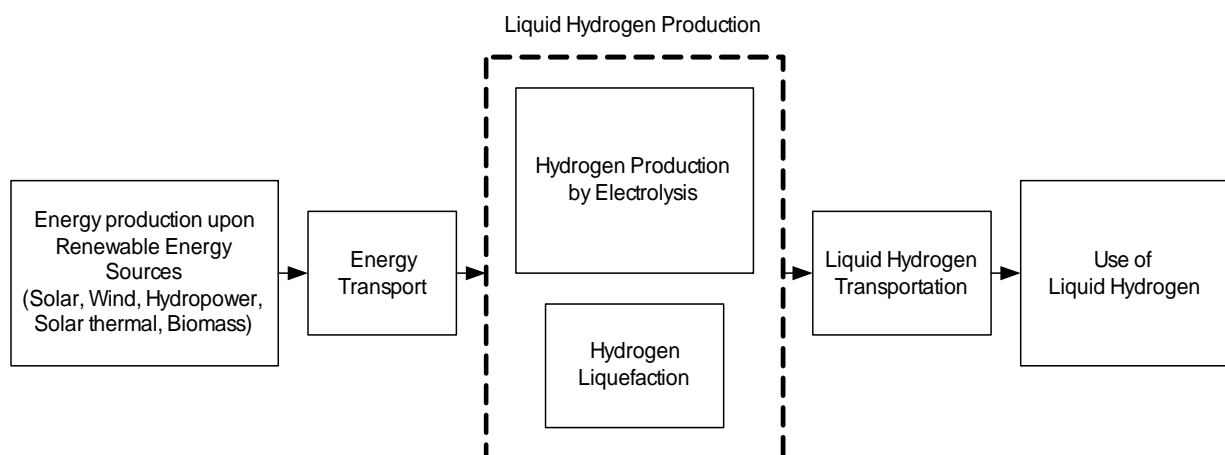
Σχήμα 3. Παραγωγή Υδρογόνου από Φυσικό Αέριο

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. Αέριες εκπομπές από την παραγωγή H₂ με αναμόρφωση με ατμό φυσικού αερίου [8]

Αέριος Ρύπος	g/kg H ₂
Βενζόλιο (C ₆ H ₆)	1.4
Διοξείδιο του Άνθρακα (CO ₂)	10662.1
Μονοξείδιο του Άνθρακα (CO)	5.9
Μεθάνιο (CH ₄)	146.3
Οξείδια του Αζώτου (NO _x ως NO ₂)	12.6
Νιτρώδες Οξείδιο (N ₂ O)	0.04
Υδρογονάνθρακες (όχι μεθάνιο) (NMHCs)	26.3
Σωματίδια	2.0
Οξείδια του Θείου (SO _x ως SO ₂)	9.7

4. ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΜΕ ΒΑΣΗ ΑΠΕ

Υπάρχουν πολλές καινοτόμες διαδικασίες παραγωγής υδρογόνου που βασίζονται σε ΑΠΕ και μόνο μερικές εξετάζονται με βάση την ΑΚΖ στην παρούσα εργασία. Τα υπό εξέταση σενάρια παραγωγής παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Παραγωγή υδρογόνου με βάση ΑΠΕ

Οι σύγκριση μεταξύ των σεναρίων παραγωγής H_2 έγινε με χρήση της βάσης δεδομένων του GEMIS (Global Emission Model for Integrated Systems) [9]. Η παρούσα εργασία περιορίζεται μόνο στη μετατροπή της ενέργειας από ΑΠΕ σε H_2 οπότε μόνο η περίπτωση της ηλεκτρόλυσης εξετάζεται. Επίσης από τις διάφορες τεχνολογίες ηλεκτρόλυσης μόνο η υψηλής πίεσης αλκαλική ηλεκτρόλυση εξετάζεται διότι αποτελεί μία λογική επιλογή για μελλοντική παραγωγή H_2 . Το κυριότερο πλεονέκτημα της τεχνολογίας είναι η παραγωγή υδρογόνου σε υψηλή πίεση το οποίο προτιμάται για την μεταφορά H_2 με αγωγούς. Η ηλεκτρόλυση αποτελεί μία ώριμη τεχνολογία και η ολική απόδοση υποτίθεται ότι είναι 77% [9].

