



**ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΑΥΤΟΝΟΜΟΥ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΓΙΑ ΚΑΛΥΨΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ**

**ΟΙΚΙΑΣ**



**Βασιλική Τσουκαλά**

**Επιβλέπων καθηγητής: Κατσιγιαννης Ιωάννης**

**Χανιά 2021**

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή, κύριο Ιωάννη Κατσίγιαννη, για την πολύτιμη βοήθεια, συμβολή και καθοδήγηση του κατά τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της πτυχιακής εργασίας, καθώς και όλους τους καθηγητές του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ. που με βοήθησαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου με τις πολύτιμες γνώσεις που μου παρείχαν.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους και συμφοιτητές που με στήριξαν όλα αυτά τα χρόνια.

## Περιεχόμενα

|  |    |
|--|----|
| ΕΙΣΑΓΩΓΗ .....   | 7  |
| Κεφάλαιο 1: Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου .....  | 11 |
| 1.1) Υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα.....  | 11 |
| 1.2) Υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού .....  | 14 |
| 1.2.1) Αλκαλική ηλεκτρόλυση .....  | 15 |
| 1.2.2) Ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων-PEM ηλεκτρόλυση .....                    | 16 |
| 1.2.3.) Ηλεκτρολύτης στερεού οξειδίου (solid oxide electrolyzer) .....                       | 17 |
| 1.3) Ηλιακό-θερμική παραγωγή υδρογόνου .....   | 17 |
| 1.4) Παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρισμό παραγόμενο από ηλιακή ενέργεια .....                   | 18 |
| 1.5) Παραγωγή υδρογόνου μέσω φωτοηλεκτρόλυσης .....  | 18 |
| 1.6) Φωτοβιολογική παραγωγή υδρογόνου .....  | 19 |
| Κεφάλαιο 2: Είδη τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου .....                                     | 20 |
| 2.1) Συμπιεσμένο αέριο .....   | 20 |
| 2.2) Υγροποίηση υδρογόνου .....  | 21 |
| 2.3) Μεταλλικά υδρίδια .....   | 22 |
| 2.4) Ασφαλής χρήση υδρογόνου .....   | 22 |
| Κεφάλαιο 3: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας .....  | 24 |
| 3.1) Αιολική ενέργεια .....  | 24 |
| 3.2) Υδροηλεκτρική ενέργεια .....  | 25 |
| 3.3) Ενέργεια από τους ωκεανούς .....  | 26 |
| 3.4) Βιοενέργεια .....   | 27 |
| 3.5) Γεωθερμική ενέργεια .....   | 28 |
| 3.6) Ηλιακή ενέργεια .....   | 29 |
| 3.6.1) Φωτοβολταϊκά συστήματα .....  | 30 |
| 3.6.2) Υλικά για την απορρόφηση φωτός και διάφορα είδη ηλιακών στοιχείων .....               | 34 |
| 3.6.3) Πυρίτιο λεπτού υμενίου .....  | 34 |
| 3.6.4) Υπεριώδη ηλιακά στοιχεία .....  | 35 |
| 3.6.5) Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία υπεράυθρων (Infrared organic photovoltaic cells) ..... | 35 |
| 3.6.6) Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα .....  | 35 |
| Κεφάλαιο 4: Αυτόνομα Μικρό-Δίκτυα (SAM-Stand Alone Micro-grids) .....                        | 38 |
| 4.1) Υβριδικά συστήματα ενέργειας .....  | 39 |
| 4.2) Εγκατεστημένα υβριδικά συστήματα ηλιακού υδρογόνου/κυψέλης καυσίμου .....               | 43 |

|   |    |
|---|----|
| Κεφάλαιο 5: Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.....  | 47 |
| 5.1) Παράγοντες επιλογής συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για την ενσωμάτωση των ΑΠΕ .....              | 48 |
| 5.2) Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας .....   | 49 |
| 5.2.1)Υδροηλεκτρικά συστήματα- αντλησιοταμίευση ή υδραντλητικά συστήματα .....                          | 49 |
| 5.2.2)Συστήματα συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES) .....                            | 50 |
| 5.2.3)Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σφονδύλου .....   | 54 |
| 5.3) Αποθήκευση θερμικής ενέργειας .....  | 55 |
| 5.4) Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας .....  | 58 |
| 5.5) Αποθήκευση χημικής ενέργειας .....   | 58 |
| 5.5.1) Μπαταρίες.....   | 59 |
| 5.5.2) Μπαταρία μολύβδου-οξέος (Pb-acid) .....  | 59 |
| 5.5.3) Μπαταρία ιόντων λιθίου (Li-ion) .....  | 60 |
| 5.5.4)Μπαταρία θείου-νατρίου (Na-S) .....   | 61 |
| 5.5.5)Μπαταρία νικελίου-καδμίου (Ni-Cd).....  | 61 |
| 5.6)Κυψέλες καυσίμου .....  | 62 |
| 5.6.1)Ιστορική αναδρομή .....   | 62 |
| 5.6.2)Μια επισκόπηση των βασικών αρχών των κυψελών καυσίμου .....                                       | 62 |
| 5.6.3)Κυψέλη καυσίμου υδρογόνου .....   | 64 |
| 5.6.4)Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC-Proton Exchange Membrane Fuel Cell) ..... | 64 |
| 5.6.5)Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFCs-Molten Carbonate Fuel Cells) .....              | 65 |
| 5.6.6)Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC-Solid Oxide Fuel Cell).....                               | 66 |
| 5.6.7)Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης .....   | 66 |
| 5.6.8)Εφαρμογές κυψελών καυσίμου .....  | 69 |
| Κεφάλαιο 6:Τεχνοοικονομική αξιολόγηση με λογισμικό HOMER.....   | 73 |
| 6.1)Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης .....   | 77 |
| Κεφάλαιο 7:Συμπεράσματα .....   | 85 |
| Βιβλιογραφία .....  | 87 |

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σήμερα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της χρήσης ορυκτών καυσίμων είναι πιο εμφανείς από ποτέ. Ταυτόχρονα, παρατηρείται όλο και συνεχόμενα αυξημένη ζήτηση για ενέργεια. Για την αντιμετώπιση και των δυο ζητημάτων, έχει γίνει στροφή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας που είναι περισσότερο φιλικές προς το περιβάλλον, οι οποίες και εντάσσονται ολοένα και περισσότερο στον τομέα παραγωγής ενέργειας.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ) είναι πηγές όπου θεωρούνται πρακτικά ανεξάντλητες και καθόλου ρυπογόνες για το περιβάλλον. Οι τεχνολογίες ΑΠΕ αξιοποιούν κυρίως ενέργεια από τον ήλιο, τον άνεμο, την βιομάζα και την κίνηση του νερού, καθώς και την γεωθερμία. Οι εφαρμογές των ΑΠΕ κερδίζουν όλο και μεγαλύτερη αποδοχή από καταναλωτές, ωστόσο, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι οι ΑΠΕ είναι διαλείπουσες και διαρκώς μεταβαλλόμενες, η ανάγκη για συστήματα αποθήκευσης γίνεται μείζονος σημασίας για την αξιοπιστία των συστημάτων ΑΠΕ. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως η διάρκεια ζωής του, οι κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης, η απόδοση, η ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αποθηκεύσει ανά μονάδα μάζας, καθώς και παράγοντες όπως η ωριμότητα της τεχνολογίας του συστήματος και το κόστος. Συνήθεις συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι οι μπαταρίες, τα συστήματα αντλησιοταμίευσης, οι κυψέλες καυσίμου και άλλα.

Οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμου υδρογόνου θεωρούνται πολλά υποσχόμενες στους τομείς παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το υδρογόνο έχει πολλά πλεονεκτήματα ως καύσιμο. Σήμερα είναι σύνηθες οι κυψέλες καυσίμου να χρησιμοποιούνται σε διαφόρους τύπους υβριδικών συστημάτων, ενώ κερδίζουν σταδιακά έδαφος και σε τομείς όπως οι μεταφορές, με πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες να προχωρούν στην σχεδίαση και παραγωγή αυτοκινήτων με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου αντί για συμβατικές μηχανές εσωτερικής καύσης.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η βέλτιστη σχεδίαση ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος φωτοβολταϊκών πάνελ/μπαταριών/κυψέλης καυσίμου υδρογόνου, 100% απαλλαγμένο από συμβατικά καύσιμα, καθώς και η ανάλυση των μεθόδων παραγωγής υδρογόνου και των διαφόρων συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας, η διερεύνηση στα είδη κυψελών καυσίμου και στις εφαρμογές τους, καθώς και η συζήτηση κατά πόσο βιώσιμα είναι τα αυτόνομα συστήματα την τρέχουσα περίοδο.

Λέξεις κλειδιά: Υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας, υδρογόνο, αυτόνομο σύστημα, σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, κυψέλη καυσίμου, φωτοβολταϊκά πάνελ, λογισμικό HOMER

## Abstract

Nowadays, the environmental effects of the usage of fossil fuels are more obvious than ever. At the same time, a continuously increased demand for energy is observed. In order to address these two issues, there has been a shift to alternative forms of energy, which are more environmentally friendly and their portion is continuously increasing in the power generation sector.

Renewable Energy Sources (RES) are sources that are considered to be practically inexhaustible and with no pollutants for the environment. The RES technologies use mainly the solar energy, wind energy, biomass, the kinetic energy of water as well as geothermal energy. RES applications are gaining a wide acceptance by end users, however, considering the fact that RES are intermittent and variable, the need of energy storage systems is becoming a necessity for the reliability of RES systems. The choice of the appropriate energy storage system depends on many factors such as lifespan, charge/discharge cycles, efficiency, amount of energy which can be stored per unit mass, as well as factors like the maturity of the technology and the cost. Usual energy storage systems are batteries, pumped-hydro storage, fuel cells, etc.

The hydrogen fuel cell technologies are considered to be very promising in both of generation and energy storage due to the fact that hydrogen has many advantages as fuel. Today, it is common fuel cells to be used in various hybrid systems, while they are gradually gaining ground in sectors such as transportation, as many car manufacturers design and produce cars with fuel cells, instead of using conventional internal combustion engines.

The purpose of this Thesis is the optimal design of a stand-alone hybrid PV/battery/fuel cell power system, 100% free of conventional fossil fuels, as well as the analysis of hydrogen production methods, energy storage systems, fuel cell types and their applications, and the discussion of how much viable are standalone systems during this period.

Keywords: Hybrid power generation system, hydrogen, stand-alone system, energy storage system, fuel cell, photovoltaics, HOMER software

## ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Πλέον, παγκοσμίως, έχει τεθεί ο στόχος της αποτελεσματικής αντιμετώπισης των διαφόρων περιβαλλοντικών προβλημάτων τα οποία επηρεάζουν, είτε άμεσα είτε έμμεσα, τον ανθρώπινο πληθυσμό στο σύνολο του. Η υπογραφή του πρωτοκόλλου του Κιότο το 1997 (το πρώτο διεθνές νομικά δεσμευτικό έγγραφο που χρησιμοποιεί μηχανισμούς της αγοράς για την επίλυση παγκοσμίων περιβαλλοντικών προβλημάτων) και μια σειρά διασκέψεων των Ηνωμένων Εθνών (21η- η διάσκεψη του Παρισιού το 2015, 23η- η διάσκεψη της Βόννης το 2017), που έχουν ως σκοπό την θέσπιση περιβαλλοντικής πολιτικής και μέτρων με σκοπό την μακροπρόθεσμη αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων όπως η κλιματική αλλαγή και η ατμοσφαιρική ρύπανση, κάνουν ξεκάθαρη την ανησυχία σχετικά με το περιβάλλον και την ποιότητα της ανθρώπινης ζωής που επηρεάζεται άμεσα από αυτό. Η όξυνση των περισσότερων περιβαλλοντικών προβλημάτων σχετίζεται άμεσα με της εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, των οποίων η συγκέντρωση στην ατμόσφαιρα αυξάνεται συνεχώς εξαιτίας της καύσης ορυκτών καυσίμων.

Σήμερα, η παραγωγή ενέργειας βασίζεται κυρίως στα ορυκτά καύσιμα, στα οποία παρατηρείται μείωση αποθεμάτων η οποία θα γίνει πιο έντονη στο κοντινό μέλλον. Το προαναφερθέν σε συνδυασμό με την ταχέως αυξανόμενη παγκόσμια ζήτηση σε ενέργεια προμηνύει μελλοντικές ελλείψεις σε ενέργεια. Ο περιορισμός της χρήσης και η απεξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, κάρβουνο και φυσικό αέριο) καθώς επίσης και η ανάπτυξη καυσίμων και ενεργειακά συστήματα, πιο φιλικά προς το περιβάλλον, είναι ζωτικής σημασίας για τον περιορισμό των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου και, συνεπώς, την αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη και η κλιματική αλλαγή. Οι ανανεώσιμες και ήπιες-εναλλακτικές μορφές ενέργειας καλούνται να καλύψουν την μελλοντική ζήτηση σε ενέργεια σε τομείς όπως η βιομηχανία, οι μεταφορές και η οικιακή χρήση.

Η κύρια πρόκληση για την ενσωμάτωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στα συμβατικά ενεργειακά συστήματα είναι η ζωτικής σημασίας ύπαρξη συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας για την αντιμετώπιση της μεταβλητότητας των ανανεώσιμων πηγών, όπως για παράδειγμα η ηλιακή ακτινοβολία και η ταχύτητα του ανέμου. Αξίζει να σημειωθεί πως εκτός από την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές, μεταβάλλεται και η κατανάλωση ενέργειας ανάλογα την μέρα, τον μήνα και την εποχή. Για παράδειγμα, η παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά βρίσκεται στην αιχμή της γύρω στο μεσημέρι, ενώ μειώνεται πολύ τις απογευματινές ώρες. Από την άλλη πλευρά, η αιχμή της ζήτησης σε ενέργεια, συνήθως, συμβαίνει κατά την διάρκεια του απογεύματος (συνήθως εξαιτίας χρήσης κουζίνας ή κλιματιστικού και συστημάτων θέρμανσης, καθώς επίσης και χρήση πλυντηρίου). Διακυμάνσεις στη ζήτηση παρουσιάζονται ανάλογα και την μέρα της εβδομάδας, καθώς οι δραστηριότητες διαφοροποιούνται ανάλογα αν πρόκειται για σαββατοκύριακο ή όχι. Διακυμάνσεις, επίσης, παρουσιάζονται και ανάλογα την εποχή, και στην παραγωγή ενέργειας αλλά και στην κατανάλωση. Τα συμβατικά συστήματα αποθήκευσης ενέργειας όπως οι μπαταρίες και τα υδροηλεκτρικά φράγματα με ταμειυτήρες, έχουν τα δικά τους πλεονεκτήματα. Ωστόσο, παρουσιάζουν τεχνικές προκλήσεις και περιορισμούς. Ως εκ τούτου το υδρογόνο, το οποίο έχει την υψηλότερη

τιμή κατώτερης θερμογόνου δύναμης σε σύγκριση με την βενζίνη και το πετρέλαιο, μοιάζει να είναι το ιδανικό μέσο αποθήκευσης ενέργειας και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι είναι αποδοτικό, ελάχιστα επιβλαβές για το περιβάλλον, μπορεί να μεταφερθεί και δεν παρουσιάζει την εκφόρτιση που παρουσιάζουν οι μπαταρίες.

Το Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ε.Ε.) ενέκρινε, στις 11 Δεκεμβρίου του 2020 συμπεράσματα σχετικά με τα μέτρα που πρέπει να ληφθούν για την δημιουργία μιας αγοράς υδρογόνου για την Ευρώπη, ώστε να μπορέσει η Ε.Ε. να τηρήσει την δέσμευση της για επίτευξη ουδέτερου ισοζυγίου διοξειδίου του άνθρακα έως το 2050. Τα συμπεράσματα παρέχουν πολιτική καθοδήγηση για την εφαρμογή της στρατηγικής της Ε.Ε. για το υδρογόνο που παρουσίασε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή στις 8 Ιουλίου 2020. Στα συμπεράσματα αυτά, το Συμβούλιο αναγνωρίζει τον σημαντικό ρόλο που διαδραματίζει το υδρογόνο, ειδικά από ανανεώσιμες πηγές, στην επίτευξη των στόχων της Ε.Ε. για απαλλαγή από τις ανθρακούχες εκπομπές, στην οικονομική ανάκαμψη και στην ανταγωνιστικότητα της Ε.Ε. παγκοσμίως. Επιπλέον, το Συμβούλιο ζητάει από την Επιτροπή να δείξει τον δρόμο προς την επίτευξη των στόχων του χάρτη πορείας για την εγκατάσταση ηλεκτρολυτικών κυψελών ανανεώσιμου υδρογόνου, ισχύος τουλάχιστον 6 GW στην Ε.Ε. έως το 2024 και 40GW έως το 2030.

Οι στόχοι της ενεργειακής πολιτικής στην Ελλάδα, συμβατοί με αυτούς της Ευρωπαϊκής Ένωσης, συνοψίζοντας στα εξής:

- τουλάχιστον 20% συνεισφορά των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας μέχρι το τέλος του 2020,
- 20% μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου μέχρι το τέλος του 2020 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 και τουλάχιστον 40% μείωση μέχρι το 2030,
- έναν στόχο δεσμευτικό σε επίπεδο Ε.Ε. για κατά τουλάχιστον 32% επίτευξη του μεριδίου της κατανάλωσης ενέργειας από ΑΠΕ για το 2030,
- μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου κατά 16% σε σχέση με τα αντίστοιχα επίπεδα εκπομπών του έτους 2005 (για τους τομείς εκτός του συστήματος εμπορίας δικαιωμάτων εκπομπών) μέχρι το 2030,
- τουλάχιστον 30% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας μέχρι το 2030 και
- τουλάχιστον 30% εξοικονόμηση στην τελική κατανάλωση ενέργειας μέχρι το 2030[1].

Πολλά εκπαιδευτικά ιδρύματα, σε πολλές χώρες όπως η Αυστραλία, τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα, ο Καναδάς και η Γαλλία, διεξάγουν έρευνα σχετικά με τον σχεδιασμό αυτόνομου υβριδικού συστήματος (συνδυασμός μιας ανανεώσιμης πηγής ενέργειας και ενός συστήματος υδρογόνου) για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών οικιών, οικισμών και κτιριακών συγκροτημάτων, πολλές φορές εν απουσία υδρογονανθράκων (εφεδρικής γεννήτριας πετρελαίου) και τα αποτελέσματα δείχνουν πως αυτά τα συστήματα μπορούν να είναι αξιόπιστα, αποδοτικά οικονομικά και περισσότερο βιώσιμα από συστήματα που βασίζονται εξ ολοκλήρου σε ορυκτά καύσιμα, ειδικά σε περιπτώσεις απομακρυσμένων από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης περιοχών ή νησιών. Με άλλα λόγια, τα αυτόνομα συστήματα (συστήματα εκτός δικτύου- offgrid) θεωρούνται ιδανικά ως εναρκτήριο σημείο της μετάβασης από συστήματα παραγωγής ενέργειας που βασίζονται στα ορυκτά καύσιμα



σε συστήματα παραγωγής ενέργειας που βασίζονται έως και 100% σε ανανεώσιμες πηγές. Η βασική πρόκληση για ένα αυτόνομο σύστημα είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων του συστήματος για να είναι αξιόπιστο και ταυτόχρονα να ελαχιστοποιούνται τα αρχικά κόστη και τα κόστη λειτουργίας.

Σύμφωνα με στοιχεία του υπουργείου περιβάλλοντος η κατάσταση στην Ελλάδα σχετικά με τον τομέα του ηλεκτρισμού έχει ως εξής: το Ελληνικό ηλεκτρικό σύστημα χωρίζεται στο διασυνδεδεμένο σύστημα της ηπειρωτικής χώρας και τα αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα των νησιών. Το διασυνδεδεμένο σύστημα καλύπτει όλη την ηπειρωτική χώρα και τα νησιά που βρίσκονται σχετικά κοντά στις ακτές του και διασυνδέεται και με τα συστήματα όλων των γειτονικών χωρών. Όσο αφορά το είδος καυσίμου για την ηλεκτροπαραγωγή της χώρας, το μεγαλύτερο ποσοστό το κατέχουν οι σταθμοί που έχουν ως καύσιμο τον λιγνίτη (56%) και ακολουθούν οι σταθμοί φυσικού αερίου συνδυασμένου κύκλου (18%), τα πετρελαϊκά προϊόντα των οποίων η κύρια χρήση λαμβάνει χώρα στα μη διασυνδεδεμένα νησιά (13%) και οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) παρουσιάζοντας δυναμικό περεταίρω ανάπτυξης (13%). Αναλυτικότερα για την αξιοποίηση τεχνολογιών Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, η Ελλάδα εμφανίζει ένα υψηλό δυναμικό για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, για τον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής, από το 2006 και έπειτα γίνεται προσπάθεια για την βέλτιστη αξιοποίηση τεχνολογιών με υψηλό βαθμό εμπορικής ωριμότητας (για παράδειγμα: αιολικά πάρκα, φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις, βιομάζα και μικρά υδροηλεκτρικά έργα) με θέσπιση αλλαγών στο θεσμικό πλαίσιο αδειοδότησης και χρήσης συστημάτων ΑΠΕ, αλλά και με κατάλληλες χρηματοδοτήσεις. Επιπλέον, στην Ελλάδα παρατηρείται περιορισμένη ανάπτυξη δικτύων τηλεθέρμανσης και εγκαταστάσεις μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ). Γενικά, τέτοιου είδους συστήματα έχουν μικρή ζήτηση στην Ελλάδα, άρα και περιορισμένο επενδυτικό ενδιαφέρον. Το μεγαλύτερο μέρος δικτύων αυτού του είδους συναντάται στα διυλιστήρια, σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στη βιομηχανία τροφίμων. Παράλληλα, κάποιες μονάδες ηλεκτροπαραγωγής της ΔΕΗ έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα ώστε να αξιοποιούν δίκτυα τηλεθέρμανσης και εγκατεστημένες μονάδες ΣΗΘ για την κάλυψη θερμικών αναγκών αστικών περιοχών όπως η Πτολεμαΐδα, η Κοζάνη, το Αμύνταιο και η Μεγαλόπολη.

Η μόνη εγχώρια πηγή ορυκτών καυσίμων, στην Ελλάδα, είναι ο λιγνίτης. Τα κοιτάσματα λιγνίτη διακρίνονται σε τρεις κατηγορίες:

1. Κοιτάσματα λιγνίτη που έχουν παραχωρηθεί για εκμετάλλευση από την ΔΕΗ Α.Ε.
2. Κοιτάσματα λιγνίτη που έχουν μισθωθεί σε ιδιώτες.
3. Κοιτάσματα λιγνίτη που ανήκουν στο Δημόσιο και δεν είναι υπό εκμετάλλευση.

Παρόλο που ο λιγνίτης είναι το εθνικό καύσιμο, όσο αφορά την ηλεκτροπαραγωγή, σταδιακά περιορίζεται και αντικαθίσταται από καύσιμα όπως το φυσικό αέριο το οποίο πρωτοεμφανίστηκε στο ελληνικό ενεργειακό ισοζύγιο το 1996. Μέχρι και σήμερα, οι εισαγόμενοι υδρογονάνθρακες και κυρίως το πετρέλαιο, κυριαρχούν στο ελληνικό ενεργειακό ισοζύγιο, κάνοντας εμφανή την μεγάλη εξάρτηση της χώρας από αυτό. Συνεπώς, οι μη προβλέψιμες και μη ελεγχόμενες μεταβολές στην τιμή του πετρελαίου είναι

επικίνδυνες για την οικονομία, την κοινωνική ανάπτυξη αλλά και για την εθνική ασφάλεια.[2]

Όλα τα προαναφερθέντα, εφιστούν την προσοχή στην σταδιακή απεξάρτηση από τους υδρογονάνθρακες, και περισσότερο από το πετρέλαιο, και στην ανάπτυξη και αξιοποίηση των ΑΠΕ. Η Ελλάδα εμφανίζει ένα υψηλό δυναμικό για την αξιοποίηση τεχνολογιών ΑΠΕ και έχει δοθεί έμφαση κυρίως σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις και αιολικά πάρκα με σκοπό την ηλεκτροπαραγωγή. Από την άλλη πλευρά, η συνεισφορά των ΑΠΕ στη θερμική ενέργεια και στις μεταφορές με την χρήση βιοκαυσίμων παραμένει σχετικά χαμηλή κυρίως λόγω έλλειψης χρηματοδοτήσεων. Με βάση τα παραπάνω, παρατηρούνται μεγάλα περιθώρια βελτίωσης σχετικά με την αξιοποίηση των τεχνολογιών ΑΠΕ. Ένας τρόπος για την αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο είναι η ανάπτυξη ηλεκτρικών μικρό-δικτύων (microgrid). Ένα σύγχρονο μικρό-δίκτυο είναι ένα ολοκληρωμένο ενεργειακό σύστημα που αποτελείται από τοπική ομαδοποίηση καταναλωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αποθήκευση και πολλαπλά ηλεκτρικά φορτία. Ένα τέτοιο δίκτυο μπορεί είτε να είναι αυτόνομο είτε συνδεδεμένο με το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης. Τα αυτόνομα μικρό-δίκτυα (stand-alone micro grids - SAM) είναι συστήματα παραγωγής ενέργειας χαμηλής τάσης που καλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες περιοχής μικρής, συνήθως, έκτασης. Σε αυτή την εργασία ερευνάται με τη χρήση του εξειδικευμένου λογισμικού HOMERο σχεδιασμός ενός αυτόνομου υβριδικού συστήματος, το οποίο βασίζεται εξ ολοκλήρου σε ανανεώσιμες πηγές, για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός έτους μιας οικίας τετραμελούς οικογένειας, η οποία βρίσκεται στη Ζάκυνθο.

## Κεφάλαιο 1: Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου

Υπάρχουν τρεις διαφορετικές κατηγορίες του κυρίως συστήματος παροχής ενέργειας που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση της οικονομίας βασισμένη στο υδρογόνο: ορυκτά καύσιμα, πυρηνικοί αντιδραστήρες (συμπεριλαμβανομένου αντιδραστήρων σχάσης και σύντηξης, αν και πολύ μακροπρόθεσμα) και τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Περίπου το 99% του υδρογόνου παράγεται από ορυκτά καύσιμα κυρίως με αναμόρφωση του ατμού του φυσικού αερίου. Το ετήσιο παγκόσμιο ποσοστό παραγωγής υδρογόνου, παγκοσμίως, είναι περίπου 50 εκατομμύρια τόνοι (45 δισεκατομμύρια κιλά), το οποίο αντιπροσωπεύει το 2% της παγκόσμιας ενεργειακής ζήτησης.

