

Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Πράσινου Υδρογόνου

Ντζαχρήστου Χριστίνα

Επιβλέπων καθηγητής

Δημήτριος Ιψάκης

Χανιά, Μάρτιος 2022

Περίληψη

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία έχει ως κύριο σκοπό την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου λειτουργίας και βελτιστοποίησης με στόχο τον σχεδιασμό ενός συστήματος παραγωγής υδρογόνου (με ηλεκτρόλυση νερού) με χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Αρχικά, επισημαίνεται η αναγκαιότητα της χρήσης των ΑΠΕ παρουσιάζοντας και αναλύοντας το μεγάλο ενεργειακό και περιβαλλοντικό πρόβλημα που μαστίζει τον πλανήτη. Τα προβλήματα αυτά αφορούν την έλλειψη ενεργειακών πόρων και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος με τα αέρια του θερμοκηπίου, που οδηγούν στην επιτακτική ανάγκη για νέες πηγές ενέργειας. Ως λύση στα ανωτέρω προτείνεται η χρήση του υδρογόνου ως μια νέα πηγή ενέργειας και αναλύονται όλοι οι λόγοι επιλογής του συγκεκριμένου καυσίμου.

Στην συνέχεια, γίνεται μια ανασκόπηση σε αντίστοιχες εργασίες της βιβλιογραφίας μέσω των οποίων περιγράφονται διάφορα συστήματα ηλεκτρόλυσης νερού που τροφοδοτούνται με χρήση ηλιακής ενέργειας. Σε αυτή την ανασκόπηση, παρουσιάζονται στοιχεία που αφορούν τον σκοπό κάθε εργασίας, την σύντομη περιγραφή των επιμέρους υποσυστημάτων που συνθέτουν ένα πλήρες σύστημα ΑΠΕ-Η₂, την μεθοδολογία βελτιστοποίησης και σχεδιασμού που ακολουθήθηκε και τέλος κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα που προέκυψαν και σχετίζονται με την παρούσα εργασία.

Συνεχίζοντας για την υλοποίηση του υπολογιστικού τμήματος της εργασίας, γίνεται παρουσίαση του μαθηματικού μοντέλου λειτουργίας των υποσυστημάτων (φωτοβολταϊκών, ηλεκτρόλυσης νερού και αποθήκευσης Η₂), καθώς και του αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας. Με βάση τα ανωτέρω, αξιοποιείται πακέτο βελτιστοποίησης μέσω matlab (αλγόριθμοι βελτιστοποίησης γενετικών αλγορίθμων) που στοχεύει στην εύρεση των βέλτιστων μεγεθών των υποσυστημάτων (φωτοβολταϊκών, ηλεκτρόλυσης νερού και αποθήκευσης Η₂) που θα οδηγούν σε προκαθορισμένη παραγωγή Η₂ στο τέλος ενός έτους. Η παραγόμενη ποσότητα Η₂ πρόκειται να αξιοποιηθεί ως καύσιμο σε αυτοκίνητα κινούμενα με αυτόνομη παροχή υδρογόνου και ενδεικτικά αποτελέσματα κατέληξαν σε :

- Κάλυψη φορτίου που αντιστοιχεί σε 1,2 αυτοκίνητα για παραγωγή 2.000.000 λίτρων υδρογόνου με χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων μεγέθους 8,5 kW για το σενάριο κόστους 1 και 7,9 kW για το σενάριο κόστους 2, μπαταριών μεγέθους 2.020 Ah για το σενάριο κόστους 1 και 8.529 Ah για το σενάριο

- κόστους 2 και μονάδα ηλεκτρόλυσης μεγέθους 4,7 kW για το σενάριο κόστους 1 και 3,8 kW για το σενάριο κόστους 2.
- Κάλυψη φορτίου που αντιστοιχεί σε 12 αυτοκίνητα για παραγωγή 20.000.000 λίτρων υδρογόνου με χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων μεγέθους 83,57 kW για το σενάριο κόστους 1 και 83,5 kW για το σενάριο κόστους 2, μπαταριών μεγέθους 11.270 Ah για το σενάριο κόστους 1 και 11.697 Ah για το σενάριο κόστους 2 και μονάδα ηλεκτρόλυσης μεγέθους 38,7 kW για το σενάριο κόστους 1 και 39,4 kW για το σενάριο κόστους 2.
 - Κάλυψη φορτίου που αντιστοιχεί σε 120 αυτοκίνητα για παραγωγή 200.000.000 λίτρων υδρογόνου με χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων μεγέθους 866,6 kW για το σενάριο κόστους 1 και 871 kW για το σενάριο κόστους 2, μπαταριών μεγέθους 31.025 Ah για το σενάριο κόστους 1 και 27.620 Ah για το σενάριο κόστους 2 και μονάδα ηλεκτρόλυσης μεγέθους 462 kW για το σενάριο κόστους 1 και 499,4 kW για το σενάριο κόστους 2.
 - Κάλυψη φορτίου που αντιστοιχεί σε 1.200 αυτοκίνητα για παραγωγή 2.000.000.000 λίτρων υδρογόνου με χρήση φωτοβολταϊκών συστημάτων μεγέθους 7.904,2 kW για το σενάριο κόστους 1 και 7.936,7 kW για το σενάριο κόστους 2, μπαταριών μεγέθους 305.960 Ah για το σενάριο κόστους 1 και 339.858 Ah για το σενάριο κόστους 2 και μονάδα ηλεκτρόλυσης μεγέθους 3.702,9 kW για το σενάριο κόστους 1 και 4.602,8 kW για το σενάριο κόστους 2.

Λέξεις κλειδιά: υδρογόνο, ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), ηλιακή ενέργεια, αέρια του θερμοκηπίου, ενεργειακό πρόβλημα, περιβαλλοντικό πρόβλημα, ηλεκτρόλυση νερού, αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας.

Abstract

The main objective of this thesis is the development of an operation and optimization algorithm for the design of a hydrogen production system (with electrolysis of water) using Renewable Energy Sources (RES). Initially, the necessity of the use of RES is highlighted, presenting and analyzing the major energy and environmental problem that plagues the planet. These problems relate to the scarcity of energy resources and the pollution of the environment with greenhouse gases, leading to the urgent need for new sources of energy. As a solution to the above, the use of hydrogen is proposed as a new energy source and all the reasons for choosing this fuel are analyzed.

In the following, a literature review is made through which various solar-powered water electrolysis systems are described. In this review, information is presented concerning the purpose of each work, a brief description of the individual subsystems that make up a complete RES-H₂ system, the optimization and design methodology followed and finally, some characteristic results obtained and related to this work.

Continuing for the implementation of the computational part of the work, the mathematical model of the subsystems (photovoltaic, water electrolysis and H₂ storage), as well as, the energy management algorithm is presented. Based on the above, an optimization package through matlab (genetic optimization algorithms) is utilized that aims to find the optimal sizes of the subsystems (photovoltaic, water electrolysis and H₂ storage) that will lead to a predetermined H₂ production at the end of a year. The produced H₂ is to be used as a fuel in cars powered by autonomous hydrogen supply and indicative results have been obtained in:

- Covering a load equivalent to 1.2 cars to produce 2,000,000 liters of hydrogen using photovoltaic systems of size 8.5 kW for cost scenario 1 and 7.9 kW for cost scenario 2, batteries of size 2,020 Ah for cost scenario 1 and 8,529 Ah for cost scenario 2 and an electrolysis unit of size 4.7 kW for cost scenario 1 and 3.8 kW for cost scenario 2.
- Covering a load equivalent to 12 cars to produce 20,000,000 liters of hydrogen using photovoltaic systems of size 83.57 kW for cost scenario 1 and 83.5 kW for cost scenario 2, batteries of size 11,270 Ah for cost scenario 1 and 11,697 Ah for cost scenario 2 and an electrolysis unit of size 38.7 kW for cost scenario 1 and 39.4 kW for cost scenario 2.

- Covering a load equivalent to 120 cars to produce 200,000,000 liters of hydrogen using photovoltaic systems of size 866.6 kW for cost scenario 1 and 871 kW for cost scenario 2, batteries of size 31,025 Ah for cost scenario 1 and 27,620 Ah for cost scenario 2 and an electrolysis unit of size 462 kW for cost scenario 1 and 499.4 kW for cost scenario 2.
- Covering a load equivalent to 1200 cars to produce 2,000,000,000 liters of hydrogen using photovoltaic systems of size 7,904.2 kW for cost scenario 1 and 7,936.7 kW for cost scenario 2, batteries of size 305,960 Ah for cost scenario 1 and 339,858 Ah for cost scenario 2 and an electrolysis unit of size 3,702.9 kW for cost scenario 1 and 4,602.8 kW for cost scenario 2.

Key words: hydrogen, renewable energy sources (RES), solar energy, greenhouse gas emissions, energy problem, environmental problem, water electrolysis, energy management algorithm.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη	1
Abstract	3
Κεφάλαιο 1 ^ο : Ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα.....	7
1.1 Έλλειψη των ενεργειακών πόρων και ανάγκη για νέες πηγές ενέργειας	7
1.2 Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος	13
1.2.1 Το φαινόμενο και τα αέρια του θερμοκηπίου.....	14
1.3 Το υδρογόνο ανάμεσα στις νέες πηγές ενέργειας.....	16
1.3.1 Λόγοι επιλογής του υδρογόνου	17
1.4 Παραγωγή Υδρογόνου από ηλιακή ενέργεια	19
1.5 Στόχοι εργασίας.....	22
Κεφάλαιο 2 ^ο : Ανασκόπηση βιβλιογραφίας	24
2.1 «Βέλτιστη παραγωγή υδρογόνου βάση μίας αποτελεσματικής στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας».....	24
2.2 «Βέλτιστος σχεδιασμός και λειτουργία υπό την αβεβαιότητα των συστημάτων ισχύος χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και αποθήκευση υδρογόνου»	29
2.3 «Βελτιστοποίηση των στρατηγικών ελέγχου σε αυτόνομα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αποθήκευση υδρογόνου»	32
2.4 «Μελέτη ενός συστήματος παραγωγής υδρογόνου με τη χρήση φωτοβολταϊκών ηλιακής ενέργειας και ηλεκτρολύτη πολυμερούς μεμβράνης στην Αλγερία»	34
2.5 «Τεχνικό - οικονομική ανάλυση ενός εκτός-δικτύου συστήματος φωτοβολταϊκών για κοινότητα σε περιοχή της ερήμου»	37
2.6 «Σχεδιασμός προ-υλοποίησης και προσομοίωση υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών/κυψελών καυσίμου για την εφαρμογή σε μονάδες αφαλάτωσης»... ..	40
2.7 «Πρόβλεψη επιδόσεων ενός συστήματος παραγωγής υδρογόνου με βάση την τεχνολογία φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων»	41
2.8 «Στρατηγικές βελτιστοποίησης μίας μονάδα ηλεκτρόλυσης τύπου PEM ως μέρος ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος».....	44
Κεφάλαιο 3 ^ο : Μαθηματική ανάλυση του ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής H ₂ από ΑΠΕ	46
3.1 Γενικά χαρακτηριστικά επιλογής μαθηματικών εξισώσεων	46
3.2 Μαθηματικά μοντέλα υποσυστημάτων.....	46
3.2.1 Φωτοβολταϊκό σύστημα	46
3.2.2 Συσσωρευτής Μόλυβδου – Οξέος	50
3.2.3 Συσκευή/Μονάδα Ηλεκτρόλυσης.....	55
3.2.4 Σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου	57

Κεφάλαιο 4^ο : Ανάπτυξη μεθοδολογίας βέλτιστης λειτουργίας του ολοκληρωμένου συστήματος αξιοποίησης Α.Π.Ε	60
4.1 Γενικά χαρακτηριστικά επιλογής και ανάπτυξης στρατηγικών ελέγχου.....	60
4.2 Παρουσίαση στρατηγικής ελέγχου.....	62
Στρατηγική ελέγχου	63
Κεφάλαιο 5^ο : Αποτελέσματα βελτιστοποίησης βάση σεναρίων κόστους.....	65
5.1 Σενάριο Κόστους 1.....	68
5.2 Σενάριο κόστους 2	77
5.3 Σύγκριση σεναρίων κόστους 1 & 2	87
Κεφάλαιο 6^ο : Συμπεράσματα, Κριτική ανάλυση και μελλοντικά βήματα	90
Βιβλιογραφία.....	92

Κεφάλαιο 1^ο : Ενεργειακά και περιβαλλοντικά προβλήματα

1.1 Έλλειψη των ενεργειακών πόρων και ανάγκη για νέες πηγές ενέργειας

Εξαιτίας της συνεχούς ανάπτυξης του παγκόσμιου πληθυσμού, ο οποίος αναμένεται να διπλασιαστεί μέχρι το τέλος του 21^{ου} αιώνα, η ανάγκη για κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται εξίσου ραγδαία με έμφαση στις αναπτυσσόμενες χώρες. Η εκτεταμένη χρήση των ενεργειακών πόρων έχει στόχο την οικονομική ανάπτυξη των αναπτυσσόμενων χωρών καθώς μέσω αυτών μπορούν να παρέχονται ενεργειακές υπηρεσίες οι οποίες απαιτούνται για την ορθή λειτουργία του σύγχρονου κόσμου. Τα παγκόσμια ενεργειακά αποθέματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.1 (έως το τρέχον έτος), καθώς και η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας στον Πίνακα 1.2.

Πίνακας 1.1 Παγκόσμια Ενεργειακά Αποθέματα

Άνθρακας (million st)	Αργό πετρέλαιο (billion b)	Φυσικό αέριο(tcf)
1.156.060	1.662	7.257

Πηγή: EIA, 2021

Πίνακας 1.2 Παγκόσμια Κατανάλωση Ενέργειας (Τετράκις Εκατομμύρια BTU)

	2015	2016	2017	2018
Παγκόσμια	567,141	567,493	582,776	599,459

Πηγή: EIA, 2021

Ειδικότερα, ο πίνακας 1.2 αναφέρει πως η παγκόσμια συνολική κατανάλωση ενέργειας το 2018 ήταν:

- 35% πετρέλαιο
- 24% φυσικό αέριο
- 27% άνθρακα
- 4% πυρηνικά
- 10% ανανεώσιμες πηγές

Οι ενεργειακοί πόροι χωρίζονται σε 3 κατηγορίες :

1. Ορυκτές πηγές ενέργειας (πετρέλαιο , φυσικό αέριο , άνθρακας)
2. Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
3. Πυρηνικές πηγές

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας παρατηρήθηκαν από τη φύση ως οι πρωταρχικές πηγές ενέργειας στην ιστορία της ανθρώπινης φυλής. Τα ξύλα και το νερό ήταν τα βασικά στοιχεία παραγωγής ενέργειας και χρησιμοποιήθηκαν ως το μέσο επιβίωσης των ανθρώπων εκείνης της εποχής. Ωστόσο, οι πρώτες τεχνολογίες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ήταν απλές μηχανικές εφαρμογές οι οποίες δεν κατάφεραν να εκπληρώσουν τις ανάγκες του σύγχρονου κόσμου σε υψηλές επιδόσεις.

Έτσι, τα τελευταία 200 χρόνια και λόγω της βιομηχανοποίησης των χωρών , η κατανάλωση ενέργειας γίνεται κατά βάση μέσω των ορυκτών καυσίμων. Αυτό ήρθε ως αποτέλεσμα από την ανάγκη των χωρών, όπως αναφέραμε, για υψηλές ενεργειακές επιδόσεις κάτι που θα μπορούσε σίγουρα να επιτευχθεί με χρήση πόρων μεγάλης ενεργειακής αξίας όπως ο άνθρακας και το πετρέλαιο. Ταυτόχρονα με την εκβιομηχάνιση , η υπόσχεση για απεριόριστα ορυκτά καύσιμα οδήγησε στην εκτεταμένη εκμετάλλευση του άνθρακα και του πετρελαίου στη βιομηχανία η οποία έφερε ταχεία οικονομική και τεχνολογική ανάπτυξη.

Πιο αναλυτικά , οι ορυκτές πηγές ενέργειας χωρίζονται σε 3 κατηγορίες :

1. Πετρέλαιο
2. Φυσικό αέριο
3. Άνθρακας

Τα ορυκτά καύσιμα , παρέχουν ένα μεγάλο μέρος της συνολικής πρωτογενούς ενέργειας παγκοσμίως , περίπου 85% , τη χρονική περίοδο 2001. Καθώς αυτά είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικά αλλά και φθηνά, θα αποτελέσουν το 90% του παγκόσμιου ενεργειακού μείγματος το 2020 μέχρι και σήμερα. Η σημαντικότητα του πετρελαίου είναι τόσο σπουδαία που η δημοσίευση αποθεμάτων του ανά τον κόσμο, προκαλεί πολιτικές αλλά και μεταξύ των χωρών συγκρούσεις. Οι αβεβαιότητες σχετικά με την μελλοντική παραγωγή του πετρελαίου σχετίζεται κυρίως με την κακή ποιότητα των δεδομένων καθώς η μοντελοποίηση των φυσικών κατανομών δεν είναι τεχνολογικά ανεπτυγμένη διαδικασία. Ωστόσο , η κατανάλωση εξαρτάται τόσο από την ανθρώπινη συμπεριφορά αλλά και από οικονομικά κριτήρια.

Τα παγκοσμίως αποδεδειγμένα αποθέματα πετρελαίου, εκτός αντισυμβατικού πετρελαίου, εκτιμώνται περίπου στα 1 τρισεκατομμύριο βαρέλια με

την Μέση Ανατολή να εκπροσωπεί το 65% των αποθεμάτων. Σήμερα , το πετρέλαιο είναι η ταχύτερη πρωτογενής πηγή ενέργειας στον κόσμο και αποτελεί το 39% της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Η συνολική ποσότητα του πετρελαίου που υπολογίστηκε προκειμένου να ικανοποιηθούν οι ανάγκες παγκοσμίως για τη χρονική περίοδο 2000 με 2020, είναι περίπου 730 δισεκατομμύρια βαρέλια . Όπως αναμένεται ωστόσο , ο όγκος του πετρελαίου που τελικά θα ανακτηθεί θα αυξηθεί κατά τη διάρκεια της παραπάνω περιόδου λόγω ανακάλυψης πρόσθετων αποθεμάτων πετρελαίου. Η παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.3 .

Πίνακας 1.3 Παγκόσμια κατανάλωση πετρελαίου

	Κατανάλωση (%)
Ηνωμένες Πολιτείες	20,5
Ευρώπη	14,5
Μέση Ανατολή	8,5
Λατινική Αμερική	6
Ανατολική Ευρώπη και Πρώην Σοβιετική Ένωση	5
Αφρική	4

Πηγή: ΕΙΑ, 2021

Στο μέλλον, οι πόροι αργού πετρελαίου θα γίνουν πιο σπάνιοι και πιο δαπανηροί. Πολλές χώρες που δεν παράγουν πετρέλαιο έχουν εμπλουτιστεί με άλλες πηγές ενέργειας, όπως ο άνθρακας , η άμμος πίσσας ,το ουράνιο και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, που δεν χρησιμοποιούνται πλήρως. Η άμμος πίσσας είναι μία ακόμη πιθανή πηγή τεράστιων ποσοτήτων πετρελαίου . Είναι αποθέσεις άμμου που εμποτίζονται με πυκνό, ιξώδες πετρέλαιο. Αποθέματα πετρελαίου υπάρχουν σε πολλές τοποθεσίες σε όλο τον κόσμο ενώ με τη χρήση σχιστολιθικού πετρελαίου που εξάγεται από το πετρελαιοειδές παρέχεται σε πολλά έθνη μία βιώσιμη εναλλακτική λύση όσο αφορά τα συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Παρόλη την επαρκή ποσότητα που υπάρχει σε αποθέματα σχιστολιθικού πετρελαίου στον κόσμο, η συνολική παραγωγή πετρελαίου δεν μπορεί να επιτευχθεί λόγω της υψηλής του περιεκτικότητας σε ορυκτή ύλη (30-70%) και νερού (5-10%) . Πολλά πετρελαιοειδή μπορούν να χρησιμοποιηθούν χωρίς επεξεργασία. Ακόμη μία από τις πιο σύγχρονα διαδεδομένες μορφές ενέργειας είναι το φυσικό αέριο. Το φυσικό αέριο έχει βιομηχανική , οικιακή, ηλεκτρική χρήση καθώς χρησιμοποιείται για εμπορικούς και μεταφορικούς σκοπούς. Στον Πίνακα 1.4 παρουσιάζεται η χρήση του φυσικού αερίου ανά τομέα.

Πίνακας 1.4 Χρήση Φυσικού Αερίου ανά τομέα Η.Π.Α

Τομέας	% της συνολικής χρήσης
Βιομηχανία	33
Οικιακά	15
Ηλεκτρική παραγωγή	38
Εμπορικός	10
Μεταφορές	3

Πηγή: EIA, 2021

Το φυσικό αέριο αναμένεται να είναι το καλύτερο σε ταχύτητα ανάπτυξης συστατικό της παγκόσμιας κατανάλωσης ενέργειας. Εξαιτίας της καθαρής σύστασής του συγκριτικά με το πετρέλαιο και τον άνθρακα, το φυσικό αέριο θα αποτελέσει τη μελλοντική λύση για πολλές χώρες με την ζήτηση του αναμενόμενα να αυξάνεται σε πολλές περιοχές του κόσμου όπως υπολογίζεται και σύμφωνα με εκτιμήσεις που αφορούν τη διαθεσιμότητα, το κόστος και το περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Τα αποθέματα του υπολογίστηκαν στα 6.076 τρισεκατομμύρια κυβικά πόδια (TCF) με τα μεγαλύτερα αποθέματα να βρίσκονται στη Μέση Ανατολή με τη συνολική κατανάλωση να αναμένεται να αυξηθεί το 2025 σχεδόν το διπλάσιο από το 2001. Στο Πίνακα 1.5 παρουσιάζεται η παγκόσμια παραγωγή φυσικού αερίου.

Πίνακας 1.5 Παγκόσμια Παραγωγή Φυσικού Αερίου ανά περιοχή (BCF)

Περιοχές	2016	2017	2018	2019
Βόρεια Αμερική	34.008	34.673	38.259	41.234
Μέση Ανατολή	21.903	22.604	23.452	24.013
Ασία & Ωκεανία	20.138	21.382	22.473	23.676
Ευρώπη	8.961	9.016	8.531	7.949
Αφρική	7.415	7.848	8.360	8.404
Κεντρική & Νότια Αμερική	5.999	6.099	6.142	6.083
Παγκόσμια	126.758	130.742	137.921	142.687

Πηγή: EIA, 2021

Οι Ηνωμένες Πολιτείες αναμένεται να παραμείνουν ο μεγαλύτερος καταναλωτής φυσικού αερίου στον βιομηχανικό τομέα καθώς παρουσιάζει συνεχή αύξηση κατά 1,4% ετησίως κατά μέσο όρο από το 2001 έως το 2025. Το φυσικό αέριο αποτελεί επίσης το 21% του πρωτογενούς ενεργειακού εφοδιασμού που εκτελείται στην Ευρώπη. Το ποσοστό αυτό θα αυξηθεί περίπου στο 28% το 2020 όπως θα

αυξηθούν και οι εισαγωγές φυσικού αερίου με κύρια χρήση την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με πολλούς διαφορετικούς τρόπους.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χρήση φυσικού αερίου είναι κατά βάση ακριβότερη από τη χρήση του άνθρακα, λόγω του αυξημένου κόστους των καυσίμων. Το φυσικό αέριο χρησιμοποιείται για την παραγωγή ενέργειας σε περιόδους υψηλής ζήτησης ενώ τα βασικά φορτία ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ικανοποιούνται με χρήση άνθρακα ή πυρηνικής ενέργειας. Αυτό επιτυγχάνεται λόγω της δυνατότητας που έχουν οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο στην εύκολη προσαρμογή της ζήτησης που απαιτείται κάθε στιγμή σε πραγματικό χρόνο, σε αντίθεση με τις καύσεις άνθρακα και πυρηνικών εργοστασίων.

Σχετικά με τον άνθρακα, ο άνθρακας ήταν μια βασική πηγή ενέργειας για χιλιάδες χρόνια. Ο άνθρακας έχει πολλές σημαντικές χρήσεις μεταξύ αυτών η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, κατασκευή τσιμέντου και χάλυβα, θέρμανση και βιομηχανία καθώς είναι η βασική πηγή καυσίμου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο Πίνακας 1.6 δείχνει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνθρακα στον κόσμο.

Πίνακας 1.6 Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας από ορυκτά καύσιμα

Περιοχή	Billion kWh	%
Ασία & Ωκεανία	8.609	53
Βόρεια Αμερική	2.945	18
Ευρώπη	1.382	8,5
Μέση Ανατολή	1.162	7
Αφρική	630	4
Κεντρική & Νότια Αμερική	406	2,5
Παγκόσμια	16.094	100.0

Πηγή: ΕΙΑ, 2021

Πολλές χώρες βασίζονται σε μεγάλο βαθμό στον άνθρακα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο αναλυτικά, στην Αυστραλία, την Κίνα, την Πολωνία και την Νότια Αφρική, η ηλεκτρική ενέργεια του άνθρακα αποτελεί περισσότερο από το 80% της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Ταυτόχρονα, η παραγωγική ικανότητα που προκύπτει από το άνθρακα πρόκειται να αυξηθεί κατά 60% στην Κίνα και κατά 45% στην Ινδία έως το 2025.

Ωστόσο, η κατανάλωση του άνθρακα σε παγκόσμιο επίπεδο τείνει να έχει πιο αργή ανάπτυξη από τα τέλη της δεκαετίας του 1980 , ενώ φαίνεται πως αυτή η τάση θα συνεχιστεί. Η παγκόσμια κατανάλωση άνθρακα παρουσιάζεται στον Πίνακα 1.7 .

Πίνακας 1.7 Παγκόσμια Κατανάλωση Άνθρακα(Mst)

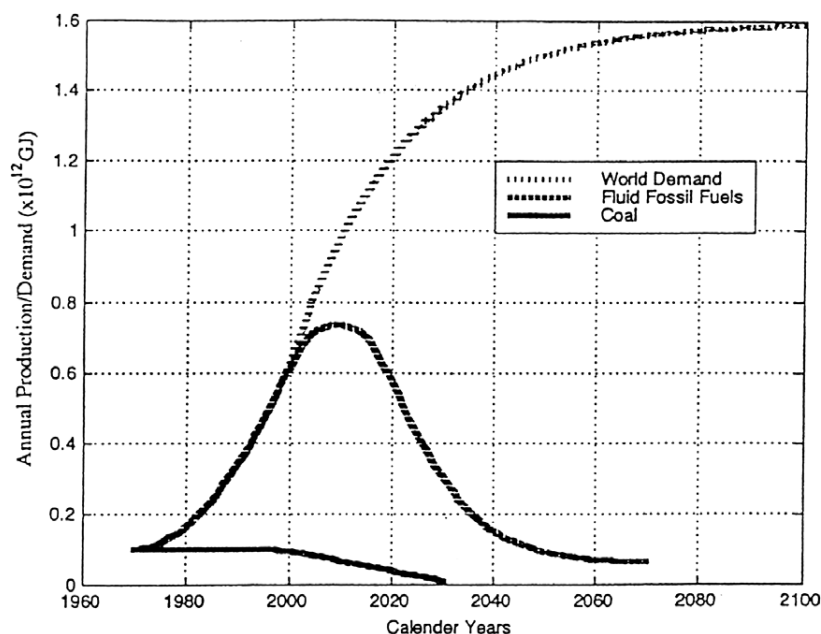
Περιοχές	2016	2017	2018	2019
Ασία & Ωκεανία	5.742.795	6.005.035	6.309.398	6.554.812
Ευρώπη	887.260	889.832	867.112	749.123
Βόρεια Αμερική	796.456	781.625	742.189	639.175
Αφρική	219.373	220.755	213.658	234.793
Κεντρική & Νότια Αμερική	56.916	57.595	57.748	57.401
Μέση Ανατολή	15.854	14.994	14.146	11.606
Παγκόσμια	8.106.962	8.350.331	8.604,120	8.639.675

Πηγή: EIA, 2021

Σήμερα, οι αναπτυσσόμενες χώρες χρησιμοποιούν περίπου το 55% του άνθρακα , το ποσοστό αυτό αναμένεται να αυξηθεί στο 65% τα επόμενα 15 χρόνια καθώς το 2050 ο άνθρακας θα αποτελεί περισσότερο από το 20% της πρωτογενούς ενέργειας στον κόσμο. Οδηγούμεστε επομένως στο εξής συμπέρασμα, η μεγάλη έλλειψη ενεργειακών πόρων προκύπτει ως αποτέλεσμα της μεγάλης ζήτησης. Ταυτόχρονα , η ενεργειακή ζήτηση αυξάνεται συνεχώς για δύο κύριους λόγους :

1. Λόγω της ανάλογης αύξησης του πληθυσμού
2. Λόγω της συνεχής ανάγκης των αναπτυσσόμενων χωρών για βελτίωση του βιοτικού επιπέδου.

Προς το παρόν , το μεγαλύτερο μέρος (περίπου 65%) των παγκόσμιων αναγκών καλύπτεται από τα υγρά ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο και φυσικό αέριο) , εφόσον υπάρχουν ακόμα διαθέσιμα αποθέματα και είναι εύχρηστα. Αναμένεται ωστόσο , ότι η παραγωγή ορυκτών καυσίμων θα φτάσει παγκοσμίως στο μέγιστο σημείο της (“peak”) και στη συνέχεια θα ακολουθήσει η σταδιακή μείωση. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζονται οι παγκόσμιες εκτιμήσεις των ποσοστών παραγωγής των ορυκτών καυσίμων καθώς και η ζήτηση.



Σχήμα 1.1 Παγκόσμια εκτίμηση για την παραγωγή και ζήτηση ορυκτών καυσίμων

Πηγή: 21st Century's energy: Hydrogen energy system

Όπως φαίνεται στο σχήμα, η παραγωγή ορυκτού καυσίμου φτάνει στο μέγιστο σημείο περίπου πριν το 2020 όπου και έπειτα αρχίζει να μειώνεται. Το ίδιο ισχύει και για την παραγωγή του άνθρακα. Αντιθέτως, λόγω της συνεχής αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού όπως και της ανάγκης των λαών για βελτίωση του βιοτικού επιπέδου, η ζήτηση για υγρά καύσιμα λειτουργεί αντιστρόφως ανάλογα. Δηλαδή, με το πέρασμα των χρόνων, η παγκόσμια ζήτηση αυξάνεται με το απόθεμα όμως να μειώνεται.

1.2 Η επιβάρυνση του περιβάλλοντος

Εκτός από το μεγάλο ενεργειακό πρόβλημα λόγω της έλλειψης πόρων, η αμέσως επόμενη δυσκολία σχετικά με τα ορυκτά καύσιμα αφορά την περιβαλλοντική επιβάρυνση που προκαλείται από αυτά και τα προϊόντα καύσης τους. Οι τεχνολογίες με τις οποίες επιτυγχάνεται η εξαγωγή ορυκτών καυσίμων όσο η μεταφορά και η μετατροπή τους σε προϊόν καύσης είναι διαδικασίες με σοβαρές επιπτώσεις στο περιβάλλον. Αυτές οι επιπτώσεις προκαλούν με τη σειρά τους, άμεσες και έμμεσες αρνητικές επιπτώσεις στην οικονομία.

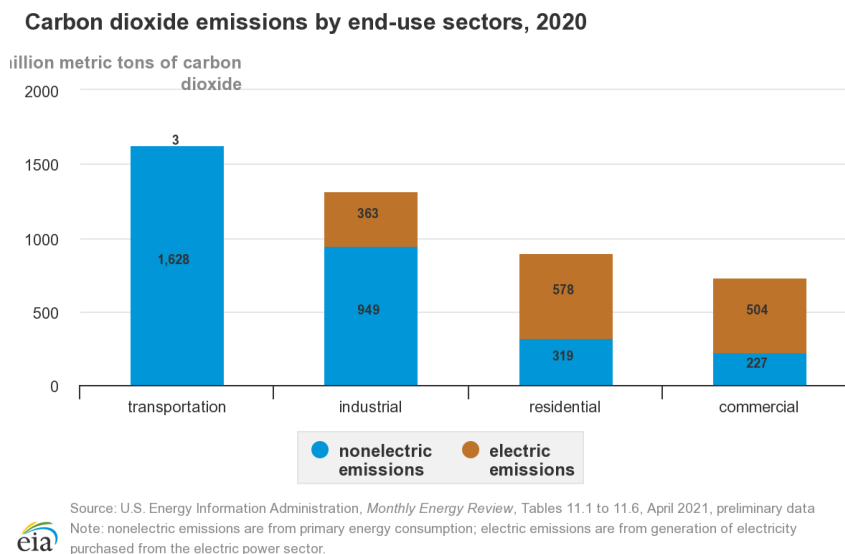
Πιο αναλυτικά, η συνεχής ανασκαφή για εξόρυξη του άνθρακα έχει φθείρει τη Γη σε μεγάλο βαθμό η οποία όμως πρέπει να ανακτηθεί για να μπορέσει να αποδώσει ξανά τα επόμενα χρόνια. Επίσης βλάβες προκαλούνται στο οικοσύστημα όταν κατά την εξαγωγή, μεταφορά ή αποθήκευση του πετρελαίου συμβαίνουν ατυχήματα και

σοβαρές διαρροές με αποτέλεσμα τη ρύπανση νερού και αέρα. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις έχουν επίσης και οι διαδικασίες διύλισης. Το μεγαλύτερο μέρος ωστόσο της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης των ορυκτών καυσίμων παρατηρείται στο τελευταίο στάδιο της χρήσης τους, αυτό της καύσης. Κατά την διαδικασία της καύσης των ορυκτών καυσίμων παράγονται διάφορα αέρια, αιθάλη και τέφρα, σταγονίδια πίσσας και άλλες οργανικές ενώσεις που απελευθερώνονται στην ατμόσφαιρα προκαλώντας ατμοσφαιρική ρύπανση. Επομένως, ως ατμοσφαιρική ρύπανση ορίζεται η παρουσία κάποιων αερίων και σωματιδίων που δεν απαρτίζουν την ατμόσφαιρα ως φυσικά συστατικά της, ή ακόμα και με την παρουσία φυσικών συστατικών σε μη φυσιολογική συγκέντρωση.