4.1 Ηλεκτρόλυση

Η διεργασία της ηλεκτρόλυσης λαμβάνει χώρα στην ηλεκτρολυτική κυψέλη η οποία αποτελείται από μία σειρά κελιών όπου στο καθένα υπάρχει ένα θετικό (άνοδος) και ένα αρνητικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος). Τα ηλεκτρόδια βυθίζονται σε νερό το οποίο καθίσταται αγωγίμο με προσθήκη υδροξειδίου του καλίου (KOH). Η άνοδος κατασκευάζεται από νικέλιο και χαλκό και είναι επικαλυμμένη με οξειδία μετάλλων όπως το μαγγάνιο, βολφράμιο και ρουθίνιο. Τα μέταλλα της ανόδου επιτρέπουν ταχεία μετατροπή του ατομικού οξυγόνου σε μοριακό οξυγόνο στην επιφάνεια ηλεκτροδίων. Η κάθοδος αποτελείται από νικέλιο, επικαλυμμένο με μικρές ποσότητες λευκόχρυσου ως καταλύτη. Ο καταλύτης επιτρέπει στην ταχεία μετατροπή του ατομικού υδρογόνου σε μοριακό υδρογόνο στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου και με αυτόν τον τρόπο αυξάνει το ποσοστό παραγωγής υδρογόνου. Ο ρυθμός παραγωγής υδρογόνου εξαρτάται με την πυκνότητα ρεύματος. Όσο υψηλότερη η πυκνότητα ρεύματος, τόσο υψηλότερη η τάση της πηγής ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτείται και το κόστος ανά μονάδα του υδρογόνου. Εντούτοις, οι υψηλότερες τάσεις μειώνουν το μέγεθος του ηλεκτρολυτικού κελιού και επομένως μειώνεται η πάγια επένδυση. Τα σύγχρονα ηλεκτρολυτικά κελιά είναι αξιόπιστα και έχουν ενεργειακή απόδοση 65-80%, και λειτουργούν σε πυκνότητες ρεύματος περίπου 2000 A/m^2 . Το ποσό ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση μπορεί να μειωθεί με την προσθήκη θερμότητας στην αντίδραση. Η ελάχιστη τάση που απαιτείται για να διασπαστεί το νερό είναι 1.23 V στους 25°C . Σε αυτήν την τάση, απαιτείται θερμότητα για να προχωρήσει η αντίδραση. Όμως, με τάση 1.47 V (στους 25°C) δεν απαιτείται επιπλέον χορήγηση θερμότητας. Η λειτουργία του ηλεκτρολυτικού κελιού σε χαμηλές τάσεις με προσθήκη θερμότητας είναι συμφέρουσα, διότι η θερμότητα είναι συνήθως λιγότερο δαπανηρή από την ηλεκτρική ενέργεια, και μπορεί να διανεμηθεί εκ νέου μέσα στη διαδικασία. Επιπλέον, αυξάνεται η αποδοτικότητα των αντιδράσεων της ηλεκτρόλυσης με αύξηση της θερμοκρασίας λειτουργίας. Για την ηλεκτρολυτική παραγωγή υδρογόνου, οι θερμοδυναμικές απώλειες οφείλονται κυρίως στις αναστρεψιμότητες που συνδέονται με τη παραγωγή θερμότητας από υψηλής ποιότητας καύσιμα, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και τη διάσπαση του νερού [11].