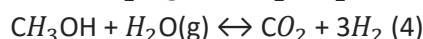
Αναμένεται ότι οποιοδήποτε σύστημα διανομής υδρογόνου μεγάλης κλίμακας θα πρέπει να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της αποθήκευσης χύδην, ώστε να αποδειχθεί ένα απόθεμα μεταξύ των εγκαταστάσεων παραγωγής και των διακυμάνσεων της ζήτησης. Αποδοτικές και χαμηλού κόστους τεχνικές ογκώδους αποθήκευσης είναι το ζητούμενο της έρευνας. Παρόλο που το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευθεί είτε σε αέρια είτε σε υγρή μορφή, ο πιο συνήθης τρόπος αποθήκευσης είναι συμπιεσμένο αέριο σε κυλίνδρους. Υπάρχουν ευρέως διαθέσιμοι κύλινδροι στο εμπόριο, όμως ενδέχεται, το κόστος να είναι υψηλό αν πρέπει να μετακινηθούν σε μεγάλη απόσταση από το σημείο που γεμίζονται. Δυστυχώς, η πυκνότητα ογκομετρικής ενέργειας\* αυτού του μέσου αποθήκευσης θεωρείται ακόμα χαμηλή και, συνεπώς, κάνει απαραίτητη την χρήση μεγαλύτερης χωρητικότητας αποθήκευσης. Σε υψηλότερες πιέσεις παρατηρείται μεγαλύτερο κόστος και αυξημένα θέματα σχετικά με την ασφάλεια. Υπάρχουν κάποιες εναλλακτικές λύσεις. Για παράδειγμα, αποθήκευση υδρογόνου σε στερεή φάση, υπό την μορφή μεταλλικών υδριδίων. Αυτός ο τρόπος αποθήκευσης θεωρείται κατάλληλος για στατικές χρήσεις (για παράδειγμα οικιακή χρήση), χάρις στις χαμηλότερες πιέσεις και που το βάρος δεν αποτελεί πρόβλημα. Μερικά προβλήματα, όμως, που είναι πιθανό να προκύψουν είναι το συνολικό βάρος των κραμάτων αποθήκευσης και η περιορισμένη χωρητικότητα των κραμάτων, το συνολικό κόστος του συστήματος και τις δυσκολίες στην απελευθέρωση του υδρογόνου. Από την άλλη μεριά, αυτή η μέθοδος υπόσχεται υψηλή ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας.[3]

### 1.1) Υδρογόνο από ορυκτά καύσιμα

Η παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα βασίζεται σε επεξεργασία παραγώγων των ορυκτών καυσίμων (όπως η βενζίνη, η μεθανόλη και η αιθανόλη) σε αέριο πλούσιο σε υδρογόνο. Η επεξεργασία καυσίμου μεθανίου (φυσικό αέριο) είναι η πιο συνήθης τεχνολογία παραγωγής υδρογόνου στο εμπόριο. Αέριο υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από υδρογονάνθρακες μέσω τριών βασικών τεχνολογιών: 1) αναμόρφωση ατμού (steam reforming-SR), 2) μερική οξείδωση (partial oxidation-POX), και 3) αυτοθερμική αναμόρφωση (auto thermal reforming-ATR). Σε κάθε μία από αυτές τις τεχνολογίες παράγεται μεγάλη ποσότητα μονοξειδίου του άνθρακα (CO) και πρέπει να ληφθεί υπόψη η ανάγκη επεξεργασίας αυτού του αερίου ρύπου (συνήθως χρησιμοποιούνται χημικά αντιδραστήρια για την μετατροπή του σε διοξείδιο άνθρακα).[4]

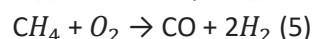
1) Αναμόρφωση ατμού- SR. Η αναμόρφωση ατμού είναι η λιγότερη ακριβή και η πιο διαδεδομένη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. Το πλεονέκτημα αυτής της τεχνολογίας προκύπτει από την υψηλή απόδοση της λειτουργίας της και τα χαμηλά κόστη λειτουργίας

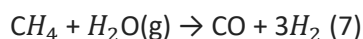
και παραγωγής. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες αυτής της τεχνολογίας είναι το φυσικό αέριο, η μεθανόλη και άλλοι οξυγονωμένοι υδρογονάνθρακες. Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την διαδικασία παραγωγής υδρογόνου είναι οι εξής:



Ολόκληρη η διαδικασία αποτελείται από δυο στάδια. Στο πρώτο στάδιο ο χρησιμοποιούμενος υδρογονάνθρακας αναμειγνύεται με ατμό και τροφοδοτείται σε σωληνοειδή καταλυτικό αντιδραστήρα. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας, παράγεται αέριο μείγμα  $H_2/CO$  με χαμηλή περιεκτικότητα σε  $CO_2$  ((1) και (2)). Η απαιτούμενη θερμοκρασία αντίδρασης επιτυγχάνεται με την προσθήκη οξυγόνου ή αέρα για το κομμάτι της καύσης του υδρογονάνθρακα στο εσωτερικό του αντιδραστήρα. Στο δεύτερο στάδιο, το ψυγμένο προϊόν τροφοδοτείται στον  $CO$  καταλυτικό μετατροπέα, όπου το μονοξείδιο του άνθρακα μετατρέπεται σε μεγάλο βαθμό σε διοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο. Η διαδικασία αναμόρφωσης ατμού απαιτεί χημικές ενώσεις απαλλαγμένες από θείο για να αποφευχθεί η απενεργοποίηση του χρησιμοποιούμενου καταλύτη. Η απαιτούμενη θερμοκρασία για την SR διαδικασία εξαρτάται από τον υδρογονάνθρακα ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί. Για παράδειγμα, για την μεθανόλη η διαδικασία λαμβάνει χώρα με θερμοκρασία  $180^\circ C$  και για τους οξυγονωμένους υδρογονάνθρακες, η θερμοκρασία μπορεί να είναι περισσότερο από  $500^\circ C$  για τους περισσότερους υδρογονάνθρακες. Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται διαιρούνται σε δυο κατηγορίες: σε μη πολύτιμα μέταλλα (συνήθως νικέλιο) και σε πολύτιμα μέταλλα από την VIII ομάδα του περιοδικού πίνακα (συνήθως λευκόχρυσος ή ρόδιο). Ένας παράγοντας που έχει σημαντικό ρόλο στην SR διαδικασία είναι ο λόγος ατόμων υδρογόνου προς άτομα άνθρακα ( $H:C$ ) του υδρογονάνθρακα που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη. Όσο μεγαλύτερη είναι αυτή η αναλογία τόσο μικρότερη είναι η εκπομπή διοξειδίου του άνθρακα. Η απόδοση της παραγωγή υδρογόνου με την SR επεξεργασία του μεθανίου σε βιομηχανική κλίμακα είναι περίπου 70-85%. Το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μεγάλη παραγωγή  $CO_2$  (περίπου  $7.05 \text{ kgCO}_2/\text{kgH}_2$ ).

**2) Μερική οξείδωση-POX.** Η μερική οξείδωση και η καταλυτική μερική οξείδωση (CPOX) των υδρογονανθράκων έχει προταθεί για την παραγωγή υδρογόνου για κυψέλες καυσίμου οχημάτων. Η υγροποιημένη πρώτη ύλη μπορεί να είναι μεθάνιο και βιοαέριο αλλά κυρίως βαριά κλάσματα πετρελαίου (για παράδειγμα πετρέλαιο θέρμανσης), των οποίων περαιτέρω επεξεργασία είναι δύσκολη. Η μερική οξείδωση είναι μια διαδικασία που δεν απαιτεί καταλύτη, στην οποία ο υδρογονάνθρακας που χρησιμοποιείται αεριοποιείται με την παρουσία οξυγόνου ((5) και (6)) και πιθανόν με την παρουσία ατμού (7) σε θερμοκρασίες  $1300-1500^\circ C$  και πιέσεις 3-8 MPa. Συγκριτικά με την αναμόρφωση ατμού ( $H_2:CO = 3:1$ ), παράγεται περισσότερο  $CO$  ( $H_2:CO = 1:1$  ή  $2:1$ ). Οπότε είναι απαραίτητη μια συμπληρωματική διαδικασία μετατροπής του μονοξειδίου του άνθρακα σε διοξείδιο του άνθρακα με υδρογόνο, με ατμό. Αυτή η αντίδραση συμβάλλει στην διατήρηση του ισοζυγίου ανάμεσα στα προϊόντα της κάθε αντίδρασης:



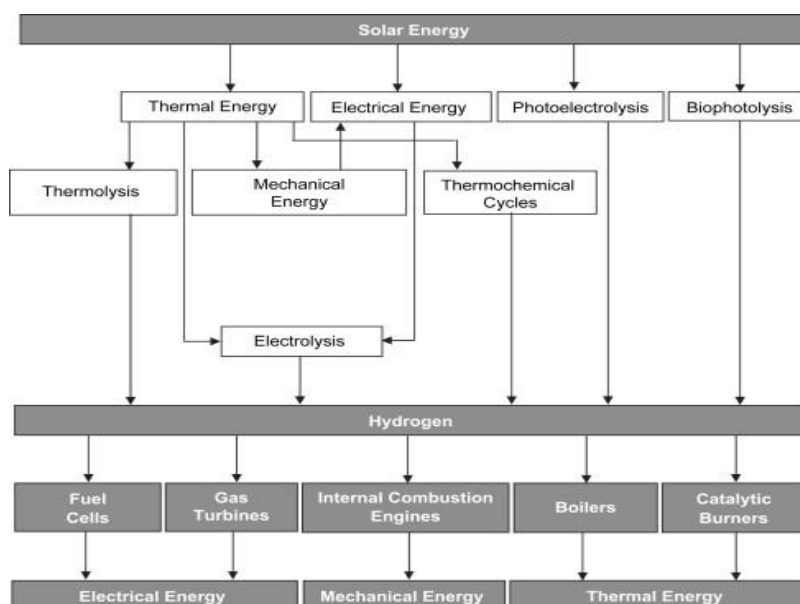


Το αέριο μείγμα που σχηματίζεται μέσω της μερικής οξείδωσης περιέχει  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , υδρόθειο ( $\text{H}_2\text{S}$ ), οξυθειοφίδιο του άνθρακα  $\text{COS}$ . Ένα μέρος του αερίου καίγεται για την παροχή αρκετής θερμότητας για την ενδόθερμη διαδικασία. Η αιθάλη που δημιουργείται από την αποσύνθεση του ακετυλενίου (αιθίνιο) είναι ένα ενδιάμεσο και ανεπιθύμητο προϊόν. Η ποσότητα του εξαρτάται από την αναλογία  $\text{H}:\text{C}$  στον αρχικό υδρογονάνθρακα που χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη. Υπάρχει, συνεπώς, όπως και στην SR διαδικασία, μια προτίμηση σε πρώτη ύλη με μεγαλύτερο λόγο  $\text{H}:\text{C}$ , όπως για παράδειγμα το φυσικό αέριο. Ενώ η λειτουργία του αντιδραστήρα είναι φθηνότερη σε σύγκριση με την αναμόρφωση ατμού, η επακόλουθη μετατροπή κάνει αυτή την τεχνολογία ακριβότερη. Αφού η διαδικασία δεν απαιτεί την χρήση καταλύτη, δεν απαιτείται αφαίρεση των θειούχων στοιχείων του φυσικού αερίου, τα οποία μειώνουν την απόδοση του καταλύτη. Οι θειούχες ενώσεις του αεριοποιημένου αρχικού υδρογονάνθρακα μετατρέπονται κατά 95% σε υδρόθειο και κατά 5% σε οξυθειοφίδιο του άνθρακα. Γίνεται προσθήκη καταλυτών στο σύστημα μερικής οξείδωσης (CPOX) για να μειωθεί η θερμοκρασία λειτουργίας. Ωστόσο ο έλεγχος της θερμοκρασίας αποδεικνύεται δύσκολος εξαιτίας του σχηματισμού ημίκαυστου άνθρακα (coke) κατά τις εξώθερμες αντιδράσεις. Για την μετατροπή του φυσικού αερίου, οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται συνήθως βασίζονται στο νικέλιο και το ρόδιο. Ωστόσο το κόστος του ρόδιου δεν είναι αμελητέο και το νικέλιο είναι επιρρεπής στον σχηματισμό άκαυστου υδρογονάνθρακα κατά την διάρκεια λειτουργίας. Συνήθως, η θερμική απόδοση των POX αντιδραστήρων με μεθάνιο ως καύσιμο κυμαίνεται στο 60-75%. [4]

3) Αυτοθερμική αναμόρφωση-ATR. Στην αυτοθερμική αναμόρφωση, γίνεται προσθήκη ατμού στην διαδικασία της μερικής οξείδωσης με καταλύτη (CPOX). Η ATR διαδικασία είναι συνδυασμός των αντιδράσεων της αναμόρφωσης ατμού (ενδόθερμες αντιδράσεις) και της μερικής οξείδωσης (εξώθερμες αντιδράσεις). Τα βασικά πλεονεκτήματα της ATR είναι το γεγονός ότι δεν απαιτείται εξωτερική θερμότητα στο σύστημα και ότι είναι φθηνότερη από την αναμόρφωση ατμού μεθανίου. Η επιλογή των συνθηκών λειτουργίας του αναμορφωτή εξαρτάται από το επιθυμητό αποτέλεσμα. Ο κύριος στόχος είναι μεγάλη παραγωγή υδρογόνου με χαμηλή περιεκτικότητα σε μονοξείδιο του άνθρακα. Η μέγιστη απόδοση υδρογόνου και η χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι δυνατό να επιτευχθούν με αναμόρφωση ατμού. Ωστόσο, η αναμόρφωση ατμού είναι ενδόθερμη διαδικασία και συνεπώς απαιτείται εξωτερική προσφορά ενέργειας στο σύστημα. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα της ATR, σε σύγκριση με την αναμόρφωση ατμού, είναι η γρήγορη εκκίνηση και ο γρήγορος τερματισμός της λειτουργίας, ενώ παράγει περισσότερο υδρογόνο, σε σύγκριση με την διαδικασία της μερικής οξείδωσης. Για την αναμόρφωση μεθανίου, η απόδοση είναι συγκρίσιμη με αυτή της μερικής οξείδωσης (60-75%) και ελαφρώς μικρότερη από την απόδοση της αναμόρφωσης ατμού. [4]

Ένας από τους κύριους τομείς της έρευνας σχετικά με την ηλιακή ενέργεια σχετίζεται με την ανάπτυξη μιας διαδικασίας παραγωγής ηλιακού καυσίμου (solar fuel). Ανάμεσα στα καύσιμα τα οποία διεκδικούν αυτό τον όρο, το υδρογόνο κατέχει μια διαπρεπή θέση χάρη το υψηλό του ενεργειακό περιεχόμενο, τις ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και την συμβατότητα που παρουσιάζει σε τομείς όπως η αποθήκευση και η διανομή. Το λεγόμενο

ηλιακό υδρογόνο περιγράφεται ως πιθανό μέσο αποθήκευσης ενέργειας που θα αντισταθμίσει την μεταβλητότητα της ηλιακής ενέργειας. Υδρογόνο μπορεί να παραχθεί με χρήση ηλιακής ενέργειας, με τέσσερις πιθανούς τρόπους. Κάθε μία από αυτές τις μεθόδους θα αναλυθεί παρακάτω. Κάποιες από αυτές τις μεθόδους περιλαμβάνουν καθιερωμένες βιομηχανικές μεθόδους, ενώ άλλες βρίσκονται ακόμα σε εργαστηριακό επίπεδο. Στο διάγραμμα 1 φαίνονται σχηματικά οι τέσσερις μέθοδοι.



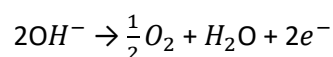
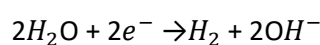
Διάγραμμα 1: Μέθοδοι παραγωγής ηλιακού υδρογόνου

Στο ίδιο διάγραμμα παρουσιάζονται, επίσης, διαφορετικοί τρόποι αξιοποίησης της ηλιακής ενέργειας από άλλες μορφές ενέργειας. Γίνεται προφανές ότι η το ηλιακό υδρογόνο (το υδρογόνο το οποίο παράγεται με χρήση ηλιακής ενέργειας- solar hydrogen) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παροχή θέρμανσης σε θερμικές εφαρμογές, ή να θέσει σε κίνηση τουρμπίνες για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, ή σε μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) για εφαρμογές μεταφοράς. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν το υδρογόνο ως καύσιμο είναι, κατά μέσο όρο, 20% πιο αποδοτικές από τις αντίστοιχες μηχανές βενζίνης παρόλο που αυτό έχει ως αποτέλεσμα μερική απώλεια ενέργειας εξαιτίας του χαμηλού ενεργειακού περιεχομένου στο στοιχειομετρικό μείγμα. Η χρήση του υδρογόνου ως καύσιμο σε τουρμπίνες και κινητήρες τζετ είναι, ουσιαστικά, παρόμοια με την χρήση συμβατικού καυσίμου τζετ. Το πλεονέκτημα που παρουσιάζει η χρήση υδρογόνου είναι η αποφυγή προβλημάτων που σχετίζονται με διάβρωση και δημιουργία ιζημάτων στις λεπίδες των τουρμπινών, κάτι που επεκτείνει την ζωής τους. Οι θερμοκρασίες εισόδου αερίου μπορούν εύκολα να ξεπεράσουν την θερμοκρασία των κανονικών αεριοστρόβιλων που είναι περίπου 800 °C αυξάνοντας, έτσι, την συνολική απόδοση. Ο μόνος ρύπος που παράγεται από την χρήση υδρογόνου ως καύσιμο σε τουρμπίνες και κινητήρες τζετ είναι το οξείδιο του αζώτου. Το υδρογόνο μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί και στα συμβατικά μπόιλερ.[3]

## 1.2) Υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού

Ανάμεσα στις διαφορετικές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου, η ηλεκτρόλυση του νερού θεωρείται αρκετά ελκυστική μέθοδος παραγωγής επειδή πρόκειται για βιώσιμη και

ανανεώσιμη χημική τεχνολογία. Έτσι, το υδρογόνο αντιπροσωπεύει ένα ιδανικό φορέα ενέργειας για την αποθήκευση διαλείπουσας ενέργειας (όπως η αιολική ή ηλιακή). Ηλεκτρόλυση του νερού ονομάζεται η διαδικασία κατά την οποία το νερό διασπάται σε υδρογόνο και οξυγόνο όταν διοχετεύεται σε αυτό ηλεκτρικό ρεύμα. Συνήθως μια μονάδα ηλεκτρόλυσης νερού αποτελείται από μια άνοδο και μια κάθοδο που διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη, και από μια πηγή ενέργειας. Ο ηλεκτρολύτης μπορεί να είναι ένα υδατικό διάλυμα, που περιέχει ιόντα, μια μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) ή μια κεραμική μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων οξυγόνου. Ένα συνεχές ρεύμα (DC) εφαρμόζεται από το αρνητικό τερματικό της πηγής συνεχούς ρεύματος στη κάθοδο (η θέση όπου λαμβάνει χώρα η αντίδραση αναγωγής), όπου το υδρογόνο παράγεται. Στην άνοδο, τα ηλεκτρόνια που παράγονται από την ηλεκτροχημική αντίδραση επιστρέφουν στον θετικό τερματικό της πηγής συνεχούς ρεύματος. Οι ημι-αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην κάθοδο και την άνοδο, αντιστοίχως, είναι οι εξής:[6]



### 1.2.1) Αλκαλική ηλεκτρόλυση

Η αγωγιμότητα του διαλύματος ενισχύεται από την χρήση δυνατού ηλεκτρολύτη που διανέμει ιόντα με υψηλή κινητικότητα, όπως νάτριο και κάλιο για τα θετικά ιόντα και υδροξείδια και χλωρίδια για τα αρνητικά ιόντα. Κατά την διάρκεια της ηλεκτρόλυσης, τα μόρια του νερού μετακινούνται από την κάθοδο με διάχυση καθώς καταναλώνονται. Ένα διάφραγμα διαχωρίζει τις διεργασίες της ανόδου και της καθόδου και έτσι συλλέγονται τα αέρια που σχηματίζονται. Συμπυκνωμένα διαλύματα υδροξειδίου του καλίου χρησιμοποιούνται συνήθως ως διάλυμα ηλεκτρολύτη επειδή έχουν πολύ υψηλή αγωγιμότητα και λιγότερα προβλήματα διάβρωσης σε σύγκριση με άλλους αλκαλικούς ηλεκτρολύτες. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου συνήθως βασίζονται στο νικέλιο λόγω του χαμηλού του κόστους. Οι κυψέλες ηλεκτρόλυσης μπορούν να έχουν δυο είδη διαμόρφωσης: μονοπολική και διπολική. Τα ηλεκτρόδια της μονοπολικής διαμόρφωσης αλλάζουν στον ηλεκτρολύτη και είναι απευθείας συνδεδεμένα με την DC πηγή ενέργειας: η άνοδος στο θετικό τερματικό και η κάθοδος στο αρνητικό τερματικό. Η συνολική τάση που εφαρμόζεται σε ολόκληρη την κυψέλη ηλεκτρόλυσης είναι ουσιαστικά ίδια με αυτή που εφαρμόζεται στα ξεχωριστά ζεύγη ηλεκτροδίων στην μονάδα ηλεκτρόλυσης ( $U_{tot}=U_{ind}$ ), αλλά το ρεύμα υποδιαιρείται ανάμεσα στις διαφορετικές κυψέλες της μονάδας ηλεκτρόλυσης.

Στη διπολική διαμόρφωση, μόνο τα δυο άκρα ηλεκτροδίων συνδέονται απευθείας με την πηγή συνεχούς ρεύματος. Τα άλλα εσωτερικά ηλεκτρόδια έχουν διπλό ρόλο: η μια πλευρά λειτουργεί ως κάθοδος για μια κυψέλη της μονάδας και η άλλη πλευρά λειτουργεί ως άνοδος για την παρακείμενη κυψέλη της μονάδας. Αυτές οι κυψέλες είναι συνδεδεμένες ηλεκτρικά χάρις τα ηλεκτρόδια τους και ιοντικά μέσω του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Η συνολική τάση της μονάδας ηλεκτρόλυσης είναι το άθροισμα των επιμέρους τάσεων των ξεχωριστών κυψελών της μονάδας ηλεκτρόλυσης ( $V_{tot}= n * V_i$ , όπου  $n$  ο αριθμός των κυψελών, αλλά το ρεύμα για κάθε κυψέλη της μονάδας ισούται με το ρεύμα εξόδου της γεννήτριας ( $I_{tot}=I_i$ ). Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται κατά την διάρκεια της

ηλεκτρόλυσης, είναι ίδια και στις δυο περιπτώσεις. Το εύρος ορίων αναφλεξιμότητας του μίγματος υδρογόνου και οξυγόνου απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό του συστήματος ηλεκτρόλυσης. Το διάφραγμα διαχωρισμού (ή μεμβράνη) πρέπει να εμποδίζει την ανάμειξη των δυο αερίων στο εσωτερικό της μονάδας ηλεκτρόλυσης. Η διπολική διαμόρφωση είναι πιο ριψοκίνδυνη αναφορικά με την ανάμειξη του οξυγόνου και του υδρογόνου εξαιτίας της ταυτόχρονης παραγωγής τους πάνω στο ίδιο διπολικό ηλεκτρόδιο (σε κάθε πλευρά). Επίσης, η διάρκεια ζωής του συστήματος αποτελεί σημαντικό κριτήριο και εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό με την ποιότητα των υλικών που χρησιμοποιούνται. Αυτά τα υλικά θα πρέπει να είναι ανθεκτικά σε υψηλές συγκεντρώσεις αλκαλικού ηλεκτρολύτη και στις συνθήκες λειτουργίας του ηλεκτρολύτη (πίεση και θερμοκρασία).[5-6]

### **1.2.2) Ηλεκτρόλυση με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων-PEM ηλεκτρόλυση**

Οι PEM ηλεκτρολύτες είναι διαδομένοι χάρις την πολύ απλή τους κατασκευή και από το γεγονός ότι είναι συμπαγείς. Η αρχή λειτουργίας ενός ηλεκτρολύτη με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων είναι απλή. Κατά την διάρκεια της ηλεκτρόλυσης, το νερό διασπάται στην άνοδο σε πρωτόνια και μοριακό οξυγόνο. Το οξυγόνο εκκενώνεται από την κυκλοφορία του νερού και τα πρωτόνια μετακινούνται στην κάθοδο υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου. Εκεί ανάγονται σε μοριακό υδρογόνο. Κάθε πρωτόνιο φέρει αρκετά μόρια νερού διάλυσης. Αυτό ονομάζεται ήλεκτρο-οσμωτική ροή. Κατά την διάρκεια του 20ου αιώνα, αρκετές καινοτομίες έχουν αυξήσει σημαντικά τις αποδόσεις των ηλεκτρολυτών. Η ιδέα των κελιών μηδενικού κενού (zero-gap cells) αναπτύχθηκαν για να αντιμετωπιστούν τα μειονεκτήματα της ήλεκτρο-οσμωτικής ροής. Αποτελείται από πορώδες ηλεκτρόδιο έναντι του στερεού διαχωριστή προκειμένου να μειωθεί η δια-πολική απόσταση και να απορριφθεί η παραγωγή αερίου στο πίσω μέρος του δια-πολικού χώρου. Επίσης, η ιδέα μηδενικού κενού με ακίνητο, σταθερό ηλεκτρολύτη συνίσταται στη διατήρηση του ηλεκτρολύτη (οξύ) στο διαχωριστικό έτσι ώστε να είναι σε θέση να ηλεκτρολύσει το νερό στο όξινο μέσο αποφεύγοντας ταυτόχρονα προβλήματα διάβρωσης. Βέβαια, αυτή η ενδιαφέρουσα προσέγγιση περιορίστηκε πρακτικά από τη διαρροή ηλεκτρολύτη που ωθήθηκε πίσω στο κύκλωμα του ηλεκτρολύτη. Έτσι, η μεμβράνη έχει διπλό ρόλο: λειτουργεί ως ηλεκτρολύτης και παράλληλα διαχωρίζει τα ηλεκτρόδια και τα αέρια. Συνεπώς, η μεμβράνη θα πρέπει να έχει συγκεκριμένες φυσικοχημικές ιδιότητες, όπως:

- Υψηλή ιοντική αγωγιμότητα για την διευκόλυνση της μετακίνησης των πρωτονίων και τη μείωση της ωμικής πτώσης,
- να μην έχει ηλεκτρική αγωγιμότητα για την αποφυγή βραχυκυκλωμάτων,
- καλή χημική σταθερότητα,
- χαμηλή διαπερατότητα σε οξυγόνο και υδρογόνο,
- καλή μηχανική σταθερότητα, ειδικά ανθεκτικότητα στην πίεση,
- καλή θερμική σταθερότητα (θερμοκρασία λειτουργίας πάνω από 80-100 °C

Η εμφάνιση των πρώτων μεμβρανών ανταλλαγής ιόντων την δεκαετία του '40 έκανε δυνατό να ληφθούν υπόψη βιομηχανικές εφαρμογές για την ιδέα zero-gap κελιών με ακίνητο ηλεκτρολύτη.[5]

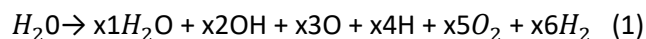


### 1.2.3.) Ηλεκτρολύτης στερεού οξειδίου (solid oxide electrolyzer)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου είναι ήλεκτρο-χημικές συσκευές που μπορούν να λειτουργήσουν αναστρέψιμα στην λειτουργία ηλεκτρόλυσης. Στον ηλεκτρολύτη στερεού οξειδίου, ο υδρατμός ανάγεται σε μοριακό υδρογόνο ( $H_2$ ). Η ηλεκτρόλυση σε υψηλές θερμοκρασίες επιτρέπει την μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας γιατί, με αυτό τον τρόπο, προσφέρεται μέρος της ενέργειας που απαιτείται για την ηλεκτρόλυση υπό την μορφή θερμότητας, που είναι φθηνότερη από την ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, η υψηλή θερμοκρασία προάγει την αγωγή του ηλεκτρολύτη και επιταχύνει την κινητική της αντίδρασης, μειώνοντας την απώλεια ενέργειας λόγω της πόλωσης του ηλεκτροδίου. Έτσι, η απόδοση της ηλεκτρόλυσης σε υψηλή θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη από αυτή της ηλεκτρόλυσης σε χαμηλή θερμοκρασία. Η απόδοση ενός συμβατικού ηλεκτρολύτη υψηλής θερμοκρασίας μπορεί να φτάσει μέχρι και 92%, ενώ οι ηλεκτρολύτες χαμηλής θερμοκρασίας έχουν απόδοση μέχρι και 85%. Το σύστημα υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιεί ως ηλεκτρολύτη κεραμικά αγώγιμα στα ιόντα οξυγόνου (διοξείδιο του ζirkονίου-  $ZrO_2$  σταθεροποιημένο με οξείδιο του μαγνησίου-  $MgO$  ή οξείδιο του ασβεστίου  $CaO$ ). Η θερμοκρασία του νερού φτάνει 200 °C για να τροφοδοτεί με ατμό την κάθοδο. Το κελί ηλεκτρόλυσης έχει θερμοκρασία λειτουργίας 800-1000 °C, που διασφαλίζει την αγωγή του στερεού ηλεκτρολύτη. Ο υδρατμός αποσυντίθεται σε αέρια υδρογόνου και ιόντα οξυγόνου ( $O^{2-}$ ). Τα ιόντα οξυγόνου μεταφέρονται μέσω του κεραμικού στερεού ηλεκτρολύτη στην άνοδο, όπου οξειδώνονται προς σχηματισμό αέριου οξυγόνου.[5]

### 1.3) Ηλιακό-θερμική παραγωγή υδρογόνου

Οι μέθοδοι ήλιο-θερμικής παραγωγής υδρογόνου μπορούν να διαχωριστούν σε διαφορετικές κατηγορίες. Υδρογόνο μπορεί να αποκτηθεί μέσω της θερμόλυσης (θερμική αποσύνθεση) του νερού, χρησιμοποιώντας θερμική ενέργεια από τον ήλιο. Η διαδικασία αποσύνθεσης (διάσπαση), ωστόσο, είναι μερική όπως φαίνεται στην εξίσωση (1) και η έκταση της είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας αντίδρασης και της πίεσης



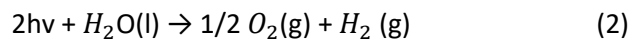
Αξίζει να σημειωθεί ότι, σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να προκύψει ο χαμηλός ρυθμός διάστασης του νερού και ο κίνδυνος επανένωσης του υδρογόνου και του οξυγόνου και να οδηγήσει σε σχηματισμό νερού. Συνεπώς, απαιτείται η ενεργειακά εντατική διαδικασία διαχωρισμού οξυγόνου-υδρογόνου, σε συνδυασμό με τεχνολογία μεμβράνης. Η θερμόλυση απαιτεί ακραία υψηλές θερμοκρασίες (>2200 K) ώστε να θεωρηθεί ότι έχει μικρή τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα στο κοντινό μέλλον. Το πρόβλημα που έγκειται και μένει να επιλυθεί είναι η εύρεση υλικών που είναι ανθεκτικά σε τόσο υψηλές θερμοκρασίες. Η διαδικασία της θερμόλυσης του νερού έχει μελετηθεί θερμοδυναμικά, οικονομικά και πειραματικά σε εργαστηριακή κλίμακα. Παρά τις προσπάθειες για αποτελεσματική ανάκτηση θερμότητας, η γενική απόδοση παρέμεινε χαμηλή. Ως εκ τούτου, είναι απαραίτητες διαδικασίες με νέα σχέδια για την αντιμετώπιση της χαμηλής απόδοσης και γίνονται κάποιες προσπάθειες πάνω σε αυτό. Προς το παρόν, δεν υπάρχει κάποια βιομηχανική εργοστασιακή μονάδα ηλιακής θερμόλυσης σε εμπορική ή πολιτική κλίμακα.[3]