Μόλις ενεργοποιηθεί το ηλιακό φως στην ατμόσφαιρα ή μέσω ανάμειξης του νερού με άλλες ατμοσφαιρικές ενώσεις, οι αναφερόμενοι ως κύριοι ρύποι μπορούν να υποβληθούν σε χημική αντίδραση και να αλλάξουν τη μορφή τους σε δευτερεύοντες ρύπους, όπως όζον, νιτρικά και διάφορα οξέα. Η κατακρήμνιση του θείου και του αζώτου, στην οποία αυτά διαλύονται σε σύννεφα και σε σταγονίδια βροχής προκειμένου να σχηματίσουν θειικά και νιτρικά οξέα, συντελούν το φαινόμενο της όξινης βροχής. Επίσης έχει καταγραφεί όξινη ομίχλη αλλά και όξινο χιόνι. Επίσης, το διοξείδιο του άνθρακα σε ισορροπία με το νερό παράγουν ασθενές ανθρακικό οξύ. Η εναπόθεση οξέων που μπορεί να είναι είτε υγρή είτε ξηρή, οδηγεί σε όξυνση του εδάφους αλλά και του νερού με αποτέλεσμα την άμεση βλάβη της υδάτινης αλλά και χερσαίας ζωής. Επομένως, τα αποτελέσματα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης να είναι επιβλαβείς συνέπειες στην ανθρώπινη υγεία, τα ζώα, τη βλάστηση, τις καλλιέργειες και τις δομές.

1.2.1 Το φαινόμενο και τα αέρια του θερμοκηπίου

Ο κίνδυνος της κλιματικής αλλαγής λόγω εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) από τα ορυκτά καύσιμα θεωρείται η κύρια περιβαλλοντική απειλή από το αναφερόμενο ενεργειακό σύστημα. Γενικά, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα που προκαλούνται από την ανθρώπινη δραστηριότητα θεωρούνται οι πιο σημαντικές. Στο Σχήμα 1.2 παρουσιάζονται οι παγκόσμιες εκπομπές CO₂ ανά τομέα χρήσης



Σχήμα 1.2 Παγκόσμιες Εκπομπές CO₂ ανά τομέα χρήσης

Πηγή: EIA, 2021

Απορροφώντας την υπέρυθρη ενέργεια που η Γη εκπέμπει στην ατμόσφαιρα, ως αποτέλεσμα των συνεχών καύσεων και των προϊόντων τους, και αντανακλώντας κάποια πίσω στη Γη προκαλούνται παγκόσμιες θερμοκρασιακές αυξήσεις. Αυτό το φαινόμενο οδηγεί στην αύξηση της στάθμης της θάλασσας, καθώς οι πάγοι λιώνουν από την αύξηση της θερμοκρασίας και με τη σειρά του έρχονται οι κλιματικές αλλαγές οι οποίες περιλαμβάνουν υψηλούς δείκτες θερμότητας, ξηρασίες, πλημμύρες, ισχυρές καταιγίδες και πυρκαγιές.

Η υπερθέρμανση του πλανήτη φαίνεται να έχει άμεση συσχέτιση με το διοξείδιο του άνθρακα. Προς το παρόν, υπολογίζεται πως η συμβολή του στο φαινόμενο του θερμοκηπίου αφορά το 50%. Εκτός από το CO₂, άλλα αέρια όπως CH₄, SO₂, CFC, N₂O, αέρια υδρογονανθράκων, όζον και υπεροξυακετυλίτριο που παράγονται μέσω των βιομηχανικών και οικιακών διαδικασιών που οδηγούν στα αέρια του θερμοκηπίου, παίζουν σημαντικό ρόλο στο φαινόμενο και στην άνοδο της θερμοκρασίας της Γης.

Σε αυτό το σημείο είναι σημαντικό να επισημανθεί πως το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής απασχολεί και θα συνεχίζει να απασχολεί με ενεργειακά ερωτήματα τα οποία θα αποτελέσουν σημαντικό αντικείμενο της διεθνούς πολιτικής δραστηριότητας. Το θέμα της υπερθέρμανσης του πλανήτη όπως και οι πυρηνικοί κίνδυνοι αντιμετωπίζονται σε διεθνές επίπεδο, σε αντίθεση με τις ανησυχίες που αφορούν την πιθανή έλλειψη πόρων ή την υποβάθμιση του εδάφους που δεν αποτελούν αντικείμενο διεθνών διαπραγματεύσεων. Δυστυχώς, σε μία παγκοσμίως αναπτυσσόμενη οικονομία η οποία εξακολουθεί να εξαρτάται για το 85% των

ενεργειακών αναγκών της από τα ορυκτά καύσιμα , το σενάριο της μείωσης των εκπομπών αερίων, για σταθεροποίηση του CO₂ που υπάρχει στην ατμόσφαιρα, φαίνεται ένα σχεδόν ακατόρθωτο έργο. Το CO₂ και το CO είναι τα κύρια αέρια του θερμοκηπίου τα οποία σχετίζονται άμεσα με την υπερθέρμανση του πλανήτη , ενώ ο άνθρακας είναι υπεύθυνος κατά 30-40% για τις εκπομπές CO₂ από τα ορυκτά καύσιμα παγκοσμίως.

Συμπερασματικά, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις εξαιτίας της χρήσης ενέργειας μπορούμε να τις παρουσιάσουμε με δύο τρόπους :

1. *Η χρήση περιορισμένων σε επάρκεια φυσικών πόρων*
2. *Η ανησυχία που προκαλείται από τη ρύπανση του περιβάλλοντος*

Η έκταση των περιβαλλοντικών προβλημάτων που προκαλούνται αποδεικνύονται συνεχώς και σχετίζονται με ένα συνδυασμό διαφόρων παραγόντων. Ταυτόχρονα, λόγω της αύξησης του πληθυσμού που έχει ως αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση την κατανάλωσης για κάλυψη αναγκών , απαιτείται να βρεθεί μια επείγουσα λύση για αντιμετώπιση των προβλημάτων που έχουν προκληθεί με σκοπό μια αειφόρο ανάπτυξη. Μία από τις πιο αποτελεσματικές λύσεις φαίνεται να είναι η εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας οι οποίες έχουν άμεση συσχέτιση με τη βιώσιμη ανάπτυξη.

1.3 Το υδρογόνο ανάμεσα στις νέες πηγές ενέργειας

Ως αποτέλεσμα όλων των παραπάνω, οι ερευνητές θεώρησαν απαραίτητο να εξετάσουν νέες εναλλακτικές πηγές ενέργειας προκειμένου να αντικατασταθούν τα ορυκτά καύσιμα. Υπάρχουν αρκετές πρωτογενείς πηγές ενέργειας σε διαθεσιμότητα, όπως η θερμοπυρηνική ενέργεια , η ηλιακή ενέργεια , η αιολική ενέργεια , η υδροηλεκτρική ενέργεια , η γεωθερμική ενέργεια, τα ωκεάνια ρεύματα, η παλίρροια και τα κύματα. Η κατανάλωση των οποίων γίνεται κατά $\frac{1}{4}$ ως ηλεκτρική ενέργεια και $\frac{3}{4}$ ως καύσιμο. Για τον λόγο αυτό , πρέπει οι προαναφερόμενες πρωτογενείς πηγές να μετατραπούν πριν τη χρήση στους αντίστοιχους μεταφορείς ενέργειας που απαιτούνται, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα όπου κάθε πρωταρχική πηγή ενέργειας μπορεί να αξιοποιηθεί άμεσα ως καύσιμο.

Επομένως, οι νέες εναλλακτικές πηγές ενέργειας πρέπει να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή καυσίμων αλλά και για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Ο στόχος, όπως έχει ήδη επισημανθεί, είναι να γίνει αντικατάσταση των ορυκτών καυσίμων όπου στον σύγχρονο κόσμο των ορυκτών καυσίμων το πλάνο προβλέπεται αρκετά απαιτητικό. Γι' αυτόν τον λόγο, η επιλογή του καυσίμου πρέπει να είναι η καλύτερη δυνατή. Μεταξύ των υποψήφιων επιλογών είναι η συνθετική βενζίνη, συνθετικό φυσικό αέριο (μεθάνιο), μεθανόλη, αιθανόλη και υδρογόνο. Τα κριτήρια μέσα από τα οποία θα γίνει η τελική επιλογή αφορούν τις ακόλουθες συνθήκες :

- Βολικό στην μεταφορά
- Ευπροσάρμοστο ή εύκολο στην μετατροπή άλλων ενεργειακών μορφών
- Υψηλή απόδοση χρήσης
- Ασφαλές στη χρήση
- Περιβαλλοντικά συμβατό
- Οικονομικό

1.3.1 Λόγοι επιλογής του υδρογόνου

1.3.1.1 Μεταφορά Υδρογόνου

Όλα τα οχήματα όπως και τα αεροπλάνα αλλά ακόμα και τα διαστημικά οχήματα πρέπει να μεταφέρουν μαζί τους το καύσιμο τους για ορισμένη απόσταση μέχρι να αναπληρώσουν αυτό που έχουν ήδη καταναλώσει. Επομένως, το πιο σημαντικό είναι το καύσιμο μεταφοράς να είναι όσο το δυνατόν πιο ελαφρύ αλλά και να μπορεί να αποθηκευτεί σε μικρό χώρο. Αυτές οι δύο απαιτήσεις συνδυάζονται και δημιουργούν έναν αδιάστατο αριθμό, τον παράγοντα κινητικότητας. Όσο υψηλότερος ο παράγοντας κινητικότητας, τόσο πιο ιδανικό είναι το συγκεκριμένο καύσιμο για μεταφορά.

Μεταξύ των υγρών καυσίμων, το υγρό υδρογόνο παρουσιάζει τον καλύτερο παράγοντα κινητικότητας, ενώ η μεθανόλη τον χαμηλότερο. Αντίστοιχα και των αέριων καυσίμων, στο αέριο υδρογόνο παρουσιάζεται ο καλύτερος παράγοντας κινητικότητας. Ταυτόχρονα, η περαιτέρω εξέταση των πλεονεκτημάτων που

αφορούν την αποτελεσματική χρήση του υδρογόνου και η συνεχής του βελτίωση είναι αυτά που καθιστούν το υδρογόνο ως το πιο ιδανικό καύσιμο μεταφοράς. Επομένως, αυτός είναι και ο λόγος όπου το υδρογόνο επιλέγεται ως καύσιμο στα διαστημικά προγράμματα, παρόλο που πλέον είναι πιο ακριβό από τα ορυκτά καύσιμα.

1.3.1.2 Απόδοση στη χρήση Υδρογόνου

Εξίσου σημαντικό να υπολογισθεί ως βασική παράμετρος και η απόδοση των καυσίμων κατά τη χρήση. Για αντίστοιχη χρήση, τα καύσιμα μετατρέπονται σε διάφορες μορφές ενέργειας, όπως αναφέραμε και πριν, τη θερμική, την ηλεκτρική και τη μηχανική. Σχετικές μελέτες δείχνουν πως το υδρογόνο είναι αυτό που μπορεί να μετατραπεί αποτελεσματικότερα στη επιθυμητή μορφή ενέργειας, συγκριτικά με άλλα καύσιμα. Εξαιτίας της μεγάλης αποτελεσματικότητας που έχει το υδρογόνο, αυτό συνεπάγεται τη διατήρηση της ενέργειας αλλά και των πόρων. Παρακάτω παρουσιάζεται ο Πίνακας 1.8 στον οποίο παρουσιάζονται οι σταθερές απόδοσης $\phi_u = \frac{\eta_F}{\eta_H}$ που ορίζεται ως η αποδοτικότητα της χρήσης ορυκτών καυσίμου η_F διαιρώντας την αποδοτικότητα χρήσης υδρογόνου η_H για διάφορες εφαρμογές.

Πίνακας 1.8 Σύγκριση σταθερών απόδοσης

Χρήση	Σταθερά απόδοσης ϕ_u
Θερμική ενέργεια	
Καύση φλόγας	1,00
Καταλυτική καύση	0,80
Παραγωγή καπνού	0,80
Ηλεκτρική ενέργεια	0,54
Μεταφορές	
Μηχανές εσωτερικής καύσης	0,82
Ηλεκτρικές μηχανές	0,40
Μέσος όρος	0,72
Σταθερά απόδοσης υδρογόνου	1,00
Σταθερά απόδοσης ορυκτών καυσίμων	0,72

Πηγή: 21st Century's energy: Hydrogen energy system

1.3.1.3 Ασφάλεια

Τα κριτήρια για την ασφάλεια των καυσίμων περιλαμβάνουν αφενός την τοξικότητα τους και αφετέρου τις ιδιότητες του για κίνδυνο πυρκαγιάς. Τα καύσιμα μπορούν να παρουσιάσουν τοξικότητα όχι μόνο στα προϊόντα καύσης τους αλλά και τα ίδια τα καύσιμα μπορούν να είναι τοξικά. Η τοξικότητα αυτή αυξάνεται όσο αυξάνεται ο λόγος του άνθρακα προς το υδρογόνο. Το υδρογόνο και το κύριο προϊόν της καύσης του, το νερό ή ο υδρατμός, δεν είναι τοξικά.

Ωστόσο, ένα προϊόν που παράγεται με τη διαδικασία της καύσης φλόγας του υδρογόνου, το NO_x εμφανίζει τοξικές επιδράσεις. Χαρακτηριστικά μέσα από τα οποία καύσιμα θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως λιγότερο ασφαλή εξαιτίας του μεγαλύτερου κινδύνου που εμφανίζουν στο να προκληθεί καταστροφική πυρκαγιά είναι α) τα ευρύτερα όρια ανάφλεξης, β) οι χαμηλές ενέργειες ανάφλεξης, γ) οι χαμηλές θερμοκρασίες ανάφλεξης, δ) η υψηλή θερμοκρασία φλόγας, ε) η υψηλή ενέργεια έκρηξης και στ) η υψηλή εκπομπή φλόγας.

Με τα παραπάνω χαρακτηριστικά της τοξικότητας και του κινδύνου πυρκαγιάς, τα καύσιμα έχουν συγκεντρώσει συνολικές βαθμολογίες επικινδυνότητας προκειμένου να υπολογίζονται στους παράγοντες ασφαλείας. Από αυτήν την κατάταξη ορίζεται ως λιγότερο ασφαλής η λευκή βενζίνη, αμέσως επόμενο το μεθάνιο και το πιο ασφαλές καύσιμο φαίνεται να είναι το υδρογόνο. Από όλα τα παραπάνω κριτήρια, γίνεται σαφές πως το υδρογόνο καλύπτει όλα τα χαρακτηριστικά για την επιλογή καταλληλότερου καυσίμου καθώς είναι το ιδανικότερο καύσιμο μεταφοράς, το πιο ευπροσάρμοστο, το πιο αποτελεσματικό και το πιο ασφαλές.

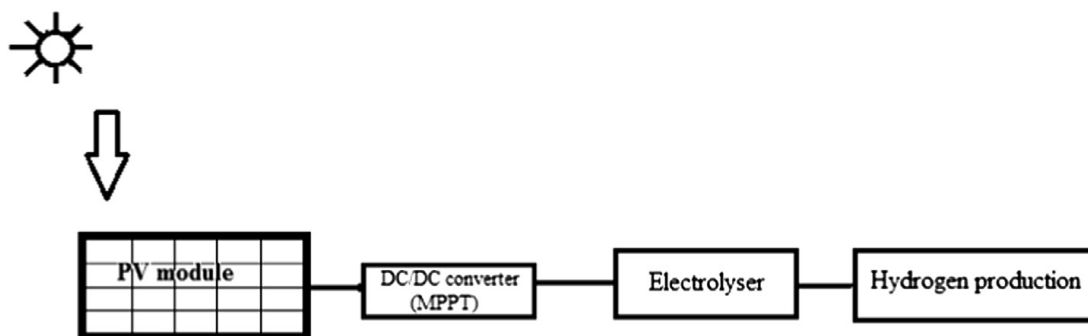
1.4 Παραγωγή Υδρογόνου από ηλιακή ενέργεια

Στις τεχνολογίες ηλιακής ενέργειας, χρησιμοποιείται το φως του ήλιου προκειμένου να παραχθεί θερμότητα και ηλεκτρική ενέργεια. Για παράδειγμα, συστήματα ηλιακής ενέργειας είναι, το ηλιακό σπίτι, τα φωτοβολταϊκά, τα ηλιακά συστήματα θέρμανσης νερού και άλλα. Σήμερα, το ποσοστό ενέργειας που καλύπτουν αυτές οι ηλιακές πηγές φτάνει περίπου το 10% παγκοσμίως ενώ στις αναπτυσσόμενες χώρες το ποσοστό αυτό φτάνει το 40%. Η άμεση ηλιακή ενέργεια ή ηλιακή φωτοβολταϊκή ισχύς, αφορά ένα σύστημα το οποίο μετατρέπει την ηλιακή ακτινοβολία σε ηλεκτρική μορφή ενέργειας μέσω φωτοβολταϊκών κυττάρων. Λόγω των πολλών πλεονεκτημάτων του, αυτός ο τύπος ανανεώσιμης ενέργειας έχει συγκεντρώσει παγκόσμια το μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Αυτά τα πλεονεκτήματα αφορούν τα παρακάτω χαρακτηριστικά :

- Εύκολη σχεδίαση και εγκατάσταση
- Μεγάλη διάρκεια ζωής
- Λιγότερες απαιτήσεις συντήρησης
- Εύκολη μεταφορά και ελαφρύ βάρος
- Χαμηλή τιμή με υψηλό ρυθμό πτώσης

Σχετικά με το τελευταίο χαρακτηριστικό, δεδομένης της μεγάλης και συνεχής πτώσης στο κόστος των φωτοβολταϊκών, υπήρξε σημαντική προώθηση της συγκεκριμένης τεχνολογίας με αποτέλεσμα την αύξηση των εγκατεστημένων φωτοβολταϊκών συστημάτων σε όλο τον κόσμο καθώς θεωρήθηκε ως μία πιθανή εναλλακτική λύση ως προς όλες τις πηγές ενέργειας.

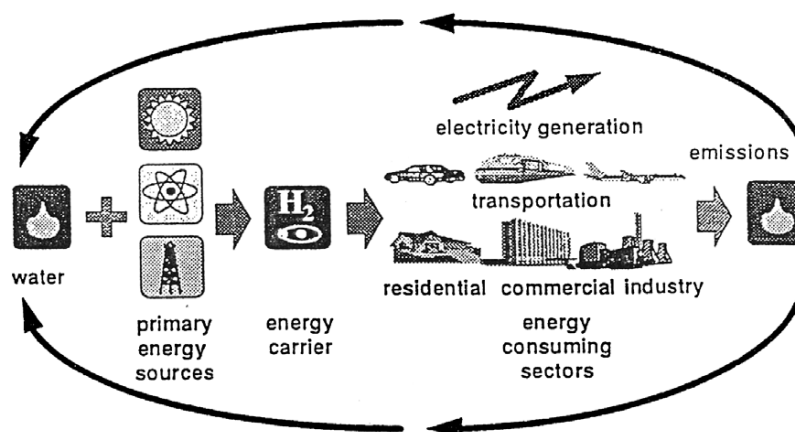
Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί ως καύσιμο με τη χρήση ηλιακής ενέργειας από φωτοβολταϊκές μονάδες (PV) για την ηλεκτρόλυση νερού χωρίς την εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα ή την χρήση ορυκτών καυσίμων. Στα φωτοβολταϊκά συστήματα υδρογόνου, γίνεται παροχή της ηλεκτρικής ενέργειας από μία φωτοβολταϊκή γεννήτρια σε έναν ηλεκτρολύτη νερού. Επομένως, τα κύρια μέρη ενός φωτοβολταϊκού συστήματος υδρογόνου είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια και ο ηλεκτρολύτης. Η ηλεκτρόλυση νερού μπορεί να διεξαχθεί σε θερμοκρασίες μεταξύ 500 και 1000 ° C (διαδικασία υψηλής θερμοκρασίας) ή σε κάτω των 100 ° C (διαδικασία χαμηλής θερμοκρασίας) μεταφέροντας μέσω της ηλεκτροχημικής διαδικασίας διάφορα ιόντα (OH⁻, H⁺, O₂). Η μεμβράνη ηλεκτρόλυσης παρέχει μια ταχύτερη απόκριση στην δυναμική της διαδικασίας και την μεταβολή του φορτίου καθώς επιτρέπει τον συμπαγή σχεδιασμό του συστήματος. Η υψηλή καθαρότητα του παραγόμενου υδρογόνου, η καλύτερη σύνδεση με το σύστημα αλλά και η υψηλή ευελιξία είναι τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη. Το σύστημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.3



Σχήμα 1.3 Φωτοβολταϊκό σύστημα υδρογόνου

Πηγή: Study of hydrogen production system by using PV solar energy and PEM electrolyser in Algeria

Είναι σκόπιμο να κατασκευάζεται υδρογόνο με χρήση όλων των πρωτογενών πηγών ενέργειας με σκοπό την κάλυψη των ελλείψεων. Το αναφερόμενο σύστημα είναι το σύστημα ενέργειας υδρογόνου. Παρακάτω, στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται ένα σχηματικό διάγραμμα που αναπαριστά το προτεινόμενο σύστημα ενέργειας υδρογόνου.



Σχήμα 1.4 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος ενέργειας υδρογόνου

Πηγή: 21st Century's energy: Hydrogen energy system

Στο αναφερόμενο σύστημα, το υδρογόνο, αλλά και το οξυγόνο, παράγονται σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις όπου διατίθενται οι πηγές πρωτογενούς ενέργειας (όπως η ηλιακή, η πυρηνική ή και ορυκτά), και το νερό όπου είναι η πρώτη ύλη. Προκειμένου να γίνει η αποθήκευση μεγάλης ποσότητας, το υδρογόνο αποθηκεύεται είτε υπόγεια είτε σε υδροφορίες όπου και στη συνέχεια μεταφέρεται μέσω αγωγών στα κέντρα κατανάλωσης ενέργειας. Έτσι, γίνεται η χρήση του στην ηλεκτρική ενέργεια, στις μεταφορές, στην βιομηχανία, σε οικιακές ή εμπορικές χρήσεις ως καύσιμο ή ενεργειακός φορέας. Το υποπροϊόν είναι το νερό ή υδρατμός. Στην περίπτωση χρήσης καύσης φλόγας υδρογόνου, παράγεται NO_x. Στη συνέχεια, το νερό και οι υδρατμοί ανακυκλώνονται μέσα στο σύστημα από την βροχή, τους ποταμούς, τις λίμνες και τους ωκεανούς προκειμένου να αντικατασταθεί το νερό που είχε χρησιμοποιηθεί στο πρώτο στάδιο για την παραγωγή υδρογόνου. Στο σύστημα ενέργειας υδρογόνου, το υδρογόνο δεν αποτελεί την πρωταρχική πηγή ενέργειας αλλά είναι μια ενδιάμεση, δευτερογενής μορφή ενέργειας. Ο ρόλος του υδρογόνου είναι να συμπληρώνει τις πρωτογενείς πηγές ενέργειας.

Η ηλιακή ενέργεια και ιδιαίτερα τα φωτοβολταϊκά συστήματα, μπορούν να προσφέρουν μια βιώσιμη εναλλακτική λύση, καθώς σε σύγκριση με άλλες ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είναι αυτή που παρουσιάζουν τις πιο σταθερές αλλά και προβλέψιμες τροφοδοσίες ενέργειας αλλά προσφέρει ταυτόχρονα την πιο οικονομική σε κόστος μονάδα εγκατάστασης. Όλα αυτά μας οδηγούν στο

συμπέρασμα πως η ηλιακή ενέργεια είναι η πιο ελπιδοφόρα αλλά και ανταγωνιστική επιλογή σχετικά με τις υπόλοιπες ανανεώσιμες πηγές. Ακόμη, όσον αφορά το μεγάλο περιβαλλοντικό πρόβλημα που έχει ήδη αναφερθεί σχετικά με τις υπερβολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συστήματα πλεονεκτούν και σε αυτόν τον τομέα καθώς μειώνουν τις εκπομπές αυτές του CO₂ στο δεκαπλάσιο.

1.5 Στόχοι εργασίας

Στην συγκεκριμένη εργασία, τίθεται ένα πρόβλημα και κάποια σενάρια προς μελέτη. Το ενδεικτικό πρόβλημα προς μελέτη αφορά ένα αυτοκίνητο H₂ που χρειάζεται 6,68kg H₂ για να κινηθεί μία απόσταση 600χλμ. Το αυτοκίνητο θα χρειαστεί 150kg H₂ ανά έτος για να ικανοποιήσει τις ανάγκες του. Στόχος της εργασίας είναι να καλυφθεί αυτή η ανάγκη για 15 αυτοκίνητα. Δηλαδή 2230kg H₂ ανά έτος ή 25,000,000 lt H₂ ανά έτος. Παράλληλα, θα ενταχθούν και παραπλήσια σενάρια ώστε να διαπιστωθεί η ευρωστία του αλγόριθμου που θα αναπτυχθεί καθώς και η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων που θα εξάγει.

Επομένως, θα χρειαστεί να σχεδιαστεί ένα υβριδικό σύστημα που να αποδίδει την παραπάνω ποσότητα H₂. Παράλληλα, θα δύναται η αξιοποίηση και της επιπλέον ποσότητας της ενέργειας που παράγεται από τις ΑΠΕ (πλεονάζουσα ενέργεια εφόσον είναι διαθέσιμη).

Ως βάση δεδομένων θα χρησιμοποιηθούν τα παρακάτω δεδομένα:

PV	1x10 kW
ELECTROLYZER	1x14cell, 1x6.9kW
BATTERY	2x500Ah
BUFFER STORAGE	40x50lt
FINAL STORAGE	5xBUFFER lt
SOCmax	85% (+2%)
SOCmin	SOCmax-15%
SOCinitial	95%

Επομένως, το σύνολο των στόχων της παρούσης διπλωματικής είναι:

- *Ανάπτυξη μοντέλου προσομοίωσης παραγωγής H_2 με χρήση ενέργειας από σύστημα φωτοβολταϊκών.*
- *Βελτιστοποίηση λειτουργίας για παραγωγή H_2 με χρήση αλγορίθμου διαχείρισης ενέργειας.*
- *Σχεδιασμός συστήματος που θα επιτυγχάνει προκαθορισμένους στόχους (π.χ. παραγωγή συγκεκριμένης ποσότητας H_2 / έτος).*
- *Σχεδιασμός συστήματος με τους στόχους που αναφέρθηκαν και ελάχιστο κόστος εξοπλισμού και εκμεταλλευόμενοι την περίσσεια ενέργεια προς πώληση.*

Κεφάλαιο 2^ο : Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο θα γίνει αναφορά σε χαρακτηριστικές εργασίες της βιβλιογραφίας που περιλαμβάνουν παραγωγή υδρογόνου από ηλιακή ενέργεια με σκοπό την ανάλυση κάποιων στοιχείων τους.

Τα στοιχεία που θα αναλυθούν επιμέρους στο κεφάλαιο είναι :

- *Ο σκοπός κάθε εργασίας*
- *Η μεθοδολογία – Περιγραφή του αντίστοιχου συστήματος*
- *Χαρακτηριστικά αποτελέσματα*

2.1 «Βέλτιστη παραγωγή υδρογόνου βάση μίας αποτελεσματικής στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας»

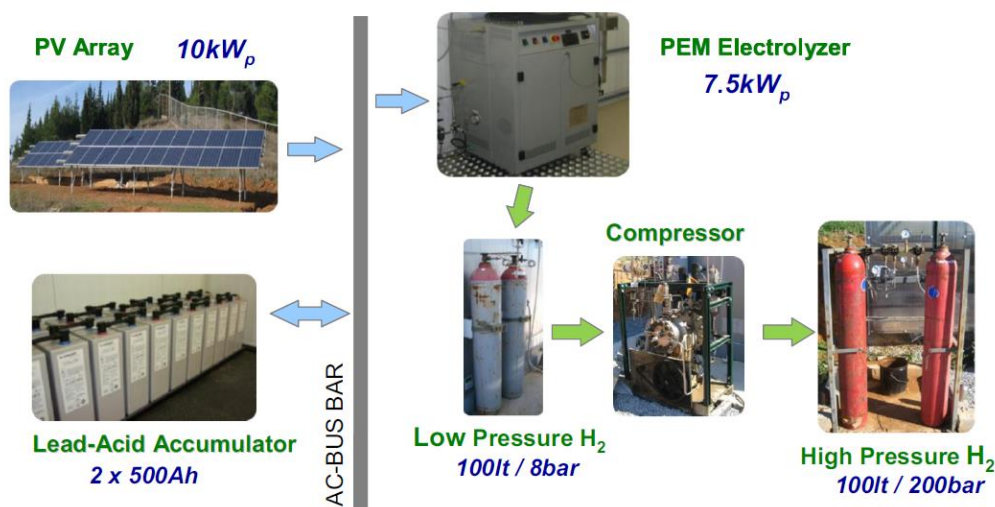
Για την εργασία με αγγλικό τίτλο “Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy” μελετήθηκαν ο σκοπός της εργασίας, η μεθοδολογία που ακολουθεί, καθώς και η σχετική περιγραφή του συστήματος με κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται παρακάτω .

Σκοπός

Σκοπός της συγκεκριμένης εργασίας είναι να παρουσιάσει μια ευέλικτη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας για μια μονάδα παραγωγής υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης νερού με χρήση ηλιακής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, η εργασία εμβαθύνει στην λειτουργία μίας ανανεώσιμης μονάδας παραγωγής υδρογόνου που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογίας Ελλάδας (ΕΚΕΤΑ), προτείνοντας μία ευέλικτη στρατηγική διαχείρισης ενέργειας με στόχο τόσο την παραγωγή υδρογόνου όσο και την προστασία συσσωρευτών.

Μεθοδολογία – Περιγραφή Συστήματος

Στην συγκεκριμένη εργασία, το υδρογόνο παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού όπου η απαιτούμενη ισχύς για την ηλεκτρόλυση παρέχεται από φωτοβολταϊκά και έναν συσσωρευτή μόλυβδου – οξέος (δύναται να φορτίζει από την περίσσεια ενέργειας). Όσον αφορά τον αλγόριθμο διαχείρισης ενέργειας, η λογική που αναφέρεται στην εν λόγω εργασία αφορά την διανομή και ρύθμιση της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας στην μονάδα ηλεκτρόλυσης, καθώς και στα βοηθητικά υποσυστήματα. Η συστοιχία φωτοβολταϊκών (PV) μέγιστης ισχύς 10 kW_p προμηθεύει ηλεκτρική ισχύ στην μονάδα ηλεκτρόλυσης τύπου PEM και ονομαστικής ισχύος 7.5 kW_p. Η εν λόγω μονάδα ηλεκτρόλυσης μπορεί να παρέχει έως και 8 bar υδρογόνου στην έξοδο της. Το παραγόμενο υδρογόνο αποθηκεύεται σε δεξαμενές σε υψηλή πίεση χρησιμοποιώντας έναν συμπιεστή μεταξύ μιας δεξαμενής που συνδέεται με την μονάδα ηλεκτρόλυσης και την τελική δεξαμενή αποθήκευσης. Προκειμένου να διατηρηθεί η ομαλή λειτουργία παρά τις διακυμάνσεις λόγω καιρικών συνθηκών, ο συσσωρευτής μόλυβδου – οξέος δύναται να αποθηκεύσει προσωρινά ηλεκτρική ενέργεια η οποία παρέχεται στο σύστημα όποτε χρειάζεται (έλλειμμα ενέργειας) με ελεγχόμενο τρόπο. Το Σχήμα 2.1 παρουσιάζει την σύνδεση των υποσυστημάτων.

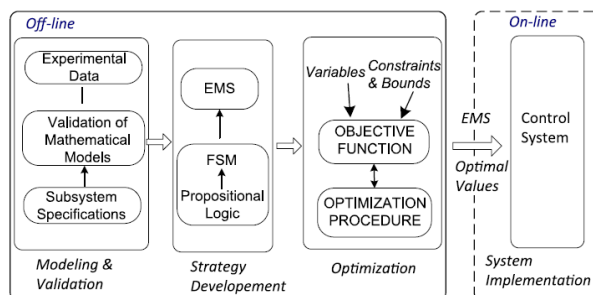


Σχήμα 2.1 Συνδεσιμότητα υποσυστημάτων

Πηγή: Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy

Υπάρχουν πολλές μεθοδολογίες που μπορούν να περιγράψουν μία στρατηγική διαχείρισης ενέργειας. Σε αυτή την εργασία, παρουσιάζεται μία μεθοδολογία που χρησιμοποιεί πεπερασμένα στοιχεία, καθώς και συστήματα αυτοματισμού που παρακολουθούν και ελέγχουν την μονάδα. Παρακάτω παρουσιάζεται το Σχήμα 2.2 η

αναπαράσταση του τρόπου με τον οποίο συνδέονται τα επιμέρους υποσυστήματα ώστε να φτάσουν στην τελική υλοποίηση και λειτουργία του συστήματος.