4.2 Διεργασία υγροποίησης

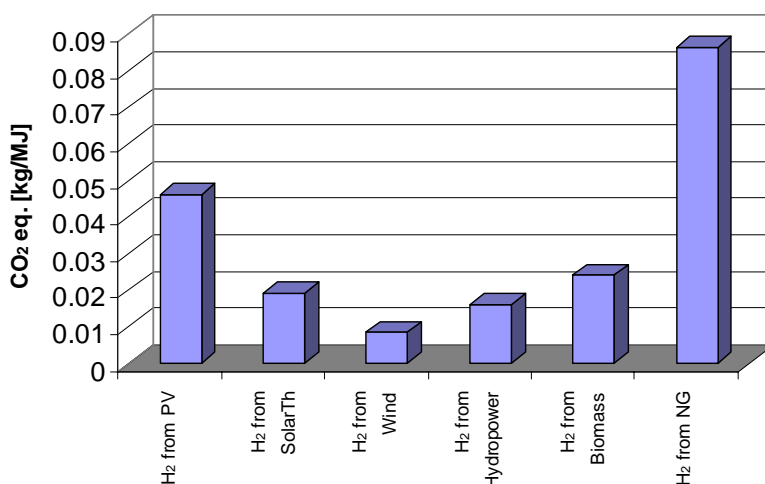
Το υδρογόνο πρέπει να ψυχθεί στους -253°C όπου και υγροποιείται. Από θερμοδυναμική άποψη, η καλύτερη διαδικασία υγροποίησης είναι ένας συνδυασμός ισοθερμικής συμπίεσης που ακολουθείται από αδιαβατική εκτόνωση, όπου το αέριο ψύχεται λόγω του φαινομένου Joule-Thomson. Η θεωρητική ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται είναι πολύ υψηλότερη, περίπου 4 kWh/kg λόγω Carnot. Στην πραγματικότητα, καμία από αυτές τις ιδανικές διαδικασίες δεν επιτυγχάνεται και επομένως το αέριο H_2 ψύχεται βαθμιαία, συνήθως με την πρόψυξη του με υγρό άζωτο. Η απαίτηση σε ηλεκτρική ενέργεια είναι 0.347 MJ/MJ ($0.00244 \text{ MJ/kg H}_2$) η οποία δίδεται στη βάση δεδομένων GEMIS (αναφέρεται σε πίεση εισόδου 30 bar).

5. ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ H₂

Η παραγωγή υδρογόνου από τις συμβατικές και ανανεώσιμες πηγές παρουσιάστηκε και αναλύθηκε λεπτομερώς. Το επόμενο βήμα της μελέτης είναι η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ώστε να καθοριστεί πώς οι εκπομπές επιβαρύνουν το περιβάλλον. Η αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εκτιμά το μέγεθος και τη σημασία των πιθανών περιβαλλοντικών επιδράσεων των διαφορετικών κύκλων ζωής υπό μελέτη. Αποτελείται από τρία βήματα: ταξινόμηση, χαρακτηρισμός και αξιολόγηση [12]. Οι κατηγορίες που έχουν εξεταστεί στη παρούσα μελέτη είναι τέσσερις: Φαινόμενο θερμοκηπίου (Global Warming Potential (GWP)), οξύνιση (Acidification), ευτροφισμός (Eutrophication) και χειμερινή αιθαλομίχλη (Winter smog).