#### **1.4) Παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρισμό παραγόμενο από ηλιακή ενέργεια**

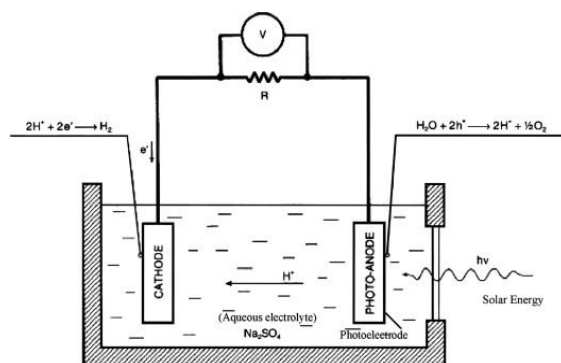
Η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρισμό λαμβάνει χώρα μέσω των φωτοβολταϊκών στοιχείων. Με το ρεύμα που παράγεται από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία πραγματοποιείται η ηλεκτρόλυση. Από άποψη οικονομίας και οικολογίας, η πιο αποδοτική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου θεωρείται η μέθοδος κατά την οποία η ηλεκτρόλυση πραγματοποιείται με ρεύμα που παράγεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Από την στιγμή που η απόδοση των σύγχρονων φωτοβολταϊκών στοιχείων (πάνελ, συλλεκτών) και ηλεκτρολυτών είναι περίπου 20% και 80% αντίστοιχα, η συνολική απόδοση της ηλιακής ενέργειας μετατρεπόμενη σε χημική ενέργεια (υπό την μορφή υδρογόνου) είναι περίπου 16%. [3]

#### **1.5) Παραγωγή υδρογόνου μέσω φωτοηλεκτρόλυσης**

Η φωτοηλεκτρόλυση του νερού είναι άλλη μια μέθοδος μετατροπής της ηλιακής ενέργειας σε καύσιμο (υπό την μορφή υδρογόνου). Κατά την φωτοηλεκτρόλυση, χρησιμοποιούνται συστήματα συλλογής φωτοηλεκτροχημικού φωτός (PEC- photo electrochemical cell) για την ηλεκτρόλυση του νερού. Αυτά τα συστήματα, όπως αυτό του διαγράμματος 2, όταν εκτίθενται στο φως του ήλιου, το φωτοηλεκτρόδιο-ημιαγωγός (άνοδος ή κάθοδος), βυθισμένο σε υδαρή ηλεκτρολύτη, θα παράγουν επαρκή τάση για να διαχωρίσει τα μόρια του νερού: συνήθως το άλλο ηλεκτρόδιο είναι μεταλλικό. Φωτόνια με ενέργεια μεγαλύτερη από το κενό ζώνης του ημιαγωγού (band gap- συνήθως έχει τιμή που κυμαίνεται: 1-1,5 eV και 2-4eV) μπορούν να απορροφηθούν από τον ημιαγωγό, δημιουργώντας ζεύγη οπών ηλεκτρονίων, τα οποία διαχωρίζονται από το ηλεκτρικό πεδίο στην περιοχή φορτίου χώρου ή εξάντλησης (space-charge region) ανάμεσα στον ημιαγωγό και τον ηλεκτρολύτη. Το ηλεκτρικό πεδίο αντικατοπτρίζει την κάμψη της ζώνης της αγωγιμότητας και η ζώνη σθένους ακμών της επιφάνειας ημιαγωγού και είναι απαραίτητη για την παροχή των ελεύθερων φορέων στο κατάλληλο ηλεκτρόδιο. Η συνολική αντίδραση γίνεται:



όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck και  $\nu$  η συχνότητα. Η φωτοηλεκτρόλυση ενσωματώνει απορρόφηση ηλιακής ενέργειας την απορρόφηση της ηλιακής ενέργειας και την ηλεκτρόλυση του νερού σε ένα φωτοηλεκτρόδιο. Αυτή η συσκευή εξαλείφει την ανάγκη για ηλεκτρολύτη. Υπάρχουν ποικίλλες διαμορφώσεις φωτοηλεκτροχημικών κυψελών στην βιβλιογραφία όπως: μονό φωτοηλεκτρόδιο, δι-φωτοηλεκτρόδιο και υβριδικό φωτοηλεκτρόδιο. Η απόδοση μετατροπής της ενέργειας με αυτή την μέθοδο εξαρτάται κυρίως από τα υλικά κατασκευής των φωτο-ηλεκτροδίων. Η μέγιστη θεωρητική απόδοση εκτιμάται ότι είναι περίπου 35%. Σε τρέχουσα έρευνα, τα συστήματα φωτοηλεκτρόλυσης φαίνεται να έχουν απόδοση περίπου 18%. Ωστόσο, αυτή η απόδοση αποκτήθηκε μόνο για μια μικρή ποσότητα παραγόμενου υδρογόνου. [3]



Διάγραμμα 2: Φώτο-ηλεκτρόλυση

## 1.6) Φωτοβιολογική παραγωγή υδρογόνου

Η φωτοβιολογική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου χρησιμοποιεί τις ίδιες διαδικασίες που συναντώνται στην φωτοσύνθεση των φυτών και των αλγών αλλά σε αυτή την μέθοδο οι διαδικασίες οδηγούν σε παραγωγή αέριου υδρογόνου αντί για παραγωγή βιομάζας που περιέχει άνθρακα. Οι βιολογικές διαδικασίες παραγωγής υδρογόνου μπορούν να ομαδοποιηθούν ως εξής: σε εξαρτώμενες από το φως και σε μη εξαρτώμενες από το φως. Οι διαδικασίες που εξαρτώνται από το φως περιλαμβάνουν την άμεση και έμμεση βιοφωτόλυση, ενώ η ζύμωση χωρίς φως είναι η κύρια διαδικασία που δεν εξαρτάται από την παρουσία φωτός. Η φωτοβιολογική παραγωγή υδρογόνου από νερό (βιοφωτόλυση), απαιτεί έναν αποτελεσματικό βιολογικό μετατροπέα, τα μικροάλγη, και έναν φωτοβιοαντιδραστήρα. Τα μικροάλγη είναι οι μόνοι πιθανοί υποψήφιοι για τέτοιες διαδικασίες και πιο συγκεκριμένα, το *Chlamydomonas reinhardtii* αποτελεί το μικρόφυκος με τις μεγαλύτερες προοπτικές στην παραγωγή υδρογόνου. Πρέπει να αναπτυχθούν στελέχη μικροφυκών που εμφανίζουν υψηλούς ρυθμούς παραγωγής υδρογόνου και απόδοση φωτοσύνθεσης σε πυκνές καλλιέργειες. Ένα πλεονέκτημα των βιολογικών διεργασιών είναι ότι καταλύονται από μικροοργανισμούς σε θερμοκρασία και πίεση περιβάλλοντος. Οι βιολογικές μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου δεν έχουν αναπτυχθεί για εμπορική χρήση ακόμη, παρά μόνο σε εργαστηριακό επίπεδο και σε μικρά (<10 m<sup>2</sup>) συστήματα υπαίθριας επίδειξης\*. Ένας λόγος που συμβαίνει αυτό είναι η σχετικά μικρή απόδοση της φωτοσύνθεσης στην πράξη: η μετατροπή της ηλιακής ενέργειας από δέντρα και γεωργικές καλλιέργειες έχει απόδοση μικρότερη από 1% αντίστοιχα.[3]

Με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω γίνεται φανερό πως η πιο ώριμη μέθοδος για παραγωγή υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση του νερού με φωτοβολταϊκά πάνελ. Η φωτοηλεκτρόλυση βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης και παρουσιάζει πρακτικά προβλήματα που δεν έχουν επιλυθεί ακόμα και αυξημένο κόστος υλικών.

## Κεφάλαιο 2: Είδη τεχνολογιών αποθήκευσης υδρογόνου

Το μέλλον του υδρογόνου ως φορέας ενέργειας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την μέθοδο με την οποία αποθηκεύεται. Το γεγονός ότι το υδρογόνο έχει πολύ χαμηλό σημείο βρασμού (-252.9 °C) και μικρή πυκνότητα (0.0899 g/l στην αέρια μορφή- στην υγρή φάση έχει πυκνότητα  $71\text{kg}/\text{m}^3$ ) καθιστά την αποθήκευση πολύπλοκη και ακριβή. Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκεύεται αλλάζοντας τις φυσικές συνθήκες του, όπως την θερμοκρασία, την πίεση και την φάση (υγρό, αέριο και στερεό), ή αλλάζοντας τις χημικές συνθήκες διαφόρων στερεών και υγρών ενώσεων. Η μέθοδος που αφορά την αλλαγή των χημικών συνθηκών περιλαμβάνει τα μεταλλικά υδρίδια, σύμπλοκα υδρίδια, νανοσωλήνες άνθρακα, μεταλλικά οργανικά πλαίσια (MOFs-Metal Organic Frameworks) καθώς και ελαφρούς υδρογονάνθρακες ως ενδιάμεσοι φορείς υδρογόνου. Σήμερα, ο πιο διαδεδομένος τρόπος που αποθηκεύεται το υδρογόνο είναι ως αέριο σε κυλίνδρους υψηλής πίεσης (350-700 bar) ή σε υγρή φάση σε κρυογονικές δεξαμενές (σε θερμοκρασία 20 K ή -253,15 °C). Η διαδικασία συμπίεσης υδρογόνου και η υγροποίηση καταναλώνουν ενέργεια, αυξάνοντας, έτσι, το κόστος διανομής υδρογόνου στην περίπτωση της απομακρυσμένης παραγωγής. Το υδρογόνο αποθηκεύεται, κυρίως, στις εξής κατηγορίες: αποθήκευση συμπιεσμένου αερίου, κρυογονική αποθήκευση (σε υγρή φάση) και αποθήκευση σε στερεή φάση. Οι εναλλακτικές επιλογές για την αποθήκευση υψηλής πίεσης είναι: η υγροποίηση, η απορρόφηση από χημικές ενώσεις, μεταλλικά υδρίδια και νανοσωλήνες άνθρακα. Το υδρογόνο είναι καλό ως φορέας βαρυμετρικής ενέργειας, το οποίο σημαίνει ότι έχει την περισσότερη ενέργεια από κάθε άλλο καύσιμο σε αναλογία με την μάζα του. Το πρόβλημα με το υδρογόνο είναι η πυκνότητα ογκομετρικής ενέργειας. Ο στόχος είναι η αύξηση και της βαρυμετρικής ενέργειας και της πυκνότητας ογκομετρικής ενέργειας.[7]

### 2.1) Συμπιεσμένο αέριο

Η αποθήκευση με συμπιεσμένο αέριο θεωρείται ως η απλούστερη μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου. Ο απαιτούμενος εξοπλισμός για αυτή την μέθοδο είναι ένας συμπιεστής και ένα δοχείο πίεσης. Ωστόσο, το κύριο μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η μικρή πυκνότητα αποθήκευσης, η οποία εξαρτάται από την πίεση αποθήκευσης. Η υψηλότερη πίεση αποθήκευσης έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο κόστος κεφαλαίου και κόστη λειτουργίας. Συνήθως χρησιμοποιούνται κύλινδροι υψηλής πίεσης 20MPa (200 bar). Παρόλα αυτά, έχουν αναπτυχθεί νέοι, ελαφροί, σύνθετοι κύλινδροι που μπορούν να αντέξουν πιέσεις μέχρι και 80MPa (800 bar) και συνεπώς το αέριο υδρογόνο μπορεί να έχει ογκομετρική πυκνότητα  $36\text{kg}/\text{m}^3$ , περίπου το μισό από όση έχει στην υγρή φάση του ( $71\text{kg}/\text{m}^3$ ). Επί του παρόντος, υπάρχουν τέσσερις τύποι δοχείων αποθήκευσης υδρογόνου και ταξινομούνται ως εξής:

- Τύπος I: δοχείο πίεσης, κατασκευασμένο από μέταλλο
- Τύπος II: δοχείο πίεσης κατασκευασμένο από ένα παχύ μεταλλικό γραμμικό στεφάνι, τυλιγμένο με ένα σύνθετο ιών ρητίνης.
- Τύπος III: δοχείο πίεσης κατασκευασμένο από μεταλλική επένδυση πλήρως τυλιγμένη με σύνθετο ιών ρητίνης.
- Τύπος IV: δοχείο πίεσης κατασκευασμένο με πολυμερή επένδυση πλήρως τυλιγμένη με σύνθετο ιών ρητίνης. Η θύρα είναι μεταλλική και ενσωματωμένη στην δομή.

Τα δοχεία τύπου I είναι τα φθηνότερα εκ των τεσσάρων τύπων δοχείου αλλά το βάρος τους είναι το μεγαλύτερο. Τα δοχεία του τύπου IV μπορούν να αντέξουν πίεση έως και 700bars (70MPa) με το μικρότερο βάρος αλλά με κόστος περίπου ίσο με το διπλάσιο του δοχείου τύπουI. [7]

Πίνακας 1: Τύποι δοχείων αποθήκευσης συμπιεσμένου αέριου υδρογόνου

|                     | Τύπος I | Τύπος II | Τύπος III και IV |
|---------------------|---------|----------|------------------|
| Κόστος (\$/lt)      | 5       | 5.5      | 11               |
| Βάρος (kg/lt)       | 1.36    | 0.41     | 0.34-0.45        |
| Μέγιστη πίεση (bar) | 200     | 263      | 300-700          |

## 2.2) Υγροποίηση υδρογόνου

Κρυογονικές δεξαμενές χρησιμοποιούνται για την αποθήκευση υδρογόνου σε υγρή φάση. Η αποθήκευση με υγρή φάση είναι περισσότερο επιθυμητή από την αποθήκευση με αέρια, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητας αποθήκευσης ενέργειας. Το υδρογόνο είναι σε υγρή φάση σε θερμοκρασία 20 K (-253 °C), το οποίο έχει υψηλό κόστος και απαιτεί ενέργεια για να διατηρηθεί στην υγρή φάση. Οι περισσότερες δεξαμενές υγρού υδρογόνου είναι σφαιρικές, επειδή αυτό το σχήμα έχει την μικρότερη επιφάνεια για μεταφορά θερμότητας ανά μονάδα όγκου. Όσο αυξάνεται η διάμετρος της δεξαμενής, ο όγκος αυξάνεται πιο γρήγορα από την επιφάνεια, οπότε μια μεγάλη δεξαμενή θα έχει, αναλογικά, λιγότερη μεταφορά θερμότητας από μια μικρή δεξαμενή.[7]



Πηγή:

Πηγή ReasearchGate: Κρυογονική δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου

Οι δεξαμενές αποθήκευσης υγρού υδρογόνου έχουν, συνήθως, χωρητικότητα 110-5300 kg. Η NASA έχει την μεγαλύτερη σφαιρική δεξαμενή στον κόσμο με χωρητικότητα 228000 kg υγρού υδρογόνου. Ακόμα και με προσεκτική μόνωση, κάποια ποσότητα υδρογόνου θα εξατμιστεί. Αυτό το αέριο υδρογόνο μπορεί να εξαεριστεί, επιτρέποντας στην πίεση να αυξηθεί στο εσωτερικό της δεξαμενής, ή αυτή η ποσότητα αερίου μπορεί να συλλεχθεί και

να επιστρέψει στην διαδικασία υγροποίησης. Στην περίπτωση που η πίεση της δεξαμενής φτάσει ένα συγκεκριμένο όριο βάσει σχεδίου, τότε κάποια ποσότητα αερίου θα πρέπει να εξαεριστεί. Αξίζει να ληφθεί υπόψη ότι ο εξαερισμός υδρογόνου στην ατμόσφαιρα ενέχει κίνδυνο για την ασφάλεια επειδή θα διαχυθεί γρήγορα στην ατμόσφαιρα.[7]

Πίνακας 2: Συγκριτικός πίνακας του συμπιεσμένου αερίου  $H_2$  σε διάφορες πιέσεις και του υγροποιημένου  $H_2$ .

|  | Συμπιεσμένο $H_2$<br>200 bar | Συμπιεσμένο $H_2$<br>350 bar | Συμπιεσμένο $H_2$<br>700 bar | Υγροποιημένο<br>$H_2$ |
|--|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------------|
| Ενέργεια ανά<br>μονάδα μάζας<br>( $kJ/kg$ )  | 10300                        | 12264                        | 14883                        | 42600                 |
| Ενέργεια ανά<br>μονάδα όγκου<br>( $MJ/m^3$ ) | 714                          | 2492                         | 3599                         | 3999                  |
| Ενεργειακό<br>περιεχόμενο<br>( $MJ/kg$ )     | 1.05                         | 8.04                         | 7.20                         | 16,81                 |

### 2.3) Μεταλλικά υδρίδια

Το υδρογόνο μπορεί να αποθηκευτεί σε στερεή μορφή είτε με φυσική απορρόφηση είτε με χημική απορρόφηση. Τα μεταλλικά υδρίδια είναι χημικές ενώσεις που επιτρέπουν στο υδρογόνο να αποθηκεύεται σε υψηλή πυκνότητα και υπό μέτρια θερμοκρασία και πίεση. Η αποθήκευση υδρογόνου με αυτό τον τρόπο είναι ασφαλέστερη σε σύγκριση με την αποθήκευση συμπιεσμένου αερίου και υγρού υδρογόνου. Τα μεταλλικά υδρίδια υπάρχουν μέσα σε μέταλλα ή σε κράματα μετάλλων, και έχουν φυσικές ιδιότητες που τα καθιστούν κατάλληλα για την αποθήκευση υδρογόνου, όπως: υψηλή πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα όγκου, ανθεκτικότητα στην οξείδωση και κάποια οφέλη καλής αντιστρεψιμότητας. Το μειονέκτημα αυτής της μεθόδου σχετίζεται με το κόστος των μεταλλικών υδριδίων, το βάρος τους και την κινητική της αντίδρασης (αργή απελευθέρωση του υδρογόνου).[7]

### 2.4) Ασφαλής χρήση υδρογόνου

Όλα τα καύσιμα έχουν ένα βαθμό επικινδυνότητας κατά τη χρήση τους και αυτό σχετίζεται κυρίως με το πόσο εύφλεκτα είναι. Τα καύσιμα πρέπει να κρατούνται μακριά από πηγές ανάφλεξης και από οξειδωτικά (όπως ο αέρας). Κάποιες ιδιότητες του υδρογόνου το καθιστούν ασφαλέστερο προς το χειρισμό και τη χρήση του σε σύγκριση με άλλα καύσιμα που χρησιμοποιούνται ευρέως σήμερα. Για παράδειγμα το υδρογόνο δεν είναι τοξικό. Επιπλέον, επειδή το υδρογόνο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα, διαλύεται ταχέως όταν ελευθερώνεται στην ατμόσφαιρα, επιτρέποντας γρήγορη διασπορά σε περίπτωση διαρροής. Από την άλλη πλευρά, κάποιες άλλες ιδιότητες του υδρογόνου απαιτούν ειδικό χειρισμό. Πιο συγκεκριμένα, το υδρογόνο έχει ένα ευρύ φάσμα εύφλεκτων συγκεντρώσεων

στον αέρα και χαμηλότερη ενέργεια ανάφλεξης από τη βενζίνη ή το φυσικό αέριο, το οποίο σημαίνει ότι μπορεί να αναφλεγεί πιο εύκολα. Συνεπώς απαιτείται επαρκής εξαερισμός και ανίχνευση διαρροών στα συστήματα υδρογόνου. Επίσης, το υδρογόνο διαλύεται σε πολλά μέταλλα, και επιπρόσθετα στις τυχόν διαρροές του, ενδέχεται να έχει αρνητικές συνέπειες για αυτά, όπως ευθραυστότητα στο υδρογόνο, οδηγώντας σε σπασίματα και εκρήξεις. Αξίζει να σημειωθεί πως η φλόγα του υδρογόνου είναι σχεδόν αόρατη (αν και εξαιρετικά θερμή) και για αυτό απαιτούνται ειδικοί ανιχνευτές φλόγας.[8]

Πίνακας 3: Συγκριτικός πίνακας με συνήθη ζητήματα ασφαλείας

| <b>Ζητήματα ασφαλείας στην αποθήκευση <math>H_2</math> με αέριο</b> | <b>Ζητήματα ασφαλείας στην αποθήκευση <math>H_2</math> σε υγρή φάση</b> | <b>Ζητήματα ασφαλείας της αποθήκευσης με μεταλλικά υδρίδια</b> |
|---|---|--|
| Σχηματισμός φουσκαλών*  | Απώλεια περιορισμού   | Πυροφορικά υλικά (υλικά που αυταναφλέγονται)                   |
| Απώλεια περιορισμού   | Boil-off**<br>Σχηματισμός πάγου   | Τοξικότητα και θερμότητα<br>Έκρηξη και απώλεια περιορισμού     |

\*Boil-off ονομάζονται οι ατμοί που δημιουργούνται λόγω της εισόδου θερμότητας περιβάλλοντος στο δοχείο αποθήκευσης (διατηρώντας σταθερή πίεση στο δοχείο αποθήκευσης).

\*\*Ο σχηματισμός φουσκαλών αναφέρεται στη φυσική περιγραφή ενός μετάλλου με κοιλότητες που δημιουργήθηκαν από συσσωρευμένο αέριο υδρογόνο. Ο σχηματισμός τους οφείλεται στο ατομικό υδρογόνο που διαχέεται μέσω του μετάλλου και συσσωρεύεται σε κενά.

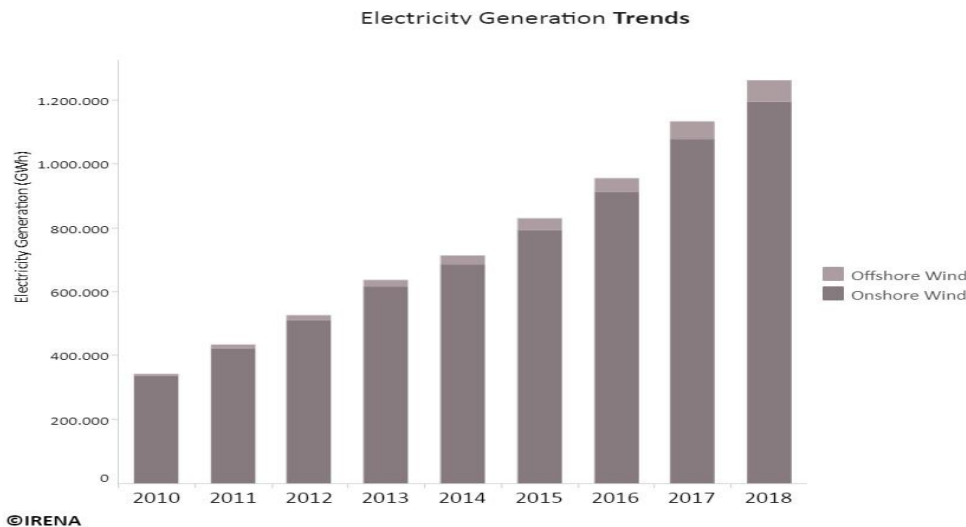
## Κεφάλαιο 3: Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Η ενέργεια στην φύση συναντάται με διάφορες μορφές όπως μηχανική, χημική, θερμική, πυρηνική, ηλιακή, αιολική, δυναμική και κινητική, γεωθερμική και υδραυλική. Οι τεράστιες ποσότητες ενέργειας, στις διάφορες μορφές της, βρίσκονται αποθηκευμένες σε πηγές. Ο κύριος διαχωρισμός αυτών των πηγών έχει ως εξής: ανανεώσιμες και μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η κύρια διαφορά τους έγκειται στη διαθεσιμότητα των αποθεμάτων τους σε βάθος χρόνου. Οι μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, συχνά αποκαλούμενες και συμβατικές πηγές ενέργειας, έχουν ως κύριο πόρο τους υδρογονάνθρακες (γαιάνθρακα, πετρέλαιο, φυσικό αέριο) των οποίων η διαθεσιμότητα είναι περιορισμένη, και τα αποθέματα αναμένεται να εξαντληθούν. Οι ανανεώσιμες, αντίθετα, είναι πρακτικά ανεξάντλητες αφού εκμεταλλεύονται πηγές όπως η ηλιακή ακτινοβολία, η ταχύτητα του ανέμου και η κίνηση του νερού. Στην βιβλιογραφία, πολλές φορές, χρησιμοποιείται ο όρος εναλλακτικές πηγές ενέργειας. Επίσης χρησιμοποιείται και ο όρος ήπιες μορφές ενέργειας γιατί έχουν ελάχιστες (τις περισσότερες φορές) περιβαλλοντικές επιπτώσεις. \*Αξίζει να σημειωθεί πως η πυρηνική ενέργεια μπορεί να κατηγοριοποιηθεί ως εναλλακτική πηγή ενέργειας αφού δεν σχετίζεται με υδρογονάνθρακες και είναι ανεξάντλητη αλλά σε καμία περίπτωση δεν μπορεί να θεωρηθεί ήπια μορφή ενέργειας εξαιτίας των ραδιενεργών αποβλήτων. Ακολουθεί σύντομη περιγραφή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας διαφόρων μορφών.

### 3.1) Αιολική ενέργεια

Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις πιο ταχύτατα αναπτυσσόμενες ενεργειακές τεχνολογίες και η χρήση της έχει γνωρίσει πολύ μεγάλη ανάπτυξη παγκοσμίως. Η εγκατεστημένη ισχύς για την παραγωγή αιολικής ενέργειας- είτε στη στεριά (onshore) είτε παράκτια (offshore)- έχει αυξηθεί ραγδαία τις τελευταίες δεκαετίες, κάνοντας το άλμα από 7,5GW το 1997 σε 564GW το 2018, σύμφωνα με δεδομένα την IRENA (International Renewable Energy Agency). Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον άνεμο διπλασιάστηκε μεταξύ 2009 και 2013 και το 2016 η αιολική ενέργεια αντιπροσώπευε το 16% της ηλεκτρικής ενέργειας που παράχθηκε από ανανεώσιμες πηγές. Πολλά μέρη του κόσμου έχουν μεγάλο αιολικό δυναμικό και συνήθως είναι απομακρυσμένες περιοχές που δεν έχουν εμπόδια, όπως κτίρια, για να διαταράσσουν και να προκαλούν στροβιλισμούς του ανέμου. Αυτό αποτελεί και έναν βασικό πλεονέκτημα των παράκτιων (και υπεράκτιων) αιολικών εγκαταστάσεων. Επιπλέον πλεονέκτημα αποτελεί το γεγονός πως η κοινή γνώμη αποδέχεται περισσότερο τα offshore από τα onshore αιολικά πάρκα.