Σχήμα 2.2 Αναπαράσταση των εκτός και εντός σύνδεσης λειτουργιών του συστήματος

Πηγή: Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy

Πιο αναλυτικά, στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζονται λειτουργίες «εκτός σύνδεσης» του συστήματος οι οποίες μέσω μίας σειράς ενεργειών οδηγούν στην τελική υλοποίηση του συστήματος σε λειτουργία.

Οι «εκτός σύνδεσης» λειτουργίες αφορούν :

1. Την μοντελοποίηση και εξακρίβωση (validation) του συστήματος.
2. Ανάπτυξη της στρατηγικής διαχείρισης ενέργειας του συστήματος.
3. Βελτιστοποίηση.

Τα παραπάνω βήματα καθορίζουν την στρατηγική διαχείρισης ενέργειας του συστήματος και παρέχουν τις βέλτιστες τιμές στο σύστημα. Με άλλα λόγια, ο αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας ελέγχει την ικανότητα των υποσυστημάτων να λειτουργήσουν και να συνδεθούν μεταξύ τους. Δηλαδή, μέσω του αλγορίθμου γίνεται επίβλεψη της φόρτισης του συσσωρευτή (μεταξύ άλλων). Επίσης, γίνεται έλεγχος των ιδιοτήτων όπως η πίεση του ρυθμιστικού διαλύματος και της δεξαμενής για την επίβλεψη της αποδοτικότητας τους ανάλογα με τις συγκεκριμένες μετρήσεις. Για παράδειγμα, αν η πίεση της δεξαμενής είναι κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο όπως και αν το σημείο φόρτισης είναι κάτω από ένα ορισμένο επίπεδο, ο αλγόριθμος προσαρμόζει τις λειτουργίες του με στόχο την συνεχώς βέλτιστη λειτουργία του συστήματος.

Η αντικειμενική συνάρτηση του συστήματος παρουσιάζεται παρακάτω :

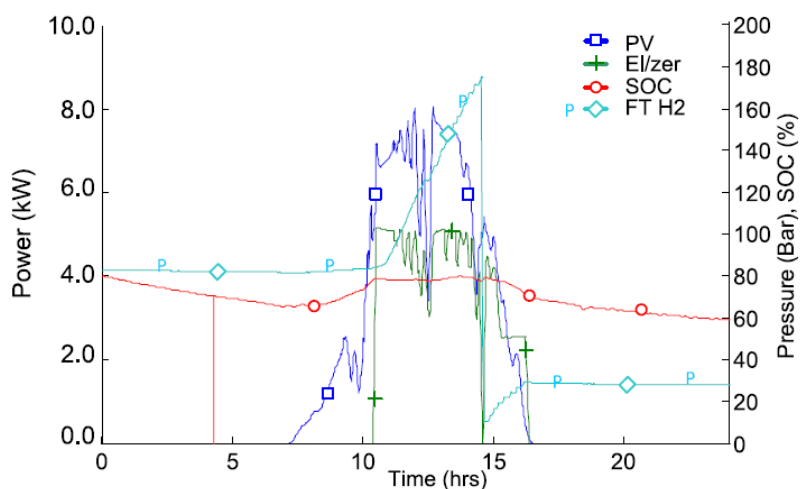
$$\min_{SOC_{el,on}, SOC_{el,off}, P_{bat,max}, P_{el,min}} J = \sum_{i=1}^n \frac{w_{loss} P_{loss}(i) + (w_{bat,cyc} Op_{bat,cyc}(i) + w_{el,cyc} Op_{el,cyc}(i))}{W_{H2,prod} H_{2,prod}(i)}$$

Όπου ,

- W_{loss} , $W_{bat,cyc}$, $W_{el,cyc}$, $W_{H2,prod}$ τα αντίστοιχα βάρη του υποσυστήματος στην αντικειμενική συνάρτηση
- P_{loss} η απώλεια φωτοβολταϊκής ισχύος σε J/s
- $Op_{bat,cyc}$ ο λόγος των κύκλων λειτουργίας του συσσωρευτή προς τους συνολικούς κύκλους λειτουργίας
- $Op_{el,cyc}$ οι κύκλοι λειτουργίας της μονάδας ηλεκτρόλυσης
- $H_{2,prod}$ η συνολική ποσότητα του παραγόμενου υδρογόνου σε Nm^3

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα

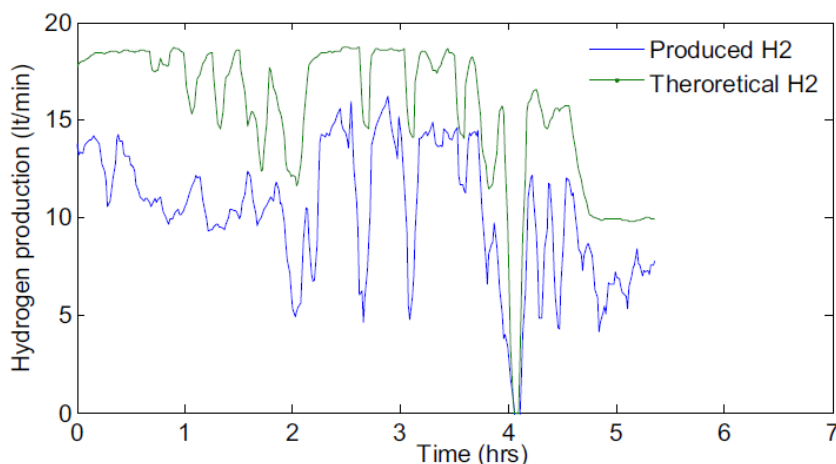
Παρακάτω παρουσιάζονται κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα του αλγορίθμου υπό συγκεκριμένες συνθήκες. Στο Σχήμα 2.3 παρουσιάζεται η απόδοση σε kW του συστήματος των φωτοβολταϊκών και του ηλεκτρολύτη όπως και τα ποσοστά της μπαταρίας αλλά και η πίεση της δεξαμενής του υδρογόνου κατά τη διάρκεια μιας συνεφιασμένης ημέρας.



Σχήμα 2.3 Ημερήσια απόδοση λειτουργιών σε συνεφιασμένη ημέρα.

Πηγή: Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy

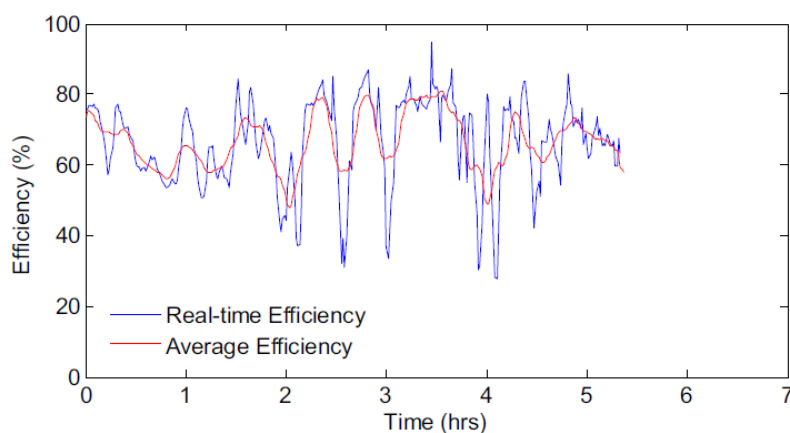
Στο Σχήμα 2.4 παρουσιάζεται η ημερήσια παραγωγή υδρογόνου σε σύγκριση με τη θεωρητική παραγωγή υδρογόνου που προκύπτει κατά τη διάρκεια μιας συνεφιασμένης ημέρας. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, οι τιμές παραγωγής του υδρογόνου (σε lt/min) που προκύπτουν σε μία ημέρα είναι σχεδόν σύμφωνες με αυτές που προέκυψαν σε θεωρητικό υπόβαθρο.



Σχήμα 2.4 Ημερήσια παραγωγή υδρογόνου σε συνεφιασμένη ημέρα.

Πηγή: Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy

Στο Σχήμα 2.5 γίνεται η ποσοστιαία παρουσίαση της απόδοσης του συστήματος κατά τη διάρκεια μιας συνεφιασμένης ημέρας σε σύγκριση με τον μέσο όρο όλων των αντίστοιχων αποδόσεων παραγωγής υδρογόνου του συστήματος. Όπως φαίνεται και πάλι, η καταγεγραμμένη απόδοση τη συγκεκριμένη ημέρα συμφωνεί σημαντικά με το ποσοστό που έχει δοθεί ως μέση απόδοση του συστήματος.



Σχήμα 2.5 Ημερήσια απόδοση παραγωγής υδρογόνου σε συνεφιασμένη ημέρα.

Πηγή: Optimal production of renewable hydrogen based on an efficient energy management strategy

2.2 «Βέλτιστος σχεδιασμός και λειτουργία υπό την αβεβαιότητα των συστημάτων ισχύος χρησιμοποιώντας ανανεώσιμες πηγές ενέργειες και αποθήκευση υδρογόνου»

Για την εργασία με τίτλο «Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage» μελετήθηκαν και καταγράφηκαν, ο σκοπός της εργασίας, η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται μαζί με μία σύντομη περιγραφή του συστήματος αλλά και κάποια ενδεικτικά αποτελέσματα όπως παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Σκοπός

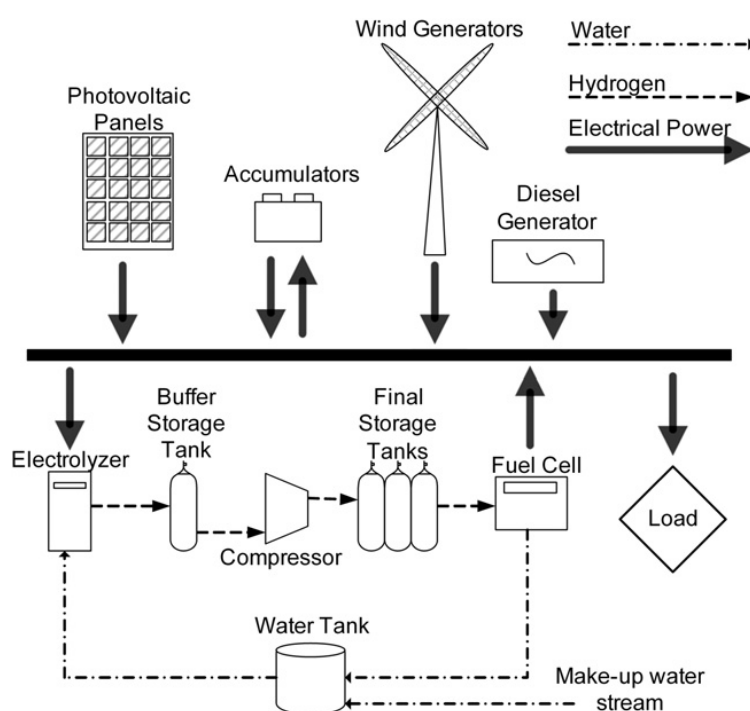
Η συγκεκριμένη εργασία αναφέρεται στο σχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση ενός συστήματος ενέργειας, υπό την αβεβαιότητα που προκαλείται από τα συστήματα παραγωγής ενέργειας (π.χ. διακύμανση ηλιακής ακτινοβολίας, ταχύτητας ανέμου), κάνοντας χρήση ΑΠΕ και αποθήκες υδρογόνου. Έτσι, προτείνεται μια συστηματική προσέγγιση που επιτρέπει την ταυτόχρονη εξέταση των πολλών υποσυστημάτων εντός του συστήματος παραγωγής ενέργειας.

Μεθοδολογία – Περιγραφή συστήματος

Το σύστημα ισχύος που παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.6, αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, μια σειρά συσσωρευτών, μία μονάδα ηλεκτρόλυσης, μία κυψέλη καυσίμου, μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου, μία συμβατική γεννήτρια τροφοδοσίας ντίζελ και έναν συμπιεστή. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζεται η διασύνδεση του συστήματος.

Από τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες και τις ανεμογεννήτριες παράγεται ηλεκτρική ενέργεια και ένα μέρος της παραγόμενης ενέργειας καταναλώνεται άμεσα για να εξυπηρετήσει τις ανάγκες του συστήματος. Στην περίπτωση που οι καιρικές συνθήκες είναι ευνοϊκές, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας υπερβαίνει τις απαιτήσεις του συστήματος για ενέργεια και αυτή μπορεί να αποθηκευτεί και να χρησιμοποιηθεί σε περιόδους ελλείμματος ενέργειας (π.χ. όταν οι ΑΠΕ δεν επαρκούν για την κάλυψη των αναγκών του συστήματος). Τα υποσυστήματα αποθήκευσης περιλαμβάνουν συσσωρευτές στους οποίους γίνεται άμεση αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και μονάδες βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης αποθήκευσης υδρογόνου. Το υδρογόνο παράγεται στην μονάδα ηλεκτρόλυσης και στη συνέχεια αποθηκεύεται σε χαμηλή πίεση. Όταν θα υπάρξει επαρκής πίεση (π.χ. 7-10bar), θα

λειτουργήσει ο συμπιεστής και θα μεταφέρει το υδρογόνο στις τελικές δεξαμενές αποθήκευσης. Στην περίπτωση που η παραγόμενη αιολική ή ηλιακή ενέργεια δεν επαρκεί, η ισχύς που απαιτείται για την κάλυψη των απαιτήσεων του συστήματος μπορεί να παρέχεται από τους συσσωρευτές, την κυψέλη καυσίμου και από τη γεννήτρια ντίζελ. Η ύπαρξη πολλαπλών υποσυστημάτων απαιτείται για τη λειτουργία του συστήματος καθώς αυτό δίνει τη δυνατότητα στο σύστημα να εξετάζει πολλούς πιθανούς συνδυασμούς οι οποίοι επηρεάζουν με τη σειρά τους την απόδοση του συστήματος. Η συγκεκριμένη λογική θα εφαρμοστεί και στην παρούσα διπλωματική εργασία.



Σχήμα 2.6 Ροή του συστήματος.

Πηγή: Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage

Η αντικειμενική συνάρτηση του συστήματος που αναπτύχθηκε είναι (σε μονάδες ευρώ) :

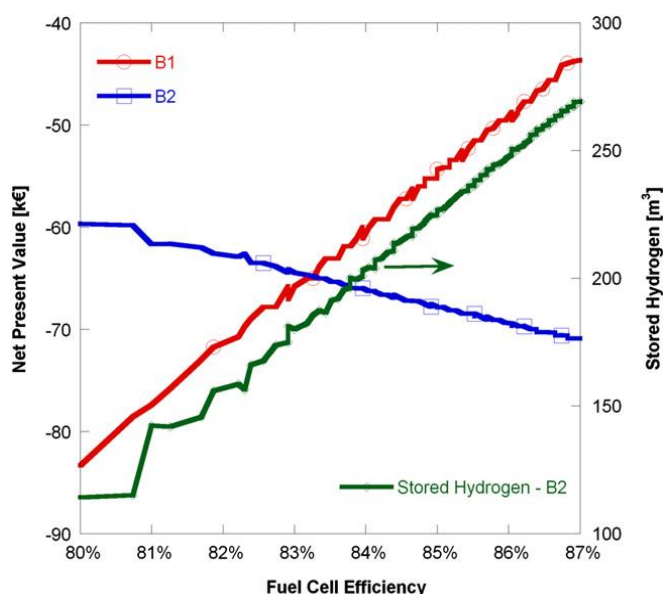
$$f = \sum_{i=0}^{yol} \frac{C_i}{(1+p)^i} + pen$$

Όπου , $C_i = C_{pur,i} + C_{installation,i} + C_{o\&m,i} + C_{replacement,i} - C_{g_equiv,i}$

- C_i , συνολικό κόστος για το έτος i
- $C_{pur,i}$, κόστος αγοράς για το έτος i
- $C_{installation,i}$, κόστος εγκατάστασης για το έτος i
- $C_{o\&m,i}$, κόστος λειτουργίας και συντήρησης για το έτος i
- $C_{replacement,i}$, κόστος αντικατάστασης για το έτος i
- $C_{g_equiv,i}$, ισοδύναμο κόστος αγοράς ενέργειας από το δίκτυο για το έτος i
- p , επιτόκιο
- pen , ποινές που καθορίζονται από το χρήστη

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα

Στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η προσομοίωση της οικονομικής συμπεριφοράς των συστημάτων σχεδιασμού που προέκυψαν στις περιπτώσεις B1 (χωρίς αβεβαιότητα) και B2 (με αβεβαιότητα στην ηλιακή ακτινοβολία, ταχύτητα ανέμου, ηλεκτρόλυση). Παρουσιάζεται επίσης, η ποσότητα ενέργειας που μετατρέπεται σε υδρογόνο και αποθηκεύεται σε δεξαμενές μακροχρόνιας αποθήκευσης. Στην περίπτωση B1, η μείωση της απόδοσης της κυψέλης καυσίμου οδηγεί σε ταχεία επιδείνωση της καθαρής παρούσας αξίας. Από την άλλη, στην περίπτωση B2 με την μείωση της αποδοτικότητας της κυψέλης καυσίμου, βελτιώνεται η λαμβανόμενη καθαρή παρούσα αξία (NPV).



Σχήμα 2.7 Σύγκριση των οικονομικών επιδόσεων στις περιπτώσεις B1 και B2.

Πηγή: Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage

2.3 «Βελτιστοποίηση των στρατηγικών ελέγχου σε αυτόνομα συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αποθήκευση υδρογόνου»

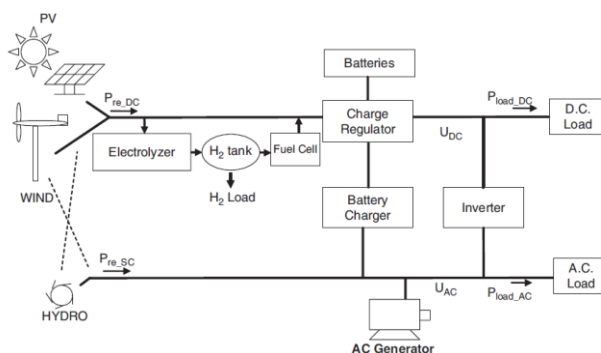
Στην αναφερόμενη εργασία της βιβλιογραφίας μελετήθηκαν και στη συνέχεια παρουσιάστηκαν τα στοιχεία αυτής που αφορούν, τον σκοπό της εργασίας, τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε μαζί με μία σύντομη περιγραφή του συστήματος και κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

Σκοπός

Στη συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται μια νέα στρατηγική διαχείρισης ενέργειας η οποία βελτιστοποιείται μέσω γενετικών αλγορίθμων με σκοπό τον έλεγχο αυτόνομων ανανεώσιμων συστημάτων με αποθήκευση υδρογόνου. Η βελτιστοποίηση των διάφορων παραμέτρων ελέγχου του συστήματος γίνεται με χρήση γενετικών αλγορίθμων καθώς στην εργασία αυτή γίνεται περιγραφή της συγκεκριμένης στρατηγικής που αναπτύχθηκε και την εφαρμογή της σε ένα σύστημα PV-ντίζελ-μπαταρίας-υδρογόνου. Μέσω της στρατηγικής ελέγχου, ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους. Ταυτόχρονα, η στρατηγική ελέγχου βελτιστοποιεί τον τρόπο αξιοποίησης ενέργειας στο σύστημα και καθορίζει τον πιο οικονομικό τρόπο για την κάλυψη των αναγκών του συστήματος.

Μεθοδολογία – Περιγραφή συστήματος

Το υβριδικό σύστημα που χρησιμοποιείται προκειμένου να εξηγηθεί η στρατηγική ελέγχου που περιγράφεται στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζεται παρακάτω στο Σχήμα 2.8



Σχήμα 2.8 Στρατηγική ελέγχου υβριδικού συστήματος.

Πηγή: Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage

Το υβριδικό σύστημα περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, μπαταρίες, ρυθμιστή φόρτισης, υδροστρόβιλο, γεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος, φορτιστή μπαταρίας, κυψέλη καυσίμου, δεξαμενή υδρογόνου και μονάδα ηλεκτρόλυσης. Η κυψέλη καυσίμου μπορεί είτε να τροφοδοτηθεί από το υδρογόνο που έχει ήδη παραχθεί μέσω των ΑΠΕ είτε από αγορά του υδρογόνου εκτός συστήματος.

Στην εργασία αναπτύχθηκαν δύο γενετικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία σχεδιασμού, ο κύριος και ο δευτερεύων. Ο κύριος, αναζητά πιθανές λειτουργίες του υβριδικού συστήματος ενώ ο δευτερεύων αναζητά την καλύτερη στρατηγική για κάθε μία από τις λειτουργίες που έγιναν από τον κύριο αλγόριθμο. Οι δύο αλγόριθμοι εργάζονται ταυτόχρονα προκειμένου να καταλήξουν στην βέλτιστη διαμόρφωση των εξαρτημάτων και στην καλύτερη στρατηγική ελέγχου. Η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση σε όλη τη διαδικασία της βελτιστοποίησης, αφορά το συνολικό καθαρό κόστος του συστήματος (NPC). Αυτό το κόστος αντιπροσωπεύει το επενδυτικό κόστος συν τις προ εξοφλημένες παρούσες αξίες όλων των μελλοντικών δαπανών κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος.

Η αντικειμενική συνάρτηση που αφορά τον κύριο αλγόριθμο είναι :

$$f_{MAIN} = \frac{(N_m + 1) - i}{\sum_{j=1}^{N_m} [(N_m + 1) - j]}$$

Η αντικειμενική συνάρτηση που αφορά τον δευτερεύον αλγόριθμο είναι :

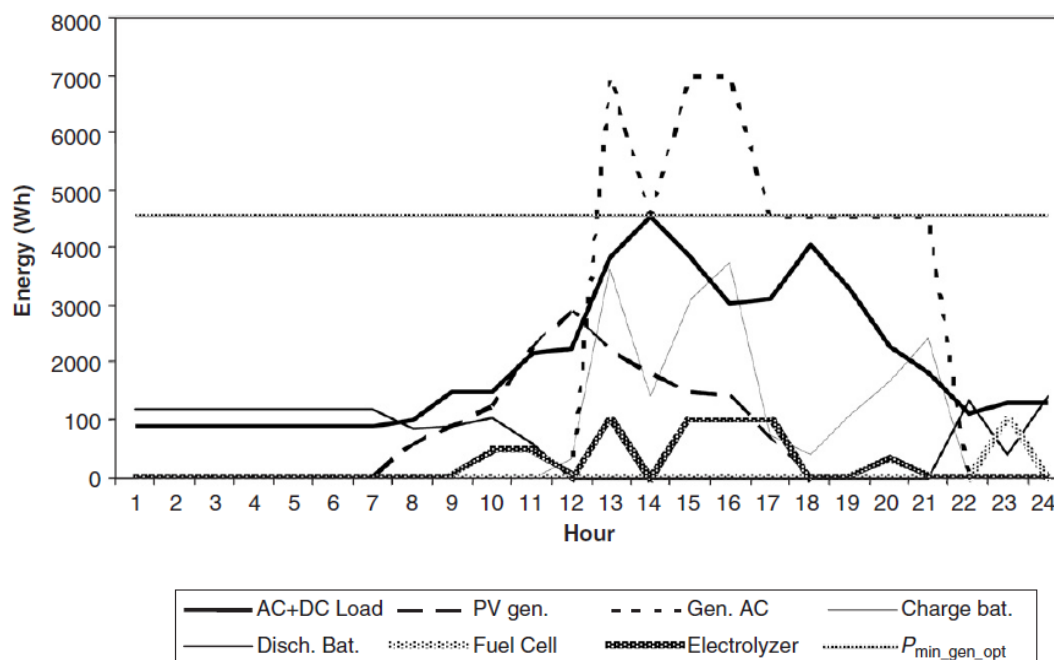
$$f_{SEC} = \frac{(N_{sec} + 1) - i}{\sum_{j=1}^{N_{sec}} [(N_{sec} + 1) - j]}$$

Όπου ,

- N_m , N_{sec} , πληθυσμός του κύριου και δευτερεύον αλγορίθμου αντίστοιχα
- i τύπος κυψέλης καυσίμου
- j τύπος ηλεκτρολύτη

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα

Στο Σχήμα 2.9 παρουσιάζεται η ωριαία κατανομή των φορτίων που καταγράφηκαν μέσω προσομοίωσης που ολοκληρώθηκε μια συγκεκριμένη ημέρα και αποτελούν αποτελέσματα μέσω βελτιστοποίησης.



Σχήμα 2.9 Ημερήσια αποτελέσματα προσομοίωσης .

Πηγή: Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage

2.4 «Μελέτη ενός συστήματος παραγωγής υδρογόνου με τη χρήση φωτοβολταϊκών ηλιακής ενέργειας και ηλεκτρολύτη πολυμερούς μεμβράνης στην Αλγερία»

Για την συγκεκριμένη εργασία, μελετήθηκαν και στη συνέχεια καταγράφηκαν κάποια χαρακτηριστικά αυτής που αφορούν , τον σκοπό σύνταξης της εργασίας , τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με μία σύντομη περιγραφή του συστήματος όπως και κάποια χαρακτηριστικά της αποτελέσματα. Τα στοιχεία αυτά παρουσιάζονται πιο αναλυτικά στη συνέχεια.

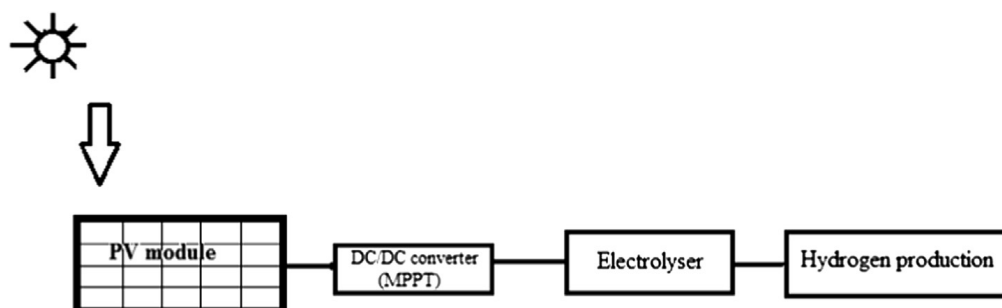
Σκοπός

Σκοπός της εργασίας αυτής είναι να διερευνηθούν οι τεχνικές δυνατότητες ενός συστήματος ηλεκτρόλυσης πολυμερικής μεμβράνης (PEM) στην παραγωγή υδρογόνου. Πιο αναλυτικά, η μελέτη έδωσε εκτιμήσεις σχετικά με την ποσότητα υδρογόνου που μπορεί να παραχθεί από αυτό το σύστημα σε έξι διαφορετικές

τοποθεσίες χρησιμοποιώντας παγκόσμιες ηλιακές ακτινοβολίες σε ωριαία συχνότητα. Πρωταρχικός στόχος της μελέτης ήταν να αναπτυχθεί ένα μαθηματικό μοντέλο συστήματος παραγωγής υδρογόνου συμπεριλαμβανομένων και της φωτοβολταϊκής μονάδας και του ηλεκτρολύτη PEM προκειμένου να αναλυθεί η απόδοση του συστήματος. Ως δευτερεύον στόχος της μελέτης ορίστηκε η επιμέρους σύγκριση της απόδοσης του συστήματος αναφορικά με την παραγωγή υδρογόνου σε επτά διαφορετικές τοποθεσίες της Αλγερίας.

Μεθοδολογία – Περιγραφή συστήματος

Τα κύρια συστατικά του φωτοβολταϊκού συστήματος υδρογόνου είναι η φωτοβολταϊκή γεννήτρια και η μονάδα ηλεκτρόλυσης. Το σύστημα παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.10 με μία σχηματική απεικόνιση .



Σχήμα 2.10 Σχηματική απεικόνιση φωτοβολταϊκού συστήματος υδρογόνου.

Πηγή: Study of hydrogen production system by using PV solar energy and PEM electrolyzer in Algeria

Για να προσομοιωθεί η φωτοβολταϊκή μονάδα με την μονάδα ηλεκτρόλυσης, είναι απαραίτητη η γνώση των χαρακτηριστικών ρεύματος τάσης των φωτοβολταϊκών μονάδων. Στην συγκεκριμένη εργασία, γίνεται χρήση ενός μοντέλου προκειμένου να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά των καμπυλών της φωτοβολταϊκής μονάδας. Αυτό το μοντέλο απαιτεί τέσσερις παραμέτρους εισόδου που σχετίζονται με τις συνθήκες αναφοράς :

1. Ρεύμα βραχυκύκλωσης $I_{sc,ref}$
2. Τάση ανοικτού κυκλώματος $V_{oc,ref}$
3. Μέγιστο ρεύμα ισχύος της μονάδας $I_{max,ref}$
4. Μέγιστη τάση ισχύος της μονάδας $V_{max,ref}$

Κατά τη διάρκεια αυτής της λειτουργίας του συστήματος , θεωρούνται δύο περιπτώσεις :

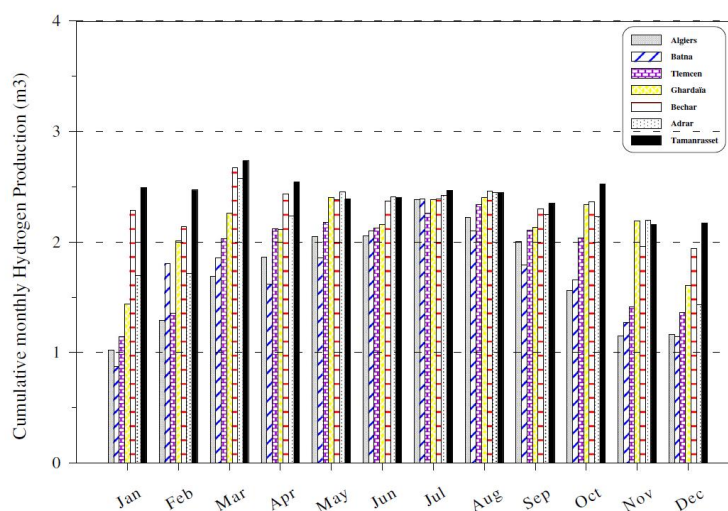
- Η ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι μικρότερη ή ίση με την ισχύ που απαιτείται από την μονάδα ηλεκτρόλυσης. Σε αυτήν την

περίπτωση, η ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια δίνεται πλήρως στην παραγωγή υδρογόνου.

- Η ισχύς που παράγεται από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια είναι μεγαλύτερη από αυτήν που απαιτείται για την τροφοδοσία στην μονάδα ηλεκτρόλυσης. Σε αυτήν την περίπτωση, η ισχύς που έχει παραχθεί σε μεγαλύτερη βαθμό από τη φωτοβολταϊκή γεννήτρια θα χαθεί.

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα

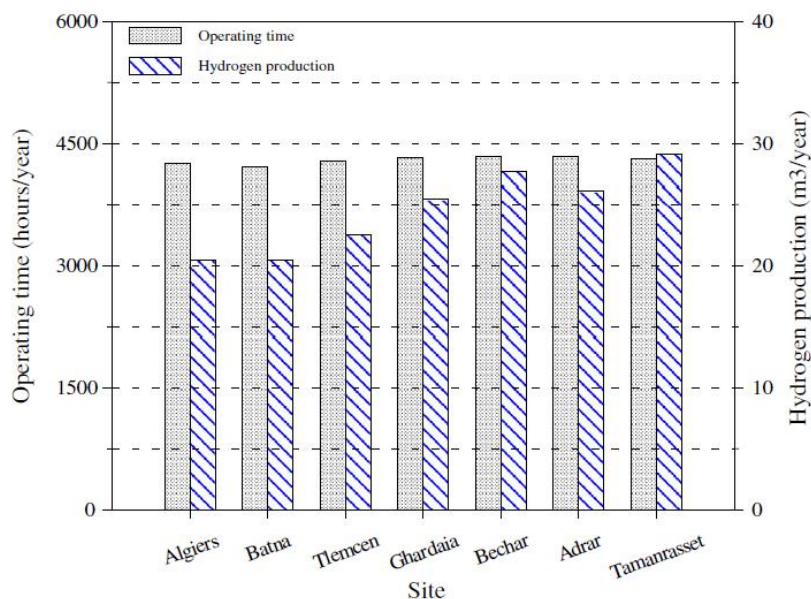
Στο Σχήμα 2.11 παρουσιάζεται η μηνιαία διακύμανση των ποσοτήτων παραγωγής υδρογόνου από το σύστημα σε διαφορετικές τοποθεσίες. Όπως φαίνεται από το σχήμα, η μέγιστη τιμή της παραγωγής υδρογόνου συμβαίνει στη νότια περιοχή. Για τη βόρεια περιοχή μπορεί να παρατηρηθεί ότι η παραγωγή υδρογόνου δεν είναι ομοιόμορφη κατά τη διάρκεια του έτους. Επιπλέον, φαίνεται πως κατά τους χειμερινούς μήνες η παραγωγή υδρογόνου είναι μικρότερη από τους υπόλοιπους μήνες.



Σχήμα 2.11 Μηνιαία παραγωγή υδρογόνου στο σύστημα.