5.1 Εκπομπές Αερίων Θερμοκηπίου

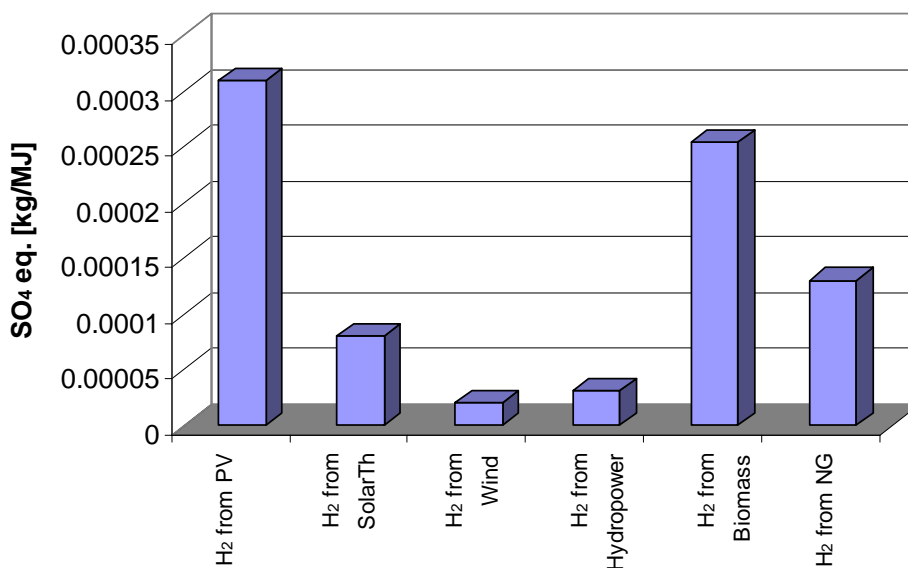
Το GWP των διαφορετικών συστημάτων παρουσιάζεται στο Σχήμα 5. Το GWP είναι ένας συνδυασμός CO₂, CH₄ και N₂O εκπομπών. Όπως αναμένεται η παραγωγή H₂ από φυσικό αέριο έχει κατά πολύ τις μεγαλύτερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.



Σχήμα 5. Ισοδύναμες εκπομπές CO₂ από την παραγωγή H₂

5.2 Εκπομπές αερίων οξύνισης

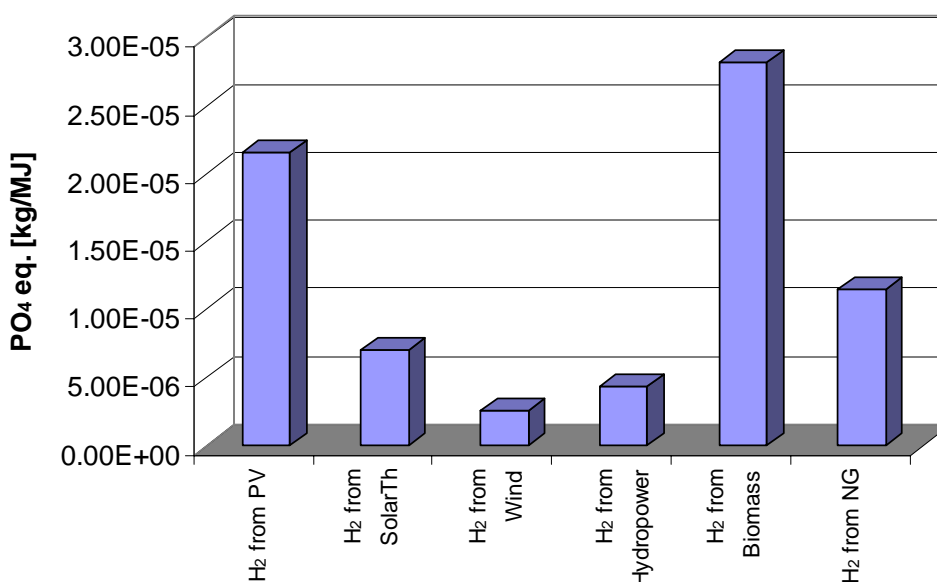
Ο οξυνισμός μετριέται ως ποσό πρωτονίων που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα. Οι παράγοντες στάθμισης παρουσιάζονται είτε ως ισοδύναμα mol. H⁺ είτε ως ισοδύναμα kg SO_x (mol. H⁺ eq και kg SO_x eq). Οι δύο τύποι ενώσεων που συνεισφέρουν κυρίως στον οξυνισμό είναι ενώσεις του θείου και του αζώτου. Χημικές ουσίες όπως η αμμωνία, το HF, HCl και τα NO_x συμβάλουν σε αυτή την κατηγορία περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι εκπομπές SO₂ και SO_x θεωρούνται ότι έχουν την ίδια συνεισφορά (Σχήμα 6). Σε αυτή την κατηγορία το H₂ από PV έχει τις υψηλότερες SO₄ eq. εκπομπές.