Διάγραμμα 3: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αιολική ενέργεια σε παγκόσμιο επίπεδο  
 Πηγή: <https://www.irena.org/wind>

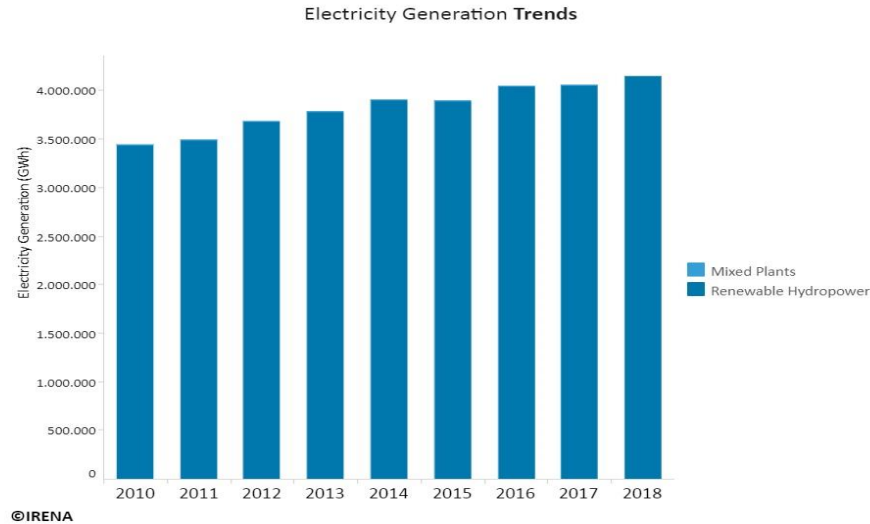
Μια ανεμογεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια μετατρέποντας την κινητική ενέργεια του ανέμου, πρώτα σε περιστροφική ενέργεια και έπειτα σε ηλεκτρική. Η ποσότητα ηλεκτρικής ισχύος που παράγεται εξαρτάται από παραμέτρους όπως η ταχύτητα του ανέμου και η επιφάνεια που καλύπτεται από τα πτερύγια της ανεμογεννήτριας. Η δύναμη που δίνει την ισχύ είναι η εξής:

$$P_{air} = \frac{1}{2} \rho A v^3$$

όπου P η ισχύς (σε Watt), A η επιφάνεια (σε  $m^2$ ) και  $\rho$  η πυκνότητα του αέρα ( $1,2041 \text{ kg/m}^3$ ). [9]

### 3.2) Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η υδροηλεκτρική ενέργεια προκύπτει από το ρέον νερό και θεωρείται μια από τις πιο αποδοτικές τεχνολογίες και μάλιστα όπου αυτή είναι διαθέσιμη, προτιμάται. Στην Νορβηγία, για παράδειγμα, πάνω από το 90% της ηλεκτρικής ενέργειας παρέχεται από την υδροηλεκτρική ενέργεια, ενώ στον Καναδά το 60% και στην Ελβετία το 55%. Η υδραυλική ενέργεια (δηλαδή η κινητική ενέργεια που αποκτά το νερό λόγω υψομετρικής διαφοράς) αποτελεί μια από τις αρχαιότερες μορφές ενέργειας που αξιοποίησε ο άνθρωπος. Ήδη περίπου από το 3500 π.Χ. στη Μεσοποταμία χρησιμοποιούνταν νερότροχοι για την άρδευση εκτάσεων. Από τις αρχές του 19<sup>ου</sup> αιώνα ξεκίνησαν να κατασκευάζονται υδροστρόβιλοι που μπορούσαν να αξιοποιήσουν μεγαλύτερες ποσότητες νερού και από μεγαλύτερες υψομετρικές διαφορές. Τέτοιοι υδροστρόβιλοι άρχισαν να χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις αξιοποίησης της υδραυλικής ενέργειας. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από αξιοποίηση υδροηλεκτρικής ενέργειας, τα τελευταία χρόνια. (Τα υδροηλεκτρικά συστήματα αναλύονται περισσότερο στην αποθήκευση μηχανικής ενέργειας). [10]



Διάγραμμα 4: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδροηλεκτρικά εργοστάσια σε παγκόσμιο επίπεδο Πηγή:  
<https://www.irena.org/hydropower>

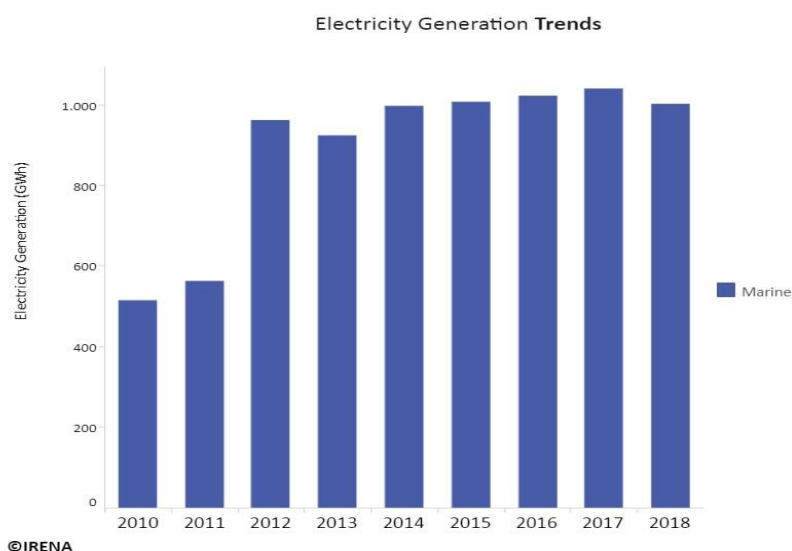
### 3.3) Ενέργεια από τους ωκεανούς

Οι παλίρροιες, τα κύματα και τα ρεύματα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αν και ακόμα βρίσκονται στο στάδιο έρευνας και ανάπτυξης και δεν είναι διαδεδομένες στην αγορά. Ωστόσο, έχουν μεγάλο εύρος πιθανών εφαρμογών και υπάρχουν τεχνολογίες που αξιοποιούν την ενέργεια των ωκεανών ως εξής:

Παλιρροιακή ενέργεια. Η ενέργεια από την παλίρροια (το φαινόμενο κατά το οποίο η στάθμη της θάλασσας ανεβαίνει και κατεβαίνει περιοδικά) οφείλεται στην ύπαρξη των βαρυτικών δυνάμεων μεταξύ της Γης και της Σελήνης. Στους ωκεανούς η άνοδος αυτή φτάνει μέχρι και ένα μέτρο, ενώ σε στενούς κόλπους είναι ακόμα μεγαλύτερη. Γενικά η ένταση με την οποία εκδηλώνεται το φαινόμενο είναι διαφορετική στις διάφορες περιοχές της Γης και εξαρτάται από τη διαμόρφωση των ακτών. Συνήθως γίνεται χρήση φράγματος κατά μήκος της εκβολής ενός ποταμού ή ενός στενού κόλπου για να ελέγχονται η πλημμυρίδα και η άμπωτη (οι δυο φάσεις της παλίρροιας). Ουσιαστικά πρόκειται για την ίδια τεχνική που χρησιμοποιείται στα υδροηλεκτρικά έργα. Το φράγμα ανοίγει στην φάση της πλημμυρίδας για να υποδεχτεί το νερό, το οποίο οδηγείται σε μια λεκάνη και το φράγμα κλείνει. Στην φάση της άμπωτης (που το νερό της θάλασσας αποσύρεται και η υψομετρική διαφορά ανάμεσα στη λεκάνη και τη θάλασσα γίνεται μέγιστη) το φράγμα ανοίγει και το νερό οδηγείται από τη λεκάνη συγκέντρωσης στους υδροστροβίλους, καθώς επιστρέφει στη θάλασσα.

Κυματική ενέργεια. Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατή και από την αξιοποίηση της ενέργειας των κυμάτων. Πιο συγκεκριμένα μέσω της ανάσχεσης της κινητικής ενέργειας του κυματισμού του νερού σε εκτεταμένες ωκεάνιες επιφάνειες, σε περιοχές με υψηλό αιολικό δυναμικό και σε ακτές. Οι κατασκευές αξιοποίησης της κυματικής ενέργειας χρησιμοποιούν κυρίως μια παλλόμενη υδάτινη στήλη και συνήθως τοποθετούνται πάνω ή κοντά στις ακτές. Πρόκειται για ένα σωλήνα κλειστό στο ένα άκρο και ανοικτός στο άλλο. Το νερό των κυμάτων εισβάλλει από το ανοικτό άκρο, που βρίσκεται κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας, και ανυψώνει την στάθμη του νερού που βρίσκεται μέσα στο σωλήνα. Η

διαδοχική ανύψωση και η κάθοδος της στάθμης του νερού συμπιέζει και αποσυμπιέζει τον όγκο του αέρα που βρίσκεται μέσα στο σωλήνα. Στο κλειστό άκρο βρίσκεται ένας αεριοστρόβιλος που περιστρέφεται χάρις της αυξομειώσεως της πίεσης του αέρα και μέσω μιας ηλεκτρογεννήτριας παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Επιπλέον, υπάρχουν κατασκευές που εγκαθίστανται σε απομακρυσμένα σημεία από τις ακτές. Μια από αυτές είναι η επιπλέουσα αντλία. Πρόκειται για έναν σωλήνα που επιπλέει στη θάλασσα και διαθέτει ένα είδος περυγίου το οποίο κινείται πάνω κάτω καθώς τα κύματα προσπίπτουν πάνω του. Η κινητική ενέργεια του περυγίου, με διάφορους τρόπους, μεταφέρεται σε ένα είδος στροβίλου, που με την σειρά του τροφοδοτεί μια ηλεκτρογεννήτρια. Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, με αξιοποίηση της ενέργειας των ωκεανών, τα τελευταία χρόνια.[11]



Διάγραμμα 5: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ωκεανό σε παγκόσμιο επίπεδο Πηγή: <https://www.irena.org/ocean>

### 3.4) Βιοενέργεια

Η βιομάζα αποτελεί δεσμευμένη και αποθηκευμένη μορφή της ηλιακής ενέργειας και είναι αποτέλεσμα της φωτοσυνθετικής δραστηριότητας των φυτικών οργανισμών. Με βάση τη δραστηριότητα αυτή, η χλωροφύλλη των φυτών μετασχηματίζει την ηλιακή ενέργεια με σειρά διεργασιών, χρησιμοποιώντας ως βασικές πρώτες ύλες  $CO_2$  από την ατμόσφαιρα, καθώς και νερό και ανόργανα συστατικά από το έδαφος. Η βιομάζα θεωρείται σημαντική και πρακτικά ανεξάντλητη ενεργειακή πηγή. Ως βιομάζα ορίζεται το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και υπολειμμάτων από τις γεωργικές, συμπεριλαμβανομένων φυτικών και ζωικών ουσιών, τις δασοκομικές και τις συναφείς βιομηχανικές δραστηριότητες, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα βιομηχανικών αποβλήτων και αστικών λυμάτων και απορριμμάτων. Τα βιοκαύσιμα είναι πιο φιλικά προς το περιβάλλον από τα συμβατικά καύσιμα αν ληφθεί υπόψη η συνολική αλυσίδα παραγωγής. Το  $CO_2$  που παράγεται κατά την καύση των φυτών ισούται με το ποσό που δεσμεύεται κατά την διαδικασία της φωτοσύνθεσης και το οποίο θα επαναδεσμευτεί κατά την επόμενη σοδειά των ενεργειακών καλλιεργειών (ενεργειακές καλλιέργειες είναι καλλιεργούμενα ή αυτοφυή είδη, παραδοσιακά ή νέα, τα οποία παράγουν ως κύριο προϊόν

βιομάζα για διαφόρους ενεργειακούς σκοπούς, όπως παραγωγή βιοκαυσίμων) , ολοκληρώνοντας έτσι τον κύκλο του πράσινου άνθρακα. Επίσης στην περίπτωση χρήσης βιοντίζελ, συναντώνται και άλλα πλεονεκτήματα (σε σύγκριση με το συμβατικό ντίζελ) όπως η απουσία θείου από την σύσταση του και συνεπώς οι σχεδόν μηδενικές εκπομπές  $SO_2$ . Η χρήση βιοενέργειας μπορεί να διαχωριστεί ως εξής: παραδοσιακή χρήση και σύγχρονη χρήση. Η παραδοσιακή χρήση αναφέρεται στην καύση βιομάζας σε μορφές όπως ξύλο, ζωικά απόβλητα και ξυλάνθρακα. Οι σύγχρονες τεχνολογίες βιοενέργειας περιλαμβάνουν υγρά βιοκαύσιμα που παράγονται μέσω αναερόβιας χώνευσης υπολειμμάτων, συστήματα θέρμανσης με πέλετ ξύλου και άλλες τεχνολογίες. Ένα από τα πιο διαδεδομένα βιοκαύσιμα είναι η βιοαιθανόλη, η οποία παράγεται με ζύμωση σακχάρων, αμύλου, κυτταρινών και ημικυτταρινών που προέρχονται από διάφορα είδη βιομάζας (αραβόσιτος, σακχαρούχο σόργο κ.α.). Η βιοαιθανόλη μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κινητήρες οχημάτων, ως έχει ή σε πρόσμειξη με βενζίνη, ως καύσιμο κίνησης. Συγκεκριμένα σε κάποιες χώρες, όπως η Βραζιλία, οι Η.Π.Α. και η Ισπανία γίνεται συνεχώς αυξανόμενη χρήση βιοαιθανόλης.[12]

### **3.5) Γεωθερμική ενέργεια**

Η γεωθερμική ενέργεια είναι θερμότητα που προέρχεται μέσα από το υπέδαφος της Γης. Νερό και/ή ατμός μεταφέρουν τη γεωθερμική ενέργεια στην επιφάνεια της Γης. Οι χρήσεις αυτού του τύπου ενέργειας (για συστήματα θέρμανσης ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας) εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά της. Ωστόσο, για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, απαιτούνται πόροι υψηλής ή μέσης θερμοκρασίας, οι οποίοι βρίσκονται συνήθως σε ενεργές, τεκτονικά, περιοχές. Αυτή η μορφή ενέργειας καλύπτει ένα σημαντικό μερίδιο της ζήτησης σε ηλεκτρικό ρεύμα σε χώρες όπως η Ισλανδία, Ελ Σαλβαδόρ, Νέα Ζηλανδία, Κένυα και Φιλιππίνες και περισσότερο από το 90% της ζήτησης σε θέρμανση στην Ισλανδία. Τα κύρια πλεονεκτήματα αυτής της μορφής ενέργειας είναι το γεγονός ότι δεν επηρεάζεται από τις καιρικές συνθήκες και ο υψηλός συντελεστής χωρητικότητας (capacity factor- ο λόγος της συνολικής ενέργειας που παράγεται προς την μέγιστη ενέργεια που θα μπορούσε να παραχθεί). Για τους παραπάνω λόγους, τα γεωθερμικά εργοστάσια παραγωγής ενέργειας μπορούν να παρέχουν το βασικό φορτίο ηλεκτρικού ρεύματος, καθώς και να παρέχουν βοηθητικές υπηρεσίες για βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη ευελιξία σε ορισμένες περιπτώσεις. Υπάρχουν διάφορες τεχνολογίες γεωθερμικής ενέργειας με διακριτά επίπεδα ωριμότητας. Τεχνολογίες απευθείας χρήσης όπως τηλεθέρμανση, γεωθερμικές αντλίες θερμότητας, θερμοκήπια και άλλες εφαρμογές είναι ευρέως χρησιμοποιούμενες και μπορούν να θεωρηθούν ώριμες. Η τεχνολογία για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από υδροθερμικές δεξαμενές με φυσικά υψηλή διαπερατότητα θεωρούνται ώριμες και αξιόπιστες. Πολλά εν λειτουργία εργοστάσια σήμερα είναι εργοστάσια ξηρού ατμού ή flash plants (μονά, διπλά και τριπλά) και αξιοποιούν θερμοκρασίες πάνω από 180°C. Ωστόσο, πεδία μέσης θερμοκρασίας χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή για συμπαραγωγή (ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας) χάρις την ανάπτυξη τεχνολογίας δυαδικού κύκλου, κατά τον οποίο το γεωθερμικό ρευστό χρησιμοποιείται μέσω εναλλάκτες θερμότητας για τη θέρμανση ενός υγρού διεργασίας σε κλειστό βρόχο. Επιπλέον, νέες τεχνολογίες αναπτύσσονται όπως τα ενισχυμένα γεωθερμικά συστήματα (Enhanced Geothermal

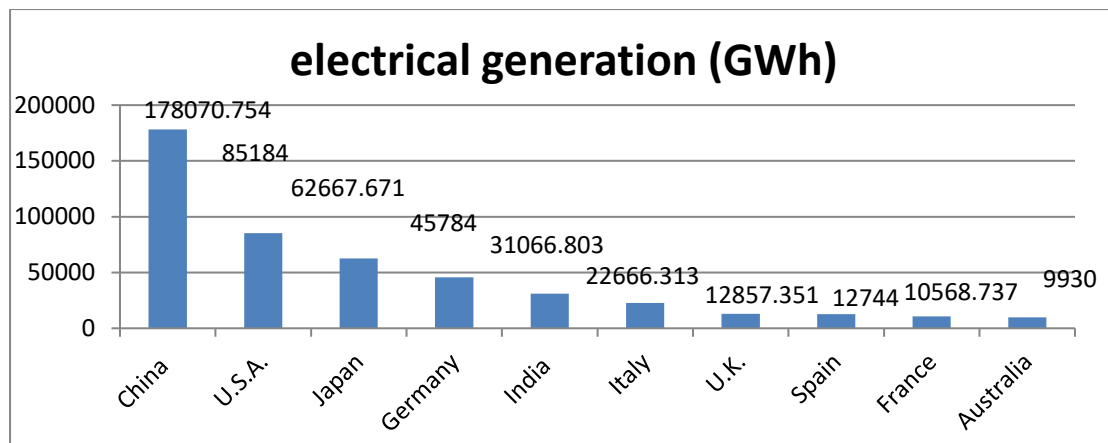
Systems-EGS), τα οποία παράγουν ηλεκτρική ενέργεια χωρίς την ανάγκη φυσικών υδροθερμικών πηγών μεταφοράς θερμότητας, και βρίσκονται σε στάδιο επίδειξης.[13]

### **3.6) Ηλιακή ενέργεια**

Ως ηλιακή ενέργεια ορίζεται το σύνολο των μορφών ενέργειας που προέρχονται από τον ήλιο με την μορφή ηλιακής ακτινοβολίας. Η συνολική ηλιακή ενέργεια που απορροφάται από την ατμόσφαιρα της Γης, τους ωκεανούς και τις ηπείρους ανέρχεται σε περίπου 3,850,000 EJ( $10^{18}$ \*joule) ετησίως, και είναι περισσότερη ενέργεια που παρέχεται από τον ήλιο σε μια ώρα από όση ενέργεια καταναλώνει ο ανθρώπινος πληθυσμός σε ένα χρόνο. Για το έτος 2018 η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας ανήρθε σε 82.8 EJ (23,000 TWh). Μέσω της φωτοσύνθεσης, η βιομάζα αιχμαλωτίζει περίπου 3,000 EJ. Κοιτάζοντας αυτά τα δεδομένα, κάποιος μπορεί να συμπεράνει πως είτε η αποκλειστική χρήση της ηλιακής ενέργειας είτε η αποκλειστική χρήση της βιομάζας είναι επαρκής για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της ανθρωπότητας. Ωστόσο, αυτό δεν είναι δυνατόν αφού τα συστήματα μετατροπής της ηλιακής ενέργειας δε ηλεκτρισμό δεν έχουν μεγάλη απόδοση, κάνοντας έτσι απαραίτητη την χρήση μεγάλων εκτάσεων γης για τοποθέτηση φωτοβολταϊκών συστημάτων. Επίσης, πηγές ενέργειας όπως η ηλιακή και η αιολική ενέργεια βασίζονται σε διαλείποντες πόρους, κάνοντας έτσι απαραίτητη την αποθήκευση ενέργειας. Από την άλλη πλευρά, η αυξημένη χρήση της βιομάζας μπορεί να επιφέρει εκτεταμένες αποψιλώσεις για την δημιουργία εκτάσεων καλλιέργειας αποδοτικών φυτών όπως το σόργο και η σόγια. Συνεπώς, παρά το μεγάλο δυναμικό αυτών των μορφών ενέργειας, δεν αποτελούν πανάκεια για την κάλυψη των ενεργειακών απαιτήσεων του πλανήτη.

Η ηλιακή ενέργεια δεσμεύεται μέσω διαφόρων συστημάτων και έπειτα χρησιμοποιείται σε πολλές εφαρμογές. Τα συστήματα δέσμευσης και συλλογής της ηλιακής ενέργειας χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: στα παθητικά ηλιακά συστήματα, τα ενεργητικά ηλιακά συστήματα ή Ηλιοθερμικά συστήματα και τα φωτοβολταϊκά συστήματα. Τα παθητικά και ενεργητικά ηλιακά συστήματα χρησιμοποιούνται κυρίως σε εφαρμογές σχετικές με την θέρμανση κτιρίων, την θέρμανση νερού (ηλιακός θερμοσίφωνας) και τον βιοκλιματικό σχεδιασμό των κτιρίων. Τα φωτοβολταϊκά συστήματα, αντίθετα, χρησιμοποιούνται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών παροχής ενέργειας από κατοικίες και αντλιοστάσια μέχρι οχήματα.[15]

Σύμφωνα με την IRENA η χώρα με την μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (για το έτος 2018) από φωτοβολταϊκά συστήματα παγκοσμίως είναι η Κίνα (με παραγωγή 178.070,754 GWh) και ακολουθείται από τις Η.Π.Α. (με παραγωγή 85.184 GWh) και από την Ιαπωνία (με παραγωγή 62.667, 671 GWh). Στην Ευρώπη, την πρώτη θέση στην παραγωγή ενέργειας την κατέχει η Γερμανία με παραγωγή με 45.784 GWh και ακολουθείται από την Ιταλία (με παραγωγή 22.666,313 GWh) και από το Ηνωμένο Βασίλειο (με παραγωγή 12.857,351 GWh), όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.[14]



Διάγραμμα 6: Οι 10 μεγαλύτερες χώρες στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

### 3.6.1) Φωτοβολταϊκά συστήματα

Το βασικό κομμάτι των φωτοβολταϊκών συστημάτων είναι το φωτοβολταϊκό πάνελ. Τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποτελούνται από φωτοβολταϊκά στοιχεία. Ένα στοιχείο δημιουργείται όταν ένα θετικά φορτισμένο στρώμα πυριτίου (p-τύπου) ενώνεται με ένα αρνητικά φορτισμένο στρώμα πυριτίου (n-τύπου) και δημιουργείται μια διόδος ημιαγωγών για την ροή των ηλεκτρονίων. Η διόδος είναι ένα στοιχείο που περιορίζει την κατευθυντήρια ροή των φορέων ηλεκτρικού φορτίου ή φορέων αγωγιμότητας. Ουσιαστικά, η διόδος επιτρέπει την ροή των ηλεκτρονίων προς μια κατεύθυνση και εμποδίζει την κίνηση του προς την αντίθετη κατεύθυνση. Γενικά, οι περισσότεροι δίοδοι είναι κατασκευασμένοι από υλικά ημιαγωγών όπως το πυρίτιο ή το γερμάνιο. Η απόδοση της μετατροπής ενέργειας ενός ηλιακού κυττάρου (στοιχείου), είναι το ποσοστό ενέργειας από το αναρροφούμενο φως που μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια, όταν το στοιχείο είναι συνδεδεμένο ως μέρος ενός ηλεκτρικού κυκλώματος. Η απόδοση υπολογίζεται χρησιμοποιώντας την αναλογία του σημείου μέγιστης ισχύος,  $P_m$ , διαιρούμενο με την ακτινοβολία φως ( $E$ , σε  $W/m^2$ ) κάτω από πρότυπες συνθήκες δοκιμής (STC, ηλιακή ακτινοβολία:  $1000 W/m^2$ , μάζα αέρα 1.5 και θερμοκρασία στοιχείου  $T_c = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) και την επιφάνεια του ηλιακού στοιχείου ( $A_c$  σε  $m^2$ ).

$$\eta = \frac{P_m}{E \times A_c}$$

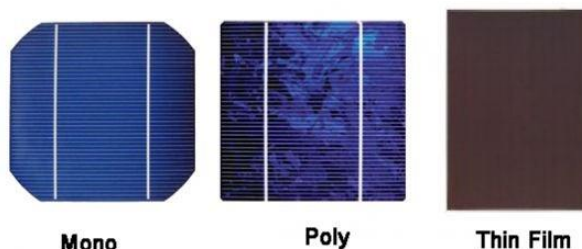
Κάτω από πρότυπες συνθήκες δοκιμής, ένα ηλιακό στοιχείο με απόδοση 12%, με εμβαδόν  $100 \text{ cm}^2$  ( $0.01 \text{ m}^2$ ) αναμένεται να παράγει περίπου 1.2 watts ισχύος. Στην πράξη, ένα ηλιακό στοιχείο αντιμετωπίζει απώλειες ενέργειας εξαιτίας απωλειών που σχετίζονται με την ανάκλαση και την ηλεκτρική αντίσταση.[15]

Η σύνδεση p-ημέσα στο στοιχείο διασφαλίζει ότι οι κινητοί φορείς ηλεκτρικού φορτίου της ίδιας πολικότητας κινούνται προς την ίδια κατεύθυνση. Αυτά τα ηλεκτρικά φορτία απομακρύνονται ως συνεχές ρεύμα. Το φωτοβολταϊκό στοιχείο λειτουργεί ως κβαντική συσκευή, ανταλλάσσοντας φωτόνια με ηλεκτρόνια. Η ιδανική περίπτωση είναι κάθε φωτόνιο επαρκούς ενέργειας (ενέργεια ίση ή μεγαλύτερη από το ενεργειακό διάκενο του ημιαγωγού) που χτυπά το κελί προκαλεί την ροή ενός ηλεκτρονίου μέσω του φορτίου. Στην πράξη, αυτό σπάνια επιτυγχάνεται. Μερικά από τα φωτόνια απορρίπτονται από το στοιχείο ή απορροφώνται από τις μεταλλικές επαφές όπου εγκαταλείπουν την ενέργεια τους ως

θερμότητα. Η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται από το φορτίο είναι το προϊόν του ηλεκτρικού ρεύματος που παρέχεται από το στοιχείο και της τάσης. Κάθε φωτοβολταϊκό στοιχείο μπορεί να παρέχει ρεύμα σε τάση μεταξύ 0,5-1 Βανάλογα με τον ημιαγωγό του στοιχείου που χρησιμοποιείται. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, συνδεδεμένα σε σειρά και παράλληλα, αποτελούν τα φωτοβολταϊκά πάνελ, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω. Οποιοσδήποτε αριθμός φωτοβολταϊκών πάνελ μπορεί να συνδεθεί για την παραγωγή της επιθυμητής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία εξαρτάται άμεσα από το ηλεκτρικό φορτίο το οποίο πρέπει να καλυφθεί από το φωτοβολταϊκό σύστημα. Η δομή του φωτοβολταϊκού συστήματος έχει το πλεονέκτημα του ότι οποιαδήποτε στιγμή μπορεί να προστεθεί νέος αριθμός πλαϊσίων για την κάλυψη της αυξημένης ζήτησης σε ενέργεια. Η δομή των φωτοβολταϊκών πάνελ περιλαμβάνει συνήθως τα ακόλουθα μέρη: α) το διαφανές γυάλινο κάλυμμα, το οποίο τοποθετείται πάνω από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία για λόγους προστασίας (για παράδειγμα προστασία από την σκόνη), β) αντί-ανακλαστική επίστρωση, η οποία χρησιμοποιείται για την εμπόδιση της αντανάκλασης, γ) τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, δ) και το πλαίσιο που χρησιμοποιείται για να συγκρατεί όλα τα κομμάτια μαζί και για να προστατεύσει από ζημιές. Ανάλογα τον ημιαγωγό, κατηγοριοποιούνται οι φωτοβολταϊκές τεχνολογίες. Ο βασικός διαχωρισμός των φωτοβολταϊκών τεχνολογιών είναι ανάμεσα σε τεχνολογία πυριτίου και λεπτού υμενίου (εικόνα 1).[15]

α) φωτοβολταϊκά πάνελ πυριτίου: Υπάρχουν δυο βασικές τεχνολογίες πυριτίου που χρησιμοποιούνται ευρέως, και αυτά είναι τα μονοκρυσταλλικά πάνελ (single- Si) και τα πολυκρυσταλλικά (poly-Si). Τα μονοκρυσταλλικά πάνελ αποτελούνται από μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία. Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία φτιάχνονται από πυρίτιο υψηλής καθαρότητας και παράγονται με μια πολύπλοκη διαδικασία με την εξαγωγή ράβδων μονοκρυσταλλικών από το τήγμα πυριτίου. Στη συνέχεια αυτές οι ράβδοι κόβονται σε λεπτές φέτες που ονομάζονται γκοφρέτες (wafers). Τα μονοκρυσταλλικά φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι, συνήθως, τετράγωνα κομμάτια με στρογγυλεμένες άκρες. Τα μονοκρυσταλλικά πάνελ έχουν ένα σκούρο μπλε χρώμα, διάρκεια ζωής έως και 30 χρόνια και απόδοση που μπορεί να φτάσει και 20%. Από την άλλη πλευρά, τα πολυκρυσταλλικά πάνελ κατασκευάζονται από πυρίτιο που δεν είναι τόσο καθαρό όσο αυτό που χρησιμοποιείται στην κατασκευή των μονοκρυσταλλικών πάνελ. Η κατασκευή των πολυκρυσταλλικών πάνελ έχει ως εξής: ένα μπλοκ πυριτίου χυτεύεται και έπειτα ψύχεται βραδέως. Όταν το τετηγμένο πυρίτιο ψύχεται και γίνεται στερεό, οι κρυσταλλικές δομές του εμφανίζονται σε διάφορα μεγέθη. Από αυτό το μπλοκ μπορούν να διαχωριστούν φέτες, και κάθε φέτα αποτελεί ένα πολυκρυσταλλικό ηλιακό κύτταρο. Τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα στη συνέχεια ενσωματώνονται σε μια διαφανή στρώση αιθυλενίου-οξικού βινυλίου, και καλύπτονται με ένα με ένα φύλλο γυαλιού έτσι ώστε να σχηματίσουν ένα ηλιακό πλαίσιο. Τα πολυκρυσταλλικά ηλιακά κύτταρα είναι τετράγωνα αλλά δεν έχουν στρογγυλεμένες γωνίες, όπως τα μονοκρυσταλλικά, και έτσι η κατασκευή των ενότητων είναι λιγότερο δαπανηρή. Οι ενότητες είναι λιγότερο σκούρες από τα μονοκρυσταλλικά κύτταρα και η απόδοσή τους είναι περίπου 15%. Γενικά, τα ηλιακά κύτταρα κρυσταλλικού έχουν υψηλό κόστος παραγωγής, το οποίο προκύπτει από τα πολύπλοκα και πολυάριθμα στάδια παραγωγής που σχετίζονται με την κατασκευή γκοφρετών (wafers) και κυψελών, καθώς επίσης και την απαιτούμενη ποσότητα πρώτης ύλης υψηλής καθαρότητας πυριτίου.