Πηγή: Study of hydrogen production system by using PV solar energy and PEM electrolyzer in Algeria

Στο Σχήμα 2.12 παρουσιάζεται η ετήσια παραγωγική ικανότητα, η ποσότητα του παραγόμενου υδρογόνου για διαφορετικές τοποθεσίες. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν ότι η υψηλότερη παραγόμενη ποσότητα υδρογόνου μπορεί να προκύψει από τοποθεσίες με υψηλή ηλιακή ακτινοβολία και οι ώρες λειτουργίας του συστήματος κυμαίνονται μεταξύ 4.200 - 4.350 συνολικά στο έτος.



Σχήμα 2.12 Σύγκριση ετήσιας παραγωγής υδρογόνου σε διαφορετικές τοποθεσίες.

Πηγή: Study of hydrogen production system by using PV solar energy and PEM electrolyzer in Algeria

2.5 «Τεχνικό - οικονομική ανάλυση ενός εκτός-δικτύου συστήματος φωτοβολταϊκών για κοινότητα σε περιοχή της ερήμου»

Αντίστοιχα για αυτήν την εργασία μελετήθηκαν και καταγράφηκαν στη συνέχεια κάποια από τα χαρακτηριστικά της που αφορούν, τον σκοπό σύνταξης της εργασίας, τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε μαζί με μια σύντομη περιγραφή του συστήματος όπως και κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

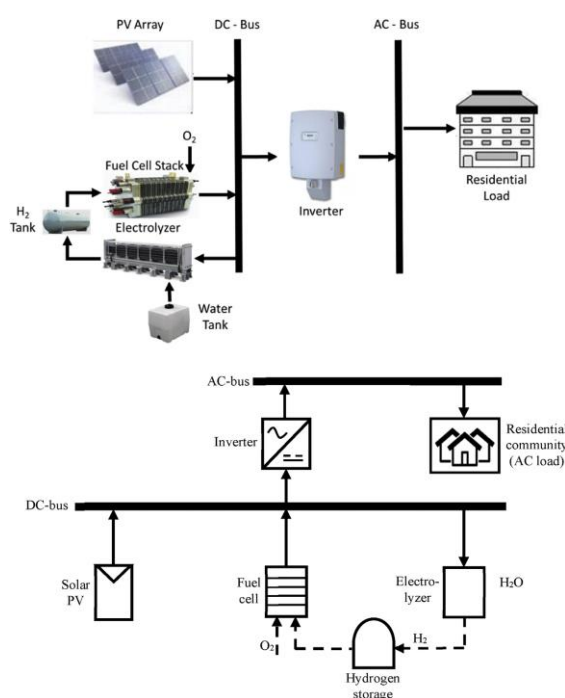
Σκοπός

Στην εργασία αυτή αναπτύχθηκε μια τεχνικό – οικονομική ανάλυση με στόχο τη σχεδίαση ενός υβριδικού συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ο κύριος στόχος της εργασίας ήταν ένας βελτιστοποιημένος σχεδιασμός και ανάπτυξη των στρατηγικών ελέγχου ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος ΑΠΕ προκειμένου να επιτευχθεί η κάλυψη του επιθυμητού φορτίου ηλεκτρικής ενέργειας μιας κοινότητας που βρίσκεται σε περιοχή της ερήμου. Ο ουσιαστικός στόχος του προτεινόμενου συστήματος είναι ένταξη τέτοιου είδους συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με απώτερο σκοπό τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου από την καύση

ορυκτών καυσίμων. Σε αυτή τη μελέτη επίσης προσδιορίστηκε η απόδοση και το κόστος του προτεινόμενου υβριδικού συστήματος ανανεώσιμης ενέργειας.

Μεθοδολογία – Περιγραφή συστήματος

Το προτεινόμενο σύστημα ισχύος βασίζεται σε φωτοβολταϊκά και κυψέλες καυσίμου με βάση το υδρογόνο τροφοδοτώντας ένα φορτίο εναλλασσόμενου ρεύματος για ένα μέρος μιας οικιστικής κοινότητας. Το υδρογόνο, απαραίτητο για τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, παράγεται από μία μονάδα ηλεκτρόλυσης και στη συνέχεια αποθηκεύεται σε φιάλες αποθήκευσης. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης λειτουργεί με χρήση της ισχύος που παράγεται από το σύστημα. Η μετατροπή DC σε AC ολοκληρώνεται με έναν μετατροπέα. Η σύνδεση του συστήματος με τον δίαυλο DC είναι απαραίτητη προκειμένου να μεταφερθεί η ενέργεια στον μετατροπέα. Μέσω αυτής της μετατροπής από DC σε AC, ικανοποιείται η ζήτηση σε εναλλασσόμενο ρεύμα για την κάλυψη των αναγκών των κατοικιών. Παράλληλα, ο δίαυλος DC χρησιμοποιείται για την ικανοποίηση της μονάδας ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή του υδρογόνου. Το αναφερόμενο σύστημα περιγράφεται σχηματικά στο Σχήμα 2.13.



Σχήμα 2.13 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος.

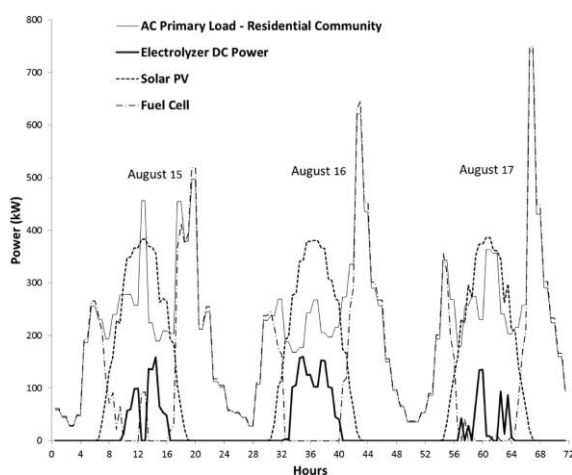
Πηγή: Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region

Στη μελέτη αυτή, γίνεται ανάλυση βελτιστοποίησης προκειμένου να βρεθεί η καλύτερη δυνατή διαμόρφωση του υβριδικού συστήματος ενέργειας με βάση του επιθυμητούς περιορισμούς στο χαμηλότερο συνολικό καθαρό κόστος. Ο δείκτης επιδόσεων ορίζεται ως το κόστος κύκλου ζωής ή το κόστος ενέργειας. Το κόστος ενέργειας λαμβάνει υπόψη το κόστος κεφαλαίου, το κόστος λειτουργίας

συντήρησης, το κόστος καυσίμων, το κόστος αντικατάστασης και τα έσοδα από την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται.

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα

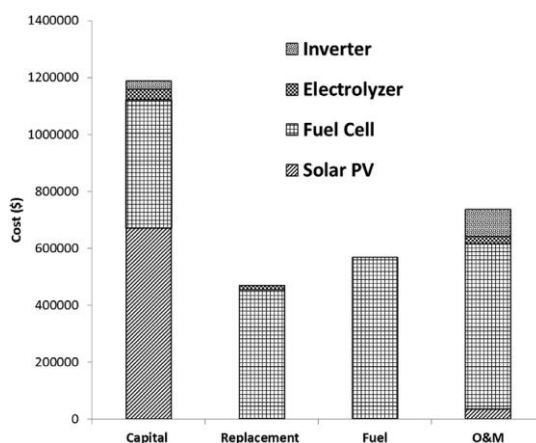
Στο Σχήμα 2.14 παρουσιάζεται η απόδοση του συστήματος. Τα αποτελέσματα δείχνουν τα φορτία που απαιτούνται για την ορθή εκτέλεση του συστήματος για 72 ώρες τον Αύγουστο όπου η κατανάλωση ενέργειας είναι υψηλή. Φαίνεται πως το μεγαλύτερο μέρος παραγωγής ενέργειας κατά τη διάρκεια της ημέρα προέρχεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ ενώ κατά τη διάρκεια της νύχτας από την κυψέλη καυσίμου.



Σχήμα 2.14 Ημερήσια απόδοση του συστήματος για 72 ώρες.

Πηγή: Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region

Στο Σχήμα 2.15 παρουσιάζεται το συνολικό κόστος του συστήματος συμπεριλαμβανομένων όσων ήδη αναφέρθηκαν.



Σχήμα 2.15 Συνολικό κόστος συστήματος.

Πηγή: Technico-economic analysis of off grid solar PV/Fuel cell energy system for residential community in desert region

2.6 «Σχεδιασμός προ-υλοποίησης και προσομοίωση υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών/κυψελών καυσίμου για την εφαρμογή σε μονάδες αφαλάτωσης»

Στην συγκεκριμένα εργασία, μελετήθηκε το αντικείμενο ανάλυσης και έπειτα καταγράφηκαν κάποια από τα χαρακτηριστικά της εν συντομία. Τα στοιχεία αυτά που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν, το σκοπό της μελέτης, τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε όπως και μια σύντομη περιγραφή του συστήματος αλλά και κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

Σκοπός

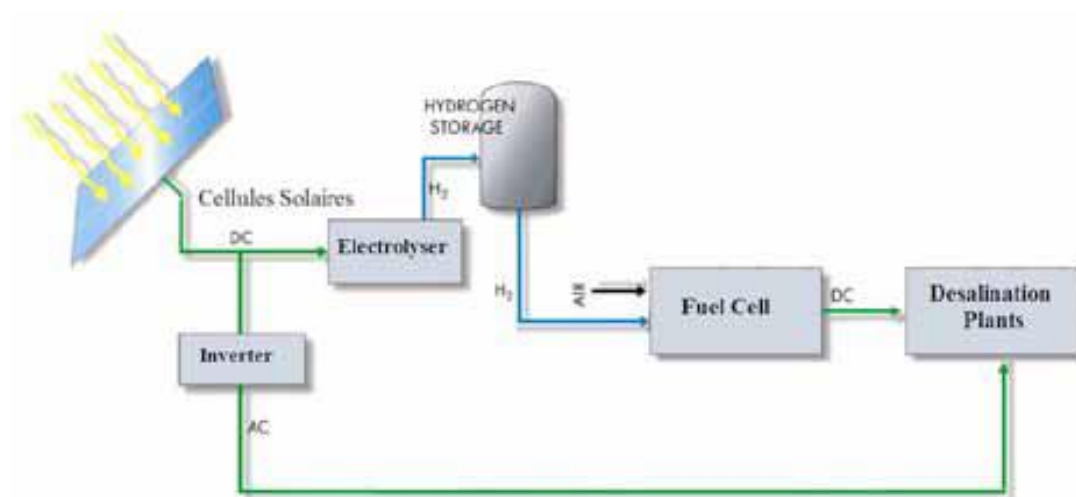
Στην παρούσα εργασία, σχεδιάζεται και προσομοιώνεται ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών και κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιεί μία μονάδα ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή υδρογόνου. Το σύστημα αυτό, εφαρμόζεται σε μονάδες αφαλάτωσης. Αυτές οι δύο καθαρές πηγές ενέργειας μπορούν να συνδεθούν με διάφορους τρόπους. Σε αυτή την εργασία μελετώνται τρεις περιπτώσεις :

- Δύο περιπτώσεις όπου η εγκατάσταση παράγει η ίδια υδρογόνο.
- Μία περίπτωση όπου τροφοδοτείται υδρογόνο από εξωτερική πηγή.

Συνεπώς, ο στόχος είναι να εκτιμηθεί το κόστος της κιλοβατώρας και να εκτιμηθεί και η διάρκεια ζωής των εγκαταστάσεων αυτών.

Μεθοδολογία – Περιγραφή συστήματος

Στη διαμόρφωση που μελετήθηκε, το πλεόνασμα της ηλιακής ενέργειας κατά προτεραιότητα χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου. Σε περίπτωση χαμηλής ηλιοφάνειας, η μπαταρία θα παρέχει ενέργεια. Το σύστημα που μελετάται, παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.16. Όπως φαίνεται και από το σχήμα, τα φωτοβολταϊκά παρέχουν ηλεκτρική ενέργεια στο φορτίο και με την περίσσεια ενέργειας παράγεται υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης. Αυτό το υδρογόνο χρησιμοποιείται από μονάδες κυψελών καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας σε περίπτωση απουσίας ηλιακής ενέργειας, όπως τις βραδινές ώρες.

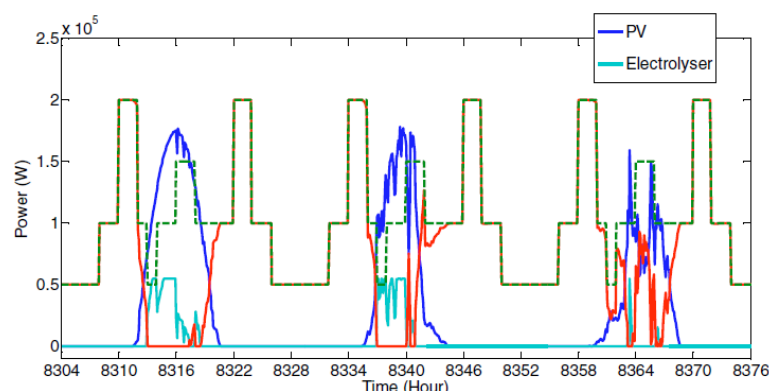


Σχήμα 2.16 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος.

Πηγή: Pre-Feasibility Design and Simulation of Hybrid PV/Fuel Cell Energy System for Application to Desalination Plants Loads

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα

Στο Σχήμα 2.17 παρουσιάζεται η ροή ισχύος που προέκυψαν κατά τη διάρκεια μιας ημέρας του καλοκαιριού.



Σχήμα 2.17 Αποτελέσματα προσομοίωσης της ροής ισχύος

Πηγή: Pre-Feasibility Design and Simulation of Hybrid PV/Fuel Cell Energy System for Application to Desalination Plants Loads

2.7 «Πρόβλεψη επιδόσεων ενός συστήματος παραγωγής υδρογόνου με βάση την τεχνολογία φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων»

Για την παρούσα εργασία της βιβλιογραφίας μελετήθηκαν και ύστερα καταγράφηκαν κάποια στοιχεία του ερευνητικού αντικειμένου. Όσα στοιχεία

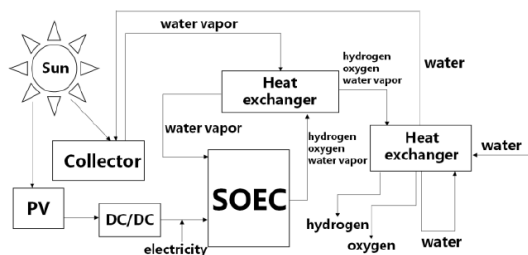
αναλύονται στη συνέχεια της ενότητας αφορούν, το σκοπό της μελέτης , τη μεθοδολογία που εφαρμόστηκε μαζί με μία σύντομη περιγραφή του συστήματος και τέλος κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

Σκοπός

Εξαιτίας της ταχείας ανάπτυξης της τεχνολογίας παραγωγής υδρογόνου με τη χρήση ηλιακής ενέργειας , η έρευνα για την κυψέλη ηλεκτρόλυσης SOEC και το φωτοβολταϊκό/θερμικό σύστημα είναι πλέον απαραίτητη. Τόσο η ηλιακή ενέργεια όσο και η ενέργεια υδρογόνου είναι φιλικές προς το περιβάλλον και μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους μέσω ηλεκτρικής ενέργειας ή θερμότητας. Η τεχνολογία παραγωγής ηλιακής θερμικής ενέργειας και η τεχνολογία παραγωγής φωτοβολταϊκής ενέργειας είναι οι δύο πιο συνηθισμένοι τρόποι χρήσης της ηλιακής ενέργειας. Παράλληλα, η παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση απαιτεί μεγάλη ποσότητα ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας. Στην παρούσα μελέτη , προτείνεται ένα πλάνο σχεδιασμού και ύστερα γίνεται πρόβλεψη της απόδοσής του για ένα σύστημα παραγωγής υδρογόνου που βασίζεται στην τεχνολογία φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων.

Μεθοδολογία – Περιγραφή συστήματος

Για την παρούσα μελέτη σχεδιάστηκε το διάγραμμα ροής του συστήματος παραγωγής υδρογόνου με βάση την τεχνολογία φωτοβολταϊκών/θερμικών συστημάτων και το οποίο παρουσιάζεται στο *Σχήμα 2.18* . Το σύστημα αποτελείται κυρίως από μονάδα ηλεκτρόλυσης SOEC, συλλέκτη ηλιακής θερμότητας, φωτοβολταϊκό πάνελ και δύο εναλλάκτες θερμότητας. Κατά τη διαδικασία λειτουργίας του συστήματος, το φωτοβολταϊκό πάνελ λαμβάνει την ακτινοβολία του ηλιακού φωτός παράγοντας έτσι ηλεκτρική ενέργεια. Στη συνέχεια , η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται στην μονάδα ηλεκτρόλυσης. Ο ηλιακός συλλέκτης παράγει υδρατμούς για να παρέχει τη θερμότητα που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση (ενδοθερμική διεργασία). Η μονάδα ηλεκτρόλυσης SOEC παράγει υδρογόνο και οξυγόνο μέσω ηλεκτρόλυσης και η επιπλέον θερμότητα που προκύπτει κατά την έξοδο του αερίου υψηλής θερμοκρασίας, συλλέγεται από τον εναλλάκτη θερμότητας. Η καινοτομία του συστήματος αυτού έγκειται στο ότι το υδρογόνο, το οξυγόνο και οι υδρατμοί από την μονάδα ηλεκτρόλυσης απελευθερώνουν θερμότητα στον εναλλάκτη θερμότητας για να κρυώσουν και στη συνέχεια εισέρχονται στον δεύτερο εναλλάκτη θερμότητας για να απελευθερώσουν την υπολειπόμενη θερμότητα. Το διαχωριζόμενο νερό και το νερό αναπλήρωσης θερμαίνονται στους εναλλάκτες θερμότητας και στον συλλέκτη θερμότητας και στην συνέχεια εισέρχονται στην μονάδα ηλεκτρόλυσης.

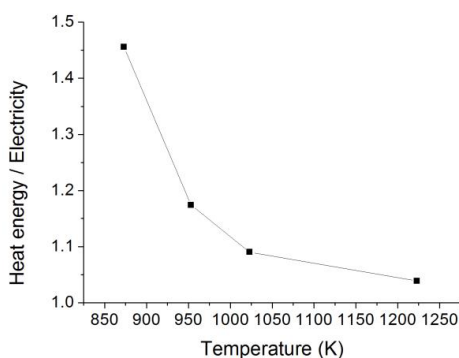


Σχήμα 2.18 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος.

Πηγή: Performance Prediction of a Hydrogen Production System Based on PV/T Technology

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα

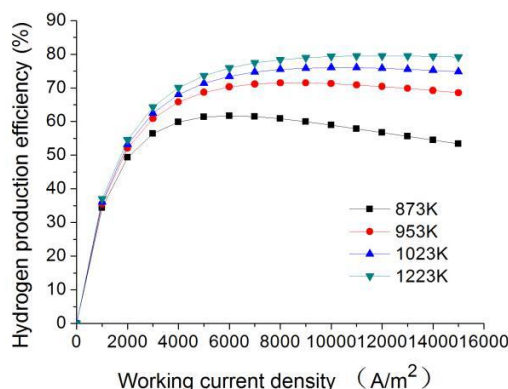
Στο Σχήμα 2.19 παρουσιάζεται το ποσοστό της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής ενέργειας προς τη θερμική ενέργεια. Φαίνεται, ότι η αναλογία της καταναλισκόμενης ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και σταδιακά μεταβάλλεται σε ίση τιμή. Με άλλα λόγια, η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται ανά μονάδα παραγωγής υδρογόνου στην κυψέλη υψηλής θερμοκρασίας είναι μικρότερη από εκείνη στην κυψέλη χαμηλής θερμοκρασίας.



Σχήμα 2.19 Μεταβολή του λόγου καταναλισκόμενης ενέργειας με θερμοκρασία.

Πηγή: Performance Prediction of a Hydrogen Production System Based on PV/T Technology

Στο Σχήμα 2.20 παρουσιάζεται η μεταβολή της απόδοσης παραγωγής υδρογόνου με την πυκνότητα του ρεύματος. Φαίνεται πως όταν η μονάδα ηλεκτρόλυσης βρίσκεται σε υψηλή θερμοκρασία, η ενεργειακή απόδοση του συστήματος συνεχίζει να αυξάνεται και μπορεί να φτάσει μέχρι περίπου το 80% όπου στη συνέχεια μειώνεται σταδιακά.



Σχήμα 2.20 Μεταβολή της απόδοσης παραγωγής υδρογόνου με την πυκνότητα ρεύματος.

Πηγή: Performance Prediction of a Hydrogen Production System Based on PV/T Technology

2.8 «Στρατηγικές βελτιστοποίησης μίας μονάδα ηλεκτρόλυσης τύπου PEM ως μέρος ενός ηλιακού φωτοβολταϊκού συστήματος»

Για την αναφερόμενη εργασία της βιβλιογραφίας, μελετήθηκε το αντικείμενο της έρευνας της και ύστερα καταγράφηκαν βάση αυτών κάποια στοιχεία. Τα χαρακτηριστικά στοιχεία της εργασίας παρουσιάζονται παρακάτω στην ενότητα και αφορούν, τον σκοπό της μελέτης, την μεθοδολογία που ακολουθήθηκε με μια σύντομη περιγραφή του συστήματος αλλά και κάποια χαρακτηριστικά αποτελέσματα που προέκυψαν.

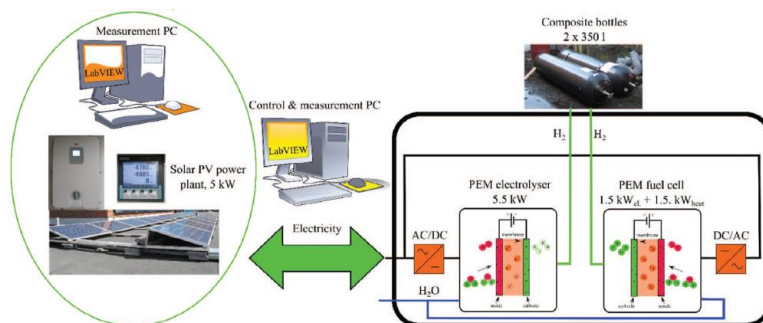
Σκοπός

Στην εργασία αυτή, επισημαίνεται η αναγκαιότητα εφαρμογής του υδρογόνου στα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας και μελετώνται στρατηγικές βελτιστοποίησης της λειτουργίας μίας μονάδας ηλεκτρόλυσης τύπου PEM σε συνδυασμό με ένα φωτοβολταϊκό σύστημα.

Μεθοδολογία – Περιγραφή συστήματος

Το σύστημα εργαστηριακών δοκιμών αποτελείται κατά κύριο λόγο από έναν φωτοβολταϊκό σταθμό συνδεδεμένο στο δίκτυο. Το τμήμα παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου περιλαμβάνει μία μονάδα ηλεκτρόλυσης τύπου PEM με πρόσθετες συσκευές όπως ένα σύστημα καθαρισμού νερού, έναν ξηραντήρα

υδρογόνου, δύο σύνθετες φιάλες για αποθήκευση, απαραίτητες στη λειτουργία του συστήματος, μια κυψέλη καυσίμου η οποία καταναλώνει υδρογόνο από αυτό που αποθηκεύεται στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Η μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού διαθέτει τροφοδοτικό συνεχούς ρεύματος και η κυψέλη καυσίμου διαθέτει έναν μετατροπέα συνεχούς ρεύματος σε εναλλασσόμενο. Στο Σχήμα 2.21 γίνεται σχηματική αναπαράσταση του συστήματος που περιγράφεται παραπάνω στο οποίο γίνεται δοκιμή της λειτουργίας του ηλεκτρολύτη τύπου PEM σε συνδυασμό με μια ηλιακή φωτοβολταϊκή εγκατάσταση.



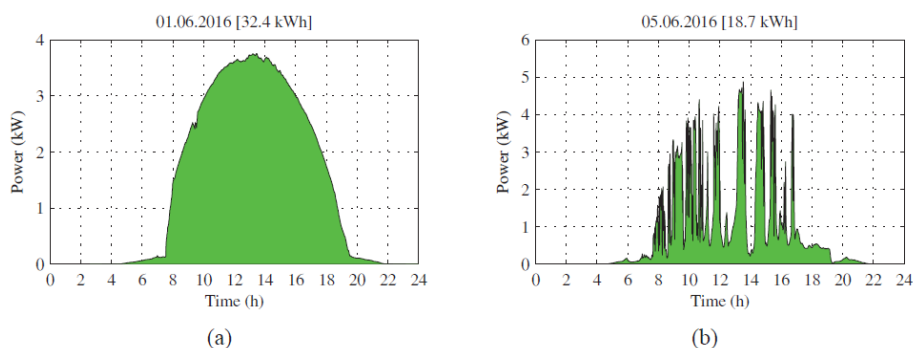
Σχήμα 2.21 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος P2G.

Πηγή: Optimization Strategies of PEM Electrolyser as Part of Solar PV System

Η ηλιακή φωτοβολταϊκή ισχύς είναι διαθέσιμη σε πραγματικό χρόνο μέσω του δικτύου μέτρησης. Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται με αναλυτή δικτύου, τα δεδομένα που προκύπτουν από τα φωτοβολταϊκά συλλέγονται με χρόνο δειγματοληψίας ενός δευτερολέπτου.

Χαρακτηριστικά αποτελέσματα

Στο Σχήμα 2.22 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που αφορούν την παραγωγή του φωτοβολταϊκού συστήματος δοκιμής σε δύο διαφορετικές ημέρες του καλοκαιριού.



Σχήμα 2.22 Ηλιακή φωτοβολταϊκή παραγωγή με το δοκιμαστικό σύστημα.

(α) Καθαρή καλοκαιρινή ημέρα, (β) Καλοκαιρινή ημέρα με συννεφιά

Πηγή: Optimization Strategies of PEM Electrolyser as Part of Solar PV System

Κεφάλαιο 3^ο : Μαθηματική ανάλυση του ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής H₂ από ΑΠΕ

3.1 Γενικά χαρακτηριστικά επιλογής μαθηματικών εξισώσεων

Η λειτουργία των υποσυστημάτων που αποτελούν μέρος της ολοκληρωμένης μονάδας παραγωγής H₂ από Α.Π.Ε., μπορεί να μελετηθεί μέσω κατάλληλων μαθηματικών εξισώσεων όπου θα περιγράφουν τα βασικά τους χαρακτηριστικά. Κύριο σκοπό της μαθηματικής μοντελοποίησης του κάθε υποσυστήματος αποτελεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων θεωρητικής ανάλυσης σε σύγκριση με τα αντίστοιχα πειραματικά, αλλά όπως θα γίνει κατανοητό, η ακρίβεια αποτελεί μονάχα την μία από τις πολλές απαιτήσεις των μαθηματικών μοντέλων. Συνολικά προτείνεται:

- *Οι εξισώσεις να προσομοιώνουν τα βασικά χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων για ευρεία όρια λειτουργίας*
- *Οι εξισώσεις να εμπεριέχουν μικρό αριθμό παραμέτρων προς εξακρίβωση (validation)*
- *Αποδεκτές παραδοχές για την λειτουργία των υποσυστημάτων*

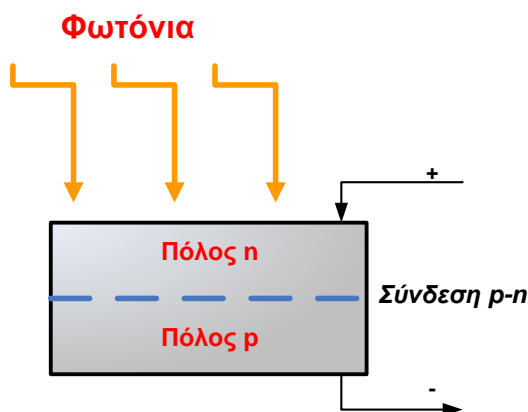
Με βάση λοιπόν τα προαναφερθέντα κριτήρια, θα ακολουθήσει η παράθεση των επιλεγμένων μαθηματικών μοντέλων του ολοκληρωμένου συστήματος.

3.2 Μαθηματικά μοντέλα υποσυστημάτων

3.2.1 Φωτοβολταϊκό σύστημα

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα αποτελείται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ, την στήριξη εγκατάστασης τους και τον βοηθητικό εξοπλισμό που περιλαμβάνει ηλεκτρικά κυρίως μέρη. “Καρδιά” του πάνελ είναι το ηλιακό στοιχείο από πυρίτιο όπου συγκεκριμένος αριθμός στοιχείων συνδέεται σε σειρά για την αύξηση της αποδιδόμενης τάσης και παράλληλα για την αύξηση του αποδιδόμενου ρεύματος. Η

φυσική σημασία της λειτουργίας των στοιχείων έγκειται στην παρουσία δύο τύπων ημιαγωγών τύπου n (αρνητικός πόλος) και p (θετικός πόλος). Στον αρνητικό πόλο τα ηλεκτρόνια διαθέτουν ελευθερία κίνησης, ενώ αντίθετα στον θετικό πόλο οι οπές-θέσεις των ηλεκτρονίων είναι αυτές που κινούνται, δημιουργώντας μία ένωση τύπου $p-n$ που λειτουργεί ως δίοδος. Όταν τα φωτόνια της ηλιακής ακτινοβολίας προσπίπτουν στα ηλιακά στοιχεία με ενέργεια μεγαλύτερη της ζώνης εύρους ενέργειας, e_{gap} , του υλικού, διαπερνούν τον πόλο n (αυξάνεται ο αριθμός των οπών) και επιδρούν στα άτομα του πόλου p (αυξάνεται ο αριθμός των ηλεκτρονίων). Με τον τρόπο αυτό, τα ηλεκτρόνια του πόλου p κινούνται και φτάνουν στην περιοχή της δόδου όπου και έλκονται από το θετικό πεδίο της εκεί περιοχής. Το σχηματιζόμενο ηλεκτρικό πεδίο εφόσον συνδεθεί σε εξωτερικό κύκλωμα, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1, μπορεί να παράγει ηλεκτρικό ρεύμα.

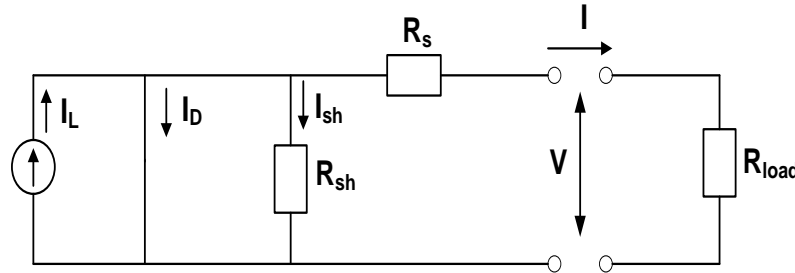


Σχήμα 3.1 Αρχή λειτουργίας ενός ηλιακού στοιχείου

Πηγή: Δημήτρης Ιψάκης, Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, 2011

Η κλίση των πάνελ προς τον ήλιο εξαρτάται από την γεωγραφική θέση της περιοχής εγκατάστασης (υψόμετρο, ημισφαίριο κ.τ.λ.) και συνήθως η βέλτιστη γωνία εγκατάστασης παρέχεται από πληροφορίες οργανισμών εξερεύνησης διαστήματος (N.A.S.A.).

Η μαθηματική ανάλυση της λειτουργίας των φωτοβολταϊκών συστημάτων βασίζεται στην χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης ($I-V$) που εξαρτάται από την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας και τη θερμοκρασία του αέρα στην επιφάνεια του φωτοβολταϊκού στοιχείου. Η διάταξη που ισοδυναμεί με την φυσική περιγραφή λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου, παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.2 και αποτελεί την βάση ανάπτυξης των περισσότερων μαθηματικών μοντέλων φωτοβολταϊκών συστημάτων που ανιχνεύονται στην βιβλιογραφία.



Σχήμα 3.2 Ισοδύναμο ηλεκτρικό κύκλωμα λειτουργίας ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου

Πηγή: Δημήτρης Ιψάκης, Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, 2011

Η αντίσταση σε σειρά, R_s (V), καθώς και η αντίσταση εκτροπής (*shunt resistance*), R_{sh} (V), αποτελούν παρασιτικά στοιχεία του κυκλώματος, όπως άλλωστε υπαγορεύει η πραγματική συμπεριφορά των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Σύμφωνα με τον νόμο ρεύματος του *Kirchoff* ισχύει για το παραπάνω κύκλωμα:

$$I = I_L - I_D - I_{sh} \quad (3.1)$$

όπου I , I_L , I_D και I_{sh} δηλώνεται το ρεύμα λειτουργίας, το ρεύμα φωτοδίοδου, το ρεύμα δίοδου και το ρεύμα εκτροπής σε A, αντίστοιχα.

Από την ημι-εμπειρική ανάλυση των ρευμάτων της σχέσης (3.1) θα προκύψει η σχέση *ισχύος* → *προσπίπτουσας ακτινοβολίας + θερμοκρασίας* που εμφανίζει μία ισχυρά μη-γραμμική συμπεριφορά. Αναπτύσσοντας τους όρους του δεξιού σκέλους της (3.1), προκύπτει η συσχέτιση *I-V*:

$$I = I_{pv} = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_O \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.2)$$

όπου α δηλώνεται η παράμετρος συσχέτισης της χαρακτηριστικής καμπύλης σε V, I_O το ανάστροφο ρεύμα κορεσμού δίοδου σε A και V_{pv} η τάση του στοιχείου σε V.