Σχήμα 6. Ισοδύναμες SO₄ εκπομπές κατά την παραγωγή H₂

5.3 Εκπομπές αερίων ευτροφισμού

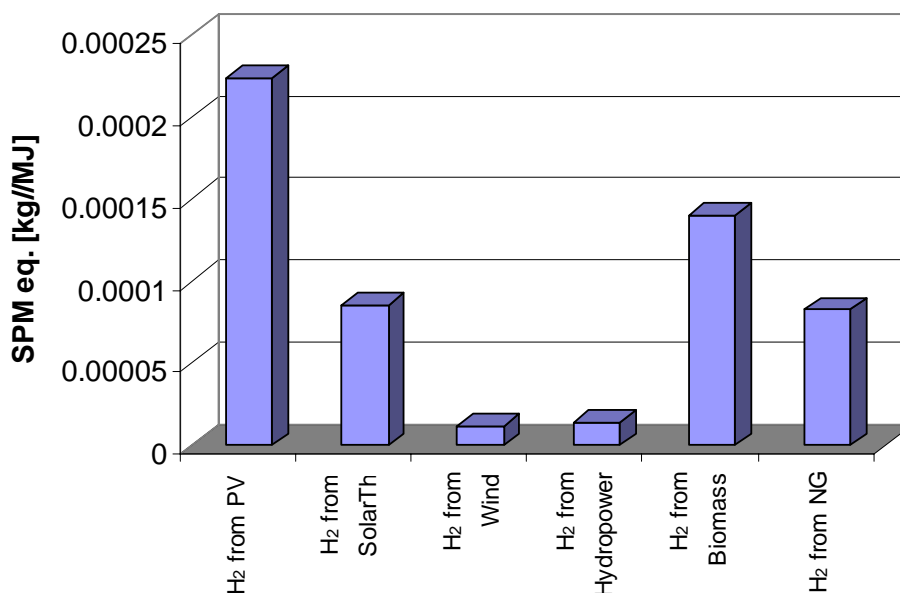
Εμπλουτισμός (ή ευτροφισμός) του ύδατος και του χώματος με άζωτο και φώσφορο μπορεί να προκαλεί αλλαγή στη σύνθεση του πληθυσμού των ειδών μέσα στα οικοσυστήματα. Ο ευτροφισμός των επίγειων οικοσυστημάτων οφείλεται κυρίως στις ατμοσφαιρικές εκπομπές NO_x (φυσικές περιοχές) και στις εκπομπές στο χώμα ενώσεων αζώτου και φωσφόρου (γεωργικές περιοχές). Για τους σκοπούς της παρούσας μελέτης μόνο οι εκπομπές που απελευθερώνονται στον αέρα μελετώνται (Σχήμα 7). Το H₂ από τη βιομάζα έχει τις υψηλότερες εκπομπές PO₄ eq. λόγω του ότι η καύση της βιομάζας παράγει εκπομπές NO_x.



Σχήμα 7. Ισοδύναμες PO₄ εκπομπές από την παραγωγή H₂

5.4 Εκπομπές Χειμερινής Αιθαλομίχλης

Για την αξιολόγηση της χειμερινής αιθαλομίχλης και για τη μετατροπή των διαφορετικών χημικών εκπομπών (σκόνη, SO₂) ισοδύναμη βάση χρησιμοποιούνται τα αιωρούμενα στερεά σωματίδια (Solid Particulate Matter (SPM)) ως ισοδύναμη ένωση. Η παραγωγή του H₂ από τα PV έχει το υψηλότερο SPM-eq που οφείλονται κυρίως στο στάδιο παραγωγής των PVs (Σχήμα 8).