β) φωτοβολταϊκά πάνελ λεπτού υμενίου: Στην προσέγγιση τεχνολογίας λεπτών υμενίων, λεπτά στρώματα υλικού ημιαγωγού εναποτίθενται σε ένα υπόστρωμα, όπως ένα μεγάλο φύλλο γυαλιού. Συνήθως απαιτείται πάχος υλικού ημιαγωγού μικρότερο από 1 μm, το οποίο είναι 100-1000 φορές μικρότερο από το πάχος της γκοφρέτας του πυριτίου. Η μειωμένη χρήση υλικού συνεπάγεται μειωμένο κόστος, το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα. Στα πάνελ λεπτού υμενίου, λόγω των μειωμένων απαιτήσεων σε υλικό, σχεδόν οποιοσδήποτε ημιαγωγός μπορεί να χρησιμοποιηθεί. Δεδομένου ότι οι ημιαγωγοί μπορούν να σχηματιστούν όχι μόνο από στοιχειακά άτομα, αλλά και από ενώσεις και κράματα που εμπλέκουν πολλά στοιχεία, υπάρχει ουσιαστικά μεγάλος αριθμός ημιαγωγών από τους οποίους μπορεί να γίνει η επιλογή. Προς το παρόν, τα ηλιακά κύτταρα των πάνελ λεπτού υμενίου που είναι διαθέσιμα στο εμπόριο, είναι από τελλουριούχο κάδμιο (CdTe), άμορφο πυρίτιο (a-Si) και λεπτή μεμβράνη πυριτίου. Οι αποδόσεις αυτών των φωτοβολταϊκών στοιχείων κυμαίνεται 6-8%.



Εικόνα 1: Βασική διαφοροποίηση φωτοβολταϊκών

Ένα ταχύτατα αναπτυσσόμενο κομμάτι της βιομηχανίας των φωτοβολταϊκών είναι τα ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά πάνελ σε οικιακά και βιομηχανικά κτίρια ως πρώτη ή βοηθητική πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Συνήθως, μια συστοιχία φωτοβολταϊκών ενσωματώνεται στην οροφή ή στους τοίχους του κτιρίου, ενώ είναι διαθέσιμα και ειδικά κεραμίδια με ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά. Οι συστοιχίες μπορούν επίσης να τοποθετηθούν εκ νέου σε οροφές σε υπάρχοντα κτίρια. Ωστόσο, ο σχεδιασμός ενός κτιρίου που προβλέπει την εγκατάσταση φωτοβολταϊκής συστοιχίας είναι φθηνότερη και το αποτέλεσμα είναι καλύτερο από άποψη αισθητικής. Τα ενσωματωμένα φωτοβολταϊκά πάνελ για κτίρια είναι διαθέσιμα με τις εξής μορφές:

- Επίπεδες στέγες-ταράτσες. Τα ηλιακά στοιχεία λεπτού- υμενίου ενσωματωμένα σε μια εύκαμπτη μεμβράνη πολυμερούς στέγης είναι ευρέως χρησιμοποιούμενα.
- Κεκλιμένες στέγες. Στις κεκλιμένες στέγες, είναι δυνατή η χρήση φωτοβολταϊκών πάνελ σε σχήμα κεραμιδιών (εικόνα 2).





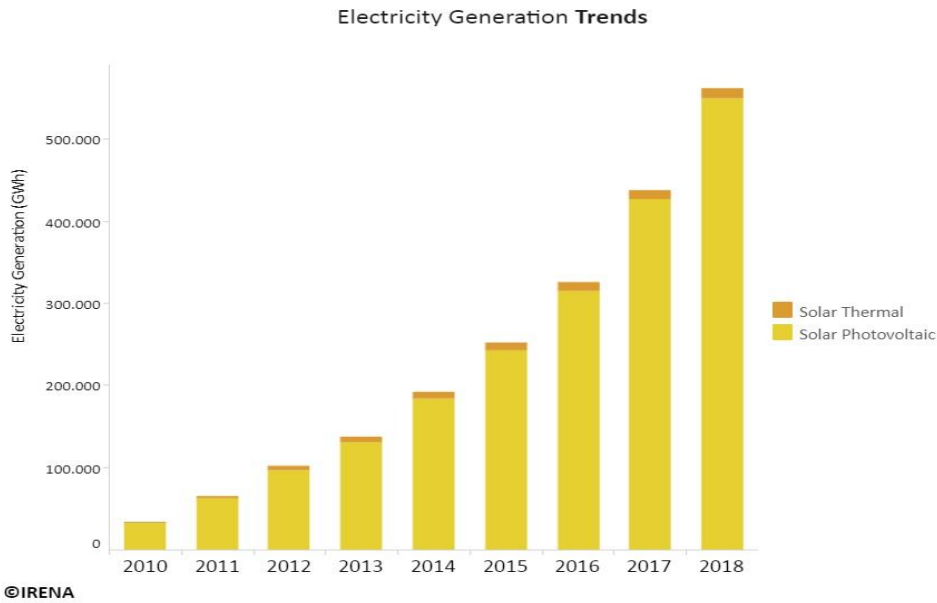
Εικόνα 2:Κεκλιμένες στέγες

- Προσόψεις  
Πάνελ τοποθετημένα σε προσόψεις κτιρίων μπορούν να παρέχουν και πρόσθετη στεγάνωση.
- Τζάμια  
(Ημι)διάφανα πάνελ μπορούν να χρησιμοποιηθούν και να αντικαταστήσουν κοινώς χρησιμοποιούμενων υλικών και κατασκευών που φτιάχνονται από γυαλί και παρόμοια υλικά, όπως παράθυρα και φωταγωγούς.[15]



Εικόνα 3: Φωτοβολταϊκή τεχνολογία τζαμιών

Στο διάγραμμα 8 φαίνονται οι τάσεις παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακά-θερμικά και ηλιακά-φωτοβολταϊκά συστήματα.



Διάγραμμα 8: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο σε παγκόσμιο επίπεδο Πηγή :<https://www.irena.org/solar>

### 3.6.2) Υλικά για την απορρόφηση φωτός και διάφορα είδη ηλιακών στοιχείων

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στα ηλιακά στοιχεία έχουν την ιδιότητα να απορροφούν τα μήκη κύματος που φθάνουν στην επιφάνεια της Γης, ενώ άλλα ηλιακά στοιχεία είναι βέλτιστα στην απορρόφηση εκείνων των μηκών κύματος φωτός που φθάνουν μέχρι πάνω από την ατμόσφαιρα της Γης, για διαστημικές εφαρμογές όπως οι δορυφόροι. Η πλειοψηφία των ηλιακών στοιχείων κατασκευάζονται κατά κύριο λόγο από ημιαγώγιμα υλικά όπως το πυρίτιο. Άλλα υλικά όπως ανόργανα στρώματα, οργανικές βαφές και οργανικά πολυμερή συναρμολογούνται ως λεπτές μεμβράνες τοποθετώντας τον ημιαγωγό πάνω σε γυάλινα, κεραμικά ή πλαστικά υποστρώματα. Επίσης, κατασκευάζεται και μια άλλη κλάση με τη μορφή νανοκρυστάλλων.[15]

### 3.6.3) Πυρίτιο λεπτού υμενίου

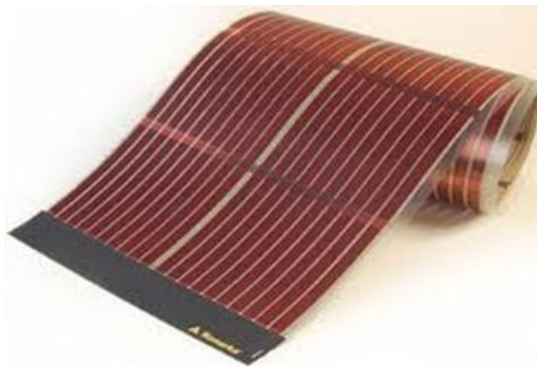
Τα ηλιακά στοιχεία πυριτίου λεπτού υμενίου κατασκευάζονται με χημική εναπόθεση ατμών χρησιμοποιώντας ένα μείγμα από σιλάνιο ( $\text{SiH}_4$ ) και αέριο υδρογόνο. Αυτή η διαδικασία, συνήθως, ενισχύεται με πλάσμα (PE-CVD) και το οποίο μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να παράγει άμορφο πυρίτιο (a-Si ή a-Si:H), πολυκρυσταλλικό πυρίτιο ή νανοκρυσταλλικό πυρίτιο (nc-Si ή nc-Si). Ηλιακά στοιχεία φτιαγμένα από αυτά τα υλικά τείνουν να έχουν μειωμένη απόδοση μετατροπής φως σε ηλεκτρισμό από μονοκρυσταλλικό πυρίτιο, αλλά είναι πολύ φθηνότερα μιας και απαιτούν λιγότερο υλικό. Το κενό ζώνης (ή ενεργειακό κενό, δηλαδή το ενεργειακό εύρος σε ένα στερεό που δεν μπορούν να υπάρχουν ηλεκτρονικές καταστάσεις) του άμορφου πυριτίου είναι μεγαλύτερο (1.7 eV) από αυτό του κρυσταλλικού πυριτίου (c-Si) (1.1 eV), το οποίο επιτρέπει την απορρόφηση του ορατού τμήματος του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας πιο ισχυρά από ότι τα υπέρυθρα μήκη κύματος. Αντίθετα, τα nc-Si και c-Si έχουν περίπου το ίδιο κενό ζώνης και ως εκ τούτου μπορούν να συνδυαστούν σε παράλληλα στοιχεία ηλιακά στοιχεία, όπου το a-Si απορροφάει το ορατό φάσμα της ακτινοβολίας στο πάνω στοιχείο και αφήνει το υπέρυθρο τμήμα της ακτινοβολίας να απορροφηθεί από το nc-Si στο κάτω στοιχείο.[15]

### 3.6.4) Υπεριώδη ηλιακά στοιχεία

Ενώ τα περισσότερα συμβατικά ηλιακά στοιχεία χρησιμοποιούν το ορατό και το υπέρυθρο τμήμα της ακτινοβολίας για την παραγωγή ηλεκτρισμό, στην Κίνα αναπτύσσονται ηλιακά στοιχεία που παράγουν ηλεκτρισμό χρησιμοποιώντας το υπεριώδες τμήμα της ακτινοβολίας αλλά επιτρέποντας στα μήκη κύματος του ορατού τμήματος του φάσματος να το διαπεράσουν. Πιστεύεται πως αυτά τα στοιχεία μπορούν να αντικαταστήσουν τα συμβατικά τζάμια των παραθύρων, έχοντας έτσι διαθέσιμη μια μεγάλη επιφάνεια εγκατάστασης τους, ενσωματώνοντας έτσι ένα συνδυαστικό πλάνο παραγωγής ενέργειας, φωτισμού και ελέγχου της θερμοκρασίας. [15]

### 3.6.5) Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία υπέρυθρων (Infrared organic photovoltaic cells)

Βασική προϋπόθεση για την παραγωγή ενέργειας και την αποδοτική μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε ηλεκτρική από τα φωτοβολταϊκά είναι η ύπαρξη αίθριου καιρού. Σε μέρες με νέφωση η παραγωγή ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά στοιχεία μειώνεται ή μπορεί να είναι και μηδενική. Η χρήση, όμως, της νανοτεχνολογίας και των νανοϋλικών στα πολυμερή ηλιακά στοιχεία μπορεί να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα αξιοποιώντας ενέργεια μια συννεφιασμένη μέρα και ως εκ τούτου να αυξήσει την απόδοση. Ερευνητές έχουν δημιουργήσει ένα ηλιακό στοιχείο πολυμερούς που μπορεί να μετατρέψει την ηλιακή ενέργεια σε ηλεκτρική μια συννεφιασμένη μέρα. Το νέο υλικό είναι μια πολυμερική χημική ένωση η οποία δύναται να αξιοποιήσει το υπέρυθρο τμήμα του φάσματος της ηλιακής ακτινοβολίας. Τα πολυμερή ηλιακά στοιχεία κατασκευάζονται από ταινίες (συνήθως 100 nm) οργανικών ημιαγωγών όπως πολυ(ρ-φαινυλενοβινυλένιο (PPV), συμπολυμερή και τα φουλερένια άνθρακα. Οι ερευνητές έχουν σχεδιάσει νανοσωματίδια που ονομάζονται κβαντικές τελείες (quantum dots) μαζί με πολυμερή υλικό έτσι ώστε το φωτοβολταϊκό στοιχείο να αξιοποιεί το τμήμα των υπέρυθρων και το τμήμα του ορατού φάσματος της ακτινοβολίας. Χρησιμοποιώντας αυτή την τεχνολογία αυξάνεται η απόδοση και μπορεί να φτάσει και 26,7%. [15]



Εικόνα 4: Οργανικά φωτοβολταϊκά στοιχεία υπέρυθρων

### 3.6.6) Συγκεντρωτικά ηλιακά συστήματα

Οι τεχνολογίες συγκέντρωσης ηλιακής ενέργειας (concentrated solar power-CSP) χρησιμοποιούν καθρέφτες για να αντανακλούν και να συγκεντρώνουν το φως του ήλιου σε

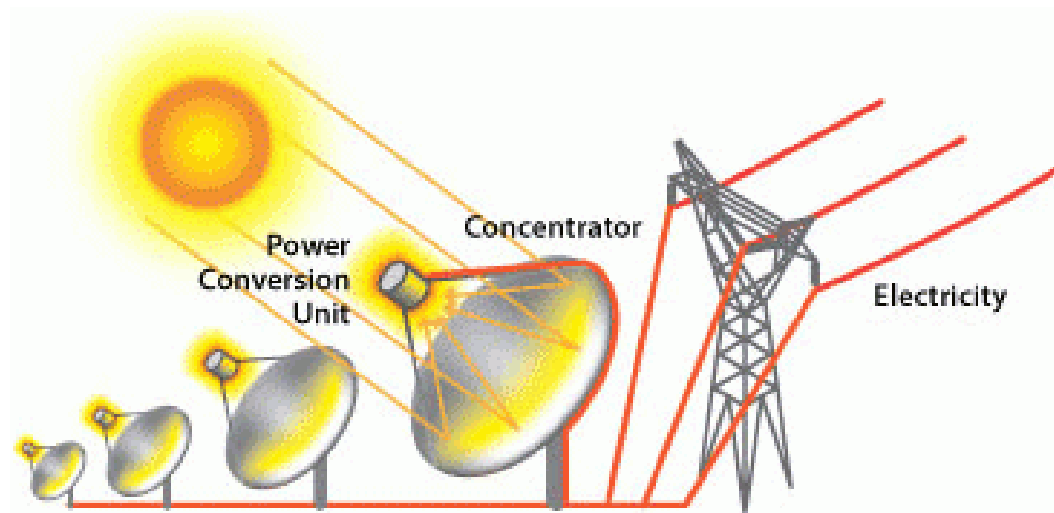
ένα δέκτη. Η ενέργεια από το συγκεντρωμένο ηλιακό φως θερμαίνει ένα υγρό υψηλής θερμοκρασίας στον δέκτη. Αυτή η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την περιστροφή ενός στροβίλου ή την τροφοδοσία ενός κινητήρα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για μια ποικιλία βιομηχανικών εφαρμογών, όπως αφαλάτωση νερού, επεξεργασία τροφίμων, χημική παραγωγή και επεξεργασία ορυκτών. Τα συστήματα συγκέντρωσης ηλιακής-θερμικής ενέργειας χρησιμοποιούνται γενικά για έργα κλίμακας χρησιμότητας μπορούν να διαμορφωθούν με διαφορετικούς τρόπους.

Τα συστήματα Power Tower (εικόνα 5) έχουν καθρέπτες γύρω από έναν κεντρικό πύργο που λειτουργεί ως δέκτης και επιτρέπει υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας και συνεπώς αποδόσεις. Οι καθρέπτες ελέγχονται από υπολογιστή (ονομάζονται ηλιοστάτες) παρακολουθούν τον ήλιο κατά μήκος δυο αξόνων και εστιάζουν την ηλιακή ενέργεια σε έναν δέκτη στην κορυφή του πύργου. Η εστιασμένη ενέργεια χρησιμοποιείται για τη θέρμανση ενός ρευστού μεταφοράς (πάνω από 538°C) για τη παραγωγή ατμού και τη λειτουργία μιας γεννήτριας. Σε αυτά τα συστήματα μπορεί εύκολα να ενσωματωθεί κάποιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, επιτρέποντας εικοσιτετράωρη λειτουργία. Το μεγαλύτερο έργο αυτής της τεχνολογίας βρίσκεται στο Ντουμπάι και ονομάζεται AsharqAl-Awsat. Έχει εγκατεστημένη ισχύ 950MW και έχει ύψος 262.44 μέτρων. Το έργο αναπτύχθηκε από την ACWAPOWER, μια εταιρεία της Σαουδικής Αραβίας που επενδύει σε έργα σχετικά με την παραγωγή ενέργειας, και θα παρέχει καθαρή ενέργεια σε 320000 κατοίκους και θα μειώσει 1,6 εκατομμύρια τόνους εκπομπών άνθρακα ετησίως.



Εικόνα 5:Το μεγαλύτερο σύστημα Power tower που βρίσκεται στο Ντουμπάι.

Άλλο σύστημα CSP (διάγραμμα 7) περιλαμβάνει καθρέφτες, οι οποίοι κατανέμονται στην επιφάνεια ενός παραβολικού πιάτου, για να συγκεντρώσουν το φως του ήλιου σε έναν δέκτη που είναι σταθερός στο εστιακό σημείο. Σε αντίθεση με άλλες τεχνολογίες CSP που χρησιμοποιούν ατμό για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ενός στροβίλου, ένα σύστημα με παραβολικό πιάτο χρησιμοποιεί ένα ρευστό λειτουργίας όπως το υδρογόνο που θερμαίνεται έως και 649°C στον δέκτη για την λειτουργία ενός κινητήρα. Κάθε πιάτο περιστρέφεται κατά δυο άξονες για να παρακολουθεί τον ήλιο.[16,17]



Διάγραμμα 7:Βασικό σύστημα CSP Πηγή:<https://www.energy.gov/eere/solar/dishengine-system-concentrating-solar-thermal-power-basics>

## Κεφάλαιο 4: Αυτόνομα Μικρό-Δίκτυα (SAM-Stand Alone Micro-grids)

Γενικά, η πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια αποτελεί δείκτη οικονομικής ανάπτυξης και ευνοϊκών συνθηκών διαβίωσης και η αλήθεια είναι πως, σε παγκόσμιο επίπεδο, το ποσοστό του πληθυσμού με πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια αυξάνεται σταθερά τις τελευταίες δεκαετίες. Σύμφωνα με την Διεθνή Οργάνωση Ενέργειας (International Energy Agency-IEA), ορισμός πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια, συνεπάγεται περισσότερα από απλή διανομή στα νοικοκυριά. Ο όρος περιλαμβάνει να καταναλώνουν ένα ελάχιστο όριο ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο εξαρτάται από το αν το νοικοκυριό είναι σε αστική ή αγροτική/υπαιθρια περιοχή και αυξάνεται εν καιρώ. Για τα αγροτικά νοικοκυριά, το ελάχιστο όριο είναι 250kWh ανά έτος και για τα αστικά νοικοκυριά είναι 500kWh ανά έτος. Σύμφωνα με την ιστοσελίδα ourworldindata.org, το 1990 περίπου το 71% του παγκόσμιου πληθυσμού είχε πρόσβαση σε ηλεκτρική ενέργεια και αυτό το ποσοστό αυξήθηκε στο 87% το 2016. Από την μία, αυτό το γεγονός είναι πολύ θετικό αλλά από την άλλη σημαίνει ότι σήμερα περίπου 940 εκατομμύρια άνθρωποι (το 13% του κόσμου) δεν έχουν πρόσβαση σε σταθερή παροχή ενέργειας. Επιπλέον, 3 δισεκατομμύρια κόσμοι (το 40% του πληθυσμού) δεν έχει πρόσβαση σε καθαρά καύσιμα για δραστηριότητες που σχετίζονται με την μαγειρική και την θέρμανση. Αυτό αποτελεί μεγάλο παράγοντα ρίσκου για θανάτους και νοσηρότητας εξαιτίας της ρύπανσης του αέρα εσωτερικών χώρων. Από τα παραπάνω πλήττονται κυρίως υποσαχάριες αφρικανικές χώρες και χώρες της νότιας και ανατολικής Ασίας, αν και τα τελευταία χρόνια, χώρες όπως η Ινδία και η Ινδονησία έχουν φτάσει υψηλά ποσοστά εξηλεκτρισμού (85% και 98% αντίστοιχα). Γενικά, η μεγαλύτερη έλλειψη ηλεκτροδότησης παρατηρείται σε απομακρυσμένες ή/και απόκρημνες αγροτικές, ορεινές ή πεδινές, περιοχές και νησιά, κυρίως αναπτυσσόμενων χωρών.[18]

Για την ηλεκτροδότηση αυτών των περιοχών υπάρχουν διάφορες τεχνικές μέθοδοι με βασικότερη την επέκταση του κεντρικού δικτύου. Πρόκειται για την πιο προφανή και επιθυμητή μέθοδο και περιλαμβάνει την επέκταση των γραμμών μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος από περιοχές που ήδη καλύπτονται από το δίκτυο ηλεκτροδότησης. Ωστόσο, το τραχύ έδαφος (όπως, για παράδειγμα, σε ορεινές και δασικές περιοχές) αυξάνει το κόστος επέκτασης (ορισμένες φορές σημαντικά). Επιπλέον, ο διασκορπισμένος χαρακτήρας των αγροτικών οικιών και οικισμών μαζί με την μικρή ζήτηση σε ενέργεια, αυξάνει το κόστος της κιλοβατώρας (kWh) της επέκτασης του δικτύου, καθιστώντας τη μη βιώσιμη από οικονομικής άποψης. Επιπλέον, στις αναπτυσσόμενες χώρες, πρόσβαση στο κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης δεν σημαίνει απαραίτητως ασφαλή και αξιόπιστη παροχή ενέργειας, όπου τα μπλακάουτ μπορούν να αποτελούν καθημερινότητα. Σε τέτοιες περιπτώσεις ιδανικά θεωρούνται τα αυτόνομα συστήματα, όπως τα οικιακά ενεργειακά συστήματα (Home Energy Systems-HES). Τα οικιακά ενεργειακά συστήματα συνήθως σχεδιάζονται για την παροχή ενέργειας σπιτιών ή και μικρών κτιρίων. Ένα πλεονέκτημα αυτών των συστημάτων είναι το γεγονός ότι μπορούν να παρέχουν σχετικά αδιάπνη ενέργεια κοντά σε μεμονωμένα νοικοκυριά ή μικρά κτίρια, καταργώντας έτσι τα κόστη μεταφοράς και διανομής, χωρίς να χρειάζονται εκτεταμένη υποδομή καθιστώντας τα την πιο βιώσιμη εναλλακτική λύση για παροχή ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές. Το σύνηθες είναι αυτού του είδους τα συστήματα να βασίζονται στο ντίζελ, όμως πλέον οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας όπως η αιολική, ηλιακή, υδροηλεκτρική και η βιομάζα



κερδίζουν σημαντικό έδαφος. Τα οικιακά συστήματα που αξιοποιούν την ηλιακή ενέργεια με φωτοβολταϊκά συστήματα για παροχή ενέργειας και ηλιακούς θερμοσίφωνες για παροχή ζεστού νερού είναι διαδεδομένα παραδείγματα οικιακών συστημάτων ενέργειας που δεν βασίζονται στο ντίζελ (όπως τα κοινά αυτόνομα συστήματα παραγωγής ενέργειας). Γενικά, αυτού του είδους τα συστήματα συνοψίζονται στον πίνακα.[19]

Πίνακας 4: Είδη ηλιακών οικιακών συστημάτων

| Περιγραφή συστήματος               | Μέση ημερήσια κατανάλωση | Προτεινόμενη τάση παραγωγής         | Προτεινόμενη τάση διανομής | Φορτία  |
|------------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|----------------------------|---|
| Πίκο (Pico) φωτοβολταϊκά συστήματα | 5-50Wh                   | 12 V DC                             | Ίδια παραγωγή (DC)         | Φως, TV, ράδιο, φορτιστής κινητού   |
| DC-ηλιακά οικιακά συστήματα        | <0.5-1kWh/D              | 12 V-24V DC                         | Ίδια παραγωγή (DC)         | Φως, φορτιστής κινητού, ανεμιστήρας, TV, ράδιο, ψύξη  |
| AC-ηλιακά οικιακά συστήματα        | >0.5-1kWh/D              | 12-24V DC                           | AC ή μικτή ACDC            | Φως, φορτιστής κινητού, ανεμιστήρας, TV, ράδιο, ψύξη  |
| Ηλιακά οικιστικά συστήματα         | 2-50kWh                  | 12/24/48VDC (συνήθως με AC διανομή) | AC                         | Φως, φορτιστής κινητού, ανεμιστήρες, TV, ράδιο, ACφορτία όπως μηχάνημα διάτρησης, μίξερ και άλλα. |

#### 4.1) Υβριδικά συστήματα ενέργειας

Τις τελευταίες δεκαετίες η στροφή σε εναλλακτικές μορφές ενέργειας και η σταδιακή αποδέσμευση από τα ορυκτά καύσιμα έχει τεθεί ως στόχος της παγκόσμιας κοινότητας και η αγορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και των συστημάτων αποθήκευσης έχει γνωρίσει άνθηση ενώ η έρευνα και η ανάπτυξη αυτών των τεχνολογιών συνεχίζεται. Ωστόσο, οι ΑΠΕ στο μεγαλύτερο μέρος της βιομηχανίας έχουν περισσότερο συμπληρωματικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας, ενώ το κύριο ρόλο κατέχουν τα ορυκτά καύσιμα. Ενώ η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ είναι αρκετά αποδοτική και αξιόπιστη, το γεγονός ότι η απόδοση τους επηρεάζεται άμεσα από παράγοντες όπως οι καιρικές συνθήκες και η εποχή του έτους αποτελεί πρόβλημα. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με σύνδεση στο κεντρικό δίκτυο (net metering) είτε με υβριδικά συστήματα. Τα υβριδικά συστήματα πολλές φορές αποτελούν την μόνη απάντηση, ειδικά

όταν πρόκειται για αυτόνομα δίκτυα . Τα αυτόνομα συστήματα ενέργειας, θεωρούνται, περισσότερο πιθανά να καλύπτουν το φορτίο των απομακρυσμένων από το κεντρικό δίκτυο περιοχών, ειδικά σε περιπτώσεις αναπτυσσόμενων χωρών. Τα υβριδικά συστήματα ενέργειας συνδυάζουν δύο ή περισσότερες μορφές ενέργειας ή συστημάτων αποθήκευσης και παρέχουν πολλά οφέλη σε σύγκριση με τα συνήθη συστήματα. Συνήθως, τα υβριδικά συστήματα αποτελούνται από ένα συνδυασμό ορυκτών καυσίμων και ΑΠΕ (ευρέως διαδεδομένη σε υβριδικά συστήματα είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι ανεμογεννήτριες), συνδεδεμένο με κάποιο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας, όπως μπαταρίες ή κυψέλες καυσίμου. Αυτή η τακτική ακολουθείται με στόχο την μείωση των εκπομπών αερίου του θερμοκηπίου (εξαιτίας της καύσης των ορυκτών καυσίμων) και την χρήση εφεδρικής τεχνολογίας ενέργειας για την εξασφάλιση συνεχούς παροχής για την αντιμετώπιση των διακυμάνσεων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (για παράδειγμα τις μέρες όπου δεν υπάρχει αέρας ή δεν παράγεται ενέργεια από τα φωτοβολταϊκά πάνελ τις μέρες με συννεφιά). Η κύρια πρόκληση σε ένα αυτόνομο σύστημα (υβριδικό ή μη) είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση των εξαρτημάτων του συστήματος με σκοπό την μείωση στο ελάχιστο δυνατό του αρχικού κόστος και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης, ενώ το σύστημα διασφαλίζεται και είναι αξιόπιστο. Με άλλα λόγια, το επιθυμητό αποτέλεσμα είναι ένα αυτόνομο σύστημα οικονομικά βιώσιμο και αποδοτικό, που θα καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες και στις ώρες υψηλής ζήτησης των καταναλωτών, χωρίς διακυμάνσεις.

Τα ενεργειακά συστήματα που βασίζονται στην χρήση του υδρογόνου μπορούν να οδηγήσουν σε περαιτέρω διεύρυνση των ΑΠΕ στον τομέα της ενέργειας, καθώς και στην αύξηση της αξιοπιστίας τους. Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αρκετές μελέτες σχετικά με την σχεδίαση και την ανάλυση αυτόνομων συστημάτων ενέργειας με υδρογόνο, οι οποίες εξερευνούν κατά πόσο βιώσιμα είναι αυτά τα συστήματα (και οικονομικά και περιβαλλοντικά), και το κατά πόσο μπορούν να περιορίσουν την χρήση ορυκτών πόρων ή την εξάρτηση από το κεντρικό δίκτυο.