Θεωρώντας υψηλή την διαφορά των δύο αντιστάσεων, $R_{sh} \gg R_s$, η παραπάνω εξίσωση απλοποιείται περαιτέρω ως εξής:

$$I_{pv} = I_L - I_O \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (3.3)$$

Για την επίλυση της (3.3), απαιτούνται εξισώσεις που θα λαμβάνουν υπόψη ακραίες συνθήκες λειτουργίας. Τέτοιου είδους καταστάσεις αφορούν τις τιμές ρεύματος και τάσης σε *συνθήκες βραχυκύκλωσης, ανοικτού κυκλώματος και μεγίστης ισχύος* που ακολουθούν. Στις συνθήκες όπου ισχύει $V_{pv}=0$ (βραχυκύκλωση), το ρεύμα I_L διαπερνά την δίοδο και ισούται με το λεγόμενο ρεύμα κλειστού κυκλώματος (*short current*):

$$I_{L,ref} = I_{pv,sc,ref} = I_{pv} = I_{sc,ref} \quad (3.4)$$

Με το όρο ref δηλώνονται οι συνθήκες αναφοράς:

- Ηλιακή ακτινοβολία $G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$
- Θερμοκρασία αέρα $T_{ref} = 25 \text{ }^\circ\text{C}$.

Σε συνθήκες ανοικτού κυκλώματος με μηδενική ένταση ρεύματος $I_{pv}=0$, η σχέση (3.3) μετασχηματίζεται σε:

$$I_{o,oc,ref} = I_{L,ref} \cdot \exp\left(\frac{-V_{oc,ref}}{\alpha_{ref}}\right) \quad (3.5)$$

Οι συνθήκες μέγιστης ισχύος υποδηλώνουν $I_{pv}=I_{mp,ref}$ και $V_{pv}=V_{mp,ref}$ και αντικαθιστώντας τις (3.4) και (3.5) στην (3.3), προκύπτει η σχέση για την αντίσταση σε σειρά:

$$R_{s,ref} = \frac{\alpha_{ref} \cdot \ln\left(1 - \frac{I_{mp,ref}}{I_{L,ref}}\right) - V_{mp,ref} + V_{oc,ref}}{I_{mp,ref}} \quad (3.6)$$

Επιπλέον, η επίδραση της ηλιακής ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στους όρους α , I_L και I_o που αναφέρθηκαν στην βασική εξίσωση (3.3) εισάγεται ως εξής:

$$\alpha = \alpha_{ref} \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (3.7)$$

$$I_L = \frac{G_T}{G_{T,ref}} \cdot [I_{L,ref} + \mu_{I,sc} \cdot (T_c - T_{c,ref})] \quad (3.8)$$

$$I_o = I_{o,ref} \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \cdot \exp\left[\left(\frac{e_{gap} \cdot N_s}{\alpha_{ref}}\right) \cdot \left(1 - \frac{T_{c,ref}}{T_c}\right)\right] \quad (3.9)$$

$$e_{gap} = 1.17 - 4.73 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{T_c^2}{T_c + 636} \quad (3.10)$$

Όπου ,

- T_c δηλώνεται η θερμοκρασία του στοιχείου (ίδια με του αέρα) σε K
- G_T δηλώνεται η ηλιακή ακτινοβολία σε W/m^2
- N_s ο αριθμός των ηλιακών στοιχείων του φωτοβολταϊκού πάνελ
- e_{gap} η ζώνη εύρους του υλικού κατασκευής (Si) σε eV

Μέσω διαφοροποίησης της σχέσης (3.5) ως προς την θερμοκρασία και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (3.5), (3.7), (3.9) προκύπτει ο προσδιορισμός της

παραμέτρου α_{ref} που απαιτείται για την ολοκλήρωση της μαθηματικής περιγραφής του φωτοβολταϊκού συστήματος :

$$\alpha_{ref} = \frac{\mu_{V,oc} \cdot T_{c,ref} - V_{oc,ref} + e_{gap} \cdot N_s}{\frac{\mu_{I,sc} \cdot T_{c,ref}}{I_{L,ref}} - 3} \quad (3.11)$$

Οι σχέσεις (3.3)-(3.11) ουσιαστικά αποτελούν το σετ των εξισώσεων που περιγράφουν την λειτουργία ενός φωτοβολταϊκού πάνελ. Η αποδιδόμενη ισχύς του φωτοβολταϊκού συστήματος δίδεται ως:

$$P_{pv} = V_{pv} \cdot I_{pv} \cdot n_{pv} \cdot N_{panel} \quad (3.12)$$

Όπου,

- P_{pv} δηλώνεται η ισχύς εξόδου του φωτοβολταϊκού συστήματος σε W
- N_{panel} ο αριθμός των φωτοβολταϊκών πάνελ
- n_{pv} η απόδοση του συστήματος

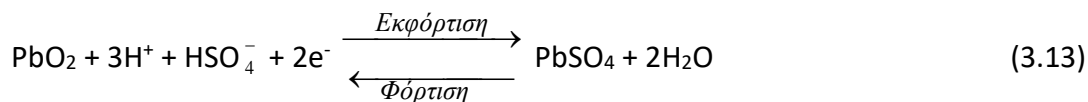
Στην απόδοση του συστήματος, n_{pv} , εμπεριέχονται όλες οι ηλεκτρικές απώλειες κατά την παραγωγή ρεύματος και συνήθως αντιστοιχούν σε μία τιμή κοντά στο ~90%.

3.2.2 Συσσωρευτής Μόλυβδου – Οξέος

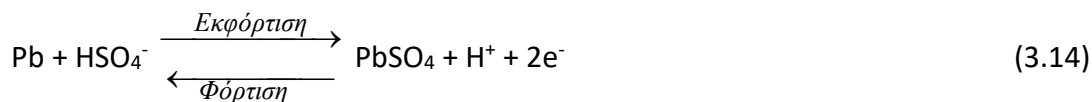
Οι συσσωρευτές αποτελούν τον πιο συνηθισμένο τρόπο αποθήκευσης και χρήσης ενέργειας, όπου μετατρέπουν την αποθηκευμένη τους χημική ενέργεια σε ηλεκτρική (και αντίστροφα) μέσω μίας σειράς ηλεκτροχημικών δράσεων. Βασική λειτουργική μονάδα των συσσωρευτών αποτελούν τα ηλεκτροχημικά κελιά που συνδέονται σε σειρά και παράλληλα με στόχο την αύξηση της αποδιδόμενης τάσης και χωρητικότητας, αντίστοιχα. Κατά την εκφόρτιση, πραγματοποιείται οξείδωση στην άνοδο των κελίων (αρνητικό ηλεκτρόδιο) και παροχή ηλεκτρονίων προς ένα εξωτερικό κύκλωμα, ενώ στην κάθοδο (θετικό ηλεκτρόδιο) λαμβάνει χώρα αναγωγή με χρήση των παραγόμενων ηλεκτρονίων. Τα υλικά των ηλεκτροδίων είναι μόλυβδος, Pb , για την άνοδο και οξείδιο του μόλυβδου, PbO_2 , για την κάθοδο. Μεταξύ των ηλεκτροδίων παρεμβάλλεται ηλεκτρολύτης που αποτελεί τον μεταφορέα του ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρόνια) μεταξύ της ανόδου και της καθόδου με την βοήθεια ιόντων. Συνήθως βρίσκεται σε υγρή μορφή ή ως διάλυμα gel και στην περίπτωση των συσσωρευτών μόλυβδου-οξέος αποτελεί διάλυμα θειικού οξέος (H_2SO_4). Ανάμεσα στα κατασκευαστικά μέρη, διακρίνεται και ο διαχωριστής που

αποτελείται από μία πορώδη μεμβράνη που επιτρέπει την ροή ιόντων μεταξύ των ηλεκτροδίων. Οι τελούμενες αντιδράσεις είναι:

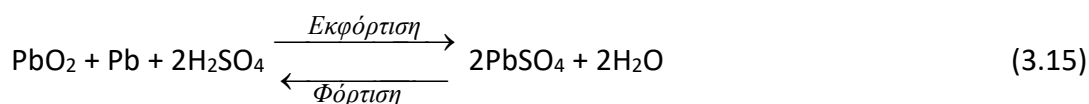
Κάθοδος



Άνοδος



Συνολική Αντίδραση



Ο συσσωρευτής ως ένα ηλεκτρικό σύστημα θεωρείται μια πηγή τάσης συνδεδεμένη σε σειρά με μία αντίσταση όπου ισχύει:

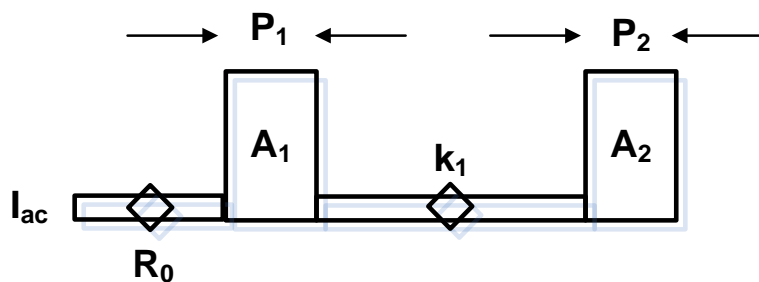
$$V_{ac} = E_{ac} - I_{ac} \cdot R_o \quad (3.16)$$

$$P_{ac} = V_{ac} \cdot I_{ac} \quad (3.17)$$

Όπου,

- E_{ac} δηλώνει την εσωτερική τάση σε V
- R_o η εσωτερική αντίσταση σε Ω
- V_{ac} και I_{ac} η τάση και το ρεύμα λειτουργίας σε V και A , αντίστοιχα
- P_{ac} η ισχύς (φόρτισης και εκφόρτισης) σε W .

Το Σχήμα 3.3 προσομοιώνει την βασική λειτουργία του συσσωρευτή με μία ισοδύναμη διάταξη δύο συγκοινωνούντων δοχείων που συνδέονται μέσω μίας βάνας (αγωγιμότητα) που επιτρέπει την διέλευση υγρού ανάμεσα στα δύο δοχεία. Το δοχείο A_1 (το ίδιο σύμβολο δηλώνει και τον όγκο του δοχείου) αναπαριστά το φορτίο που είναι άμεσα διαθέσιμο προς χρήση και το δοχείο A_2 το φορτίο που είναι χημικά αποθηκευμένο στον συσσωρευτή.



Σχήμα 3.3 Κινητικό μοντέλο προσομοίωσης συσσωρευτή μόλυβδου-οξέος.

Πηγή: Δημήτρης Ιψάκης, Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, 2011

Η αγωγιμότητα, k_1 (είναι ανάλογη της διαφοράς P_1 και P_2), αντιστοιχεί στην σταθερά ταχύτητας μίας χημικής αντίδρασης πρώτης τάξης που εκφράζει την διαδικασία όπου το δεσμευμένο φορτίο γίνεται διαθέσιμο. Καθένα από τα δύο δοχεία χαρακτηρίζεται από ένα πλάτος που προσδιορίζεται από τον όρο P_i όπου σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [Δημήτρης Ιψάκης, Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, 2011], ισχύει,

- $P_1 > P_2$
- $P_2 = 1 - P_1 = 1 - c$.

Το άθροισμα των όγκων των δοχείων A_1 και A_2 αντιστοιχεί ουσιαστικά στην μέγιστη δυνατή αξιοποίηση της ονομαστικής χωρητικότητας του συσσωρευτή (q_{\max}) σε Ah.

Οι δυναμικές εξισώσεις του σχήματος 3.3 που σχετίζουν τα φορτία (σε Ah) q_1 (διαθέσιμο) και q_2 (δεσμευμένο) με τα ύψη, h_i , των δοχείων A_1 και A_2 δίνονται ως εξής:

$$\frac{dq_1}{dt} = -I_{ac} - k_1 \cdot (h_1 - h_2) \quad (3.18)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = k_1 \cdot (h_1 - h_2) \quad (3.19)$$

$$h_1 = \frac{A_1}{P_1} = \frac{q_1}{c} \quad (3.20)$$

$$h_2 = \frac{A_2}{P_2} = \frac{q_2}{1-c} \quad (3.21)$$

Όπου,

- q_1, q_2 δηλώνεται το διαθέσιμο και δεσμευμένο φορτίο αντίστοιχα σε Ah
- I_{ac} το ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης
- h_1, h_2 το ύψος των δοχείων 1 και 2 αντίστοιχα
- t ο χρόνος λειτουργίας σε h.

Στο παραπάνω σετ εξισώσεων, εάν αντικατασταθούν οι σχέσεις (3.20) και (3.21) στις (3.18) και (3.19), προκύπτει πως τα φορτία q_1 και q_2 θα δίνονται ως:

$$q_1 = q_{1,0} \cdot e^{-k \cdot t} + \frac{(q_0 \cdot k \cdot c - I_{ac}) \cdot (1 - e^{-k \cdot t})}{k} - \frac{I_{ac} \cdot c \cdot (k \cdot t - 1 + e^{-k \cdot t})}{k} \quad (3.22)$$

$$q_2 = q_{2,0} \cdot e^{-k \cdot t} + q_0 \cdot (1 - c) \cdot (1 - e^{-k \cdot t}) - \frac{I_{ac} \cdot (1 - c) \cdot (k \cdot t - 1 + e^{-k \cdot t})}{k} \quad (3.23)$$

$$k = \frac{k_1}{c \cdot (1 - c)} \quad (3.24)$$

Όπου,

- $q_{1,0}, q_{2,0}$ δηλώνεται το αρχικό διαθέσιμο και δεσμευμένο φορτίο αντίστοιχα σε Ah
- q_0 το άθροισμα των φορτίων $q_{1,0}$ και $q_{2,0}$ σε Ah
- k, c χαρακτηριστικοί παράμετροι που προσδιορίζονται για κάθε συσσωρευτή μέσω κατασκευαστικών δεδομένων.

Το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης και φόρτισης προκύπτει θέτοντας αντίστοιχα στη σχέση (3.22) το αριστερό τους μέλος ίσο με ($q_1=0$) και ($q_1=c \cdot q_{max}$) μετά το πέρας ενός ορισμένου χρόνου t . Τα ρεύματα αυτά δίδονται από τις εξής σχέσεις:

$$I_{d,max} = \frac{k \cdot q_{1,0} \cdot e^{-k \cdot t} + q_0 \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot t})}{1 - e^{-k \cdot t} + c \cdot (k \cdot t - 1 + e^{-k \cdot t})} \quad (3.25)$$

$$I_{c,max} = \frac{-k \cdot c \cdot q_{max} + k \cdot q_{1,0} \cdot e^{-k \cdot t} + q_0 \cdot k \cdot c \cdot (1 - e^{-k \cdot t})}{1 - e^{-k \cdot t} + c \cdot (k \cdot t - 1 + e^{-k \cdot t})} \quad (3.26)$$

Όπου,

- $I_{d,max}, I_{c,max}$ δηλώνεται το μέγιστο ρεύμα εκφόρτισης και φόρτισης αντίστοιχα σε A.

Όπως παρουσιάστηκε και στην σχέση (3.16), η τάση του συσσωρευτή αποτελεί γραμμική συνάρτηση της αντίστασης, της εσωτερικής τάσης και του ρεύματος. Η θερμοκρασία λειτουργίας θεωρείται κατά παραδοχή σταθερή.

Η τιμή της εσωτερικής τάσης, E_{ac} , λαμβάνεται από τις παρακάτω σχέσεις για την περίπτωση της εκφόρτισης και φόρτισης :

Εκφόρτιση

$$E_{ac} = E_{\min} + (E_{o,d} - E_{\min}) \cdot \frac{q_1}{q_{1,\max}} \quad (3.27)$$

Φόρτιση

$$E_{ac} = E_{o,c} + (E_{\max} - E_{o,c}) \cdot \frac{q_1}{q_{1,\max}} \quad (3.28)$$

Όπου,

- E_{\min} δηλώνεται η ελάχιστη αποδεκτή εσωτερική τάση εκφόρτισης σε V ,
- $E_{o,d}$ η μέγιστη αποδεκτή τάση εκφόρτισης σε V
- E_{\max} η μέγιστη αποδεκτή εσωτερική τάση φόρτισης σε V
- $E_{o,c}$ η ελάχιστη αποδεκτή εσωτερική τάση φόρτισης σε V

Οι ανωτέρω τιμές των εσωτερικών τάσεων παρέχονται από κατασκευαστικά δεδομένα (συνήθως ευρέως διαθέσιμα) και αφορούν τις ακραίες συνθήκες λειτουργίας του συσσωρευτή για πλήρη εκφόρτιση και φόρτιση.

Η κυριότερη μεταβλητή της λειτουργίας των συσσωρευτών και γενικότερα της ολοκληρωμένης μονάδας αξιοποίησης Α.Π.Ε., είναι η κατάσταση φόρτισης, SOC . Πρόκειται για την μεταβλητή ελέγχου που δηλώνει την χωρητικότητα του συσσωρευτή σε ποσοστό επί τοις % και συνδέεται με το ρεύμα φόρτισης/εκφόρτισης καθώς και με το διαθέσιμα αποθηκευμένο φορτίο σε κάθε χρονική στιγμή. Η κατάσταση φόρτισης αποτελεί μεταβλητή που δεν μπορεί να μετρηθεί άμεσα αλλά προκύπτει μέσω άλλων μετρήσεων, όπως της τάσης, ή μέσω εμπειρικών κυρίως μεθόδων που απαιτούν ιδιαίτερα πολύπλοκες τεχνικές. Ουσιαστικά, μπορεί να ειπωθεί πως πρόκειται για το πηλίκο του διαθέσιμου φορτίου σε χρόνο t σε σχέση με την ονομαστική χωρητικότητα του συσσωρευτή και δίνεται, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [Δημήτρης Ιψάκης, Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, 2011], ως:

$$SOC(t+1) = SOC(t) \cdot (1 - \sigma_{ac}) + \frac{I_{ac} \cdot \eta_{ac}}{Q_o} \cdot (\Delta t) \quad (3.29)$$

Όπου,

- η_{ac} δηλώνεται η απόδοση του συσσωρευτή ~95%
- σ_{ac} ο ρυθμός αυτοεκφόρτισης του συσσωρευτή ~2.5%
- Δt η διαφορά των χρονικών στιγμών $(t+1)-t$ σε h

3.2.3 Συσκευή/Μονάδα Ηλεκτρόλυσης

Η διεργασία της ηλεκτρόλυσης αναφέρεται στην διάσπαση του νερού προς υδρογόνο και οξυγόνο που επιτυγχάνεται με την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως και στην περίπτωση των συσσωρευτών έτσι και εδώ, διακρίνεται η παρουσία ηλεκτροχημικών κελιών που αποτελούνται από τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της κάθοδο και από τον ηλεκτρολύτη που βοηθά στην μεταφορά των ιόντων. Στην κάθοδο πραγματοποιείται η αναγωγή των πρωτονίων σε υδρογόνο και στην άνοδο η οξείδωση του νερού προς οξυγόνο και πρωτόνια, ελευθερώνοντας παράλληλα και δύο ηλεκτρόνια. Η συνολική αντίδραση έχει ως εξής:



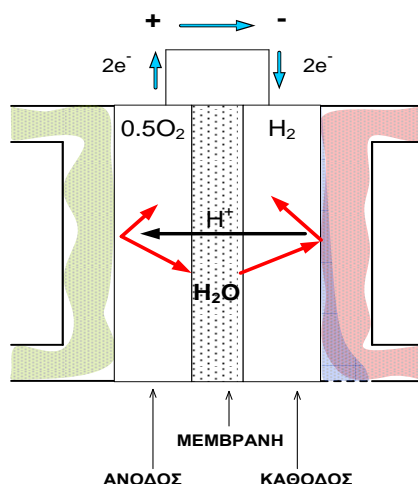
Στην ηλεκτρόλυση με χρήση πολυμερικής μεμβράνης (*polymer exchange membrane electrolyzers, PEM*) διακρίνονται υλικά όπως ιρίδιο, ρουθίνιο, πλατίνα και γραφίτης, σε διάφορους συνδυασμούς, για την κατασκευή της ανόδου και πλατίνα ή πλατίνα-γραφίτης για την κάθοδο. Παρακάτω παρουσιάζονται οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις της συσκευής ηλεκτρόλυσης ακολουθούμενες από περιγραφή της λειτουργίας τους για την κάθε περίπτωση.

Πίνακας 3.1 Ηλεκτροχημικές αντιδράσεις για την διεργασία ηλεκτρόλυσης

Ηλεκτρολύτης	Άνοδος	Κάθοδος
Πολυμερική Μεμβράνη	$H_2O \rightarrow \frac{1}{2} \cdot O_2 + 2H^+ + 2e^-$	$2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

Η συσκευή ηλεκτρόλυσης τύπου *PEM*, όπως εμφανίζεται στο Σχήμα 3.4, χαρακτηρίζεται από την χρήση πολυμερικής μεμβράνης ιονομερών φθοροανθράκων τύπου *Nafion*[®] που επιτρέπει την μεταφορά πρωτονίων. Διακρίνεται ακόμη από υψηλές πυκνότητες ρεύματος. Στα πλεονεκτήματα του προστίθεται η αποφυγή

χρήσης υγρού ηλεκτρολύτη που απαιτεί συνεχή επανακυκλοφορία και η μεγάλη δυνατότητα ενσωμάτωσης του σε διεργασίες αξιοποίησης Α.Π.Ε. με διακοπτόμενη παραγωγή ενέργειας. Επομένως, η περίπτωση της συσκευής ηλεκτρόλυσης τύπου PEM χαρακτηρίζεται από σημαντικά πλεονεκτήματα και προτείνεται δικαίως για χρήση στην υπό μελέτη ολοκληρωμένη μονάδα.



Σχήμα 3.4 Λειτουργία ηλεκτροχημικού κελιού κατά την διεργασία ηλεκτρόλυσης με χρήση πολυμερικής μεμβράνης.

Πηγή: Δημήτρης Ιψάκης, Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, 2011

Η βασική εξίσωση που χαρακτηρίζει την λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης, αντιστοιχεί στην σχέση τάσης-ρεύματος ($V-I$) που λαμβάνει υπόψη τις απώλειες λόγω ηλεκτροδιακών δράσεων και αντιστάσεων κατά την μεταφορά ηλεκτρονίων και ιόντων.

Η σχέση $V-I$ για την περίπτωση ενός ηλεκτροχημικού κελιού και η απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύς δίνονται ως εξής:

$$V_{elec} = V_{rev,elec} + \frac{r_1 + r_2 \cdot T_{elec}}{A_{elec}} \cdot I_{elec} + (s_1 + s_2 \cdot T_{elec} + s_3 \cdot T_{elec}^2) \cdot \log\left(\frac{t_1 + t_2/T_{elec} + t_3/T_{elec}^2}{A_{elec}} \cdot I_{elec}\right) \quad (3.31)$$

$$P_{elec} = V_{elec} \cdot I_{elec} \cdot n_{elec} \quad (3.32)$$

Όπου,

- V_{elec} δηλώνει την τάση λειτουργίας σε V
- r_1 και r_2 παράμετροι που σχετίζονται με την αντίσταση του ηλεκτρολύτη σε $\Omega \cdot m^2$ και $\Omega \cdot m^2/^\circ C$ αντίστοιχα
- s_1 , s_2 και s_3 παράμετροι που σχετίζονται με τις απώλειες στα ηλεκτρόδια σε V , $V/^\circ C$ και $V/^\circ C^2$ αντίστοιχα

- t_1 , t_2 και t_3 παράμετροι που σχετίζονται με τις απώλειες στα ηλεκτρόδια σε $V \cdot m^2/A$, $V \cdot m^2 \cdot ^\circ C/A$ και $V \cdot m^2 \cdot ^\circ C^2/A$, αντίστοιχα
- A_{elec} η επιφάνεια των ηλεκτροδίων σε m^2
- T_{elec} η θερμοκρασία λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης σε $^\circ C$
- I_{elec} το ρεύμα λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης σε A
- P_{elec} η καταναλισκόμενη ισχύς της συσκευής ηλεκτρόλυσης σε W
- n_{elec} ο αριθμός των κελιών της συσκευής ηλεκτρόλυσης.

Σε μία ολοκληρωμένη μονάδα αξιοποίησης Α.Π.Ε προς παραγωγή H_2 η λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης πρέπει να περιορίζεται στην θερμοκρασία που προτείνεται από τους κατασκευαστές, απαιτείται μονάχα μία πειραματική καμπύλη $V-I$ για την συγκεκριμένη θερμοκρασία όπου βάσει αυτής μπορούν εύκολα να προκύψουν οι τιμές των παραμέτρων r_i , s_i και t_i . Η παραγωγή του υδρογόνου συνδέεται με την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος και δίδεται από τον νόμο του *Faraday*:

$$n_{H_2} = n_F \cdot \frac{n_c \cdot I_{elec}}{n_e \cdot F} \quad (3.33)$$

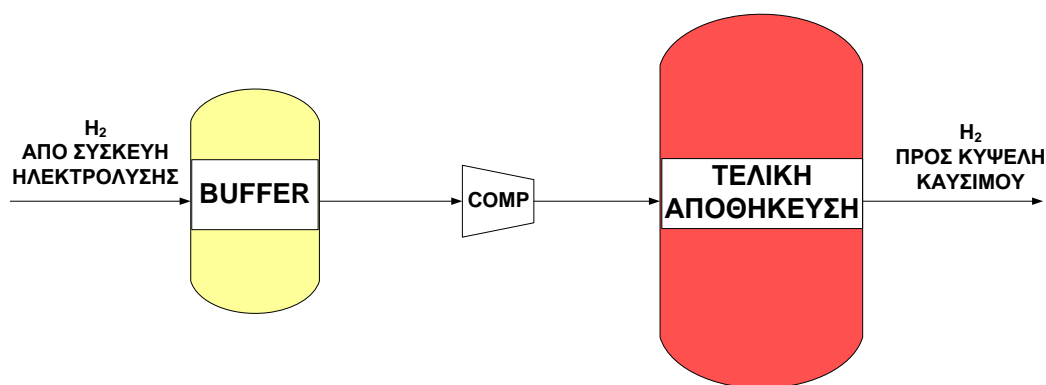
Όπου,

- n_{H_2} δηλώνει τη ροή του παραγόμενου υδρογόνου σε mol/s
- n_c ο αριθμός των κελιών της συσκευής ηλεκτρόλυσης
- n_F η απόδοση του *Faraday*.

Η απόδοση *Faraday* αναφέρεται ουσιαστικά στον λόγο του παραγόμενου υδρογόνου προς το θεωρητικά δυνατό και δίνεται κυρίως από κατασκευαστικές εταιρίες στις τιμές 80-100%.

3.2.4 Σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου

Η μέθοδος αποθήκευσης σε κυλινδρικά δοχεία, χαρακτηρίζεται από την χρήση ενός συμπιεστή που μεταφέρει με ταυτόχρονη αύξηση της πίεσης, το υδρογόνο στις φιάλες. Το λειτουργικό σχήμα αποθήκευσης που προτείνεται για μία ολοκληρωμένη μονάδα αξιοποίησης Α.Π.Ε., παρουσιάζεται στο *Σχήμα 3.5* και διακρίνεται από την υλοποίηση υπό μονάδων βραχυπρόθεσμης και μακροπρόθεσμης αποθήκευσης.



Σχήμα 3.5 Λειτουργική αρχή αποθήκευσης υδρογόνου σε ολοκληρωμένη μονάδα αξιοποίησης Α.Π.Ε.

Πηγή: Δημήτρης Ιψάκης, Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, 2011

Συγκεκριμένα, το παραγόμενο-από την ηλεκτρόλυση-υδρογόνο αποθηκεύεται στα δοχεία προσωρινής αποθήκευσης (*buffer*) έως ότου επιτευχθεί μία προκαθορισμένη πίεση ($P_{buffer,max}$). Στο σημείο εκείνο λειτουργεί ο συμπιεστής για την μεταφορά του στα τελικά δοχεία αποθήκευσης. Η μεταφορά και συμπίεση του υδρογόνου διαρκεί έως ότου η πίεση στα δοχεία *buffer* “αγγίξει” την τιμή $P_{buffer,min}$. Με τον τρόπο αυτόν εξασφαλίζεται πρωτίστως η βέλτιστη λειτουργία του συμπιεστή καθώς προφυλάσσεται από συνεχή χρήση, ενώ εν συνεχεία πραγματοποιείται και εξομάλυνση στην διακοπτόμενη παραγωγή υδρογόνου που εμφανίζεται με διαφορετικές κάθε φορά ροές. Το βασικό μαθηματικό μοντέλο αφορά το νόμο του *Van der Waals* για πραγματικά αέρια και συσχετίζει την πίεση αποθήκευσης με τον όγκο των δοχείων, την θερμοκρασία αποθήκευσης (πρακτικά σταθερή) και την εισροή υδρογόνου:

$$P_T = \frac{n \cdot R \cdot T_{stor}}{V_T - n \cdot b} - a \cdot \frac{n^2}{V_T^2} \quad (3.34)$$

$$a = \frac{27 \cdot R^2 \cdot T_{cr}^2}{64 \cdot P_{cr}} \quad (3.35)$$

$$b = \frac{R \cdot T_{cr}}{8 \cdot P_{cr}} \quad (3.36)$$

Όπου,

- P_T δηλώνει την πίεση αποθήκευσης σε bar
- n ο αριθμός των γραμμομορίων του αποθηκευμένου υδρογόνου σε mol
- R η παγκόσμια σταθερά των αερίων σε $bar \cdot m^3/mol \cdot K$
- T_{stor} η θερμοκρασία αποθήκευσης του υδρογόνου σε K
- V_T ο όγκος του αποθηκευτικού χώρου σε m^3
- T_{cr} και P_{cr} η κρίσιμη θερμοκρασία και πίεση του υδρογόνου αντίστοιχα σε K και bar
- α ο όρος για την περιγραφή των ενδομοριακών δράσεων σε $bar \cdot m^6/mol^2$
- β ο όρος που περιγράφει τον όγκο που καταλαμβάνουν τα μόρια αερίου ενός mol σε m^3/mol .

Κεφάλαιο 4^ο : Ανάπτυξη μεθοδολογίας βέλτιστης λειτουργίας του ολοκληρωμένου συστήματος αξιοποίησης Α.Π.Ε

4.1 Γενικά χαρακτηριστικά επιλογής και ανάπτυξης στρατηγικών ελέγχου

Η βασική αρχή της στρατηγικής ελέγχου στην υπό μελέτη μονάδα, έγκειται στην βέλτιστη αξιοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά με στόχο την παραγωγή H_2 (καθορισμένης ποσότητας στο τέλος του έτους, π.χ. $X \text{ kg/yr}$ ή Nm^3/yr). Για την εκπλήρωση όμως του συγκεκριμένου στόχου, απαιτείται παράλληλα και η βέλτιστη αξιοποίηση των συνδεδεμένων υποσυστημάτων. Η διαθέσιμη ισχύς της ολοκληρωμένης μονάδας από τα φωτοβολταϊκά δίνεται ως P_{res} , W. Με βάση το θετικό πρόσημο της καθαρής ισχύος ($P > 0$), επιτρέπεται η έναρξη ορισμένων λειτουργιών της μονάδας:

- Φόρτιση συσσωρευτή
- Λειτουργία συσκευής ηλεκτρόλυσης
- Απόρριψη ισχύος

Πέραν όμως της τιμής της καθαρής ισχύος, η λειτουργία του κάθε υποσυστήματος οφείλει να εξαρτάται και από την τιμή μίας μεταβλητής ελέγχου. Για την ολοκληρωμένη μονάδα αξιοποίησης Α.Π.Ε., η μεταβλητή αυτή προτείνεται να είναι η κατάσταση φόρτισης του συσσωρευτή, SOC , όπου βάσει ορίων στην λειτουργία του θα πραγματοποιείται λήψη συγκεκριμένων αποφάσεων. Ειδικότερα, το ανώτερο όριο λειτουργίας του συσσωρευτή, SOC_{max} , προτείνεται να καθορίζει την παραγωγή υδρογόνου και αντίστοιχα το κατώτερο όριο, SOC_{min} , να καθορίζει την κατανάλωση υδρογόνου για παραγωγή ενέργειας. Παράλληλα, εμφανίζεται μία σειρά τεχνικών κυρίως προδιαγραφών που οφείλουν να τηρούνται με στόχο την ασφαλή λειτουργία της μονάδας. Ένας από τους βασικούς στόχους στην ανάπτυξη της στρατηγικής ελέγχου, είναι η καταγραφή όλων εκείνων που επηρεάζουν την λειτουργία της

ολοκληρωμένης μονάδας. Αυτές οι λεπτομέρειες εάν δεν ληφθούν υπόψη, μπορούν να οδηγήσουν το σύστημα σε δυσλειτουργία και κατά συνέπεια σε εξαιρετικά δυσμενή κόστη.