Σχήμα 8. Ισοδύναμες εκπομπές SPM από την παραγωγή H₂

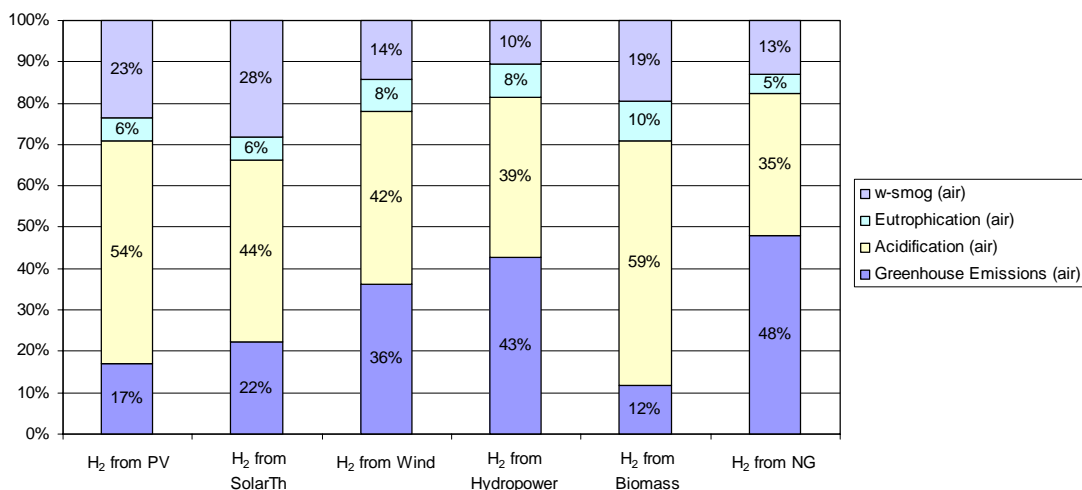
6. ΚΑΝΟΝΙΚΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Η κανονικοποίηση συσχετίζει όλα τα αποτελέσματα περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας λειτουργικής μονάδας με τα αποτελέσματα περιβαλλοντικών επιπτώσεων μιας κατάστασης αναφοράς. Στην παρούσα εργασία, η μέθοδος Eco-indicator 95 για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που βλάπτουν τα οικοσυστήματα ή την ανθρώπινη υγεία σε Ευρωπαϊκή κλίμακα χρησιμοποιείται [12] (Πίνακας 2). Η κανονικοποίηση δεν αποκαλύπτει τίποτα για τη σχετική σπουδαιότητα αυτών των αποτελεσμάτων. Οι παράγοντες αξιολόγησης χρησιμοποιούνται γι' αυτό το λόγο (Πίνακας 2). Οι παράγοντες αξιολόγησης σταθμίζουν τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης ώστε να αποτιμηθεί η σοβαρότητα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, που μετριέται σε σημεία οικο-δείκτη. Οι τυποποιημένοι οικο-δείκτες μπορούν να θεωρηθούν ως αδιάστατοι αριθμοί. Η απόλυτη τιμή των οικο-δείκτων δεν έχει σημασία. Κεντρικός σκοπός είναι να συγκριθούν οι σχετικές διαφορές μεταξύ των διάφορων διαδικασιών παραγωγής υδρογόνου. Η κλίμακα επιλέγεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε η αξία 1 (ενός) σημείου να είναι αντιπροσωπευτική για το ένα χιλιοστό του ετήσιου περιβαλλοντικού φορτίου που δέχεται ένα μέσος ευρωπαϊός κάτοικος.