Μια από τις πιο υποσχόμενες προσεγγίσεις υβριδικών συστημάτων είναι ο συνδυασμός ηλιακής ενέργειας με μια άλλη πηγή. Για παράδειγμα, στη μελέτη των Hazemet al [20] προτάθηκε ένα αυτόνομο υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας με χρήση υδρογόνου και ηλιακής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της πόλης του Brest, στην Γαλλία. Η παροχή ενέργειας στην συγκεκριμένη πόλη εξαρτάται από τις γραμμές μετάδοσης υψηλής τάσης από την περιφέρεια, μέσω μεγάλης απόστασης με επακόλουθες απώλειες γραμμής, ειδικά κατά την διάρκεια της περιόδου αιχμής, τον χειμώνα. Αυτό παροτρύνει την χρήση των ΑΠΕ. Το υβριδικό σύστημα που προτείνεται, αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, κυψέλες καυσίμου, ηλεκτρολύτη και δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου. Τα αποτελέσματα της μελέτης (με χρήση του λογισμικού HOMER) έδειξε πως το προτεινόμενο σύστημα, και πιο συγκεκριμένα οι κυψέλες καυσίμου, είναι μια βιώσιμη εναλλακτική επιλογή για τις ντίτζελ γεννήτριες ως μια αξιόπιστη πηγή ενέργειας, φιλική προς το περιβάλλον, με μειωμένο κόστος συντήρησης. Επιπλέον, η μελέτη έδειξε πως οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να αντιμετωπίσουν αποτελεσματικά τις διακυμάνσεις μιας ανανεώσιμης πηγής, όπως η ηλιακή ενέργεια.

Σε παρόμοιο υβριδικό σύστημα με το παραπάνω, τα φωτοβολταϊκά πάνελ και οι κυψέλες καυσίμου μπορεί να προστεθεί και γεννήτρια ντίτζελ. Σε μελέτη των CGhenai και MBettayeb



[21] σχετικά με τον βέλτιστο σχεδιασμό αυτόνομου συστήματος που βασίζεται στην ηλιακή ενέργεια και στο υδρογόνο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών ενός εμπορικού κτιρίου (το κτίριο διαχειρίζεται το πανεπιστήμιο της Σάρτζα, στα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα). Έγινε προσομοίωση (σε λογισμικό HOMER) τριών διαφορετικών διατάξεων, οι οποίες παρουσίασαν το χαμηλότερο κόστος ενέργειας (COE-Cost of Energy). Η πρώτη διάταξη αποτελούταν από δύο ΑΠΕ συστήματα (φωτοβολταϊκά πάνελ και κυψέλες καυσίμου) και μια εφεδρική ντίζελ γεννήτρια. Η δεύτερη διάταξη αποτελούταν μόνο από ΑΠΕ συστήματα (φωτοβολταϊκά πάνελ και κυψέλες καυσίμου) για την παραγωγή ενέργειας. Η τρίτη διάταξη συνδύαζε τα φωτοβολταϊκά πάνελ με μια ντίζελ γεννήτρια. Σε όλες τις διατάξεις χρησιμοποιήθηκαν μπαταρίες και μετατροπές (DC → AC). Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν πως η βέλτιστη επιλογή για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του συγκεκριμένου κτιρίου είναι το σύστημα που περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πάνελ, κυψέλες καυσίμου και τη ντίζελ γεννήτρια αφού προσφέρει την καλύτερη ενσωμάτωση των ΑΠΕ (σε ποσοστό 66.1%), χαμηλό κόστος ενέργειας (92\$/MWh) και χαμηλές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (24kgCO<sub>2</sub>/MWh).

Γενικά παρατηρείται στην βιβλιογραφία, σε μελέτες σχετιζόμενες με υβριδικά και αυτόνομα συστήματα, μια τάση προτίμησης στην αξιοποίηση της ηλιακής ενέργειας, ανεξαρτήτως αν πρόκειται για σύστημα βασιζόμενο 100% σε ΑΠΕ ή όχι και αν πρόκειται για σύστημα που καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες ενός κτιρίου ή ενός οικισμού ή ακόμα και μιας πόλης. Αυτό μπορεί να οφείλεται στην διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας της εκάστοτε περιοχής, στις κλιματικές συνθήκες γενικότερα, καθώς επίσης και την δυνατότητα πρόσβασης σε άλλες πηγές ενέργειας (ανανεώσιμες ή μη). Σε μελέτη των M. Santarelli, M. Cali, S. Macagno [22], σχετικά με το σχεδιασμό και την ανάλυση αυτόνομου συστήματος παραγωγής ενέργειας με υδρογόνο για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών (3 MWh/year) ενός κατοικήσιμου κτιρίου που βρίσκεται στην κοιλάδα της λίμνης Euglio, στην ΒΔ Ιταλία, κατά την διάρκεια ενός έτους λειτουργίας, γίνεται σύγκριση τριών συστημάτων με διαφορετικές ΑΠΕ. Τα τρία συστήματα αποτελούνται από μια πηγή ΑΠΕ (φωτοβολταϊκά πάνελ, μικρή υδρο-τουρμπίνα και ανεμογεννήτρια), ηλεκτρολύτη και κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων. Για την σύγκριση των συστημάτων λήφθηκε υπόψη η ποσότητα της ενέργειας που παράχθηκε από ΑΠΕ αλλά και η ποσότητα ενέργεια που αποθηκεύτηκε υπό την μορφή υδρογόνου, και για όλο τον χρόνο αλλά και για κάθε μήνα. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν πως το σύστημα με την ανεμογεννήτρια δεν είναι βιώσιμο και αποδοτικό επειδή η μέση ταχύτητα ανέμου της συγκεκριμένης περιοχής είναι πολύ χαμηλή. Σε αντίθεση με τον άνεμο, η ηλιακή ακτινοβολία έχει σχεδόν σταθερή διαθεσιμότητα κατά την διάρκεια του έτους, οπότε η απαιτούμενη εποχική αποθήκευση της ενέργειας υπό την μορφή υδρογόνου είναι η λιγότερη. Η μελέτη έδειξε πως το βέλτιστο σύστημα είναι αυτό με τον υδροστρόβιλο και αυτό οφείλεται στην υψηλή απόδοση της τεχνολογίας υδροστρόβιλου και στο γεγονός ότι η ενέργεια στέλνεται απευθείας στον καταναλωτή με υψηλή συχνότητα. Συνεπώς είναι το σύστημα με τα μικρότερα κόστη. Ωστόσο, αυτή η διάταξη είναι κατάλληλη για περιοχές όπου βρίσκονται κοντά σε τοποθεσίες με υδροηλεκτρικά συστήματα, γεγονός που περιορίζει την διαθεσιμότητα τους. Αυτό δεν συμβαίνει με την ηλιακή ενέργεια, όπου η διαθεσιμότητα της είναι μεγαλύτερη και αξιοποίηση της είναι ευκολότερη (παρά την χαμηλή απόδοση των φωτοβολταϊκών πάνελ σε σύγκριση με την απόδοση του υδροστρόβιλου).

Παρά το μεγάλο αριθμό ερευνών που υπάρχουν στην βιβλιογραφία, που αφορούν την τεχνοοικονομική αξιολόγηση των υβριδικών συστημάτων με υδρογόνο, ελάχιστες έρευνες συγκρίνουν 100% ΑΠΕ αυτόνομα συστήματα με αυτόνομα συστήματα ντίζελ γεννήτριας. Σε μελέτη των F. Dawood, GMShafiullah και M. Anda [23] γίνεται σύγκριση ανάμεσα σε τρεις διαφορετικές διατάξεις αυτόνομου συστήματος με ΑΠΕ και ένα αυτόνομο σύστημα με ντίζελ γεννήτρια για την κάλυψη του ημερήσιου φορτίου (2 MWh) μιας υποθετικής απομακρυσμένης κοινότητας στην ΒΔ Αυστραλία, που αποτελείται από 100 κατοικίες (400 κάτοικοι), μερικά κτίρια εμπορικής χρήσης και μικρές εργοστασιακές μονάδες. Οι διατάξεις αυτόνομου συστήματος είναι οι εξής:

- Σύστημα 1 (Σ1)- ντίζελ γεννήτριες
- Σύστημα 2 (Σ2)- φωτοβολταϊκά πάνελ-κυψέλες καυσίμου
- Σύστημα 3 (Σ3)- φωτοβολταϊκά πάνελ-μπαταρίες-κυψέλες καυσίμου
- Σύστημα 4 (Σ4)- φωτοβολταϊκά πάνελ-μπαταρίες

Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του κάθε συστήματος (με χρήση του λογισμικού HOMER) συγκρίθηκαν τα κόστη κεφαλαίου (CAPEX), τα κόστη λειτουργίας (OPEX), το κόστος ενέργειας (COE) και τις μειώσεις εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Η σύγκριση των συστημάτων έδειξε πως το Σ1 είναι αυτό με το μικρότερο κόστος επένδυσης, αλλά αυτό με το μεγαλύτερο κόστος κύκλου ζωής κατά την διάρκεια ζωής του εγχειρήματος (25 χρόνια). Επιπλέον, τα αποτελέσματα έδειξαν πως το Σ1 έχει το μεγαλύτερο COE μακροπρόθεσμα για το έργο και είναι το περισσότερο ρυπογόνο σύστημα (610 τόνοι  $CO_2$  ανά έτος), εξαιτίας της χρήσης ορυκτών καυσίμων (ντίζελ) και την πλήρη απουσία ανανεώσιμων πηγών ενέργειας από το σύστημα παραγωγής ενέργειας. Για το Σ4, τα αποτελέσματα έδειξαν πως ο εκμηδενισμός των ρύπων και η μη χρήση ντίζελ απαιτεί υψηλότερο CAPEX, αλλά χαμηλότερο COE (48.6% μείωση) κατά την διάρκεια των 25 ετών ζωής του έργου. Το COE αυτού του συστήματος ανέρχεται στα \$0.394, σε σύγκριση με του Σ1 που ανέρχεται σε \$0.665.

Η ιδέα της αποθήκευσης ενέργειας υπό την μορφή υδρογόνου εξετάστηκε σε δύο συστήματα (Σ2 και Σ3) για λόγους σύγκρισης των πλεονεκτημάτων και των μειονεκτημάτων της χρήσης του υδρογόνου. Έτσι το Σ2, που είναι συνδυασμός φωτοβολταϊκών πάνελ και κυψελών καυσίμου, συγκρίθηκε με το Σ1 και Σ4. Η προσομοίωση του Σ2 έδειξε πως η αποθήκευση μιας ΑΠΕ υπό την μορφή υδρογόνου δεν είναι η πιο αποδοτική από οικονομική άποψη, όταν συγκρίνεται με το Σ4. Ωστόσο, η αποθήκευση με υδρογόνο είναι πιο αποδοτική από την αποθήκευση με μπαταρία στην μείωση της περίσσειας ενέργειας κατά 56%, λόγω του δυναμικού παραγωγής υδρογόνου (ηλεκτρολύτης). Συνεπώς, απαιτείται λιγότερη χωρητικότητα φωτοβολταϊκών πάνελ για την ίδια ενεργειακή ισορροπία του αυτόνομου συστήματος. Επιπλέον, τα συστήματα με υδρογόνο έχουν μεγαλύτερη ενεργειακή αυτονομία υπό την μορφή συμπιεσμένου υδρογόνου στην δεξαμενή, το οποίο μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με την αύξηση της μονάδας παραγωγής του και την χωρητικότητα αποθήκευσης (δηλαδή τον ηλεκτρολύτη και την δεξαμενή υδρογόνου). Αξίζει να σημειωθεί πως και το σύστημα μπαταρίας, αλλά και το σύστημα κυψέλης καυσίμου, έχουν σημαντικά μειωμένο COE από το σύστημα ντίζελ γεννήτριας, ενώ δεν υπάρχουν εκπομπές ρύπων. Τα αποτελέσματα των Σ2 και Σ4 συγκρίθηκαν με αυτά ενός υβριδικού συστήματος

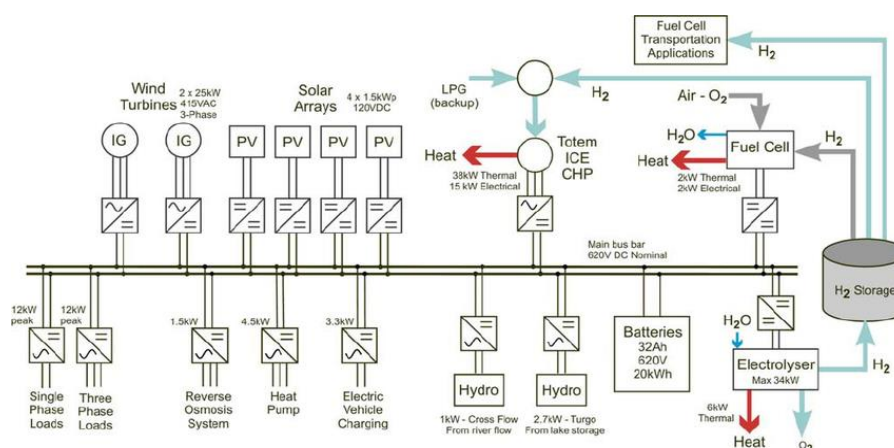
αποθήκευσης ΑΠΕ μπαταρίας-υδρογόνου (Σ3). Η τεχνοοικονομική αξιολόγηση του Σ3 έδειξε πως πρόκειται για το πιο οικονομικά βιώσιμη διάταξη για ένα σύστημα που βασίζεται 100% σε ΑΠΕ. Επιπλέον, τα αποτελέσματα έδειξαν πως το Σ3 έχει μια υποσχόμενη μειωμένη περίοδο αποπληρωμής 6.01 ετών και μειωμένο COE κατά 48.6%, σε σύγκριση με το Σ1. Επίσης, η αυτονομία του συστήματος Σ3 είναι 80 ώρες υπό την μορφή αποθηκευμένου υδρογόνου ( $177 \text{ kgH}_2$ ), ενώ η αυτονομία του συστήματος Σ4 ανέρχεται σε 16.3 ώρες. Ένα ακόμη πλεονέκτημα του Σ3 είναι η διασφάλιση της ποιότητας ισχύος, της συχνότητας και του ελέγχου τάσης του συστήματος χάρις την χρήση μπαταριών με και μετατροπέα DC-AC.

#### **4.2) Εγκατεστημένα υβριδικά συστήματα ηλιακού υδρογόνου/κυψέλης καυσίμου**

Υβριδικά συστήματα φωτοβολταϊκών πάνελ/κυψελών καυσίμου έχουν αρχίσει να εγκαθίστανται από τα μέσα του 1980, σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών. Σχεδόν όλα από τα παρακάτω συστήματα είχαν χρηματοδότηση από κυβερνήσεις, πανεπιστήμια και ιδρύματα.[3]

Το πρότζεκτ FIRST είναι ένα αυτόνομο σύστημα φωτοβολταϊκών/υδρογόνου για τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές στην Μαδρίτη, Ισπανία. Το σύστημα εγκαταστάθηκε το 2000 και το πρότζεκτ ολοκληρώθηκε το 2004. Σε αυτό το σύστημα χρησιμοποιήθηκε ένας απευθείας συνδεδεμένος ηλεκτρολύτης για να καλύψει την ζήτηση φορτίου (133-197W) του εξοπλισμού. Κατά την διάρκεια του τετραετούς πρότζεκτ, κατασκευάστηκαν και δοκιμάστηκαν δύο πειραματικά συστήματα στη Μαδρίτη. Η σχεδίαση αυτών των δύο συστημάτων βασίστηκε σε μια μέση κατανάλωση ενέργειας 3.6 kWh/day και μια μέση ζήτηση ισχύος 150 W, που προορίζονται για την παροχή ηλεκτρικού ρεύματος σε τηλεπικοινωνιακές μονάδες. Το πρώτο σύστημα ήταν ένα υβριδικό σύστημα φωτοβολταϊκών/κυψελών καυσίμου υδρογόνου, στο οποίο ο κύριος ρόλος της κυψέλης καυσίμου ήταν να παρέχει ενέργεια σε περιπτώσεις έλλειψης ενέργειας στις μπαταρίες. Ο κύριος σκοπός της επίδειξης του πρώτου συστήματος ήταν να δοκιμαστεί η αξιοπιστία αυτής της διάταξης συστήματος και να συγκριθεί με συμβατικά συστήματα ντίζελ γεννητριών, που χρησιμοποιούνται συχνά σε τέτοιου είδους εφαρμογές. Το δεύτερο σύστημα ήταν ένα τελείως αυτόνομο σύστημα που αποτελούνταν από έναν PEM (Proton Exchange Membrane-Μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων) ηλεκτρολύτη, ένα σύστημα υδριδίου μετάλλου αποθήκευσης υδρογόνου και μια PEMκυψέλη καυσίμου αέρα/υδρογόνου (ο αέρας χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό μέσο). Ο σκοπός της επίδειξης του δεύτερου συστήματος ήταν η παραγωγή υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης του νερού κατά την διάρκεια περιόδων με ηλιοφάνεια με περίσσεια ηλιακή ενέργεια, την μακροπρόθεσμη αποθήκευση υδρογόνου και την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά παραγγελία μέσω της κυψέλης καυσίμου. Γενικά, έχουν διεξαχθεί πολλά πρότζεκτ που δοκιμάζουν το υδρογόνο που παράγεται με χρήση ηλιακής ενέργειας ως καύσιμο/ μέσο αποθήκευσης είτε για περιπτώσεις εφεδρείας είτε σε πλήρη αυτόνομα συστήματα. Σε κάθε περίπτωση, σε κάθε ένα από αυτά τα πρότζεκτ γίνεται χρήση ΑΠΕ αποκλειστικά και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου είναι μηδενικές. Άλλο τέτοιο πρότζεκτ είναι το HARI (Hydrogen and Renewable Integration), στο West Beacon Farm στο Λέστερσιρ στο Ηνωμένο Βασίλειο, το οποίο διερευνά μεθόδους

αποθήκευση ενέργειας που παράγεται από διαλείπει ανανεώσιμες πηγές χρησιμοποιώντας υδρογόνο. Το πρότζεκτ ξεκίνησε το 2002. Ένα σύστημα υδρογόνου αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη ισχύος 36 kW, αποθήκευση συμπιεσμένου αερίου όγκου 2856Nm<sup>3</sup> (κανονικά κυβικά μέτρα- μονάδα μέτρησης όγκου του συμπιεσμένου αερίου) και 2 κυψέλες καυσίμου ισχύος 2 και 5 kW αντίστοιχα προστέθηκε στο ήδη υπάρχον σύστημα ΑΠΕ, το οποίο περιλαμβάνει δύο ανεμογεννήτριες με συνδυασμένη ονομαστική ισχύ 50kW, συστοιχία φωτοβολταϊκών πάνελ ισχύος 13kW και ένα micro-υδροηλεκτρικό σύστημα ισχύος 3 kW με σκοπό την παροχή ενέργειας σε φορτία οικιών και εμπορικών κτιρίων ενός μικρό τοπικού δικτύου. Το πρότζεκτHARI υλοποιεί την έννοια της οικονομίας υδρογόνου με απώτερο σκοπό την ανεξαρτησία δικτύου και την αυτό-επάρκεια του West Beacon Farm.



Διάγραμμα 9: Διάταξη πρότζεκτHARI

Στον Καναδά, στο Ινστιτούτο Έρευνας Υδρογόνου (HRI), αναπτύχθηκε και εγκαταστάθηκε ένα αυτόνομο σύστημα που βασίζεται στην παραγωγή υδρογόνου με ηλιακή και αιολική ενέργεια. Αυτό το πρότζεκτ ξεκίνησε το 2001. Ο σκοπός του συστήματος ήταν να επιδείξει την ασφάλεια και την αξιοπιστία ενός αυτόνομου συστήματος και της αποθήκευσης υπό την μορφή υδρογόνου.

Το Εθνικό Ινστιτούτο Αεροδιαστημικής τεχνολογίας (INTA), ξεκίνησε ένα πρόγραμμα στην τεχνολογία υδρογόνου, το 1989, στην Ισπανία, το οποίο είχε δυο βασικούς στόχους: 1) την χρήση του υδρογόνου ως μέσο αποθήκευσης της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας, 2) την χρήση ολοκληρωμένων συστημάτων σε για επανδρωμένες διαστημικές αποστολές. Το πρόγραμμα ολοκληρώθηκε το 1997. Το RHOEBU εργοστάσιο, παρείχε ενέργεια σε μέρος της Κεντρικής Βιβλιοθήκης ενός μέλους της ένωσης των γερμανικών ερευνητικών κέντρων Helmholtz, με υδρογόνο που παραγόταν από ηλιακή ενέργεια, όλο τον χρόνο ανεξάρτητα από το κεντρικό δίκτυο για 10 χρόνια (1993-2003). Ο κύριος σκοπός του εργοστασίου ήταν η δοκιμή της απαιτούμενης αποθήκευσης, χρησιμοποιώντας το υδρογόνο ως φορέας ενέργειας σε συνεργασία με έναν ηλεκτρολύτη και μια κυψέλη καυσίμου υπό ρεαλιστικές συνθήκες ακτινοβολίας και κατανάλωσης ενέργειας, και για να δείξει την βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος μηδενικών εκπομπών.

Το πρότζεκτ αυτόνομου συστήματος φωτοβολταϊκών και υδρογόνου (SAPHYS) ήταν το αποτέλεσμα της συνεργασίας του κυβερνητικού οργανισμού της Ιταλίας για την ενέργεια και το περιβάλλον (ENEA), του Ινστιτούτου Ενέργειας της Νορβηγίας (IFE) και της Γερμανίας

(KFA), με την υποστήριξη της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, στο πλαίσιο του προγράμματος μη-πυρηνικής ενέργειας Joule-II από το 1994 έως το 1997. Οι στόχοι το προγράμματος ήταν η αξιολόγηση της απόδοσης του υδρογόνου ως μέσο αποθήκευσης της ηλιακής- ηλεκτρικής ενέργειας και ο σχεδιασμός και η δοκιμή ενός μικρού αυτόνομου συστήματος. Τα αποτελέσματα της αξιολόγησης έδειξαν πως ο ηλεκτρολύτης είναι μια ώριμη τεχνολογία, επαρκώς αξιόπιστη για λειτουργία μέσω φωτοβολταϊκής συστοιχίας. Η προσθήκη μπαταρίας στο σύστημα είχε ως σκοπό την αντιμετώπιση των βραχυπρόθεσμων ενεργειακών διακυμάνσεων. Επιπλέον, χρησιμοποιήθηκε PEM κυψέλη καυσίμου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανεπαρκής και οι μπαταρίες σχεδόν πλήρως εκφορτισμένες.

Το πρότζεκτ ηλιακού υδρογόνου SCHATZ ξεκίνησε το 1989 και επρόκειτο για ένα αυτόνομο φωτοβολταϊκό σύστημα που χρησιμοποιεί το υδρογόνο ως μέσο αποθήκευσης και για κυψέλη καυσίμου (ισχύος 1.5 kW) για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όταν η ηλιακή ακτινοβολία είναι ανεπαρκής. Η εγκατάσταση του συστήματος έγινε στο Πανεπιστήμιο Χάμπολτ Στέιτ της Καλιφόρνια, στο θαλάσσιο εργαστήριο του πανεπιστημίου, και το φορτίο το οποίο καλούταν να καλύψει το σύστημα ήταν ο συμπιεστής αέρα (ισχύος 600 W) του εργαστηρίου, που χρησιμοποιείται για να αερίζει το ενυδρείο. Το φορτίο συνδεόταν με το σύστημα μέσω ενός DC/AC μετατροπέα. Η συστοιχία των φωτοβολταϊκών πάνελ ήταν απευθείας συνδεδεμένη με τον ηλεκτρολύτη. Το πρότζεκτ ολοκληρώθηκε το 1996. Οι στόχοι του πρότζεκτ ήταν η αξιολόγηση της απόδοσης της αποθήκευσης με υδρογόνο, της ενέργειας που παράγεται με αξιοποίηση της ηλιακής ακτινοβολίας και της αξιολόγησης της χρήσης της PEM κυψέλης καυσίμου όσο αφορά την παραγωγή ενέργειας από αποθηκευμένο υδρογόνο και οξυγόνο (από τον ατμοσφαιρικό αέρα).

Στο Φράμπουργκ, στην Γερμανία, κατασκευάστηκε ένα αυτόνομο ενεργειακά ηλιακό σπίτι από το ινστιτούτο Φράουνχοφερ για ηλιακά ενεργειακά συστήματα, το 1992. Όλες οι ενεργειακές απαιτήσεις του σπιτιού για θέρμανση, ζεστό νερό χρήσης, ηλεκτρική ενέργεια και μαγείρεμα καλύπτονταν αποκλειστικά από ηλιακή ενέργεια μέχρι το 1995. Αποθήκευση υδρογόνου υπό πίεση και οξυγόνο, παραγόμενα από ηλεκτρολύτη, χρησιμοποιήθηκαν για μετατροπή σε ηλεκτρική ενέργεια από κυψέλη καυσίμου, όπως και η καταλυτική καύση υδρογόνου για μαγείρεμα και ως εφεδρεία για την θέρμανση χώρου. Η κυψέλη καυσίμου συνδεόταν με το σύστημα με ένα μετατροπέα DC/DC για να ταιριάζει με τα 48 V του συστήματος του σπιτιού.

Το Φεβρουάριο του 2006, εγκαταστάθηκε σύστημα υδρογόνου που χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια ως κύρια πηγή ενέργειας στο Κέντρο Καθαρής Ενέργειας (CEC) στο πανεπιστήμιο Pamukkale, στο Ντενιζλί στην Τουρκία. Το σύστημα σχεδιάστηκε να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες ενός κτιρίου 165 m<sup>2</sup> που κατασκευάστηκε από μια εταιρεία (BereketEnergyInc.) από τις οποίες χρηματοδοτήσαν το πρότζεκτ, στην πανεπιστημιούπολη του Pamukkale. Χρησιμοποιήθηκαν παθητικά (παράθυρα με διπλά τζάμια) και ενεργά συστήματα ηλιακής θέρμανσης (ηλιακούς συλλέκτες στο δώμα του κτιρίου). Το σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ εγκατεστημένης ισχύος 5kW, ηλεκτρολύτη, 2 PEM κυψέλες καυσίμου εγκατεστημένης ισχύος 2.4 kW, 6 δεξαμενές αποθήκευσης υδριδίου μετάλλου (Metal Hydride-MH). Επίσης, χρησιμοποιήθηκαν 16 μπαταρίες μολύβδου οξέος τάσης 12 V και χωρητικότητας 150 Ah. Για έρευνα απόδοσης, τα μισά φωτοβολταϊκά πάνελ

εγκαταστάθηκαν σε σταθερές βάσεις στο δώμα του κτιρίου, ενώ τα άλλα μισά τοποθετήθηκαν πάνω σε περιστρεφόμενες βάσεις ανίχνευσης της τροχιάς του ήλιου. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα φωτοβολταϊκά πάνελ που τοποθετούνται σε άξονα ανίχνευσης ηλιακής τροχιάς, αυξάνουν την παραγωγή ενέργειας κατά 10%.[3]

## Κεφάλαιο 5: Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας

Η παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας επηρεάζεται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες και το κλίμα της εκάστοτε περιοχής στην οποία εγκαθίσταται οι μονάδες παραγωγής ενέργειας. Για παράδειγμα, ο άνεμος δεν είναι συνεχώς διαθέσιμος και όταν είναι διαθέσιμος, δεν έχει πάντοτε την απαιτούμενη ταχύτητα (ελάχιστη ταχύτητα ανέμου που αξιοποιείται από την ανεμογεννήτρια είναι περίπου 5 m/s και η μέγιστη είναι περίπου 24 m/s) και ο ήλιος δεν είναι όλες τις μέρες του χρόνου διαθέσιμος ανάλογα την εποχή του έτους και τον συντελεστή αιθριότητας της περιοχής. Τα παραπάνω καθιστούν απαραίτητη την ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης ενέργειας μιας και η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια είναι συνεχής και παρουσιάζει μικρές μεταβολές. Η χρονική διάρκεια της αποθήκευσης του εκάστοτε συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, δημιουργεί την εξής κατηγοριοποίηση:

- Μακροπρόθεσμη αποθήκευση: Πρόκειται, γενικά, για μεγάλες εγκαταστάσεις που έχουν ως σκοπό την κάλυψη μεγάλου ποσού ενέργειας για όλη την διάρκεια του χρόνου. Συνήθως, αυτά τα συστήματα δεν παρουσιάζουν αυτό-εκφόρτιση και έχουν μεγάλη αυτονομία.
- Μεσοπρόθεσμη αποθήκευση: Τα συστήματα μεσοπρόθεσμης αποθήκευσης χρησιμοποιούνται για να αντιμετωπίσουν τους ημερήσιους κύκλους διαφόρων ΑΠΕ γεννητριών ή να εξομαλύνουν τις ημερήσιες ή εβδομαδιαίες αιχμές του φορτίου. Συνήθως, αυτά τα συστήματα έχουν συχνούς κύκλους φόρτισης-εκφόρτισης. Για αυτό το λόγο, μια σημαντική παράμετρος είναι ο προσδιορισμός του πόσες φορές η μονάδα αποθήκευσης μπορεί να απελευθερώσει το επίπεδο ενέργειας για το οποίο σχεδιάστηκε μετά από κάθε φόρτιση, εκφραζόμενο ως μέγιστος αριθμός κύκλων φόρτισης- εκφόρτισης. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν συστήματα αποθήκευσης ενέργειας με υδρογόνο και τα συστήματα αποθήκευσης συμπιεσμένου αέρα (CAES).
- Βραχυπρόθεσμη αποθήκευση: αυτό το είδος συστημάτων αποθήκευσης είναι απαραίτητο για την αντιμετώπιση μεταβολών σύντομης διάρκειας, όπως για παράδειγμα μικρές μεταβολές της τάσης. Η άμεση απόκριση των χαρακτηριστικών συστημάτων όπως τα συστήματα σφονδύλου, των μπαταριών και των υπερπυκνωτών μπορούν να μειώσουν τέτοιες μεταβολές. [25]

Ένα σύστημα αποθήκευσης ενέργειας μπορεί, επίσης, να περιγραφεί υπό το πρίσμα των ακόλουθων χαρακτηριστικών.