Τα βήματα ανάπτυξης μίας στρατηγικής ελέγχου που πρέπει να ληφθούν υπόψη πριν την υλοποίηση της σε μία διεργασία αξιοποίησης Α.Π.Ε. είναι τα εξής:

1. Τήρηση των κατασκευαστικών ορίων λειτουργίας για τον συσσωρευτή και την συσκευή ηλεκτρόλυσης

Ο συγκεκριμένος περιορισμός αφορά την εξασφάλιση επέκτασης της ζωής των υποσυστημάτων και την μείωση των λειτουργικών τους εξόδων βάσει προσεκτικής και αποδοτικής λειτουργίας. Όσον αφορά την έναρξη λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης, αυτή καθορίζεται από την περίσσεια καθαρής ισχύος και από το ανώτατο όριο λειτουργίας του συσσωρευτή. Λόγω όμως των συνεχών διακυμάνσεων των μετεωρολογικών δεδομένων, υφίσταται κίνδυνος συνεχών ενάρξεων-παύσεων που ενδέχεται να οδηγήσουν σε σοβαρά μηχανικά προβλήματα. Για το λόγο αυτό, προτείνεται η θέσπιση ελάχιστων ορίων στην ισχύ λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης, καθώς και θέσπιση ζώνης υστέρησης στα ακραία όρια λειτουργίας του συσσωρευτή, έτσι ώστε να διασφαλιστεί περαιτέρω η μείωση της διακοπτόμενης λειτουργίας τους.

2. Εφαρμογή στρατηγικής ελέγχου βέλτιστης λειτουργίας βάσει του μαθηματικού μοντέλου προσομοίωσης και δυνατότητα υλοποίησης του σε πραγματική διεργασία.

Το μαθηματικό μοντέλο προσομοίωσης που αναπτύχθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, οφείλει να αποτελεί βασικό κομμάτι της μεθοδολογίας βέλτιστης λειτουργίας, καθώς από την επίλυση τους θα προκύψουν οι μεταβλητές λειτουργίας και ελέγχου που επηρεάζουν συνολικά την απόδοση της ολοκληρωμένης μονάδας αξιοποίησης Α.Π.Ε.. Αντίστοιχα, η προτεινόμενη μεθοδολογία βέλτιστης λειτουργίας θα πρέπει να είναι προσαρμοσμένη στις απαιτήσεις της μαθηματικής μοντελοποίησης έτσι ώστε να δύναται η εφαρμογή και υλοποίησή της χωρίς την απαίτηση για τροποποίηση των μαθηματικών εξισώσεων ή αλλαγής του υπολογιστικού περιβάλλοντος εφαρμογής τους. Επιπλέον, η προτεινόμενη μεθοδολογία θα πρέπει να χαρακτηρίζεται και από την δυνατότητα υλοποίησής της σε ενσωματωμένα συστήματα που εφαρμόζονται κατά κόρον σε εγκατεστημένες μονάδες.

4.2 Παρουσίαση στρατηγικής ελέγχου

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναπτυχθεί και παρουσιασθεί η στρατηγική ελέγχου που προτείνεται για εφαρμογή στην υπό μελέτη μονάδα αξιοποίησης Α.Π.Ε.. Τα χαρακτηριστικά που πρέπει να τις διακρίνουν ορίσθηκαν :

- Στην ανεξάρτητη λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης
- Στην τήρηση των κατασκευαστικών ορίων λειτουργίας του συσσωρευτή και της συσκευής ηλεκτρόλυσης
- Στην αλληλένδετη σχέση στρατηγικής ελέγχου και μαθηματικού μοντέλου

Η πρόταση για χρήση ζώνης υστέρησης στα ακραία όρια της κατάστασης φόρτισης, αναμένεται να προστατεύσει τα υποσυστήματα από καταπόνηση λόγω του αυξημένου αριθμού ενάρξεων-παύσεων στην λειτουργία τους. Όπως διαπιστώθηκε, η ζώνη υστέρησης προστατεύει τον συσσωρευτή από υψηλό αριθμό φορτίσεων/εκφορτίσεων, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται η μείωση των συνεχών ενάρξεων/παύσεων λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου και της συσκευής ηλεκτρόλυσης με αποτέλεσμα την μείωση του κόστους λειτουργίας και συντήρησης.

Η ζώνη υστέρησης (*hysteresis band*) ορίζεται ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} HB_{acc} &= SOC_{mac,charge} - SOC_{max} \\ HB_{elec} &= SOC_{max} - SOC_{elec} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Πίνακας 4.1 Επεξήγηση των ορίων της κατάστασης φόρτισης SOC

Όρια SOC	Επεξήγηση ορίων SOC
SOC_{elec}	Ελάχιστο όριο επιτρεπτής λειτουργίας συσκευής ηλεκτρόλυσης
SOC_{max}	Μέγιστο όριο επιτρεπτής λειτουργίας συσκευής ηλεκτρόλυσης
$SOC_{max,charge}$	Μέγιστο αποδεκτό όριο φόρτισης

Στρατηγική ελέγχου

Ισχύει ότι $P > 0$

- **$SOC \geq SOC_{max,charge}$**

Η διαθέσιμη ισχύς παρέχεται εξολοκλήρου στην συσκευή ηλεκτρόλυσης εφόσον είναι μεταξύ των ορίων λειτουργίας της ($P_{min,elec} \leq P \leq P_{max,elec}$). Στην περίπτωση διαθέσιμης ισχύος μεγαλύτερης από $P_{max,elec}$, τότε η συσκευή ηλεκτρόλυσης αξιοποιεί την μέγιστη δυνατή ισχύ και το επιπλέον ποσό $P - P_{max,elec}$ απορρίπτεται. Αντίστοιχα, στην περίπτωση διαθέσιμης ισχύος μικρότερης από του ελάχιστου ορίου $P_{min,elec}$, ο συσσωρευτής εκφορτίζεται παρέχοντας ισχύ ίση με $P_{min,elec} - P$ για λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης στο ελάχιστο της όριο.

- **$SOC_{max} < SOC < SOC_{max,charge}$ και $P < P_{min,elec}$**

Ο συσσωρευτής εκφορτίζεται παρέχοντας ισχύ ίση με $P_{min,elec} - P$ για λειτουργία της συσκευής ηλεκτρόλυσης στο ελάχιστο της όριο.

- **$SOC_{max} < SOC < SOC_{max,charge}$ και $P > P_{max,elec}$**

Η συσκευή ηλεκτρόλυσης αξιοποιεί την μέγιστη δυνατή ισχύ και το επιπλέον ποσό $P - P_{max,elec}$ χρησιμοποιείται για φόρτιση του συσσωρευτή έως του ανώτατου επιτρεπτού ορίου $SOC_{max,charge}$.

- **$SOC_{max} < SOC < SOC_{max,charge}$ και $P_{min,elec} \leq P \leq P_{max,elec}$:**

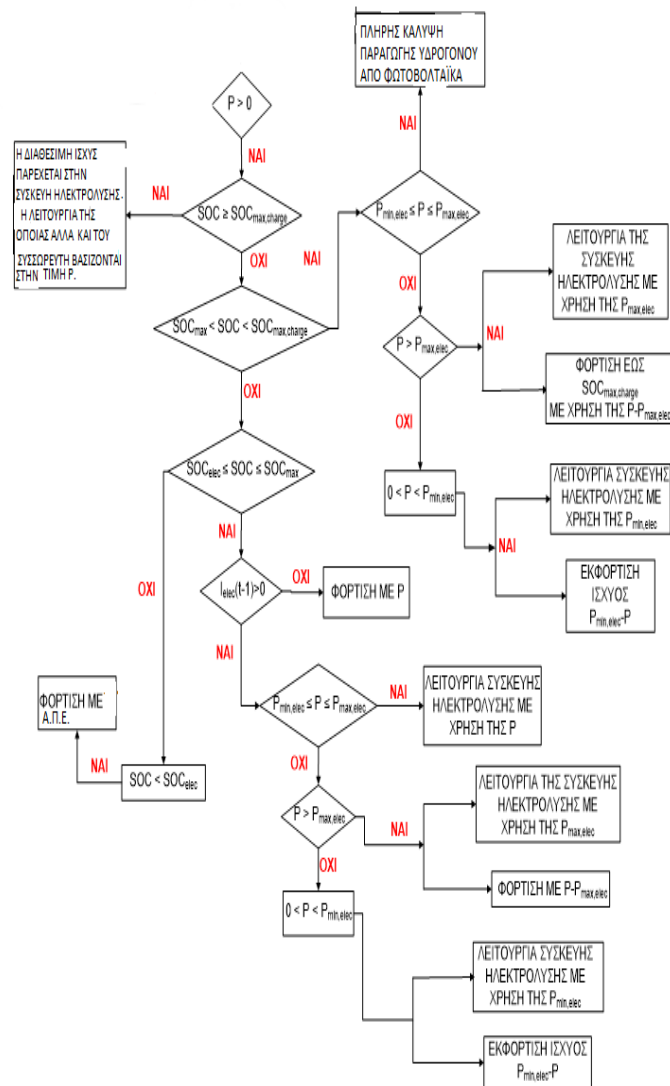
Πλήρης κάλυψη της παραγωγής υδρογόνου από τα φωτοβολταϊκά.

- **$SOC_{elec} \leq SOC \leq SOC_{max}$**

Εάν στο προηγούμενο χρονικό βήμα ($t-1$) η συσκευή ηλεκτρόλυσης λειτουργούσε, τότε επεκτείνεται η λειτουργία της έως του ορίου SOC_{elec} . Ο συσσωρευτής λειτουργεί σύμφωνα με την ισχύ P και ανάλογα των προηγούμενων περιπτώσεων. Σε περίπτωση μη λειτουργίας της συσκευής ηλεκτρόλυσης, τότε η διαθέσιμη ισχύς παρέχεται εξολοκλήρου για την φόρτιση του συσσωρευτή.

- **$SOC < SOC_{elec}$**

Ο συσσωρευτής φορτίζεται από τις Α.Π.Ε..



Σχήμα 4.2 Λογικό διάγραμμα υλοποίηση στρατηγικής ελέγχου

Πηγή: Δημήτρης Ιψάκης, Σχεδιασμός βέλτιστης λειτουργίας ενεργειακών συστημάτων με χρήση ανανεώσιμων και εναλλακτικών πηγών, Διδακτορική Διατριβή, ΑΠΘ, 2011

Κεφάλαιο 5^ο : Αποτελέσματα βελτιστοποίησης βάση σεναρίων κόστους

Στο τελευταίο κεφάλαιο αυτής της εργασίας, θα παρουσιασθεί μία σειρά σεναρίων λειτουργίας και βελτιστοποίησης. Αρχικά, αξίζει να αναφερθεί πως μελετήθηκαν δύο σενάρια κόστους τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά τα κόστη εξοπλισμού του συστήματος. Έπειτα, μελετήθηκαν τέσσερα σενάρια βελτιστοποίησης συγκεκριμένου στόχου παραγωγής υδρογόνου διαδοχικά αυξανόμενο ανά έτος (2.000.000-2.000.000.000 lt). Πιο αναλυτικά,

Πίνακας 5.1 Σενάριο κόστους 1:

Κόστος Μονάδας Φωτοβολταϊκών	18.000€/10KWp
Κόστος Μονάδας Ηλεκτρόλυσης	8.000€/6,9KWp
Κόστος Μπαταρίας	500€/500Ah
Κόστος Δεξαμενής	200€/500lt

Πίνακας 5.2 Σενάριο κόστους 2:

Κόστος Μονάδας Φωτοβολταϊκών	18.000€/10KWp
Κόστος Μονάδας Ηλεκτρόλυσης	4.000€/6,9KWp
Κόστος Μπαταρίας	500€/500Ah
Κόστος Δεξαμενής	20€/500lt

Παρακάτω παρουσιάζονται οι εξισώσεις που χρησιμοποιούνται στην αντικειμενική συνάρτηση βελτιστοποίησης:

- Εξίσωση κόστους εξοπλισμού**

$$C_{\text{εξοπλισμού}} = (\text{Αριθμός PV} * \text{Κόστος μονάδας PV}) + (\text{Αριθμός ELEC} * \text{Κόστος μονάδας ELEC}) + (\text{Αριθμός BAT} * \text{Κόστος BAT}) + (\text{Αριθμός TANK} * \text{Κόστος TANK})$$

- Εξίσωση για λειτουργικά κόστη**

$$C_{PV} = \text{Αριθμός PV} * 100$$

$$C_{ELEC} = \text{Αριθμός ELEC} * 500$$

$$C_{BAT} = \text{Αριθμός BAT} * 10$$

$$C_{TANK} = \text{Αριθμός TANK} * 10$$

100€	10kW
500€	6,9kW
10€	1000Ah
10€	500lt

- **Εξίσωση για το κέρδος από την πώληση του υδρογόνου και ενέργειας**

$$C_{\text{ΠΩΛΗΣΗΣ}} = (\text{Κέρδος πώλησης υδρογόνου} * \text{Συνολική παραγωγή υδρογόνου}) + (\text{Κέρδος πώλησης πλεονάζουσας ενέργειας} * \text{Συνολικά πλεονάζουσα ενέργεια})$$

- **Εξίσωση NPV (Καθαρή Παρούσα Αξία) για διάρκεια αποπληρωμής ίση με 20 έτη**

$$NPV(i) = NPV(i - 1) + \frac{(C_{PV} + C_{ELEC} + C_{BAT} + C_{TANK} - C_{\text{ΠΩΛΗΣΗΣ}})}{(1+h)^i}$$

Όπου,

i : Αφορά διαδοχικά τα έτη κατά τη διάρκεια αποπληρωμής .

Ο υπολογισμός του NPV ξεκινάει από το δεύτερο έτος ($i = 2$) , καθώς για τον πρώτο χρόνο ισχύει $NPV(i = 1) = C_{\text{εξοπλισμού}}$

h = επιτόκιο το οποίο έχει οριστεί ίσο με 0,6

- **Αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης/βελτιστοποίησης**

$$S_1 = ((\text{Συνολική παραγωγή υδρογόνου} - \text{Στόχος παραγωγής υδρογόνου})^2) + ((\text{Μέγιστο ποσοστό φόρτισης μπαταρίας} - 100)^2) + ((\text{Ελάχιστο ποσοστό φόρτισης μπαταρίας} - 15)^2)$$

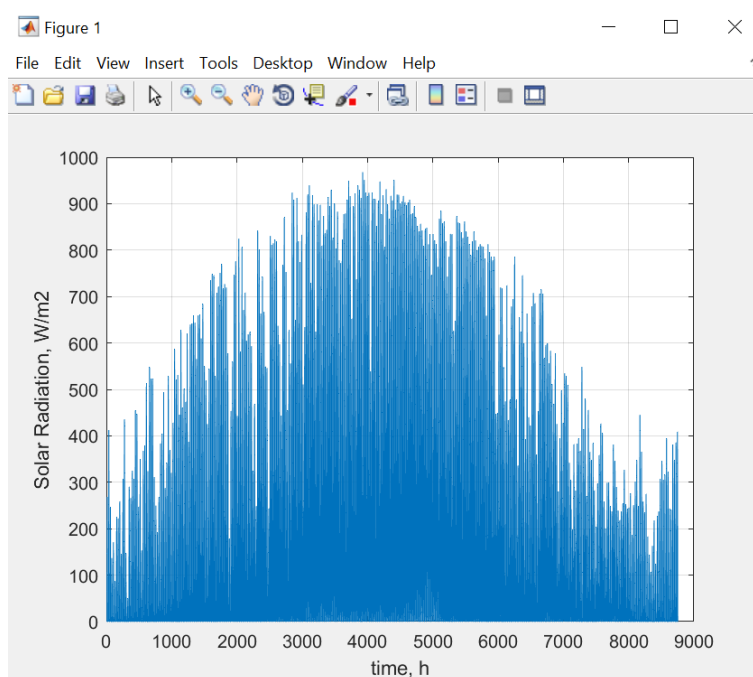
$$S_2 = (C_{\text{εξοπλισμού}} - 10000)^2$$

$$S_3 = (\text{Συνολικά πλεονάζουσα ενέργεια} - 10000)^2$$

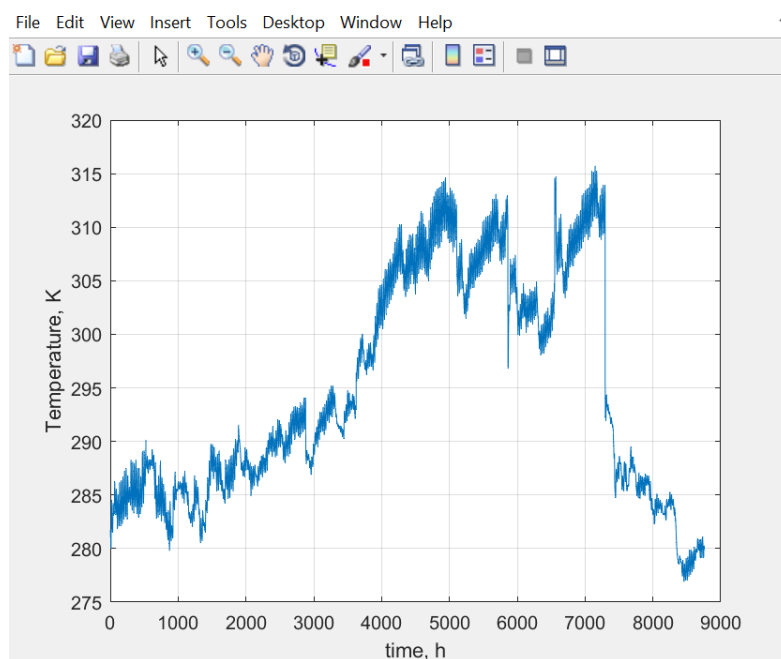
Επομένως, η αντικειμενική συνάρτηση αφορά :

1. Την εκπλήρωση συγκεκριμένων στόχων (target) προς παραγωγή υδρογόνου στο τέλος κάθε έτους (όρος S_1) . Εδώ τονίζεται πως ο αλγόριθμος διαχείρισης ενέργειας έχει ως περιορισμούς το μέγιστο/ελάχιστο όριο φόρτισης των μπαταριών (100% και 15% αντίστοιχα).
2. Την επίτευξη ελάχιστου κόστους εξοπλισμού (όρος S_2).
3. Την επίτευξη μηδενικής απώλειας ενέργειας (όρος S_3). Στην περίπτωση που υπάρξει απώλεια ενέργειας, δηλαδή περίσσεια/πλεονάζουσα ενέργειας, η ποσότητα αυτή δίνεται προς πώληση.

Σε πρώτη φάση και πριν την παρουσίαση των αποτελεσμάτων βελτιστοποίησης, παρουσιάζονται τα *Γράφηματα 5.1 & 5.2* που προέκυψαν από το σύστημα μελέτης και το λογισμικό MATLAB και αφορούν τα μετεωρολογικά δεδομένα βάση των οποίων έγιναν όλοι οι υπολογισμοί για τα σενάρια που θα ακολουθήσουν. Τα δεδομένα αυτά, θεωρήθηκαν κοινά για όλα τα σενάρια. Η περιοχή που λήφθηκαν τα δεδομένα είναι η Θεσσαλονίκη.



Γράφημα 5.1 Ηλιακή ακτινοβολία σε όλη τη διάρκεια του έτους.



Γράφημα 5.2 Θερμοκρασία του αέρα σε όλη τη διάρκεια του έτους.

5.1 Σενάριο Κόστους 1

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του κεφαλαίου, η μελέτη του πρώτου σεναρίου κόστους ολοκληρώθηκε με τα καταγεγραμμένα κόστη εξοπλισμού του συστήματος όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.1 . Στη συνέχεια, μελετήθηκαν τέσσερα σενάρια βελτιστοποίησης συγκεκριμένου στόχου παραγωγής υδρογόνου διαδοχικά αυξανόμενο. Δηλαδή,

Σενάριο 1. Στόχος παραγωγής υδρογόνου 2.000.000 λίτρα

Σενάριο 2. Στόχος παραγωγής υδρογόνου 20.000.000 λίτρα

Σενάριο 3. Στόχος παραγωγής υδρογόνου 200.000.000 λίτρα

Σενάριο 4. Στόχος παραγωγής υδρογόνου 2.000.000.000 λίτρα

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικές εικόνες από το κομμάτι της βελτιστοποίησης μέσω Matlab , όπου χρησιμοποιήθηκε μέθοδος βελτιστοποίησης γενετικών αλγορίθμων, με στόχο την εύρεση των βέλτιστων μεγεθών των υποσυστημάτων (φωτοβολταϊκών, ηλεκτρόλυσης νερού και αποθήκευσης H₂) που θα οδηγούν σε προκαθορισμένη παραγωγή H₂ στο τέλος ενός έτους. Για κάθε σενάριο κόστους, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έγινε χρήση προκαθορισμένων τιμών κόστους εξοπλισμού όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.1.1 , αυτές οι μεταβλητές ορίζονται από την αρχή στον κώδικα καθώς παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην εύρεση των βέλτιστων τιμών.

```
% 4 SCENARIOS AT
% C_Cost_PV=18000; % 18000euro/10kWp
% C_Cost_Elec=8000; % 4000euro/6.9kWp
% C_Cost_Bat=500; % 500euro/500Ah
% C_Cost_Tank=200; %200euro ta 500lt tank
```

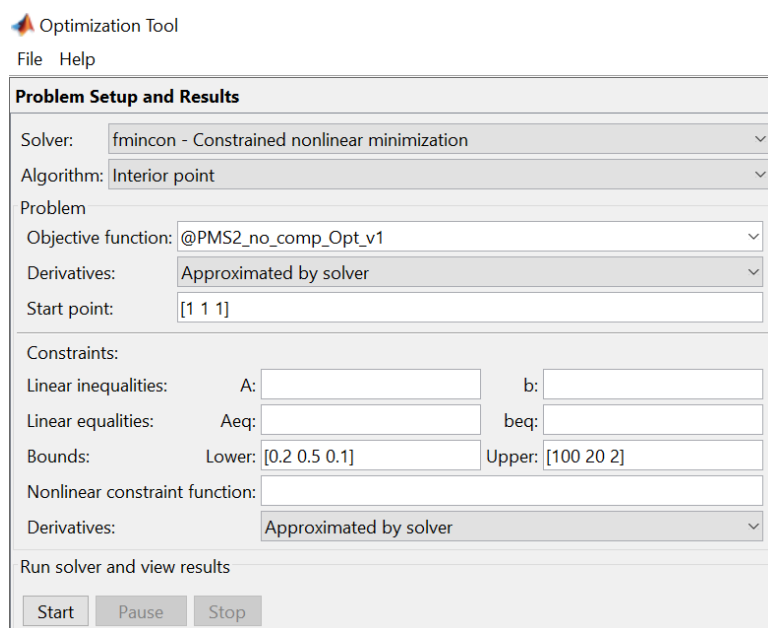
Εικόνα 5.1.1 (MATLAB) Κόστη εξοπλισμού για σενάριο κόστους 1

Έπειτα, γίνεται χρήση του Optimization tool μέσω Matlab το οποίο θα ορίσει τις τελικές βέλτιστες τιμές που προκύπτουν για κάθε σενάριο στόχου παραγωγής σε συνδυασμό με το συγκεκριμένο σενάριο κόστους. Όπως παρουσιάζονται παρακάτω στις Εικόνες 5.1.2 , 5.1.4 , 5.1.6 , 5.1.8 που αντιστοιχούν στα Σενάρια στόχου παραγωγής 1,2,3,4 αντίστοιχα. Οι τιμές που δόθηκαν στο εργαλείο βελτιστοποίησης Optimization tool, αφορούν ένα σημείο έναρξης Start Point και τα όρια στα οποία θα κυμαίνονται οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές Bounds: [Lower, Upper] οι τιμές αυτές

μεταβάλλονται ανά σενάριο στόχου παραγωγής. Για όλα τα σενάρια, ορίζεται το τυχαίο σημείο έναρξης Start Point = [1,1,1] και το κατώτερο όριο Lower = [0.2 , 0.5 , 0.1] και παραμένουν σταθερά.

Οι βέλτιστες τιμές που προκύπτουν από το εργαλείο βελτιστοποίησης Optimization tool , αναφέρεται σε τρεις μεταβλητές opt = [a,b,c] όπου,

- a, βέλτιστο μέγεθος φωτοβολταϊκών
- b, βέλτιστο μέγεθος μπαταριών
- c, βέλτιστο μέγεθος συστήματος ηλεκτρόλυσης νερού



Εικόνα 5.1.2 (Optimtool) Εύρεση βέλτιστων τιμών για σενάριο στόχου 1

Αφού προκύψουν οι βέλτιστες τιμές μέσω του εργαλείου βελτιστοποίησης , οι οποίες αφορούν τα μεγέθη που αναφέρθηκαν νωρίτερα , γίνεται εφαρμογή του μαθηματικού κώδικα με χρήση των μεταβλητών στόχου που αφορούν το σενάριο στόχου παραγωγής 1. Δηλαδή, την απαιτούμενη αποθήκευση υδρογόνου, την απαιτούμενη παραγωγή υδρογόνου αλλά και την τιμή πώλησης του υδρογόνου που έχει προκύψει από την βελτιστοποίηση. Το κομμάτι του κώδικα που αφορά τις αντίστοιχες εντολές παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.3.

Σχεδιασμός και Βελτιστοποίηση Υβριδικού Συστήματος Παραγωγής Πράσινου Υδρογόνου, Ντζαχρήστου Χριστίνα

```
%SCENARIO 1: PRODUCTION H2 = 2e6lt at the end of year with constraints
% optimal solution for a) 2e6 H2 (target) b) SOC: 15-100 (constraint)
% c) Minimum Power Loss at 10000Wh (constraint), d) Cost of Equipment at 10000euro (constraint)

% LOWER/UPPER BOUNDS [0.2 0.5 0.1] and [100 20 2];
opt=[0.8457255057255663    4.042023802895774    0.6830091834068299]; % Cost of H2 at 11.7

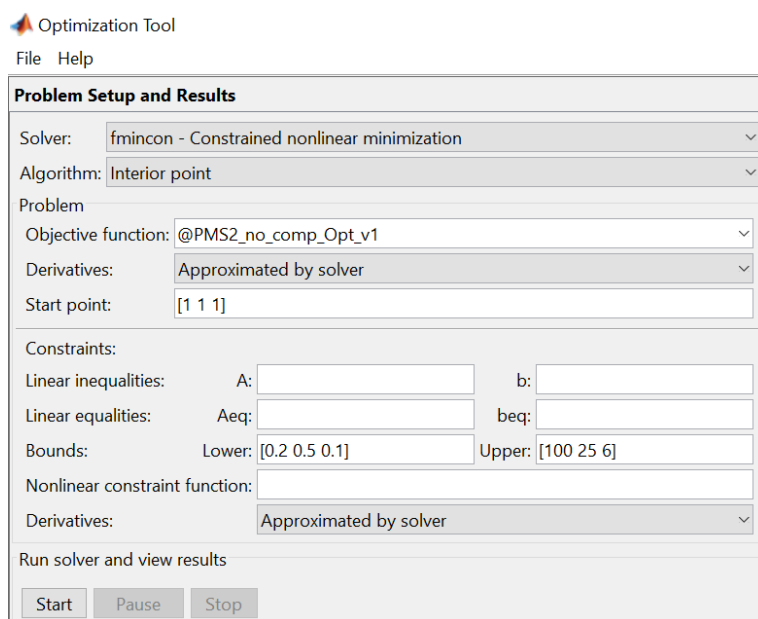
% S1=((Hydrogen_elec_lt(8761)-Target_H2)^2)+((max_SOC-100)^2)+((min_SOC-15)/1)^2;%
% S2=(C(1)-1e4)^2;
% S3=(Pres_loss_tot-1e4)^2;
% Break Even Price at 10.4 for H2, Tank =40;

help tank_final=40;
Target_H2=2e6;
H2_cost_rate=10.4;
```

Εικόνα 5.1.3 (MATLAB) Εφαρμογή κώδικα για σενάριο στόχου 1

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση του προγράμματος στην Matlab, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.1, 5.3.2 και 5.3.3 στην στήλη του Σεναρίου 1.

Συνεχίζοντας, ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα για το Σενάριο στόχου 2, αυξάνοντας σε αυτή τη περίπτωση την μεταβλητή που αναφέρεται στο ανώτατο όριο των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.1.4 (Optimtool) Εύρεση βέλτιστων τιμών για σενάριο στόχου 2

Με τον ίδιο τρόπο εκτελείται και το κομμάτι του κώδικα στην Matlab για την ολοκλήρωση του Σεναρίου 2, αυξάνοντας τις τιμές που αφορούν την αποθήκευση, παραγωγή και πώληση του υδρογόνου όπως ορίζονται για το συγκεκριμένο σενάριο. Το κομμάτι του κώδικα που αφορά τις αντίστοιχες εντολές παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.5.

```
%SCENARIO 2: PRODUCTION H2 = 2e7lt at the end of year with constraints
% optimal solution for a) 2e7 H2 (target) b) SOC: 15-100 (constraint),
% c) Minimum Power Loss at 10000Wh (constraint), d) Cost of Equipment at 10000euro (constraint)

% LOWER/UPPER BOUNDS [0.2 0.5 0.1] and [100 25 6];
opt=[8.346862939504497 22.539996427517387 5.607315036098944];

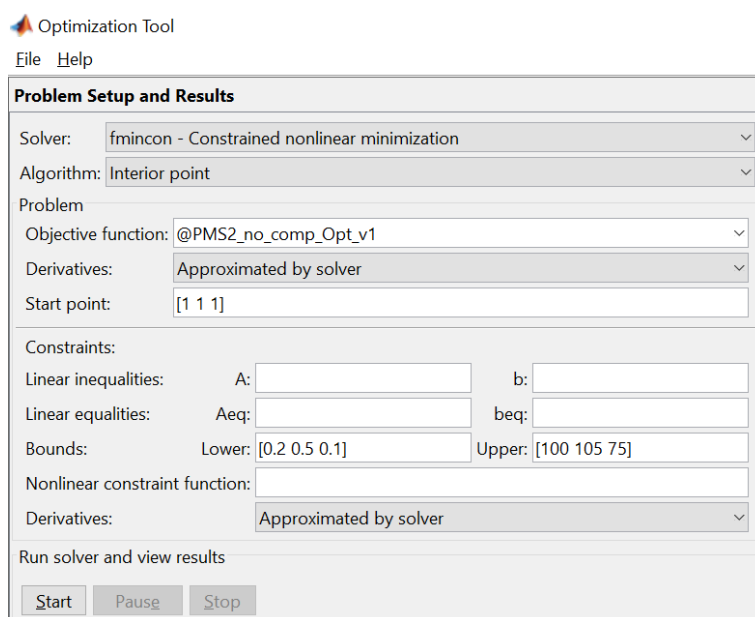
% S1=((Hydrogen_elec_lt(8761)-Target_H2))^2+(((max_SOC-100))^2)+(((min_SOC-15)/1)^2);%
% S2=(C(1)-1e4)^2;
% S3=(Pres_loss_tot-1e4)^2;
% Break Even Price at 9.8 for H2, Tank =400;

help_tank_final=400;
Target_H2=2e7;
H2_cost_rate=9.8;
```

Εικόνα 5.1.5 (MATLAB) Εφαρμογή κώδικα για σενάριο στόχου 2

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση του προγράμματος στην Matlab, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.1, 5.3.2 και 5.3.3 στην στήλη του Σεναρίου2.

Συνεχίζοντας στο επόμενο σενάριο , ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα για το Σενάριο στόχου 3 , αυξάνοντας και σε αυτή τη περίπτωση την μεταβλητή που αναφέρεται στο ανώτατο όριο των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.1.6 (Optimtool) Εύρεση βέλτιστων τιμών για σενάριο στόχου 3

Με τον ίδιο τρόπο εκτελείται και το κομμάτι του κώδικα στην Matlab για την ολοκλήρωση του Σεναρίου 3, αυξάνοντας τις τιμές που αφορούν την αποθήκευση, παραγωγή και πώληση του υδρογόνου όπως ορίζονται για το συγκεκριμένο σενάριο. Το κομμάτι του κώδικα που αφορά τις αντίστοιχες εντολές παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.7.


```
%SCENARIO 3: PRODUCTION H2 = 2e8lt at the end of year with constraints
% optimal solution for a) 2e8 H2 (target) b) SOC: 15-100 (constraint),
% c) Minimum Power Loss at 10000Wh (constraint), d) Cost of Equipment at 10000euro (constraint)

% LOWER/UPPER BOUNDS [0.2 0.5 0.1] and [100 105 75];
opt=[86.65642261075355 62.05187701868971 66.95710219799085];

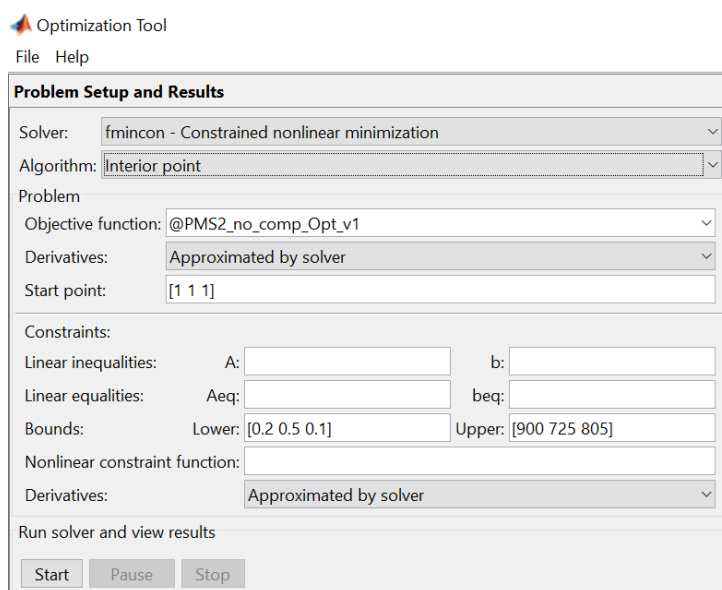
% S1=((Hydrogen_elec_lt(8761)-Target_H2))^2+(((max_SOC-100))^2)+(((min_SOC-15)/1)^2);%
% S2=(C(1)-1e4)^2;
% S3=(Pres_loss_tot-1e4)^2;
% Break Even Price at 9.8 for H2, Tank =4000;

help tank final=4000;
Target_H2=2e8;
H2_cost_rate=9.8;
```

Εικόνα 5.1.7 (MATLAB) Εφαρμογή κώδικα για σενάριο στόχου 3

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση του προγράμματος στην Matlab, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.1, 5.3.2 και 5.3.3 στην στήλη του Σεναρίου 3.