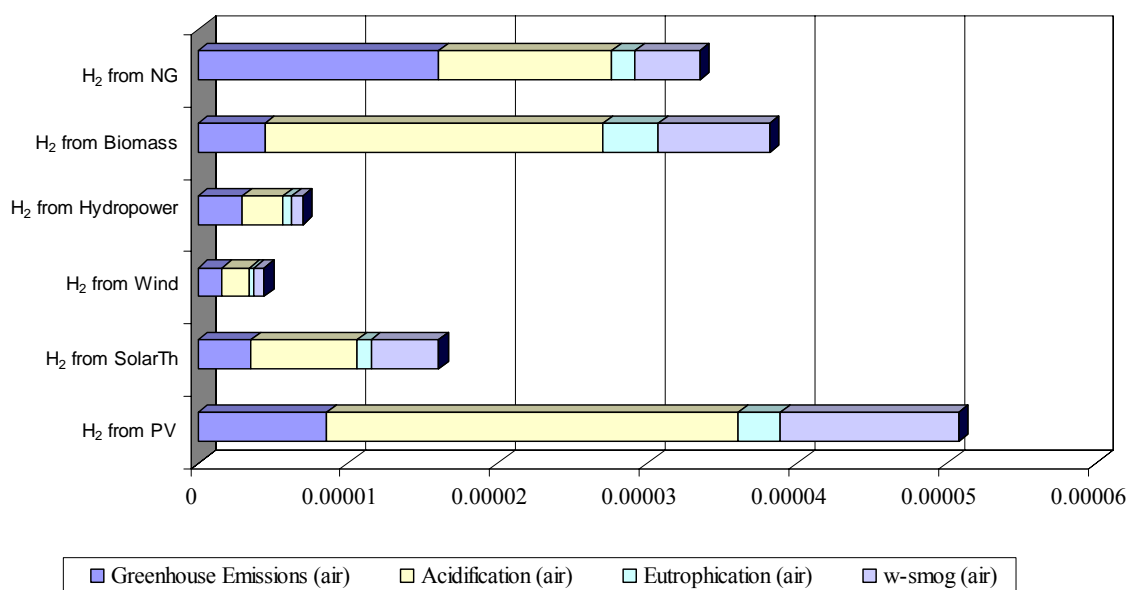
ΠΙΝΑΚΑΣ 2. Eco-indicator 95 παράγοντες κανονικοποίησης και αξιολόγησης [12]

Περιβαλλοντική Επίπτωση	Κανονικοποίηση	Αξιολόγηση
Αέρια Θερμοκηπίου	0.0000742	2.5
Οξύνιση (Acidification)	0.00888	10
Ευτροφισμός (Eutrophication)	0.0262	5
Χειμερινή Αιθαλομίχλη (Winter smog)	0.0106	5

Τέλος, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης προστίθενται για να δώσουν έναν συνολικό βαθμό περιβαλλοντικής επίπτωσης για κάθε διαδικασία. Η γραφική παράσταση "δεικτών" παρουσιάζει τη συνολική περιβαλλοντική επίπτωση όλων των εναλλακτικών σεναρίων παραγωγής υδρογόνου (Σχήματα 9 και 10).



Σχήμα 10. Ποσοστιαία συνεισφορά των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στο συνολικό δείκτη



Σχήμα 11. Συνολικός δείκτης περιβαλλοντικών επιπτώσεων για κάθε σενάριο παραγωγής H₂

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Αν και το υδρογόνο θεωρείται γενικά καθαρό καύσιμο, είναι σημαντικό να αναγνωριστεί ότι η μέθοδος παραγωγής του διαδραματίζει έναν πολύ σημαντικό ρόλο στο επίπεδο περιβαλλοντικών επιδράσεων. Εξέταση των κύκλων ζωής των διαφορετικών σεναρίων παραγωγής δίνει μια πλήρη εικόνα για τα περιβαλλοντικά φορτία που σχετίζονται με την παραγωγή υδρογόνου. Η ΑΚΖ των σεναρίων παραγωγής υδρογόνου δείχνει ότι η παραγωγή με τη χρήση της φωτοβολταϊκής ενέργειας έχει την χειρότερη περιβαλλοντική απόδοση από όλα τα άλλα σενάρια. Αυτό αποδίδεται στην κατασκευαστική διαδικασία των φωτοβολταϊκών στοιχείων που συμβάλλει ιδιαίτερα σε όλες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων του συστήματος. Συγχρόνως η αποδοτικότητα των

φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι πολύ χαμηλή. Η χρήση των ΑΠΕ έχει το πλεονέκτημα μιας φιλικής προς το περιβάλλον παραγωγής υδρογόνου, αλλά το κύριο μειονέκτημα βρίσκεται στην ανικανότητα αξιοποίησης ενός μεγάλου μέρους της διαθέσιμης ενέργειας [13]. Οι υψηλές ισοδύναμες εκπομπές του CO₂ και SO₂ έχουν αρνητικό αντίκτυπο στην παραγωγή υδρογόνου με αναμόρφωση ατμού του φυσικού αερίου. Οι εκπομπές μεθανίου (CH₄), οι οποίες προέρχονται κυρίως από τις διαρροές φυσικού αερίου στην ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια της παραγωγής και της διανομής, έχουν μια μεγάλη επίδραση στο GWP του συστήματος. Η χρήση της αιολικής, υδροηλεκτρικής και ηλιακής θερμικής ενέργειας αποδεικνύονται τα φιλικότερα προς το περιβάλλον σενάρια μεταξύ των εξεταζομένων για παραγωγή υδρογόνου.

Το μέλλον της παραγωγής υδρογόνου από ΑΠΕ εξαρτάται έντονα από το ίδιο το κόστος των ΑΠΕ. Η παραγωγή υδρογόνου από ΑΠΕ θα εισαχθεί στην αγορά όταν και όπου είναι οικονομικώς αποδοτικότερο έναντι των άλλων τοπικών μορφών ενέργειας. Από περιβαλλοντική και οικονομική σκοπιά, είναι σημαντικό να αυξηθεί η ενεργειακή αποδοτικότητα όλων των διαδικασιών. Αυτό θα οδηγήσει σε μειωμένη κατανάλωση πόρων και σε μείωση των εκπομπών. Εντούτοις, η μελέτη AKZ επιβεβαιώνει ότι η παραγωγή υδρογόνου που βασίζεται σε ΑΠΕ δίδει την δυνατότητα στο υδρογόνο να αποτελέσει έναν ελπιδοφόρο ενεργειακό φορέα για μια ολοκληρωμένη ανάπτυξη σε συμφωνία με την ανάγκη να προστατευτεί το περιβάλλον.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. National Renewable Energy Laboratory, “**The Green Hydrogen report**”, DOE/GO-10095-179, DE95009213, May 1995
2. SETAC, “**Guidelines for Life Cycle Assessment: A code of practice**”, Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Washington DC, 1993
3. U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation, LCAccess - LCA 101, 2001
4. Dante R.C., Guereca L.P., Neri L., Escamilla J.L., Aquino L., Celis J., “**Life cycle analysis of hydrogen fuel: a methodology for a strategic approach of decision making**”, 2002;27:131-133
5. Gaines L., Stodolsky A., “**Lifecycle Analysis: Uses and pitfalls**”, Air and waste management association’s 90th annual meeting and exhibition, June 8-13, 1997, Toronto, Ontario, Canada
6. Hofstetter P., “**Perspectives in life cycle impact assessment**”, Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1998
7. ISO (1997a), “**Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework**”, ISO/FDIS 14 040
8. Spath P., Mann M., (2000), “**Life cycle assessment of hydrogen production via natural gas steam reforming**”, National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy Laboratory, Contract No. DE-AC36-99-GO10337
9. Global Emission Model for Integrated Systems (GEMIS) database (September 2002), Φκο-Institut, Gesamthochschule Kasse
10. Schug C.A., “**Operational characteristics of high-pressure, high-efficiency water-hydrogen-electrolysis**”, Int. J. Hydrogen Energy, 1998;23(12): 1113-1120
11. Rosen M.A., “**Energy and exergy analyses of electrolytic hydrogen production**”, Int. J. Hydrogen Energy, 1995;20:547-553
12. Goedkoop M.J., “**The Eco-indicator 95 Final Report**” (in English), NOH Report 9523, PRe consultants, Amersfoort (NL), July 1995
13. Koroneos C., Spachos Th., Moussiopoulos N., “**Exergy analysis of renewable energy sources**”, Renewable Energy, 2003;28:295-310