- Η χωρητικότητα ορίζει το πόση ενέργεια αποθηκεύεται στο σύστημα και εξαρτάται από την διαδικασία αποθήκευσης, το μέσο και το μέγεθος του συστήματος.
- Η ισχύς καθορίζει το πόσο γρήγορα μπορεί να εκφορτιστεί (ή να φορτιστεί) η αποθηκευμένη ενέργεια του συστήματος.
- Η απόδοση είναι ο λόγος της ενέργειας που παρέχεται στον χρήστη προς την ενέργεια που απαιτείται για την φόρτιση του συστήματος.
- Η χρονική περίοδος της αποθήκευσης καθορίζει πόσο καιρό αποθηκεύεται η ενέργεια και διαρκεί από ώρες έως και μήνες.
- Ο χρόνος φόρτισης/εκφόρτισης καθορίζει τον χρόνο που απαιτείται για την φόρτιση/εκφόρτιση του συστήματος.

- Το κόστος αναφέρεται είτε στην χωρητικότητα (€/kWh) είτε στην ισχύ (€/kW) του συστήματος αποθήκευσης και εξαρτάται από το κόστος της αρχικής επένδυσης και τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης του εξοπλισμού, καθώς επίσης και από την διάρκεια ζωής του συστήματος.

Τα συστήματα αποθήκευσης ενέργειας μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερις κατηγορίες, ανάλογα τον τύπο της ενέργειας που αποθηκεύεται σε αυτά. Αυτές οι κατηγορίες είναι οι εξής: συστήματα αποθήκευσης μηχανικής ενέργειας, ηλεκτρικής ενέργειας, θερμικής ενέργειας και χημικής ενέργειας. Κάθε μία από αυτές τις κατηγορίες αποθήκευσης ενέργειας παρουσιάζει διαφορετικά πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα. Με βάση αυτά, αξιολογείται η κάθε μέθοδος και επιλέγεται σε πολλές εφαρμογές και διάφορους τομείς (βιομηχανία, μεταφορά, ηλεκτροδότηση κατοικίας ή οικισμού, κτλ.). Παρακάτω αναλύονται οι μέθοδοι αποθήκευσης και αξιολογούνται τα χαρακτηριστικά τους, όπως η απόδοση στην μετατροπή ενέργειας, η συνολική χωρητικότητα, η πυκνότητα ενέργειας (ποσότητα ενέργειας αποθηκευμένη ανά κιλό) και άλλα.[26]

### **5.1) Παράγοντες επιλογής συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για την ενσωμάτωση των ΑΠΕ**

1. Οικονομική βιωσιμότητα, απόδοση συστήματος και διάρκεια ζωής. Η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών και την εξασφάλιση της αυτονομίας προϋποθέτει να ληφθούν υπόψη πολλοί παράγοντες. Οι βασικοί παράγοντες που έχουν καθοριστικό ρόλο στην επιλογή του συστήματος αποθήκευσης είναι πρωτίστως η οικονομική βιωσιμότητα του, όπως και σε κάθε επένδυση. Το αρχικό κόστος του συστήματος αποθήκευσης είναι πολύ σημαντικός παράγοντας. Έπειτα, η απόδοση του συστήματος και η διάρκεια ζωής του επηρεάζουν άμεσα την επιλογή, όσο χαμηλότερη είναι η απόδοση και μικρότερη η διάρκεια ζωής του συστήματος τόσο περισσότερο ασύμφορο οικονομικά είναι. Επίσης, μέσα στην ανάλυση του κύκλου ζωής, τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης αποτελούν άλλη μια πτυχή με δυνατότητα συμβολής στην συνολική οικονομική αξία του συστήματος. Το αρχικό κόστος και τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης μπορούν να καθορίσουν την περιοδική αντικατάσταση μερών του συστήματος, αν και σε εφαρμογές μεγάλης κλίμακας θεωρούνται πιο αξιόπιστα τα συστήματα αποθήκευσης με μεγάλη διάρκεια ζωής και υψηλή απόδοση. Στην παραπάνω κατηγορία ανήκουν τα συστήματα αντλησιοταμίευσης.
2. Τεχνικοί παράγοντες και χαρακτηριστικά. Κάποια συστήματα αποθήκευσης ενέργειας είναι πιο πλεονεκτικά σε σύγκριση με άλλα σε χαρακτηριστικά όπως ο χρόνος λειτουργίας, η αυτό-εκφόρτιση, ο ρυθμός εκφόρτισης, η χωρητικότητα σε αποθήκευση, ο ρυθμός μετάδοσης ισχύος, η διάρκεια της αποθήκευσης, ο χρόνος ανταπόκρισης του συστήματος, ο χρόνος φόρτισης-εκφόρτισης και η λειτουργική ευκολία του συστήματος. Μια ευρεία γκάμα τέτοιων παραγόντων μπορούν να καθορίσουν την επιλογή του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης ενέργειας.
3. Περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η αύξηση της ανθρωπογενούς εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα είναι συνδεδεμένη με την χρήση ορυκτών καυσίμων στους τομείς παραγωγής ενέργειας και μεταφοράς. Για αυτό το λόγο, η ενσωμάτωση των ΑΠΕ στην παραγωγή ενέργειας θεωρείται υπεύθυνη για την μείωση χρήσης των συμβατικών



καυσίμων, και συνεπώς, στην μείωση των εκπομπών. Με αυτό τον τρόπο οι ΑΠΕ συμβάλλουν στην αντιμετώπιση περιβαλλοντικών προβλημάτων όπως η υπερθέρμανση του πλανήτη και η ατμοσφαιρική ρύπανση. Συνεπώς, η επιλογή του κατάλληλου συστήματος αποθήκευσης για την αξιοποίηση των ΑΠΕ, επιβάλλει να ληφθούν υπόψη τυχόν περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Για παράδειγμα, βλαβερές χημικές ουσίες που μπορεί να απελευθερωθούν από κάποια συστήματα αποθήκευσης μπορούν να προκαλέσουν ρύπανση υδάτων ή ακόμα και αποδόμηση του εδάφους. Στην πραγματικότητα, υπάρχουν κάποιοι βαθμοί μεταβλητότητας των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Τα μεγάλα συστήματα αντλησιοταμίευσης έχουν μεγάλο περιβαλλοντικό αντίκτυπο σε σύγκριση με τις μικρές επιπτώσεις που προκαλούνται από μπαταρίες ή κυψέλες καυσίμου. [24]

## 5.2) Αποθήκευση μηχανικής ενέργειας

### 5.2.1) Υδροηλεκτρικά συστήματα- αντλησιοταμίευση ή υδραντλητικά συστήματα

Υδροηλεκτρικά συστήματα ονομάζονται τα συστήματα που μετατρέπουν την κινητική και την δυναμική ενέργεια του νερού σε ηλεκτρική ενέργεια. Ένα σύνηθες υδροηλεκτρικό σύστημα αποτελείται από:

- το φράγμα ή υδατοφράκτη, ο οποίος αυξάνει το ύψος πτώσης και δημιουργεί ταμιευτήρα νερού,
- την υδροληψία, το σημείο που το νερό εισέρχεται στο σύστημα,
- τον υπερχειλιστή, όπου εξέρχεται το νερό που πλεονάζει καθώς και η οικολογική παροχή (ως οικολογική παροχή ορίζεται η ποσότητα ροής ύδατος που διατίθεται για την αποκατάσταση και συντήρηση των διεργασιών που συντελούνται σε ένα ποτάμιο σύστημα προς όφελος της διατήρησης των υδρόβιων οικοσυστημάτων.),
- τον αγωγό προσαγωγής του νερού,
- τον υδροηλεκτρικό σταθμό, στον οποίο περιλαμβάνονται οι κτιριακές εγκαταστάσεις, οι υδροστρόβιλοι, οι ηλεκτρογεννήτριες, οι μετασχηματιστές, η μονάδα ελέγχου και ο βοηθητικός εξοπλισμός,
- την εξαγωγή του νερού από τον σταθμό στον ποταμό ή σε κάποιον άλλον ταμιευτήρα.

Ένα υδροηλεκτρικό σύστημα θεωρείται μεγάλο μεγέθους όταν η ονομαστική του ισχύς είναι μεγαλύτερη από 10 MW. Για ονομαστική ισχύ μικρότερη των 10 MW υπάρχει περαιτέρω κατηγοριοποίηση, η οποία έχει ως εξής:

1. micro, για ονομαστική ισχύ μικρότερη από 0,1 MW
2. mini, για ονομαστική ισχύ 0,1-1 MW
3. μικρό, για ονομαστική ισχύ 1-10 MW

Η αντλησιοταμίευση βασίζεται στην άντληση νερού από έναν ταμιευτήρα σε ένα άλλον που βρίσκεται σε μεγαλύτερο υψόμετρο. Συνήθως, αυτό γίνεται κατά την διάρκεια περιόδων με χαμηλή ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια και γενικά σε περιόδους εκτός αιχμής. Όταν αυξάνεται η ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια, το νερό φεύγει από τον υψηλότερο ταμιευτήρα μέσω μιας υδροηλεκτρικής τουρμπίνας και συλλέγεται στον χαμηλότερο ταμιευτήρα. Οι δύο σημαντικότερες μεταβλητές αυτής της τεχνολογίας, οι οποίες είναι το ύψος πτώσης του

νερού και ο διαθέσιμος όγκος του νερού, αποτελούν και τους δυο μεγαλύτερους περιορισμούς, καθώς οι τοποθεσίες που θεωρούνται κατάλληλες για την αξιοποίηση αυτής της τεχνολογίας πρέπει να έχουν σημαντικές διαφορές στην ανύψωση μεταξύ άνω και κάτω ταμιευτήρων με τον διαθέσιμο χώρο για την κατασκευή δύο μεγάλων φραγμάτων. Αξίζει να αναφερθεί, ότι υπάρχει και η δυνατότητα υπόγειας αντλησιοταμίευσης αξιοποιώντας πλημμυρισμένα ορυχεία και έχοντας τον ωκεανό ή την ανοικτή θάλασσα ως τον χαμηλότερο ταμιευτήρα.

Η αντλησιοταμίευση είναι η πιο ώριμη και οικονομικά βιώσιμη τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας, και αυτή με την μεγαλύτερη χωρητικότητα (100-5000 MW). Επιπλέον, η απόδοση αυτής της τεχνολογίας κυμαίνεται 75-85%. Για λόγους σύγκρισης αναφέρεται ότι οι μηχανές εσωτερικής καύσης των αυτοκινήτων έχουν απόδοση περίπου 20-35%, τα φωτοβολταϊκά πάνελ έχουν 10-17% κατά μέσο όρο, ενώ μια αιολική γεννήτρια μπορεί να επιτύχει απόδοση μέχρι 40%. Τα υδροηλεκτρικά συστήματα, πέρα από υψηλή απόδοση, έχουν γρήγορη απόκριση και μεγάλη διάρκεια ζωής, που φτάνει και τα 50 έτη. Περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με την απορρύθμιση του οικοσυστήματος που σχετίζεται με την κατασκευή φραγμάτων για τις εγκαταστάσεις μεγάλων υδροηλεκτρικών συστημάτων επηρέασαν αρνητικά την δημοτικότητα αυτής της τεχνολογίας. Παρόλα αυτά, η αυξανόμενη ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια των τελευταίων χρόνων στρέφει ξανά το ενδιαφέρον προς τα υδροηλεκτρικά συστήματα. Παρόλα τα πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας, τα υδροηλεκτρικά συστήματα έχουν κάποια μειονεκτήματα, στα οποία περιλαμβάνονται τα εξής:

- μεγάλη επένδυση κεφαλαίου
- περιορισμός στην επιλογή κατάλληλης τοποθεσίας εγκατάστασης
- η λειτουργία της ρύθμισης του συστήματος καταναλώνει μέρος της παραγόμενης ενέργειας
- είναι απαραίτητος ο σωστός σχεδιασμός και προγραμματισμός για να διασφαλιστεί ότι το νερό αντλείται κατά την διάρκεια περιόδων με χαμηλή ζήτηση σε ενέργεια και χρησιμοποιείται για την κάλυψη της ζήτησης αιχμής των καταναλωτών. [24,26]

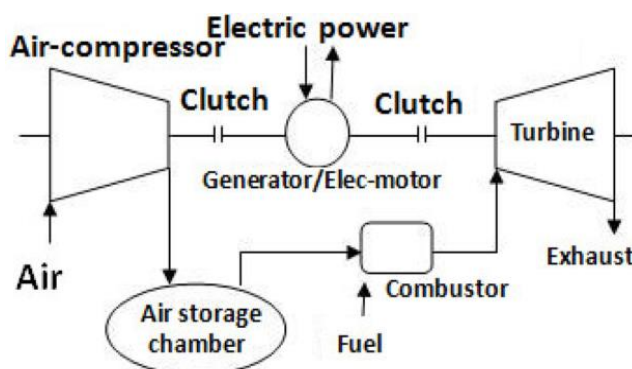
### **5.2.2) Συστήματα συμπιεσμένου αέρα (Compressed Air Energy Storage-CAES)**

Η λογική πίσω από την τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας με συμπιεσμένο αέρα είναι παρόμοια με αυτή της τεχνολογίας των υδροηλεκτρικών συστημάτων και της αντλησιοταμίευσης. Σε αυτά τα συστήματα, η περίσσεια ενέργεια χρησιμοποιείται για τη λειτουργία συμπιεστών αέρα, οι οποίοι αντλούν αέρα και τον διοχετεύουν σε υπόγεια σπήλαια ή σε δεξαμενές πάνω από το έδαφος υπό πίεση. Συνήθως, ο συμπιεσμένος αέρας χρησιμοποιείται με φυσικό αέριο για αυξημένη απόδοση, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και χωρίς φυσικό αέριο όπου ο όγκος επέκτασης και η αλλαγή αδιαβατικής πίεσης μπορούν να παράγουν ενέργεια σε έναν αεριοστρόβιλο (AA-CAES: Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage), ωστόσο το ενεργειακό δυναμικό είναι χαμηλό.

Το αρχικό κόστος εγκατάστασης των συστημάτων CAES εξαρτάται από τον απαιτούμενο όγκο αέρα που θα αποθηκεύεται και την κατασκευή της δομής αποθήκευσης αυτού του όγκου. Για αυτό τον λόγο, τα υπόγεια συστήματα CAES είναι τα πιο αποδοτικά οικονομικά, με δυναμικό αποθήκευσης μέχρι και 400 MW ή 8-26 ώρες εκφόρτισης. Ωστόσο, τα υπόγεια

συστήματα απαιτούν εύρεση της αεροστεγούς ακεραιότητας αποθήκευσης ενός κατάλληλου γεωλογικού σχηματισμού. Οι σπηλιές αποθήκευσης φυσικού αερίου είναι ιδανικές καθώς επωφελούνται από την γεωστατική πίεση. Αντίθετα, τα συστήματα CAES πάνω από την επιφάνεια του εδάφους έχουν μικρότερη χωρητικότητα, 3-15 MWh 2-4 ώρες εκφόρτισης αλλά δεν έχουν τους περιορισμούς των υπόγειων συστημάτων. Τα συστήματα CAES φαίνονται πως είναι κατάλληλα για αποθήκευση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας (>100 MW). Προς το παρόν, υπάρχουν δυο μονάδες CAES μεγάλης κλίμακας σε λειτουργία. Η πρώτη μονάδα CAES εγκαταστάθηκε και τέθηκε σε λειτουργία στο Huntorf, το 1978, και έχει ονομαστική ισχύ 290 MW. Το 1991, άρχισε να λειτουργεί η δεύτερη μονάδα CAES μεγάλης κλίμακας στο McIntosh και έχει ονομαστική ισχύ 110 MW, με δυνατότητα αποθήκευσης 2700 MWh, και μπορεί να παρέχει ενέργεια σε πλήρη ισχύ μέχρι και 26 ώρες.

Ένα σύστημα CAES αποτελείται από τα ακόλουθα εξαρτήματα: του συμπιεστές, τους διαστολείς, τις δεξαμενές αέρα, τον κινητήρα/γεννήτρια, το σύστημα ελέγχου και το συμπληρωματικό εξοπλισμό, όπως για παράδειγμα οι σωληνώσεις και οι δεξαμενές καυσίμου. Οι συμπιεστές, οι διαστολείς και οι δεξαμενές αέρα καθορίζουν τον σχηματισμό ολόκληρου του συστήματος CAES (διάγραμμα 10).



Διάγραμμα 10: Διάταξη συστήματος CAES

Οι συμπιεστές και οι διαστολείς επιλέγονται και σχεδιάζονται σύμφωνα με τις εφαρμογές του συστήματος και την πίεση αποθήκευσης του αέρα. Η πίεση του αέρα σε έναν κινούμενο κύλινδρο μπορεί να φτάσει τα 30 MPa. Η πίεση που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα CAES μεγάλης κλίμακας είναι περίπου 8 MPa. Σε συστήματα CAES μεγάλης κλίμακας απαιτούνται δεξαμενές αέρα μεγάλου όγκου, οπότε η κατασκευή των δεξαμενών αποθήκευσης είναι σημαντικός παράγοντας. Για αυτό τον λόγο, οι τρέχουσες, εν λειτουργία, μονάδες CAES χρησιμοποιούν υπόγεια σπήλαια, και συγκεκριμένα, σπήλαια άλατος. Γενικά, θεωρούνται ιδανικοί γεωλογικοί σχεδιασμοί τα υπόγεια στρώματα άλατος, τα υπόγεια στρώματα σκληρού πετρώματος και πορώδους πετρώματος. Οι δύο προαναφερθέντες εγκαταστάσεις συστημάτων CAES χρησιμοποιούν υπόγεια σπήλαια άλατος ως δεξαμενές αποθήκευσης αέρα, με χωρητικότητα  $310,000 m^3$  (Huntorf) και  $560,000 m^3$  (McIntosh) αντιστοίχως. Στα σπήλαια άλατος, συνήθως είναι απαραίτητο να αντιμετωπιστούν προβλήματα όπως ζημιές που προκαλούνται από μικρά ζώα ή επεξεργασία του αλμυρού νερού κ.α.

Οι τρόποι λειτουργίας μιας δεξαμενής αέρα χωρίζονται σε λειτουργία ολισθαίνουσας πίεσης (sliding-pressure) και λειτουργία σταθερής πίεσης (constant-pressure).

- Λειτουργία ολισθαίνουσας πίεσης με σταθερό όγκο: η αυξανόμενη πίεση οδηγεί σε αλλαγή του λόγου πίεσης των συμπιεστών προκαλώντας αύξηση των μη αναστρέψιμων απωλειών. Επίσης, στο τέλος της εκφόρτισης, θα υπάρχει υπολειπόμενος αέρας, ο οποίος θα μειώσει την απόδοση όλου του συστήματος.
- Λειτουργία σταθερής πίεσης κατά τα στάδια της φόρτισης και της εκφόρτισης: οι συμπιεστές και οι διαστολείς μπορούν να διατηρήσουν την υψηλή απόδοση υπό ονομαστικές συνθήκες.

Το κίνητρο για την ανάπτυξη της CAES τεχνολογίας είναι η επίτευξη ενεργειακής βιωσιμότητας και η μείωση της εκπομπής αέριων ρύπων, όποτε η τρέχουσα τεχνολογική ανάπτυξη και έρευνα πάνω σε αυτή την τεχνολογία στοχεύει στην μείωση (ή ακόμα και στην μηδενική) χρήση ορυκτών καυσίμων. Προς το παρόν, υπάρχουν υπό ανάπτυξη διάφορες τεχνολογίες CAES που ενσωματώνουν και άλλα υποσυστήματα με σκοπό την αύξηση της απόδοσης.

### 1. Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES)

Σε ένα συνηθισμένο σύστημα CAES, μια μεγάλη ποσότητα της θερμότητας που παράγεται κατά την διάρκεια της συμπίεσης αποβάλλεται απευθείας στην ατμόσφαιρα μέσω θερμαντικών σωμάτων ή ψυγείων. Κατά την διάρκεια των σταδίων της διαστολής, απαιτείται πολύ θερμότητα για να ενισχυθεί η ισχύς, η οποία προέρχεται από την καύση ορυκτών καυσίμων (ή άλλες πηγές θερμότητας) για να αυξηθεί η θερμοκρασία του αέρα στο εσωτερικό των διαστολέων για να αυξηθεί η χωρητικότητα ισχύος. Συνεπώς, η αξιοποίηση της θερμότητας των συμπιεστών μπορεί να μειώσει, ή ακόμα και να εκμηδενίσει την χρήση ορυκτών καυσίμων και να βελτιώσει την απόδοση ολόκληρου του θερμοδυναμικού κύκλου του συστήματος. Για ένα AA-CAES σύστημα με ενσωμάτωση θερμικής αποθήκευσης, η θερμότητα που απελευθερώνεται κατά την διάρκεια της συμπίεσης μπορεί να αποθηκευτεί σε αδιαβατικά δοχεία και να επαναχρησιμοποιηθεί κατά την διάρκεια του σταδίου της διαστολής.

### 2. Liquid Air Energy Storage (LAES)

Ένα LAES σύστημα θεωρείται ένα είδος συστήματος CAES το οποίο στοχεύει στην αύξηση της θερμικής αξίας (ή θερμικού περιεχομένου) που αποθηκεύεται. Υπάρχουν δύο στάδια στον κύκλο λειτουργίας του συστήματος: το στάδιο της φόρτισης (αέρας συγκεκριμένης πίεσης από τους συμπιεστές υγροποιείται και αποθηκεύεται σε δεξαμενές αποθήκευσης χαμηλής θερμοκρασίας) και το στάδιο εκφόρτισης (ο υγροποιημένος αέρας γίνεται αέρας υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης στους διαστολείς για να κινηθούν οι κινητήρες/γεννήτριες).

### 3. Αποθήκευση ενέργειας με υπερκρίσιμο συμπιεσμένο αέρα (SC-CAES: Supercritical Compressed Air Energy Storage)

Το SC-CAES σύστημα είναι ένα νέο είδος συστήματος CAES το οποίο ενσωματώνει τα πλεονεκτήματα των AA-CAES και LAES: φιλικό προς το περιβάλλον, υψηλή θερμική απόδοση και υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο. Σε ένα σύστημα SC-CAES, ο αέρας συμπιέζεται μέχρι να φτάσει την υπερκρίσιμη κατάσταση του (πίεση > 37.9 bar, T >

132K= -141.15 °C) και τότε ο υπερκρίσιμος συμπιεσμένος αέρας αποθηκεύεται σε δεξαμενές, αφού ο εναλλάκτης θερμότητας συλλέξει την θερμότητα που παράχθηκε κατά την συμπίεση. Ο υγρός αέρας φτάνει την αέρια φάση και παράγει ενέργεια του αφού αντληθεί σε υπερκρίσιμη πίεση και θερμανθεί από τους εναλλάκτες θερμότητας.[27]

#### 5.2.2.1) Εφαρμογές συστημάτων CAES

Τα τελευταία χρόνια, οι προοπτικές των εφαρμογών και το δυναμικό των συστημάτων CAES στην υποστήριξη συστημάτων παραγωγής ενέργειας έχει αναγνωριστεί ευρέως. Προβλέπεται πως τα συστήματα CAESθα έχουν ένα μείζον ρόλο στην διαχείριση της ενέργειας του χρόνου διαχωρισμού μεταξύ παραγωγής και της χρήσης ισχύος. Οι πιθανές εφαρμογές αυτών των συστημάτων εξηγούνται παρακάτω.

1) Διαχείριση της ζήτησης. Για τις επιχειρήσεις ηλεκτρισμού, είναι σύνηθες να αποθηκεύεται ενέργεια κατά την διάρκεια περιόδων εκτός μέγιστης ζήτησης (off-peak demand) και να αντισταθμίζει τις ελλείψεις στην παραγωγή ενέργειας κατά την διάρκεια των περιόδων όπου η ζήτηση σε ενέργεια είναι η μέγιστη.

2) Ενσωμάτωση περισσότερων μονάδων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ. Τα συστήματα CAES μπορούν να συμβάλλουν στην ενσωμάτωση μονάδων παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ στο υπάρχον κεντρικό δίκτυο διανομής ενέργειας. Με αυτό τον τρόπο μπορούν να αντιμετωπιστούν τα προβλήματα της διαλείπουσας και ασταθής φύσης των ΑΠΕ. Όσο αφορά τα μικρό-δίκτυα (micro-grid), τα συστήματα CAES μπορούν να καταστείλουν ταχέως τις διακυμάνσεις ισχύος και να βελτιώσει την ποιότητα και την αξιοπιστία της παροχής ενέργειας.

3) Εφαρμογές στα έξυπνα δίκτυα (smart-grids). Τα έξυπνα δίκτυα, ως μελλοντική κατεύθυνση της βιομηχανίας της ενέργειας, στοχεύουν στην επίτευξη ενεργειακής διαχείρισης στην παροχή και κατανάλωση ενέργειας με την χρήση του διαδικτύου και τεχνολογία βάσεων δεδομένων.

4) Εφαρμογές σε κινητήρες συμπιεσμένου αέρα. Η ενέργεια πεπιεσμένου αέρα μπορεί να μετατραπεί σε άλλες μορφές μηχανικής ενέργειας μέσω κινητήρων πεπιεσμένου αέρα, οι οποίοι χρησιμοποιούνται κυρίως σε οχήματα πεπιεσμένου αέρα. Αυτά τα οχήματα (που χρησιμοποιούνται για την διάνυση μικρών αποστάσεων μέσα σε πόλεις) μπορεί να τροφοδοτούνται μόνο με πεπιεσμένο αέρα ή ακόμα και σε συνδυασμό με βενζίνη, ντίζελ και αιθανόλη.