Συνεχίζοντας στο τελευταίο σενάριο στόχου, ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα για το Σενάριο στόχου 4, αυξάνοντας και σε αυτή τη περίπτωση την μεταβλητή που αναφέρεται στο ανώτατο όριο των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.1.8 (Optimtool) Εύρεση βέλτιστων τιμών για σενάριο στόχου 4

Με τον ίδιο τρόπο εκτελείται και το κομμάτι του κώδικα στην Matlab για την ολοκλήρωση του Σεναρίου 4, αυξάνοντας τις τιμές που αφορούν την αποθήκευση, παραγωγή και πώληση του υδρογόνου όπως ορίζονται για το συγκεκριμένο σενάριο. Το κομμάτι του κώδικα που αφορά τις αντίστοιχες εντολές παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1.9.

```
%SCENARIO 4: PRODUCTION H2 = 2e9lt at the end of year with constraints
% optimal solution for a) 2e9 H2 (target) b) SOC: 15-100 (constraint),
% c) Minimum Power Loss at 10000Wh (constraint), d) Cost of Equipment at 10000euro (constraint)

% LOWER/UPPER BOUNDS [0.2 0.5 0.1] and [900 725 805];
opt=[790.4208220443161 611.9219378240814 536.6457203323971];

% S1=((Hydrogen_elec_lt(8761)-Target_H2))^2+(((max_SOC-100))^2)+(((min_SOC-15)/1)^2);%
% S2=(C(1)-1e4)^2;
% S3=(Pres_loss_tot-1e4)^2;
% Break Even Price at 9.1 for H2, Tank =40000;

help_tank_final=40000;
Target_H2=2e9;
H2_cost_rate=9.1;
```

Εικόνα 5.1.9 (MATLAB) Εφαρμογή κώδικα για σενάριο στόχου 4

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση του προγράμματος στην Matlab, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.1, 5.3.2 και 5.3.3 στην στήλη του Σεναρίου 4.

Καταγραφή αποτελεσμάτων για **Σενάριο κόστους 1**

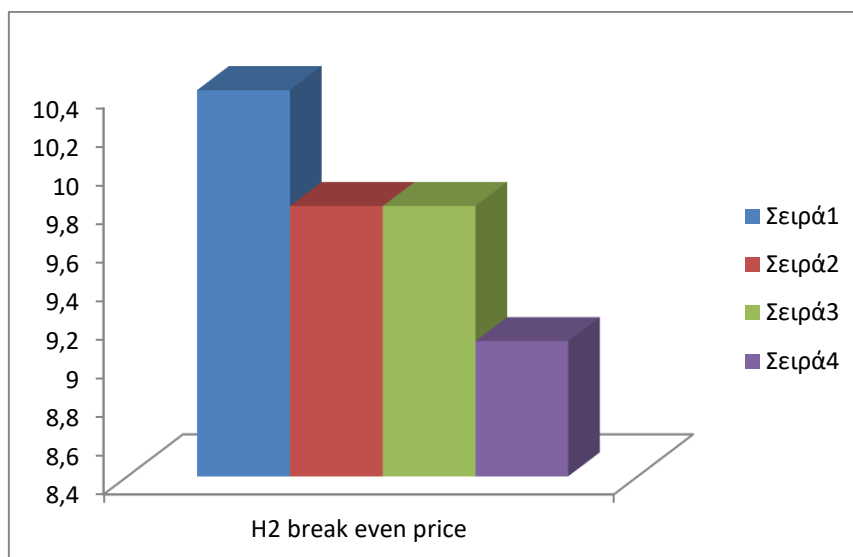
Πίνακας 5.3.1 Αποτύπωση αποτελεσμάτων που αφορούν το σύστημα

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Μέγεθος PV, kW	8,5	83,57	866,6	7904,2
Μέγεθος BAT, Ah	2020	11270	31025	305960
Μέγεθος ELEC, kW	4,7	38,7	462	3702,9
Μέγεθος TANK, m ³	20	200	2000	20000
Παραγωγή υδρογόνου, lt	1.999.900	19.998.000	199.970.000	1.999.900.000
Τιμή πώλησης υδρογόνου, €	10,4	9,8	9,8	9,1

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εφαρμογή του Σεναρίου Κόστους 1 και αφορούν τα χαρακτηριστικά του συστήματος αντίστοιχα για κάθε σενάριο στόχου. Πιο αναλυτικά ,

- **Αριθμός (ή μέγεθος) PV , Αριθμός (ή μέγεθος) BAT , Αριθμός (ή μέγεθος) ELEC , Αριθμός (ή μέγεθος) TANK** , αναφέρεται στο μέγεθος των φωτοβολταϊκών, των μπαταριών, των συστημάτων ηλεκτρόλυσης και των δεξαμενών που προέκυψαν ως βέλτιστη λύση για την επίτευξη κάθε στόχου πολλαπλασιασμένο με το αντίστοιχο ονομαστικό μέγεθος όπως αναφέρεται για κάθε σενάριο.
- **Παραγωγή υδρογόνου** , αναφέρεται στην συνολική παραγωγή υδρογόνου που προέκυψε στο τέλος του έτους με σκοπό την επίτευξη κάθε αναφερομένου στόχου των σεναρίων (2,000,000 – 2,000,000,000lt).
- **Τιμή πώλησης υδρογόνου**, αφορά το break-even price, δηλαδή την τιμή πώλησης του υδρογόνου η οποία θα μηδενίσει τα έξοδα ώστε η καθαρή παρούσα αξία NPV στο τέλος των 20 ετών να είναι μηδενική (έπειτα από εκεί θα υπάρχει μόνο κέρδος για το προτεινόμενο εγχείρημα).

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το γράφημα 5.3 στο οποίο γίνεται αναπαράσταση των τιμών πώλησης του υδρογόνου (σε €) ανά σενάριο στόχου παραγωγής (series 1-4).

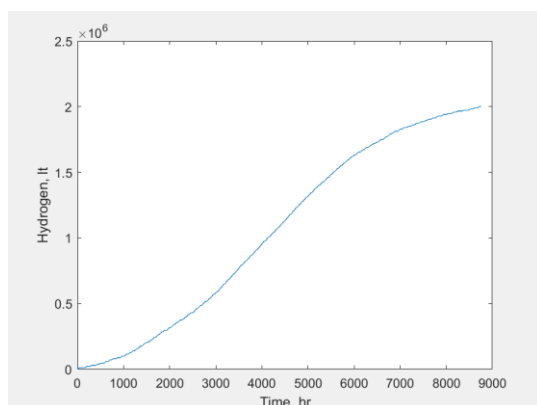


Γράφημα 5.3 Τιμή πώλησης του υδρογόνου ανά σενάριο στόχου παραγωγής

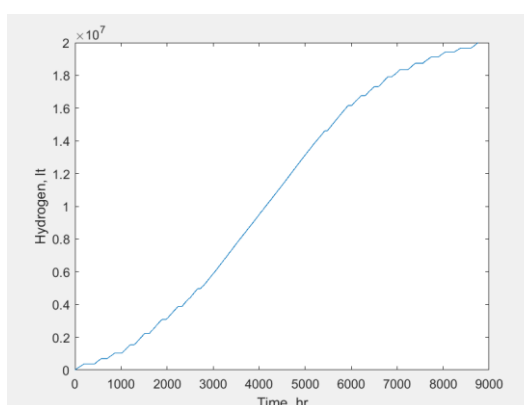
Όπως φαίνεται, στο σενάριο 4 η τιμή πώλησης του υδρογόνου είναι η χαμηλότερη μεταξύ των επιμέρους σεναρίων. Βάση αυτού του αποτελέσματος, βαίνουμε στο συμπέρασμα πως όσο το σύστημα μεγαλώνει, κάτι που ισχύει στην περίπτωση του τελευταίου σεναρίου, τόσο η τιμή πώλησης του υδρογόνου μειώνεται.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα *Γραφήματα 5.4.(1-4)* διαδοχικά όπως αναφέρονται τα σενάρια 1 έως 4. Τα γραφήματα αναφέρεται στην ποσότητα του υδρογόνου που επιτυγχάνει τον εκάστοτε στόχο σεναρίων 1 έως 4.

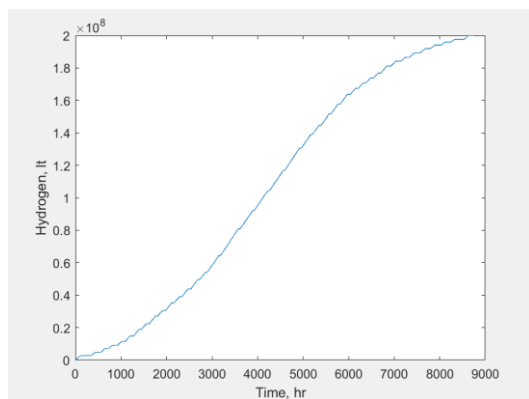
Ποσότητα υδρογόνου που φτάνει στο στόχο παραγωγής :



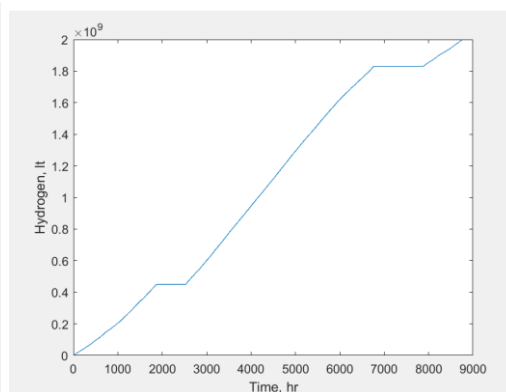
Γράφημα 5.4.1 Σενάριο 1



Γράφημα 5.4.2 Σενάριο 2



Γράφημα 5.4.3 Σενάριο 3



Γράφημα 5.4.4 Σενάριο 4

Όπως φαίνεται παραπάνω, σε όλα τα σενάρια παραγωγής υδρογόνου επιτυγχάνεται ο προβλεπόμενος στόχος. Παρατηρούμε πως η παραγωγή στον αρχικό στόχο 2.000.000 λίτρα επιτυγχάνεται με συνεχή αύξηση, ενώ όσο αυξάνεται η απαιτούμενη ποσότητα παραγωγής, παρατηρείται σταδιακή μείωση της σταθερότητας της παραγωγής υδρογόνου. Για παράδειγμα, στο τελευταίο σενάριο είναι εμφανής η διακοπή της παραγωγής κάποιες ώρες του χρόνου.

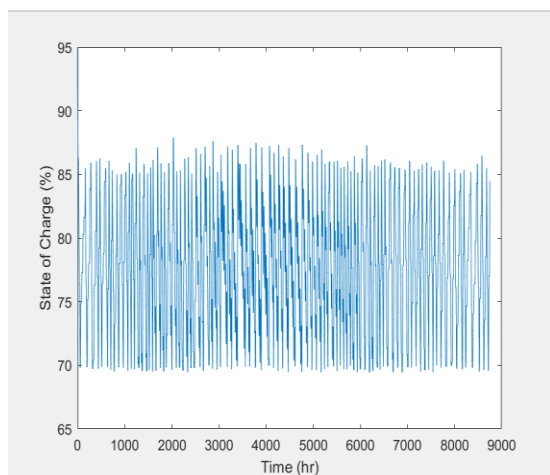
Πίνακας 5.3.2 Αποτύπωση αποτελεσμάτων που αφορούν την λειτουργία όπως μπαταρία και της μονάδας ηλεκτρόλυσης

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Χρόνος φόρτισης μπαταρίας, %	27,53	26,4	27,43	24,62
Χρόνος εκφόρτισης μπαταρίας, %	41,15	45,07	41,45	49,53
Χρόνος λειτουργίας μονάδας ηλεκτρόλυσης, %	65,38	74,42	66,13	79,82
Σύνολο κύκλων μπαταρίας	89	25	65	20
Ποσοστό κύκλων, %	48,66	13,67	35,54	10,94

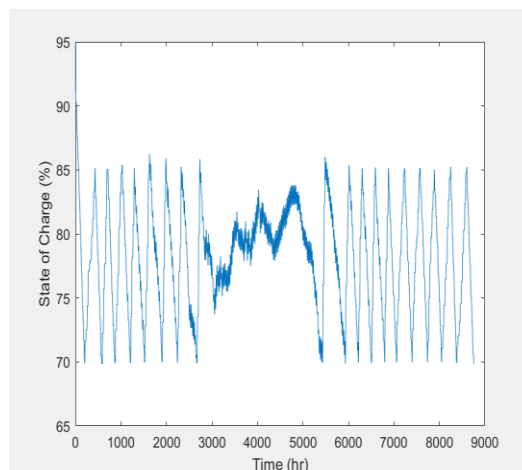
- **Χρόνος φόρτισης μπαταρίας**, αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου στο οποίο φόρτιζε η μπαταρία (διακοπτόμενα).
- **Χρόνος εκφόρτισης μπαταρίας**, αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου στο οποίο εκφόρτιζε η μπαταρία (διακοπτόμενα).
- **Χρόνος λειτουργίας μονάδας ηλεκτρόλυσης**, αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου στο οποίο λειτουργούσε η μονάδα ηλεκτρόλυσης (διακοπτόμενα).
- **Σύνολο κύκλων μπαταρίας**, αναφέρεται στον συνολικό αριθμό των κύκλων που ολοκληρώθηκαν κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας (γίνεται η παραδοχή πως ένας κύκλος δηλώνει μία φόρτιση να διαδέχεται μία εκφόρτιση ή το αντίστροφο).

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα Γραφήματα 5.5.(1-4) διαδοχικά όπως αναφέρονται τα σενάρια 1 έως 4. Τα γραφήματα αυτά, αφορούν την κατάσταση φόρτισης όπως μπαταρίας όπως παρουσιάζεται στα σενάρια στόχου παραγωγής υδρογόνου 1 έως 4.

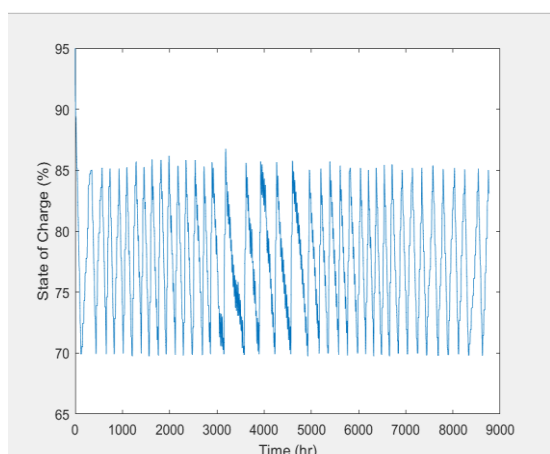
Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας :



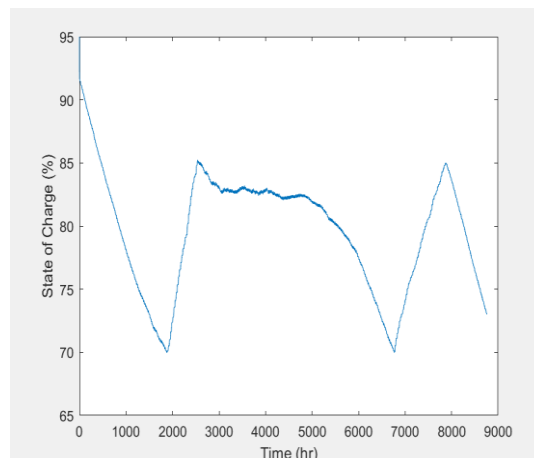
Γράφημα 5.5.1 Σενάριο 1



Γράφημα 5.5.2 Σενάριο 2



Γράφημα 5.5.3 Σενάριο 3



Γράφημα 5.5.4 Σενάριο 4

Όπως φαίνεται, η κατάσταση της μπαταρίας και στα 4 σενάρια κυμαίνεται μεταξύ 70-95%. Ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας είναι πολύ συχνός στο πρώτο σενάριο παραγωγής υδρογόνου, επιτυγχάνοντας τους περισσότερους κύκλους φόρτισης κατά τη διάρκεια ενός έτους. Λιγότεροι κύκλοι φόρτισης μπαταρίας με την πιο μικρή συχνότητα φορτίσεων και εκφορτίσεων αναφέρονται στο τελευταίο σενάριο με την μεγαλύτερη απαιτούμενη ποσότητα παραγωγής H_2 . Παρατηρείται επίσης, το σημείο του γραφήματος στο οποίο ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας είναι ο μικρότερος μέσα στη χρονική περίοδο. Αυτό το σημείο αναπαριστά την περίοδο του χρόνου όπου το σύστημα παραγωγής υδρογόνου παίρνει την περισσότερη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά λόγω ιδανικών συνθηκών ηλιοφάνειας.

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Ενέργεια που δίνει η μπαταρία στη μονάδα ηλεκτρόλυσης, kWh	3.807,2	34.166	372.390	3.615.800
Ενέργεια που δίνουν οι ΑΠΕ στη μπαταρία, kWh	4.014,1	34.820	423.000	3.068.900
Ενέργεια που δίνουν οι ΑΠΕ στη μονάδα ηλεκτρόλυσης, kWh	7.655,6	80.454	773.760	7.847.100
Ενέργεια που χάνεται, kWh	10,093	0	0	0

Πίνακας 5.3.3 Αποτύπωση αποτελεσμάτων που αφορούν τα τελικά ποσά ενέργειας

- **Ενέργεια που δίνει η μπαταρία στη μονάδα ηλεκτρόλυσης**, αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που έχει δώσει η μπαταρία για τη λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης μέχρι το τέλος του χρόνου.
- **Ενέργεια που δίνουν οι ΑΠΕ στη μπαταρία**, αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά για τη φόρτιση της μπαταρίας μέχρι το τέλος του χρόνου.
- **Ενέργεια που δίνουν οι ΑΠΕ στη μονάδα ηλεκτρόλυσης**, αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά για τη λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης μέχρι το τέλος του χρόνου.
- **Ενέργεια που χάνεται**, αναφέρεται στην συνολική ενέργεια που περισσεύει, επομένως μπορεί να μεταπωληθεί στο δίκτυο, μέχρι το τέλος του χρόνου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.3.4 τα συνολικά κόστη που προέκυψαν για την επένδυση ανά σενάριο στόχου.

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Συνολικό κόστος επένδυσης	30.708 €	286.370 €	2.926.500 €	26.827.000 €

Πίνακας 5.3.4 Αποτύπωση αποτελεσμάτων που αφορούν τα συνολικά κόστη επένδυσης

5.2 Σενάριο κόστους 2

Αντίστοιχα στο δεύτερο σενάριο κόστους, η μελέτη ολοκληρώθηκε με τα καταγεγραμμένα κόστη εξοπλισμού του συστήματος όπως φαίνονται στον Πίνακα 5.2 (μειωμένα κόστη για την μονάδα ηλεκτρόλυσης και την μονάδα αποθήκευσης H_2). Στη συνέχεια, μελετήθηκαν τέσσερα σενάρια βελτιστοποίησης συγκεκριμένου στόχου παραγωγής υδρογόνου διαδοχικά αυξανόμενο. Δηλαδή,

Σενάριο 1. Στόχος παραγωγής υδρογόνου 2.000.000 λίτρα

Σενάριο 2. Στόχος παραγωγής υδρογόνου 20.000.000 λίτρα

Σενάριο 3. Στόχος παραγωγής υδρογόνου 200.000.000 λίτρα

Σενάριο 4. Στόχος παραγωγής υδρογόνου 2.000.000.000 λίτρα

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται αναλυτικές εικόνες από το κομμάτι της βελτιστοποίησης μέσω Matlab, όπου χρησιμοποιήθηκε μέθοδος βελτιστοποίησης γενετικών αλγορίθμων, με στόχο την εύρεση των βέλτιστων μεγεθών των υποσυστημάτων (φωτοβολταϊκών, ηλεκτρόλυσης νερού και αποθήκευσης H₂) που θα οδηγούν σε προκαθορισμένη παραγωγή H₂ στο τέλος ενός έτους. Για κάθε σενάριο κόστους, όπως έχει ήδη αναφερθεί, έγινε χρήση προκαθορισμένων τιμών κόστους εξοπλισμού όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.2.1, αυτές οι μεταβλητές ορίζονται από την αρχή στον κώδικα καθώς παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην εύρεση των βέλτιστων τιμών.

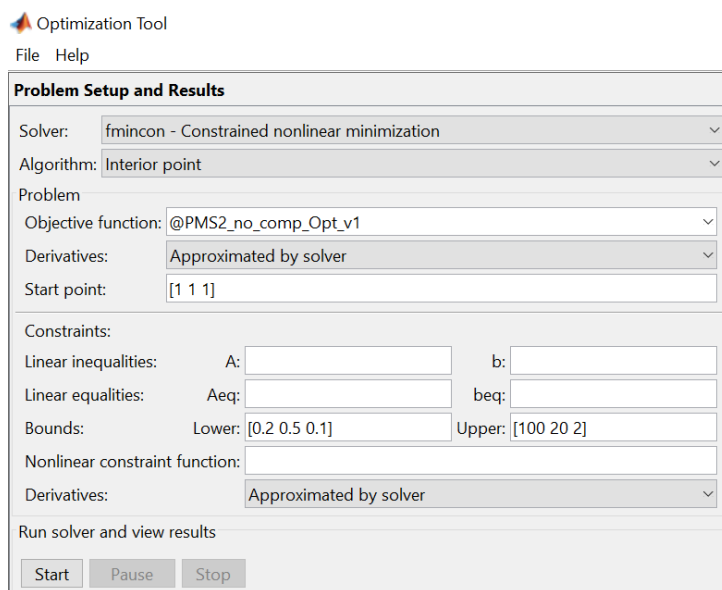
```
% 4 SCENARIOS AT  
% C_Cost_PV=18000; % 18000euro/10kWp  
% C_Cost_Elec=4000; % 4000euro/6.9kWp  
% C_Cost_Bat=500; % 500euro/500Ah  
% C_Cost_Tank=20; %200euro ta 500lt tank
```

Εικόνα 5.2.1 (MATLAB) Κόστη εξοπλισμού για σενάριο κόστους 2

Έπειτα, γίνεται χρήση του Optimization tool μέσω Matlab το οποίο θα ορίσει τις τελικές βέλτιστες τιμές που προκύπτουν για κάθε σενάριο στόχου παραγωγής σε συνδυασμό με το συγκεκριμένο σενάριο κόστους. Όπως παρουσιάζονται παρακάτω στις Εικόνες 5.2.2, 5.2.4, 5.2.6, 5.2.8 που αντιστοιχούν στα Σενάρια στόχου παραγωγής 1,2,3,4 αντίστοιχα. Οι τιμές που δόθηκαν στο εργαλείο βελτιστοποίησης Optimization tool, αφορούν ένα σημείο έναρξης Start Point και τα όρια στα οποία θα κυμαίνονται οι αντίστοιχες βέλτιστες τιμές Bounds: [Lower, Upper] οι τιμές αυτές μεταβάλλονται ανά σενάριο στόχου παραγωγής. Για όλα τα σενάρια, ορίζεται το σημείο έναρξης Start Point = [1,1,1] και το κατώτερο όριο Lower = [0.2, 0.5, 0.1] και παραμένουν σταθερά.

Οι βέλτιστες τιμές που προκύπτουν από το εργαλείο βελτιστοποίησης Optimization tool, αναφέρεται σε τρεις μεταβλητές opt = [a,b,c] όπου,

- a, βέλτιστο μέγεθος φωτοβολταϊκών
- b, βέλτιστο μέγεθος μπαταριών
- c, βέλτιστο μέγεθος συστήματος ηλεκτρόλυσης νερού



Εικόνα 5.2.2 (Optimtool) Εύρεση βέλτιστων τιμών για σενάριο στόχου 1

Αφού προέκυψαν οι βέλτιστες τιμές μέσω του εργαλείου βελτιστοποίησης, οι οποίες αφορούν τα μεγέθη που αναφέρθηκαν νωρίτερα, γίνεται εφαρμογή του μαθηματικού κώδικα με χρήση των μεταβλητών στόχου που αφορούν το σενάριο στόχου παραγωγής 1. Δηλαδή, την απαιτούμενη αποθήκευση υδρογόνου, την απαιτούμενη παραγωγή υδρογόνου αλλά και την τιμή πώλησης του υδρογόνου που έχει προκύψει από την βελτιστοποίηση. Το κομμάτι του κώδικα που αφορά τις αντίστοιχες εντολές παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.3.

```
% SCENARIO 1: PRODUCTION H2 = 2e6lt at the end of year with constraints
% optimal solution for a) 2e6 H2 (target) b) SOC: 15-100 (constraint),
% c) Minimum Power Loss at 10000Wh (constraint), d) Cost of Equipment at 10000euro (constraint)

% LOWER/UPPER BOUNDS [0.2 0.5 0.1] and [100 20 2];
opt=[0.7880266747633852 17.057932968800742 0.5567698937874241];

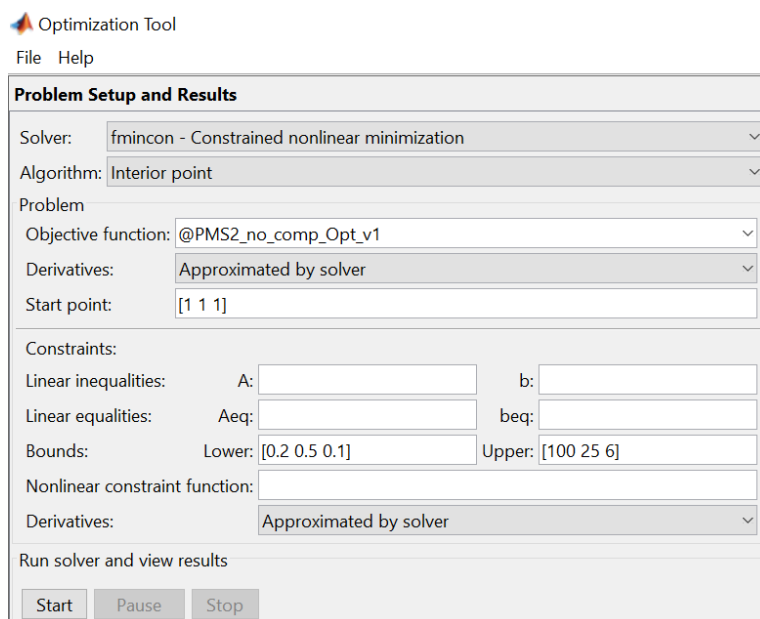
% S1=((Hydrogen_elec_lt(8761)-Target_H2))^2+((max_SOC-100))^2+((min_SOC-15)/1)^2;%
% S2=(C(1)-1e4)^2;
% S3=(Pres_loss_tot-1e4)^2;
% Break Even Price at 9.3 for H2, Tank =40;

help_tank_final=40;
Target_H2=2e6;
H2_cost_rate=9.3;
```

Εικόνα 5.2.3 (MATLAB) Εφαρμογή κώδικα για σενάριο στόχου 1

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση του προγράμματος στην Matlab, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.1, 5.4.2 και 5.4.3 στην στήλη του Σεναρίου 1.

Συνεχίζοντας, ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα για το Σενάριο στόχου 2, αυξάνοντας σε αυτή τη περίπτωση την μεταβλητή που αναφέρεται στο ανώτατο όριο των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.2.4 (Optimtool) Εύρεση βέλτιστων τιμών για σενάριο στόχου 2

Με τον ίδιο τρόπο εκτελείται και το κομμάτι του κώδικα στην Matlab για την ολοκλήρωση του Σεναρίου 2, αυξάνοντας τις τιμές που αφορούν την αποθήκευση, παραγωγή και πώληση του υδρογόνου όπως ορίζονται για το συγκεκριμένο σενάριο. Το κομμάτι του κώδικα που αφορά τις αντίστοιχες εντολές παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.5.

```
%SCENARIO 2: PRODUCTION H2 = 2e7lt at the end of year with constraints
% optimal solution for a) 2e7 H2 (target) b) SOC: 15-100 (constraint),
% c) Minimum Power Loss at 10000Wh (constraint), d) Cost of Equipment at 10000euro (constraint)

% LOWER/UPPER BOUNDS [0.2 0.5 0.1] and [100 25 6];
opt=[8.351651428629165 23.393622522417914 5.714721101058648];

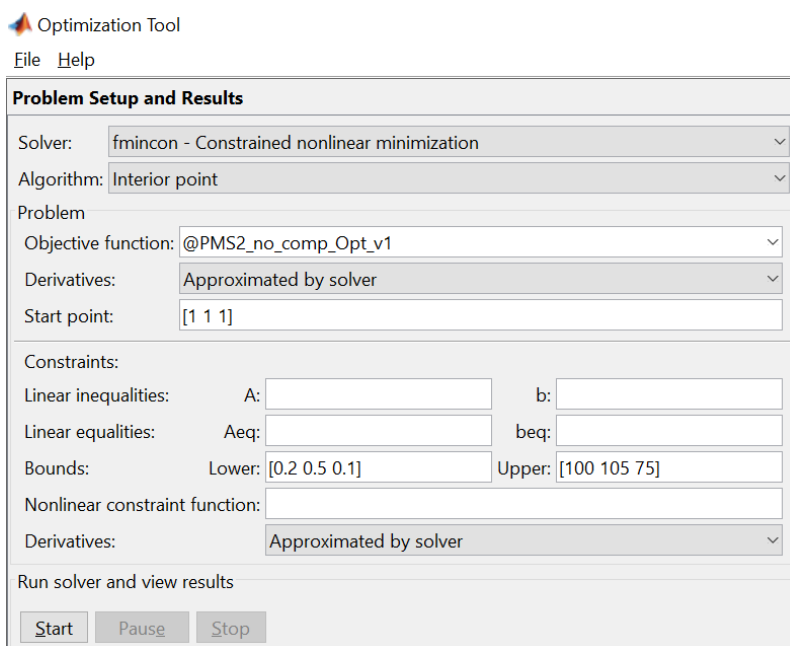
% S1=((Hydrogen_elec_lt(8761)-Target_H2))^2+(((max_SOC-100))^2)+(((min_SOC-15)/1)^2);%
% S2=(C(1)-1e4)^2;
% S3=(Pres_loss_tot-1e4)^2;
% Break Even Price at 7.2 for H2, Tank =400;

help tank final=400;
Target_H2=2e7;
H2_cost_rate=7.2;
```

Εικόνα 5.2.5 (MATLAB) Εφαρμογή κώδικα για σενάριο στόχου 2

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση του προγράμματος στην Matlab, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.1, 5.4.2 και 5.4.3 στην στήλη του Σεναρίου 2.

Συνεχίζοντας στο επόμενο σενάριο, ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα για το Σενάριο στόχου 3, αυξάνοντας και σε αυτή τη περίπτωση την μεταβλητή που αναφέρεται στο ανώτατο όριο των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.2.6 (Optimtool) Εύρεση βέλτιστων τιμών για σενάριο στόχου 3

Με τον ίδιο τρόπο εκτελείται και το κομμάτι του κώδικα στην Matlab για την ολοκλήρωση του Σεναρίου 3, αυξάνοντας τις τιμές που αφορούν την αποθήκευση, παραγωγή και πώληση του υδρογόνου όπως ορίζονται για το συγκεκριμένο σενάριο. Το κομμάτι του κώδικα που αφορά τις αντίστοιχες εντολές παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.7.

```
%SCENARIO 3: PRODUCTION H2 = 2e8lt at the end of year with constraints
% optimal solution for a) 2e8 H2 (target) b) SOC: 15-100 (constraint),
% c) Minimum Power Loss at 10000Wh (constraint), d) Cost of Equipment at 10000euro (constraint)

% LOWER/UPPER BOUNDS [0.2 0.5 0.1] and [100 105 75];
opt=[87.10217698290079 55.239702486397185 72.38099714580059];

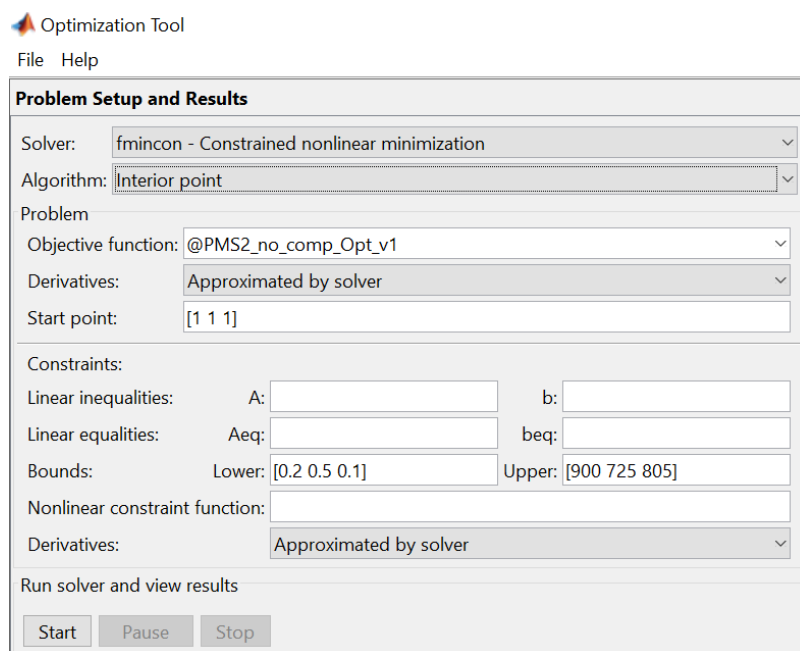
% S1=((Hydrogen_elec_lt(8761)-Target_H2)^2)+((max_SOC-100)^2)+((min_SOC-15)/1)^2;%
% S2=(C(1)-1e4)^2;
% S3=(Pres_loss_tot-1e4)^2;
% Break Even Price at 7.5 for H2, Tank =4000;

help_tank_final=4000;
Target_H2=2e8;
H2_cost_rate=7.5;
```

Εικόνα 5.2.7 (MATLAB) Εφαρμογή κώδικα για σενάριο στόχου 3

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση του προγράμματος στην Matlab, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.1, 5.4.2 και 5.4.3 στην στήλη του Σεναρίου 3.

Συνεχίζοντας στο τελευταίο σενάριο στόχου, ακολουθήθηκαν τα ίδια βήματα για το Σενάριο στόχου 4, αυξάνοντας και σε αυτή τη περίπτωση την μεταβλητή που αναφέρεται στο ανώτατο όριο των αποτελεσμάτων.



Εικόνα 5.2.8 (Optimtool) Εύρεση βέλτιστων τιμών για σενάριο στόχου 4

Με τον ίδιο τρόπο εκτελείται και το κομμάτι του κώδικα στην Matlab για την ολοκλήρωση του Σεναρίου 4, αυξάνοντας τις τιμές που αφορούν την αποθήκευση, παραγωγή και πώληση του υδρογόνου όπως ορίζονται για το συγκεκριμένο σενάριο. Το κομμάτι του κώδικα που αφορά τις αντίστοιχες εντολές παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.2.9.

```
%SCENARIO 4: PRODUCTION H2 = 2e9lt at the end of year with constraints
% optimal solution for a) 2e9 H2 (target) b) SOC: 15-100 (constraint),
% c) Minimum Power Loss at 10000Wh (constraint), d) Cost of Equipment at 10000euro (constraint)

% LOWER/UPPER BOUNDS [0.2 0.5 0.1] and [900 725 805];
opt=[793.6696676363388 679.7162390123696 667.0673977967676];

% S1=((Hydrogen_elec_lt(8761)-Target_H2)^2)+((max_SOC-100)^2)+((min_SOC-15)/1)^2;%
% S2=(C(1)-1e4)^2;
% S3=(Pres_loss_tot-1e4)^2;
% Break Even Price at 7 for H2, Tank =40000;

help_tank_final=40000;
Target_H2=2e9;
H2_cost_rate=7;
```

Εικόνα 5.2.9 (MATLAB) Εφαρμογή κώδικα για σενάριο στόχου 4

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την εκπόνηση του προγράμματος στην Matlab, παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.1, 5.4.2 και 5.4.3 στην στήλη του Σεναρίου 4.

Καταγραφή αποτελεσμάτων για **Σενάριο κόστους 2**

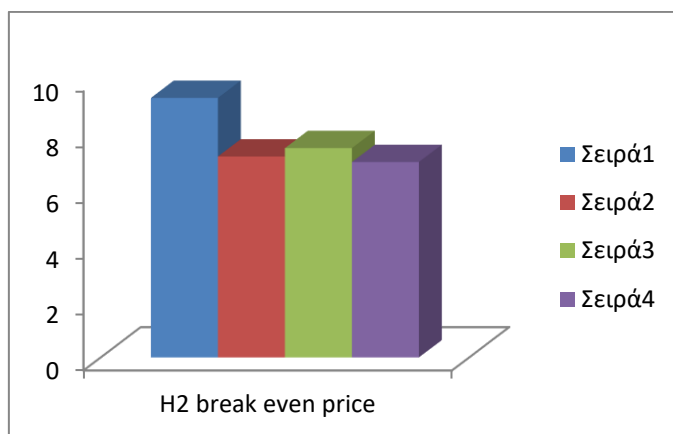
Πίνακας 5.4.1 Αποτύπωση αποτελεσμάτων που αφορούν το σύστημα

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Μέγεθος PV, kW	7,9	83,5	871	7936,7
Μέγεθος BAT, Ah	8529	11697	27620	339858
Μέγεθος ELEC, kW	3,8	39,4	499,4	4602,8
Μέγεθος TANK, m ³	20	200	2000	20000
Παραγωγή υδρογόνου, lt	1.999.900	19.998.000	200.030.000	2.000.000.000
Τιμή πώλησης υδρογόνου, €	9,3	7,2	7,5	7

Στον παραπάνω πίνακα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν κατά την εφαρμογή του Σεναρίου Κόστους 2 και αφορούν τα χαρακτηριστικά του συστήματος αντίστοιχα για κάθε σενάριο στόχου. Πιο αναλυτικά ,

- **Αριθμός (ή μέγεθος) PV , Αριθμός (ή μέγεθος) BAT , Αριθμός (ή μέγεθος) ELEC , Αριθμός (ή μέγεθος) TANK** , αναφέρεται στην ποσότητα των φωτοβολταϊκών, των μπαταριών, των συστημάτων ηλεκτρόλυσης και των δεξαμενών που προέκυψαν ως βέλτιστη λύση για την επίτευξη κάθε στόχου πολλαπλασιασμένο με το αντίστοιχο ονομαστικό μέγεθος όπως αναφέρεται για κάθε σενάριο.
- **Παραγωγή υδρογόνου** , αναφέρεται στην συνολική παραγωγή υδρογόνου που προέκυψε στο τέλος του έτους με σκοπό την επίτευξη κάθε αναφερομένου στόχου των σεναρίων (2 εκατομμύρια – 2 δισεκατομμύρια λίτρα).
- **Τιμή πώλησης υδρογόνου**, αφορά το break-even price , δηλαδή την τιμή πώλησης του υδρογόνου η οποία θα μηδενίσει τα έξοδα ώστε η καθαρή παρούσα αξίας NPV στο τέλος των 20 ετών να είναι μηδενική.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το γράφημα 5.6 στο οποίο γίνεται αναπαράσταση των τιμών πώλησης του υδρογόνου ανά σενάριο στόχου παραγωγής.

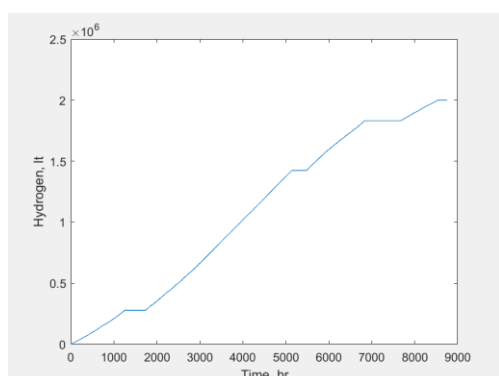


Γράφημα 5.6 Τιμή πώλησης του υδρογόνου ανά σενάριο στόχου παραγωγής

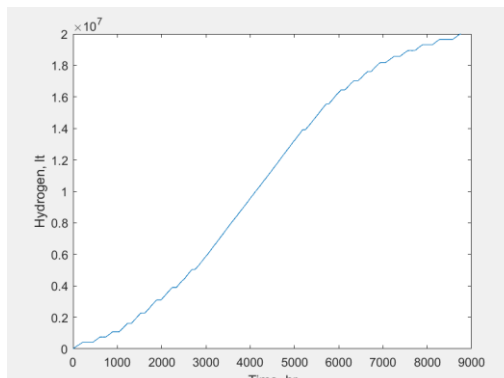
Όπως φαίνεται, στο σενάριο 4 η τιμή πώλησης του υδρογόνου είναι ξανά η χαμηλότερη συγκριτικά των υπόλοιπων σεναρίων. Ωστόσο, παρατηρείται πως η αντίστοιχη τιμή που προέκυψε στο σενάριο 2 είναι εξίσου χαμηλή και με μικρή απόκλιση από αυτή του σεναρίου 4 παρόλη την διαφορά που έχουν τα δύο αυτά σενάρια (2 και 4) συγκριτικά με το μέγεθος του συστήματος.

Αντίστοιχα με το προηγούμενο σενάριο κόστους, παρακάτω παρουσιάζονται τα *Γραφήματα 5.7.(1-4)* διαδοχικά όπως αναφέρονται τα σενάρια 1 έως 4. Τα γραφήματα αναφέρονται στην ποσότητα του υδρογόνου που επιτυγχάνει τον εκάστοτε στόχο σεναρίων 1 έως 4.

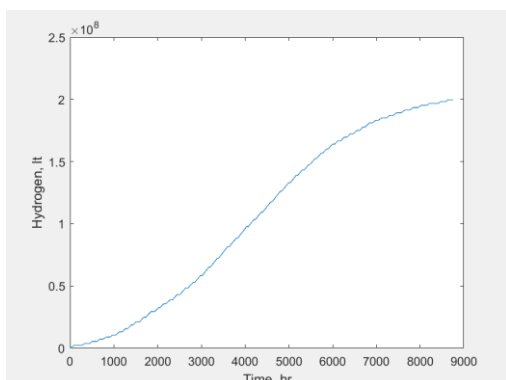
Ποσότητα υδρογόνου που φτάνει στο στόχο παραγωγής:



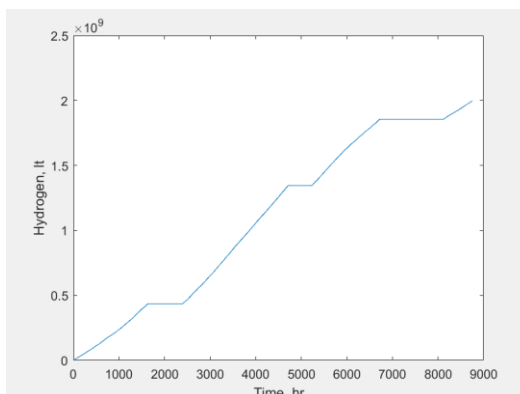
Γράφημα 5.7.1 Σενάριο 1



Γράφημα 5.7.2 Σενάριο 2



Γράφημα 5.7.3 Σενάριο 3



Γράφημα 5.7.4 Σενάριο 4

Όπως φαίνεται παραπάνω, σε όλα τα σενάρια παραγωγής υδρογόνου επιτυγχάνεται ο προβλεπόμενος στόχος. Παρατηρούμε πως σε όλα τα σενάρια παραγωγής, οι απαιτούμενες ποσότητες επιτυγχάνονται με συνεχή αύξηση. Στο πρώτο αλλά και στο τελευταίο σενάριο παρατηρείται μεγαλύτερη μείωση της σταθερότητας της παραγωγής υδρογόνου, ενώ στα υπόλοιπα σενάρια η παραγωγή φαίνεται να επιτυγχάνεται με μεγαλύτερη σταθερότητα στο ρυθμό.

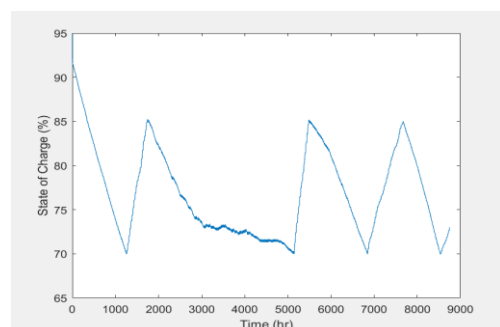
Πίνακας 5.4.2 Αποτύπωση αποτελεσμάτων που αφορούν την λειτουργία της μπαταρία και της μονάδας ηλεκτρόλυσης

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Χρόνος φόρτισης μπαταρίας, %	23,38	25,84	29,01	25,58
Χρόνος εκφόρτωσης μπαταρίας, %	49,06	44,94	38,06	45,08
Χρόνος λειτουργίας μονάδας ηλεκτρόλυσης, %	78,57	73,97	61,11	69,46
Σύνολο κύκλων	24	25	73	14
Ποσοστό κύκλων, %	13,12	13,67	39,91	7,65

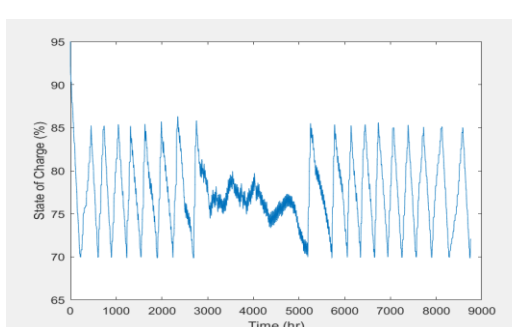
- **Χρόνος φόρτισης μπαταρίας**, αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου στο οποίο φόρτιζε η μπαταρία.
- **Χρόνος εκφόρτισης μπαταρίας**, αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου στο οποίο εκφόρτιζε η μπαταρία.
- **Χρόνος λειτουργίας μονάδας ηλεκτρόλυσης**, αναφέρεται στο ποσοστό του χρόνου στο οποίο λειτουργούσε η μονάδα ηλεκτρόλυσης.
- **Σύνολο κύκλων μπαταρίας**, αναφέρεται στον συνολικό αριθμό των κύκλων που ολοκληρώθηκαν κατά τη διάρκεια του χρόνου λειτουργίας.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται τα *Γραφήματα 5.8 (1-4)* διαδοχικά όπως αναφέρονται τα σενάρια 1 έως 4. Τα γραφήματα αυτά, αφορούν την κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας όπως παρουσιάζεται στα σενάρια στόχου παραγωγής υδρογόνου 1 έως 4.

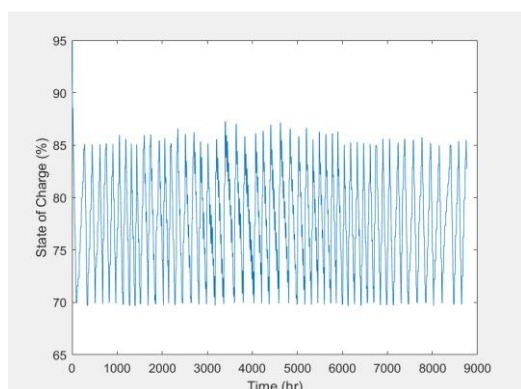
Κατάσταση φόρτισης μπαταρίας :



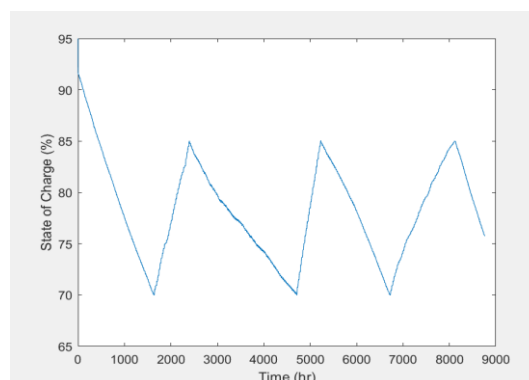
Γράφημα 5.8.1 Σενάριο 1



Γράφημα 5.8.2 Σενάριο 2



Γράφημα 5.8.3 Σενάριο 3



Γράφημα 5.8.4 Σενάριο 4

Της φαίνεται, η κατάσταση της μπαταρίας και στα 4 σενάρια κυμαίνεται μεταξύ 70-95%. Ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας είναι ο μεγαλύτερος στο τρίτο σενάριο παραγωγής υδρογόνου, επιτυγχάνοντας της περισσότερους κύκλους φόρτισης κατά τη διάρκεια της έτους. Λιγότεροι κύκλοι φόρτισης μπαταρίας με την πιο μικρή συχνότητα φορτίσεων και εκφορτίσεων αναφέρονται στο τελευταίο σενάριο με την μεγαλύτερη απαιτούμενη ποσότητα παραγωγής. Παρατηρείται της, το σημείο του γραφήματος στο οποίο ο ρυθμός φόρτισης και εκφόρτισης της μπαταρίας είναι ο μικρότερος μέσα στη χρονική περίοδο. Αυτό το σημείο αναπαριστά την περίοδο του χρόνου όπου το σύστημα παραγωγής υδρογόνου παίρνει την περισσότερη ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά λόγω ιδανικών συνθηκών ηλιοφάνειας.

Πίνακας 5.4.3 Αποτύπωση αποτελεσμάτων που αφορούν τα τελικά ποσά ενέργειας

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Ενέργεια που δίνει η μπαταρία στη μονάδα ηλεκτρόλυσης, kW	3.692,4	34.703	370.080	4.063.000
Ενέργεια που δίνουν οι ΑΠΕ στη μπαταρία, kW	3.112,6	35.419	426.500	3.560.500
Ενέργεια που δίνουν οι ΑΠΕ στη μονάδα ηλεκτρόλυσης, kW	7.770,4	79.921	776.400	7.400.400
Ενέργεια που χάνεται, kW	0	0	17,679	0

- **Ενέργεια που δίνει η μπαταρία στη μονάδα ηλεκτρόλυσης**, αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που έχει δώσει η μπαταρία για τη λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης μέχρι το τέλος του χρόνου.
- **Ενέργεια που δίνουν οι ΑΠΕ στη μπαταρία**, αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά για τη φόρτιση της μπαταρίας μέχρι το τέλος του χρόνου.
- **Ενέργεια που δίνουν οι ΑΠΕ στη μονάδα ηλεκτρόλυσης**, αναφέρεται στη συνολική ενέργεια που παρέχουν τα φωτοβολταϊκά για τη λειτουργία της μονάδας ηλεκτρόλυσης μέχρι το τέλος του χρόνου.
- **Ενέργεια που χάνεται**, αναφέρεται στην συνολική ενέργεια που περισσεύει, επομένως χάνεται από το σύστημα, μέχρι το τέλος του χρόνου.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.4 τα συνολικά κόστη που προέκυψαν για την επένδυση ανά σενάριο στόχου.

	Σενάριο 1	Σενάριο 2	Σενάριο 3	Σενάριο 4
Συνολικό κόστος επένδυσης	25.741 €	192.890 €	1.965.000 €	18.094.000 €

Πίνακας 5.4.4 Αποτύπωση αποτελεσμάτων που αφορούν τα συνολικά κόστη επένδυσης

5.3 Σύγκριση σεναρίων κόστους 1 & 2 με χρήση εμπειρικών σχέσεων

Η παραγόμενη ποσότητα H_2 που καταγράφηκε στα οκτώ συνολικά σενάρια στόχου του κεφαλαίου για τα δύο σενάρια κόστους επιμέρους, πρόκειται να αξιοποιηθεί ως καύσιμο σε αυτοκίνητα κινούμενα με αυτόνομη παροχή υδρογόνου. Το ενδεικτικό πρόβλημα προς μελέτη αφορά ένα αυτοκίνητο H_2 που χρειάζεται 6,68kg H_2 για να κινηθεί μία απόσταση 600χλμ. Το αυτοκίνητο θα χρειαστεί 150kg H_2 ανά έτος για να ικανοποιήσει τις ανάγκες του. Εάν θέσουμε έναν στόχο να καλυφθεί αυτή η ανάγκη για 15 αυτοκίνητα, δηλ. 2.230kg H_2 ανά έτος ή 25,000,000 lt H_2 ανά έτος τότε δύναται να σχεδιαστεί ένα υβριδικό σύστημα που να αποδίδει την παραπάνω ποσότητα H_2 . Κάτι, που έγινε όπως παρουσιάστηκε.

Θέλοντας μία ρεαλιστική απεικόνιση των αποτελεσμάτων, θεωρούμε ως βάση μία μονάδα ηλεκτρόλυσης 4.2kWp που αποδίδει 14lt/min [12, 16] και θα χρησιμοποιήσουμε αυτή την βάση με την μέθοδο των τριών. Παρουσιάζεται ο

Πίνακας 5.5 στον οποίο αναγράφεται το μέγεθος της μονάδας ηλεκτρόλυσης για όλα τα σενάρια στόχου και στα επιμέρους σενάρια κόστους. Στη συνέχεια, βάση του μεγέθους βάσης που αναφέρθηκε και μέσω μαθηματικών πράξεων (απλή μέθοδος των τριών), υπολογίστηκε η τελική παραγωγή υδρογόνου που προέκυψε στα αντίστοιχα σενάρια κόστους και καταγράφηκε στον Πίνακα 5.6.(1-4) αναφορικά των σεναρίων στόχου παραγωγής μαζί με την αντιστοιχία σε πλήθος των αυτοκινήτων που καλύπτονται από την καταγεγραμμένη παραγωγή υδρογόνου και στα δύο σενάρια κόστους. Τα χρόνια αποπληρωμής των εξόδων προέκυψαν από την διαίρεση της καθαρής παρούσας αξίας NPV, για κάθε σενάριο, με το άθροισμα των εξόδων του υδρογόνου και της περίσσειας ενέργειας. Η καθαρή παρούσα αξία περιγράφει το κόστος που αφορά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του συστήματος, δηλαδή τα έξοδα εγκατάστασης και αποτελεί βάση σύγκρισης και όχι αυστηρά την απόδοση του κεφαλαίου.

Πίνακας 5.5 Σύγκριση σεναρίων κόστους ως προς την ενέργεια που αξιοποιήθηκε

	Σενάριο Κόστους 1	Σενάριο Κόστους 2
Μέγεθος ELEC (σενάριο 1), kW	4,7	3,8
Μέγεθος ELEC (σενάριο 2), kW	38,7	39,4
Μέγεθος ELEC (σενάριο 3), kW	462	499,4
Μέγεθος ELEC (σενάριο 4), kW	3702,9	4602,8

Πίνακας 5.6.1 Σύγκριση σεναρίων κόστους ως προς την παραγωγή υδρογόνου και την αντίστοιχη κάλυψη σε αυτοκίνητα (Σενάριο 1)

	Σενάριο Κόστους 1	Σενάριο Κόστους 2
Παραγωγή υδρογόνου, λίτρα/χρόνο	7.018.153	5.721.387
Συνολική κάλυψη αυτοκινήτων/χρόνο	4,2	3,4
Χρόνια αποπληρωμής	8,26	7,74

Πίνακας 5.6.2 Σύγκριση σεναρίων κόστους ως προς την παραγωγή υδρογόνου και την αντίστοιχη κάλυψη σε αυτοκίνητα (Σενάριο 2)

	Σενάριο Κόστους 1	Σενάριο Κόστους 2
Παραγωγή υδρογόνου, λίτρα/χρόνο	57.617.699	58.721.286
Συνολική κάλυψη αυτοκινήτων/χρόνο	34,6	35,2
Χρόνια αποπληρωμής	8,18	7,5

Πίνακας 5.6.3 Σύγκριση σεναρίων κόστους ως προς την παραγωγή υδρογόνου και την αντίστοιχη κάλυψη σε αυτοκίνητα (Σενάριο 3)

	Σενάριο Κόστους 1	Σενάριο Κόστους 2
Παραγωγή υδρογόνου, λίτρα/χρόνο	688.016.342	743.749.518
Συνολική κάλυψη αυτοκινήτων/χρόνο	412,8	446
Χρόνια αποπληρωμής	8,36	7,33

Πίνακας 5.6.4 Σύγκριση σεναρίων κόστους ως προς την παραγωγή υδρογόνου και την αντίστοιχη κάλυψη σε αυτοκίνητα (Σενάριο 4)

	Σενάριο Κόστους 1	Σενάριο Κόστους 2
Παραγωγή υδρογόνου, λίτρα/χρόνο	5.514.292.157	6.854.437.727
Συνολική κάλυψη αυτοκινήτων/χρόνο	3.309	4.110
Χρόνια αποπληρωμής	8,25	7,24

Όπως φαίνεται, το σύστημα της μελέτης υπερκάλυψε τον στόχο του προβλήματος και στις δύο περιπτώσεις των σεναρίων κόστους, βάση των τιμών που προέκυψαν. Το σενάριο κόστους 2, επιφέρει συνολικά μεγαλύτερο συμφέρον στο σύστημα συγκριτικά με το σενάριο κόστους 1 όπως φαίνεται και στην αντιστοιχία με τα χρόνια που χρειάστηκαν στο σύστημα για αποπληρωμή των εξόδων αλλά και στην αντίστοιχη κάλυψη οχημάτων που επιτυγχάνεται.

Κεφάλαιο 6^ο : Συμπεράσματα, Κριτική ανάλυση και μελλοντικά βήματα

Το βασικό συμπέρασμα που προέκυψε κατά την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας είναι η ικανότητα ενός υβριδικού συστήματος το οποίο χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως καύσιμο να καλύψει έναν μεγάλο αριθμό αυτοκινήτων ως προς τις ανάγκες του σε κίνηση πολλών χιλιομέτρων.

Παράλληλα, ενθαρρυντικά φαίνονται τα σχέδια της Ευρωπαϊκής Ένωσης, αλλά και πολλών μεμονωμένων κρατών-μέλη τα οποία υιοθετούν νέες πολιτικές για τη χρήση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι ΑΠΕ αποτελούν τη βάση ενός νέου μοντέλου οικονομικής ανάπτυξης της λεγόμενη πράσινη ανάπτυξη και κεντρικό σημείο εστίασης της Οικολογικής Οικονομίας, που επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το παγκόσμιο οικολογικό κίνημα. Το ενδιαφέρον για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ξεκινά τη δεκαετία του 1970, ως αποτέλεσμα των απαντών πετρελαϊκών κρίσεων της εποχής αλλά και λόγω της καταστροφής του περιβάλλοντος και της υποβάθμισης της ποιότητας ζωής από τη χρήση ορυκτών ως πηγή ενέργειας. Σήμερα, λαμβάνονται υπόψιν στους επίσημους ενεργειακούς σχεδιασμούς των αναπτυγμένων κρατών, αν και αποτελούν ακόμη πολύ μικρό ποσοστό της ενεργειακής παραγωγής με ανερχόμενα βήματα να ετοιμάζονται για την περεταίρω αξιοποίησής τους.

Το υδρογόνο ως πηγή ενέργειας παρουσιάζεται ως μια πολύ ελπιδοφόρα τεχνολογία στον τομέα των καυσίμων. Το υδρογόνο είναι ένα αέριο τα αποθέματα του οποίου είναι ανεξάντλητα. Παρόλο που το υδρογόνο υπάρχει στη φύση σε πρακτικά ανεξάντλητες ποσότητες, είναι δεσμευμένο στο μεγαλύτερο μέρος του στα μόρια του νερού το οποίο αποτελείται από δύο άτομα υδρογόνου και ένα οξυγόνου. Έτσι, ενώ το νερό είναι άφθονο στον πλανήτη μας, η διάσπαση του μορίου απαιτεί ενέργεια.

Σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Ένωση, ο οδικός χάρτης για την απομάκρυνση του ενεργειακού τομέα από τον άνθρακα, προβλέπουν την επίτευξη μεριδίου ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές τουλάχιστον 30% ως το 2030. Ωστόσο, η Επιτροπή πρότεινε σε ανακοίνωση να οριστεί υποχρεωτικός στόχος το 27% της κατανάλωσης ενέργειας να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές καθώς μέσω των δεσμευτικών στόχων για τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, θα ευνοηθεί η ανάπτυξη στον τομέα της ενέργειας.

Το μερίδιο των ΑΠΕ για τη θέρμανση αναμένεται να παραμείνει σε γενικές γραμμές σταθερό τα επόμενα χρόνια, για το λόγο αυτό οι συνολικές εκπομπές CO₂ που σχετίζονται με τη θέρμανση το 2025 αναμένεται να είναι μόνο 2% χαμηλότερες από το 2019. Ο τομέας των μεταφορών είναι ιδιαίτερα κρίσιμος και αυτός που έχει πληγεί περισσότερο, ωστόσο μόνο 2 από τις 30 αεροπορικές εταιρείες παγκοσμίως έλαβαν κυβερνητική υποστήριξη, προκειμένου να δεσμευτούν για «πράσινες» αεροπορικές μεταφορές. Οι στόχοι καθαρών μηδενικών εκπομπών σε βασικές αγορές αναμένεται να επιταχύνουν την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Μετά την Ευρωπαϊκή Ένωση και αρκετές ευρωπαϊκές χώρες, τρεις μεγάλες ασιατικές οικονομίες ανακοίνωσαν πρόσφατα στόχους για την επίτευξη καθαρών μηδενικών εκπομπών: Ιαπωνία και Νότια Κορέα έως το 2050 και Κίνα έως το 2060. Ενώ είναι πολύ νωρίς για να εκτιμηθούν οι ακριβείς επιπτώσεις τους, οι στόχοι αυτοί είναι πολύ πιθανό να επιταχύνουν περαιτέρω την ανάπτυξη ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε όλους τους τομείς, με δυνητικά σημαντικές επιπτώσεις στις παγκόσμιες αγορές.

Βιβλιογραφία

- [1] Balat, Mustafa. 2005. "Usage of Energy Sources and Environmental Problems." *Energy Exploration and Exploitation* 23 (2): 141–68. <https://doi.org/10.1260/0144598054530011>.
- [2] Rehman, Shafiqur, Maher A. Bader, and Said A. Al-Moallem. 2007. "Cost of Solar Energy Generated Using PV Panels." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11 (8): 1843–57. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.03.005>.
- [3] Odhiambo, Morice R.O., Adnan Abbas, Xiaochan Wang, and Gladys Mutinda. 2021. "Solar Energy Potential in the Yangtze River Delta Region— a Gis-Based Assessment." *Energies* 14 (1). <https://doi.org/10.3390/en14010143>.
- [4] Jia, Yuting, Guruprasad Alva, and Guiyin Fang. 2019. "Development and Applications of Photovoltaic–Thermal Systems: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102 (June 2018): 249–65. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.12.030>.
- [5] Hernández-Callejo, Luis, Sara Gallardo-Saavedra, and Víctor Alonso-Gómez. 2019. "A Review of Photovoltaic Systems: Design, Operation and Maintenance." *Solar Energy* 188 (March): 426–40. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.06.017>.
- [6] Malinowski, Mariusz, Jose I. Leon, and Haitham Abu-Rub. 2017. "Solar Photovoltaic and Thermal Energy Systems: Current Technology and Future Trends." *Proceedings of the IEEE* 105 (11): 2132–46. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2690343>.
- [7] Veziroğlu, T. Nejat, and Sümer Şahin. 2008. "21st Century's Energy: Hydrogen Energy System." *Energy Conversion and Management* 49 (7): 1820–31. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.08.015>.
- [8] Ghribi, Djamila, Abdellah Khelifa, Said Diaf, and Maïouf Belhamel. 2013. "Study of Hydrogen Production System by Using PV Solar Energy and PEM Electrolyser in Algeria." *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (20): 8480–90. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.09.175>.
- [9] Egeland-Eriksen, Torbjørn, Amin Hajizadeh, and Sabrina Sartori. 2021. "Hydrogen-Based Systems for Integration of Renewable Energy in Power Systems: Achievements and Perspectives." *International Journal of Hydrogen Energy* 46 (63): 31963–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.06.218>.

- [10] Ghenai, Chaouki, Tareq Salameh, and Adel Merabet. 2020. "Technico-Economic Analysis of off Grid Solar PV/Fuel Cell Energy System for Residential Community in Desert Region." *International Journal of Hydrogen Energy* 45 (20): 11460–70. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.05.110>.
- [11] Touati, Said, Abderrahmane Belkaid, Rabah Benabid, Khaled Halbaoui, and Mustapha Chelali. 2012. "Pre-Feasibility Design and Simulation of Hybrid PV/Fuel Cell Energy System for Application to Desalination Plants Loads." *Procedia Engineering* 33: 366–76. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.01.1216>.
- [12] Ziogou, Chrysovalantou, Dimitris Ipsakis, Fotis Stergiopoulos, Simira Papadopoulou, Stella Bezergianni, and Spyros Voutetakis. 2012. "Infrastructure, Automation and Model-Based Operation Strategy in a Stand-Alone Hydrolytic Solar-Hydrogen Production Unit." *International Journal of Hydrogen Energy* 37 (21): 16591–603. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.179>.
- [13] Dufo-López, Rodolfo, José L. Bernal-Agustín, and Javier Contreras. 2007. "Optimization of Control Strategies for Stand-Alone Renewable Energy Systems with Hydrogen Storage." *Renewable Energy* 32 (7): 1102–26. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.013>.
- [14] Giannakoudis, Garyfallos, Athanasios I. Papadopoulos, Panos Seferlis, and Spyros Voutetakis. 2010. "Optimum Design and Operation under Uncertainty of Power Systems Using Renewable Energy Sources and Hydrogen Storage." *International Journal of Hydrogen Energy* 35 (3): 872–91. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.044>.
- [15] Kosonen, Antti, Joonas Koponen, Kimmo Huoman, Jero Ahola, Vesa Ruuskanen, Tero Ahonen, and Thomas Graf. 2016. "Optimization Strategies of PEM Electrolyser as Part of Solar PV System." *2016 18th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE 2016 ECCE Europe*. <https://doi.org/10.1109/EPE.2016.7695649>.
- [16] Ziogou, Chrysovalantou, Dimitris Ipsakis, Panos Seferlis, Stella Bezergianni, Simira Papadopoulou, and Spyros Voutetakis. 2013. "Optimal Production of Renewable Hydrogen Based on an Efficient Energy Management Strategy." *Energy* 55: 58–67. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.03.017>.
- [17] "Petroleum & Other Liquids - U.S. Energy Information Administration (EIA)." n.d. Accessed March 1, 2022. <https://www.eia.gov/petroleum/>.