5) Εφαρμογές σε άλλους τομείς. Σε περιπτώσεις βλάβης του κεντρικού συστήματος παροχής ενέργειας, τα συστήματα CAES μπορούν να έχουν εφεδρική χρήση ή για αδιάλειπτη παροχή ηλεκτρικού ρεύματος (UPS- Uninterrupted Power Supply), για παροχή επαρκούς ενέργειας σε σημαντικούς χρήστες όπως νοσοκομεία και τράπεζες.[27]

### 5.2.3) Συστήματα αποθήκευσης ενέργειας σφονδύλου

Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των σφονδύλων είναι ο τεράστιος αριθμός κύκλων φόρτισης/εκφόρτισης, οι οποίοι μπορεί να φτάσουν εκατοντάδες χιλιάδες, ανεξάρτητα το βάθος της εκφόρτισης (DoD). Επιπλέον, η διάρκεια ζωής των σφονδύλων μπορεί να ξεπεράσει τα είκοσι χρόνια και η παρακολούθηση κατά την φόρτιση τους είναι πολύ απλή και αξιόπιστη καθώς απαιτείται μόνο η περιστροφική ταχύτητα. Αξίζει να αναφερθεί και ο μικρός χρόνος ανταπόκρισης των σφονδύλων (<4 ms), ο οποίος καθιστά το σφόνδυλο ιδανικό για εφαρμογές σε συστήματα ενέργειας για αντιμετώπιση παροδικών μεταβολών. Η ενέργεια στο σφόνδυλο αποθηκεύεται σε κινητική μορφή λόγω της περιστροφής της μάζας του σφονδύλου. Η αποθηκευμένη ενέργεια,  $w$ , δίνεται από την εξής σχέση:

$$w = \frac{1}{2} J \omega_m^2 \quad (1)$$

όπου  $J$  είναι η ροπή αδράνειας της περιστροφικής μάζας (με μονάδα μέτρησης  $\text{kgm}^2$ ) και  $\omega_m$  η περιστροφική ταχύτητα (με μονάδα μέτρησης  $\text{rad/sec}$ ). Η ροπή αδράνειας γενικά ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$J = \int r^2 dm \quad (2)$$

όπου  $r$  η απόσταση κάθε περιστρεφόμενου στοιχείου μάζας,  $dm$ , από τον άξονα περιστροφής. Ανάλογα, για τον κυκλικό δίσκο του σφονδύλου ακτίνας  $r$  και μάζας  $m$ , η ροπή αδράνειας δίνεται από την εξής σχέση:

$$J = mr^2 \quad (3)$$

Η αντοχή στον εφελκυσμό,  $\sigma$ , του υλικού δείχνει την μέγιστη ένταση κατά την διάρκεια της περιστροφής και καθορίζει την επιτρεπόμενη περιστροφική ταχύτητα. Δίνεται από την σχέση:

$$\sigma = \rho r^2 \omega_m^2 \quad (4)$$

όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα του υλικού ( $\text{kg/m}^3$ ). Συνεπώς, αυξάνοντας την αντοχή του υλικού στον εφελκυσμό και μειώνοντας την πυκνότητα του, αυξάνεται η ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται στην ίδια μάζα. Η ανάπτυξη νέων σύνθετων υλικών με ενισχυμένα χαρακτηριστικά βοηθάει στην βελτίωση αυτής της τεχνολογίας. Ανάλογα με την ταχύτητα περιστροφής, οι σφόνδυλοι χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: 1) χαμηλής ταχύτητας και 2) υψηλής ταχύτητας. Στους σφονδύλους χαμηλής ταχύτητας, χρησιμοποιείται η κλασική τεχνολογία, δηλαδή χρησιμοποιούνται ατσάλι και άλλα μεταλλικά κράματα σε συνδυασμό με μηχανικά ρουλεμάν αποδίδοντας ταχύτητες έως και 10,000  $\text{r/min}$  και συνολικές απώλειες 0.5-1% της ονομαστικής ισχύος. Ο περιορισμός της ταχύτητας οφείλεται στον τύπο του ρουλεμάν και στην αντοχή του υλικού στον

εφελκυσμό. Ωστόσο, οι σφόνδυλοι χαμηλής ταχύτητας χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται η αποθήκευση ενέργειας για μεγάλο χρονικό διάστημα. Από την άλλη πλευρά, η περιστροφική ταχύτητα των σφονδύλων υψηλής ταχύτητας μπορεί να φτάσει έως και 100,000 r/min, και οι συνολικές απώλειες είναι συνήθως 0.1% της ονομαστικής ισχύος. Οι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιούν προηγμένα σύνθετα υλικά, όπως γυαλί από ίνες άνθρακα με μαγνητικά ή υπεραγώγιμα ρουλεμάν. Οι σφόνδυλοι υψηλής ταχύτητας χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου απαιτείται σε υψηλής θερμική αξία (energy density) σε σύντομο χρονικό διάστημα. Η τιμή των σφονδύλων υψηλής ταχύτητας είναι πέντε φορές μεγαλύτερη από αυτή των σφονδύλων χαμηλής ταχύτητας για την ίδια ονομαστική ισχύ. Ένα σύνθετο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας σφονδύλου αποτελείται από ένα σφόνδυλο κινούμενο από έναν ηλεκτρικό κινητήρα/γεννήτρια. Ο κινητήρας του σφονδύλου είναι διασυνδεδεμένο με το δίκτυο, συνήθως μέσω δυο ηλεκτρονικών μετατροπών. Κατά τη διάρκεια της φόρτισης, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια και η περιστροφική ταχύτητα του σφονδύλου αυξάνεται. Ο πρώτος μετατροπέας λειτουργεί ως ανορθωτής, ενώ ο δεύτερος λειτουργεί ως αντιστροφέας.

Κατά την διάρκεια της λειτουργίας εκφόρτισης, η μηχανική ενέργεια του περιστρεφόμενου σφονδύλου μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Ο δεύτερος μετατροπέας λειτουργεί ως ανορθωτής και ο πρώτος ως αντιστροφέας στην συχνότητα του δικτύου. Η περιστροφική ταχύτητα του σφονδύλου μειώνεται ανάλογα. Αν δεν απαιτείται ενέργεια, το σύστημα περνάει σε λειτουργία αδράνειας ή αναμονής, όπου ο σφόνδυλος περιστρέφεται με σταθερή ταχύτητα. Μια από τις πρόσφατες εφαρμογές των συστημάτων σφονδύλου είναι η ρύθμιση ισχύος των ανεμογεννητριών. Ένα μειονέκτημα αυτής της τεχνολογίας που αξίζει να ληφθεί υπόψη είναι ο μεγάλος ρυθμός αυτό-εκφόρτισης κατά την διάρκεια της λειτουργίας αδράνειας εξαιτίας απωλειών του συστήματος. Μαγνητικά και υπεραγώγιμα ρουλεμάν μπορούν να ρυθμιστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να μειώσουν τις απώλειες τριβής αν και αυξάνουν το συνολικό κόστος του συστήματος.[28]

### **5.3) Αποθήκευση θερμικής ενέργειας**

Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας σχετίζεται με τεχνολογία, η οποία αποθηκεύει θερμική ενέργεια θερμαίνοντας ή ψύχοντας ένα μέσο αποθήκευσης έτσι ώστε η αποθηκευμένη ενέργεια να χρησιμοποιηθεί σε διαφορετική χρονική στιγμή σε εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, καθώς και για παραγωγή ενέργειας. Τα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας χρησιμοποιούνται ιδιαίτερα σε κτίρια και σε βιομηχανικές διεργασίες. Τα πλεονεκτήματα της χρήσης αυτών των συστημάτων περιλαμβάνουν την αύξηση της συνολικής απόδοσης, μεγαλύτερη αξιοπιστία ενώ μπορεί να οδηγήσει σε μείωση των κοστών της αρχικής επένδυσής και της λειτουργίας, καθώς επίσης, και σε μείωση της ρύπανσης του περιβάλλοντος (μείωση στις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα). Τα ηλιακά θερμικά συστήματα είναι βιομηχανικώς ώριμα και αξιοποιούν ένα μεγάλο μέρος της θερμικής ενέργειας του ήλιου κατά την διάρκεια της μέρας. Εν τούτοις, η τεχνολογία αυτή δεν έχει αποδοτική λειτουργία τις ώρες της μέρας με ελάχιστη (ή μηδαμινή) ηλιακή ακτινοβολία. Η αποθήκευση θερμικής ενέργειας γίνεται ιδιαίτερα σημαντική στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω σταθμών



συγκέντρωσης ηλιακής ακτινοβολίας όπου αποθηκεύεται η ηλιακή θερμότητα και χρησιμοποιείται όταν το φως του ήλιου δεν είναι διαθέσιμο.

Στην Ευρώπη, υπολογίζεται ότι περίπου 1.4 εκατομμύρια GWh/έτος να εξοικονομηθούν και να αποφευχθεί η εκπομπή 400 εκατομμυρίων τόνων διοξειδίου του άνθρακα, σε κτίρια και βιομηχανικούς τομείς από την εκτεταμένη χρήση συστημάτων αποθήκευσης θερμότητας/ψύχους. Η ποσότητα ενέργειας που αποθηκεύεται ανά μονάδα όγκου ή μάζας είναι σημαντικός παράγοντας για την βελτιστοποίηση της απόδοσης διαφόρων εφαρμογών (όπως οι ηλιακοί συλλέκτες) και την κατανάλωση ενέργειας για τη θέρμανση/ψύξη χώρου. Πλέον, εξετάζεται μια κατηγορία υλικών, η οποία μπορεί να αυξήσει την ποσότητα της ενέργειας που αποθηκεύεται σε μια δεξαμενή νερού μικρού μεγέθους, αυξάνοντας το ηλιακό κλάσμα (δηλαδή την ετήσια συμμετοχή του ήλιου στην ικανοποίηση του θερμικού φορτίου του χώρου) για ένα συγκεκριμένο όγκο. Αυτή η κατηγορία υλικών, είναι τα υλικά αλλαγής φάσης (phase change materials- PCMs). Τα PCMs είναι υλικά αποθήκευσης λανθάνουσας θερμότητας, τα οποία χρησιμοποιούν τους χημικούς δεσμούς τους για την αποθήκευση και την απελευθέρωση ενέργειας. Όταν τα PCMs φτάνουν στην θερμοκρασία στην οποία λιώνουν (θερμοκρασία τήξης), απορροφούν μεγάλες ποσότητες ενέργειας χωρίς να θερμαίνονται. Όταν αυτά τα υλικά στερεοποιούνται απελευθερώνουν ενέργεια όταν η περιβάλλουσα θερμοκρασία πέφτει. Τα PCMs πρέπει να έχουν τα εξής χαρακτηριστικά: υψηλή θερμική αγωγιμότητα και μεγάλη ικανότητα λανθάνουσα θερμότητα, το σημείο τήξης των ουσιών πρέπει να είναι μέσα σε ένα ρεαλιστικό εύρος εφαρμογών, τα υλικά πρέπει να είναι χημικά σταθερά και πρέπει να τήκονται συγχρόνως. Επίσης, τα υλικά πρέπει να μην είναι τοξικά, ούτε διαβρωτικά. Επιπλέον, τα PCMs πρέπει να είναι διαθέσιμα στην αγορά και η χρήση τους να είναι οικονομικά βιώσιμη. Τις τελευταίες δεκαετίες, διάφοροι τύποι παραφίνης, λιπαρά οξέα και αλκοόλες ζάχαρης θεωρούνται κατάλληλα για χρήση ως PCMs, αν και κανένα από αυτά τα υλικά δεν έχει όλα τα χαρακτηριστικά που θα το καθιστούσε ιδανικό PCM. Αυτά τα συστήματα περιλαμβάνουν την μετάβαση των προαναφερθέντων υλικών από στερεό σε στερεό ή από στερεό σε υγρό σε σταθερή θερμοκρασία. Τα στερεά μεταβαίνουν σε υγρά ή υφίστανται κρυσταλλική μετάβαση κατά την διάρκεια συσσώρευσης ενέργειας και επανέρχονται στην αρχική στερεή τους κατάσταση κατά τη διάρκεια της ανάκτησης της ενέργειας. Η θερμότητα μεταφέρεται στο σύστημα μέσω ενός υγρού. Γενικά, τα PCMs κατηγοριοποιούνται είτε ως οργανικά είτε ως ανόργανα. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ανά κατηγορία.



Πίνακας 5: Σύγκριση οργανικών και ανόργανωνPCM

|              | Πλεονεκτήματα   | Μειονεκτήματα   |
|--------------|---|---|
| Οργανικά PCM | Χημικά σταθερά<br>Μη διαβρωτικά<br>Μη τοξικά  | Ακριβότερα<br>Μεγάλο εύρος τήξης<br>Χαμηλότερη ικανότητα λανθάνουσας θερμότητας |
| Ανόργανα PCM | Φθηνότερα<br>Μεγαλύτερη λανθάνουσα θερμότητα ανά μονάδα όγκου<br>Υψηλή θερμική αγωγιμότητα<br>Μη εύφλεκτα | Διαβρωτικά<br>Λιγότερο σταθερά  |

Είναι δυνατόν να εξεταστεί η θερμική αποθήκευση στην ζεστή και/ή στην κρύα πλευρά της ηλιακής μονάδας. Στην πρώτη περίπτωση επιτρέπεται η αποθήκευση ζεστού νερού από τους συλλέκτες να παρέχεται στη γεννήτρια ψυκτικού απορρόφησης (σε λειτουργία ψύξης) ή απευθείας στους χρήστες (σε λειτουργία θέρμανσης). Το δεύτερο επιτρέπει την αποθήκευση κρύου νερού που παράγεται από το ψυκτικό απορρόφησης και στην συνέχεια αυτό να τροφοδοτείται στους ακροδέκτες ψύξης στο εσωτερικό του κτιρίου. Συνήθως η αποθήκευση κατηγοριοποιείται ανάλογα το εύρος θερμοκρασίας της δεξαμενής αποθήκευσης. Μια θερμή δεξαμενή λειτουργεί στους 80-90 °C, μια ζεστή δεξαμενή έχει εύρος λειτουργίας 40-50 °C, ενώ μια κρύα δεξαμενή λειτουργεί στο εύρος θερμοκρασίας 7-15 °C. Ενώ η αποθήκευση θερμότητας είναι πάντα παρούσα στην θερμή πλευρά των ηλιακών εγκαταστάσεων λόγω της θέρμανσης και της παραγωγής ζεστού νερού οικιακής χρήσης, η αποθήκευση ψύχους δικαιολογείται σε μεγαλύτερες εγκαταστάσεις. Η χρήση της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας, αρχικά, δεν μπορούσε να έχει αποδοτικό ρόλο εφεδρείας αλλά βοηθούσε το συνολικό σύστημα να σταθεροποιηθεί θερμικά. Συνεπώς, η θερμική αποθήκευση βρήκε χρήση στα ηλιακά- υποβοηθούμενα θερμικά συστήματα. Το πλεονέκτημα της θερμικής αποθήκευσης από την συγκέντρωση της θερμότητας του ήλιου είναι ότι η ενέργεια συλλέγεται και αποθηκεύεται ως θερμότητα απευθείας, χωρίς να μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό, κάτι που αυξάνει την απόδοση ολόκληρης της διαδικασίας. Η επιλογή του μέσου αποθήκευσης εξαρτάται από την φύση της διαδικασίας. Η πιο απλή μέθοδος αποθήκευσης θερμικής ενέργειας σχετίζεται με την θέρμανση ή ψύξη ενός υγρού ή στερεού μέσου αποθήκευσης (όπως νερό, άμμος, λιωμένα άλατα ή πέτρες). Το νερό αποτελεί την φθηνότερη επιλογή και έχει, επίσης, πολλές οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές.

Μια υπό ανάπτυξη τεχνολογία είναι αυτή της αποθήκευσης κρυογονικής ενέργειας. Αυτή η τεχνολογία χρησιμοποιεί ενέργεια (είτε από το κεντρικό δίκτυο είτε από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας) σε ώρες της μέρας όπου η ζήτηση των καταναλωτών είναι χαμηλή, για την παραγωγή κρυογονικού υγρού, το οποίο χρησιμοποιείται σε έναν κινητήρα κρυογονικής θερμότητας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αναμένεται πως αυτή η τεχνολογία θα

έχει σχετικά υψηλή θερμική αξία, χαμηλό κόστος ανά μονάδα ενέργειας και μεγάλη διάρκεια αποθήκευσης.[29]

#### **5.4) Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας**

Η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να επιτευχθεί μέσω ηλεκτροστατικών όπως οι πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές ή αποθήκευση ηλεκτρομαγνητισμού συμπεριλαμβανομένου συστημάτων υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας (super conducting magnetic energy storage-SMES).

- Πυκνωτές: Οι πυκνωτές λειτουργούν αποθηκεύοντας ενέργεια σε ένα ηλεκτρικό πεδίο ανάμεσα από δυο ηλεκτρόδια (μεταλλικές πλάκες) που χωρίζονται από ένα μονωτικό υλικό που λέγεται διηλεκτρικό. Η αποθήκευση προωθείται με την αύξηση της επιφάνειας του ηλεκτροδίου και την μείωση του πάχους του διηλεκτρικού. Οι πυκνωτές έχουν περιορισμένο δυναμικό αποθήκευσης ενέργειας εξαιτίας της χαμηλής χωρητικότητας τους και ενεργειακή πυκνότητα.
- Υπερπυκνωτές: Οι υπερπυκνωτές προτιμώνται σε εφαρμογές αποθήκευσης ενέργειας μεγάλης κλίμακας, σε σχέση με τους πυκνωτές. Ένας υπερπυκνωτής είναι ένας ηλεκτρικός πυκνωτής διπλού στρώματος (Electric double layer capacitor-EDLC) και έχει τις ίδιες αρχές λειτουργίας με έναν συνηθισμένο πυκνωτή. Σε σύγκριση με τους απλούς πυκνωτές, οι υπερπυκνωτές έχουν αντικαταστήσει το διηλεκτρικό με έναν αγωγό ιοντικού ηλεκτρολύτη. Οι EDLC έχουν εξαιρετικά υψηλή πυκνότητα ισχύος, μεγάλη διάρκεια ζωής (πάνω από 100000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης), γρήγορη επαναφόρτιση και μεγάλο εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας (-40°C έως 70°C). Ωστόσο, είναι ακριβοί, με μικρή πυκνότητα ενέργειας και λόγω μεταβολών στην τάση κατά τη διάρκεια της εκφόρτισης, απαιτούν ηλεκτρονικά συστήματα τα οποία αυξάνουν το επίπεδο πολυπλοκότητας του συστήματος.
- SMES: Ένα σύστημα υπεραγώγιμης μαγνητικής αποθήκευσης ενέργειας εφαρμόζει το μαγνητικό πεδίο που δημιουργείται μέσα σε ένα υπεραγώγιμο πηνίο για να αποθηκεύσει ηλεκτρική ενέργεια. Οι εφαρμογές του προορίζονται για παροδική και δυναμική αντιστάθμιση καθώς μπορεί να απελευθερώσει γρήγορα ενέργεια, με αποτέλεσμα τη σταθερότητα της τάσης του συστήματος, βελτιώνοντας την δυναμική και στατική σταθερότητα του συστήματος. Η απόδοση μετατροπής ενέργειας ενός SMES συστήματος είναι περίπου 95%. Οι περιορισμοί αυτού του συστήματος προκύπτουν από τις απαιτήσεις μεγάλης ψύξης, ευαισθησία στα περιβάλλοντα μαγνητικών πεδίων και στις αλλαγές έντασης ρεύματος και μαγνητικού πεδίου.[26]

#### **5.5) Αποθήκευση χημικής ενέργειας**

Η αποθήκευση χημικής ενέργειας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί περαιτέρω και να διαιρεθεί σε αποθήκευση ηλεκτροχημικής και θερμοχημικής ενέργειας. Η αποθήκευση ηλεκτροχημικής ενέργειας αναφέρεται στις συμβατικές μπαταρίες, όπως οι μπαταρίες οξέος-μολύβδου, νικελίου υδριδίου μετάλλου, ιόντων λιθίου και μπαταρίες ροής, όπως ψευδαργύρου βρώμιου. Η αποθήκευση ηλεκτροχημικής ενέργειας επιτυγχάνεται με τις κυψέλες καυσίμου, συνήθως με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, αλλά χρησιμοποιούνται και οι κυψέλες μεθανόλης, οι κυψέλες τηγμένου ανθρακικού άλατος και κυψέλες στερεού

οξειδίου. Οι επιλογές για θερμοχημική αποθήκευση περιλαμβάνουν ηλιακό υδρογόνο, ηλιακή αμμωνία και μεθόδους διάστασης και ανασυνδυασμού μεθανίου με χρήση ηλιακής ενέργειας. Παρακάτω συνοψίζονται οι περισσότερες διαδεδομένες επιλογές αποθήκευσης χημικής ενέργειας, οι οποίες αφορούν διάφορα είδη μπαταριών και κυψελών καυσίμου.[26]

### 5.5.1) Μπαταρίες

Οι μπαταρίες είναι η πιο συμβατική και συνηθισμένη τεχνολογία αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η επιλογή της κατάλληλης μπαταρίας βασίζεται στην ύπαρξη ή όχι κάποιων επιθυμητών χαρακτηριστικών, όπως: μεγάλη χωρητικότητα (Ah), μεγάλη απόδοση, ρυθμός φόρτισης/εκφόρτισης, μεγάλο εύρος θερμοκρασίας ομαλής λειτουργίας, βάθος εκφόρτισης(DoD), χρόνος φόρτισης, κόστος (ανά μονάδα ισχύος ή ενέργειας,  $W\dot{h}$  kW) και άλλα. Μια μπαταρία αποτελείται από δυο ξεχωριστές ήμι-κυψέλες. Κάθε ήμι-κυψέλη συνήθως περιέχει συνήθως διαφορετικά μέταλλα ή κράματα μετάλλων ως ηλεκτρόδια. Τα μέταλλα στις δυο ήμι-κυψέλες υπόκεινται σε διαφορετικές χημικές αντιδράσεις όταν συνδέονται με ένα εξωτερικό ηλεκτρικό ρεύμα. Το ρεύμα ρέει, τα δυο ηλεκτρόδια αλλάζουν χημικά και η μπαταρία αποφορτίζεται. Στην μπαταρία το θετικό ηλεκτρόδιο ονομάζεται κάθοδος και το αρνητικό ηλεκτρόδιο ονομάζεται άνοδος. Τα ηλεκτρόδια βρίσκονται μέσα σε ηλεκτρολύτη. Τα αρνητικά φορτισμένα ιόντα, που ονομάζονται ανιόντα, εγκαθίστανται στην κάθοδο. Τα θετικά φορτισμένα ιόντα, που ονομάζονται κατιόντα, εγκαθίστανται στην άνοδο. Στην αντίδραση οξειδοαναγωγής που τροφοδοτεί την μπαταρία, τα κατιόντα ανάγονται (προστίθενται ηλεκτρόνια) στην κάθοδο, ενώ τα ανιόντα οξειδώνονται (αφαιρούνται ηλεκτρόνια) στην άνοδο. Τα ηλεκτρόδια είναι ηλεκτρικά συνδεδεμένα μόνο μέσω του ηλεκτρολύτη. Το υλικό κατασκευής των ηλεκτροδίων και ο τύπος του ηλεκτρολύτη προσδιορίζουν το είδος του ηλεκτροχημικού ζεύγος, με το οποίο καθορίζεται η κατηγορία της μπαταρίας. Υπάρχουν πολλά είδη μπαταρίας και το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο είναι αυτό των μπαταριών μολύβδου-οξέος. Αυτό οφείλεται κυρίως στο χαμηλό αρχικό κόστος και σε ενεργειακά χαρακτηριστικά, όπως η ενεργειακή πυκνότητα (30-50 Wh/kg) και η απόδοση (70-90%), στην αξιοπιστία και την σχετικά απλή τους τεχνολογία, καθώς και στην διαθεσιμότητα του μολύβδου. Άλλοι τύποι μπαταρίας είναι λιθίου-ιόντων, νικελίου- καδμίου, θείου-νατρίου και άλλοι. Παρακάτω αναλύονται οι κυριότεροι τύποι μπαταριών. [24]

### 5.5.2) Μπαταρία μολύβδου-οξέος (Pb-acid)

Η μπαταρία μολύβδου-οξέος είναι η πρώτη επαναφορτιζόμενη μπαταρία που χρησιμοποιήθηκε και σε οικιακές εφαρμογές αλλά και σε εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας. Ωστόσο, η χρήση αυτού του τύπου μπαταρίας είναι περιορισμένη σε εμπορικού τύπου εφαρμογές μεγαλύτερης κλίμακας και αυτό οφείλεται στην διαθεσιμότητα άλλων τύπων μπαταρίας με μεγαλύτερη ενεργειακή πυκνότητα και απόδοση. Παρά το γεγονός ότι έχει μικρότερη απόδοση από νέες μπαταρίες, οι μπαταρίες μολύβδου-οξέος έχουν κάποια επιθυμητά χαρακτηριστικά όπως η γρήγορη απόκριση, εκτεταμένη διάρκεια ζωής, αξιοπιστία και ως τεχνολογία βελτιωμένο επίπεδο ωριμότητας, ειδικά σε συστήματα αυτοκίνησης και σε άλλες εφαρμογές όπου το βάρος δεν θεωρείται ιδιαίτερα επιβαρυντικό για τις συνθήκες λειτουργίας. Επιπλέον, πρόκειται για σχετικά φθηνές μπαταρίες (\$300-600/kWh), απόδοση 70-90% και ανάλογα το βάθος εκφόρτισης (DoD), γίνεται αναφορά στην βιβλιογραφία για διάρκεια ζωής 250-1000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης αλλά και για

2000 κύκλους για τον ίδιο τύπο μπαταρίας. Τα στοιχεία μια μπαταρίας μολύβδου-οξέος αποτελούνται από σπογγώδη μόλυβδο, που έχει τον ρόλο της ανόδου, και κάθοδο οξέος μολύβδου. Τα ηλεκτρόδια της ανόδου και της καθόδου είναι βυθισμένα σε αραιό ηλεκτρολύτη θεικού οξέος. Κατά την διάρκεια της εκφόρτισης, παράγεται στα ηλεκτρόδια θειικός μόλυβδος. Οι θειικοί κρύσταλλοι γίνονται μεγαλύτεροι και είναι δύσκολο να διασπαστούν κατά την επαναφόρτιση, αν η μπαταρία έχει υπερεκφορτιστεί ή έχει παραμείνει αποφορτισμένη για μεγάλο χρονικό διάστημα. Τα μειονεκτήματα αυτού του τύπου μπαταρίας σχετίζονται με το βάρος, την διάρκεια ζωής, τις απαιτήσεις συντήρησης, τους κινδύνους σχετικά με την τοξικότητα του μολύβδου και του θεικού οξέος κατά την διάρκεια της παραγωγής και της απόρριψης και την πτώση της χωρητικότητας σε χαμηλές θερμοκρασίες.[24,26]

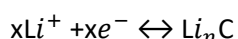
### 5.5.3) Μπαταρία ιόντων λιθίου (Li-ion)

Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου έχουν σημαντικές εφαρμογές σε συσκευές είτε υψηλής είτε χαμηλής ισχύος, αλλά και σε φορητές ηλεκτρονικές συσκευές και σε μικροσυσκευές τηλεπικοινωνιών. Η προτίμηση στην χρήση αυτού του τύπου μπαταριών οφείλεται στην υψηλή ενεργειακή πυκνότητα (75-200 Wh/kg) και την υψηλή απόδοση (85-90%). Η άνοδος αυτής της μπαταρίας αποτελείται από γραφίτη άνθρακα, ενώ η κάθοδος αποτελείται από λιθωμένο μεταλλικό οξειδίο. Το μέσο αποθήκευσης περιέχει ένα μείγμα από άλατα λιθίου ( $\text{LiBF}_4$ ,  $\text{LiClO}_4$  ή  $\text{LiPF}_6$ ) και οργανικά ανθρακικά άλατα (ανθρακικό διμεθύλιο ή διαιθυλεστέρα). Κατά την διαδικασία εκφόρτισης ιόντα λιθίου ( $\text{Li}^+$ ) μετακινούνται από το αρνητικό ηλεκτρόδιο ενώ μεταφέρουν ρεύμα στην θετική πλευρά με την αντίθετη διαδικασία να συμβαίνει κατά την φόρτιση με την ακόλουθη ήλεκτρο-χημεία:

Η ημι-αντίδραση στο θετικό ηλεκτρόδιο:



Η ημι-αντίδραση στο αρνητικό ηλεκτρόδιο:



Η διάρκεια ζωής σύγχρονων μπαταριών ιόντων λιθίου φαίνεται να ξεπερνάει τους 3000 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης. Επιπλέον, αυτού του τύπου οι μπαταρίες, έχουν το πλεονέκτημα της γρήγορης φόρτισης/εκφόρτισης, χαμηλό ποσοστό αυτό-εκφόρτισης, ποίκιλλα μεγέθη και βάρη, μικρότερο βάρος με υψηλή ενεργειακή πυκνότητα και είναι σχετικά πιο ασφαλής για το περιβάλλον σε σύγκριση με άλλες μπαταρίες, όπως για παράδειγμα τις μπαταρίες οξέος- μολύβδου. Το μεγάλο μειονέκτημα αυτού του τύπου μπαταρίας είναι το κόστος παραγωγής επειδή εξαρτάται από την διάρκεια ζωής της μπαταρίας, την ηλεκτρική απόδοση και την ασφάλεια της συσκευής. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου εξαρτώνται, σε μεγάλο βαθμό στο κοβάλτιο ή στα φωσφορικά άλατα. Και στις δυο ενσωματώσεις λαμβάνει χώρα η μεταφορά ιόντων λιθίου από την άνοδο στην κάθοδο (και το αντίστροφο), δημιουργώντας ροή ρεύματος. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου που βασίζονται στο κοβάλτιο έχουν υψηλή απόδοση και υψηλή ενεργειακή πυκνότητα. Μειονέκτημα αποτελεί το υψηλό κόστος της μπαταρίας που οφείλεται στην περιορισμένη διαθεσιμότητα του κοβαλτίου, ζητήματα ασφάλειας καθώς και σωστή διαχείριση των μπαταριών. Οι μπαταρίες ιόντων λιθίου που βασίζονται στα

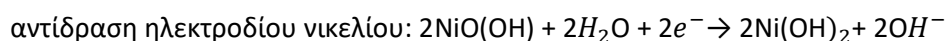
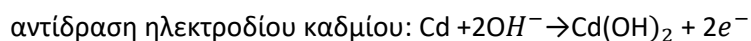
φωσφορικά άλατα έχουν υψηλότερη απόδοση από αυτές που βασίζονται στο κοβάλτιο, ενώ έχουν την ίδια ενεργειακή πυκνότητα αλλά με χαμηλότερο κόστος. Πρόκειται για πρόσφατη τεχνολογία, σε σύγκριση με τις μπαταρίες που βασίζονται στο κοβάλτιο, και απαιτεί περαιτέρω ανάπτυξη. [24,26]

#### 5.5.4) Μπαταρία θείου-νατρίου (Na-S)

Πρόκειται για τεχνολογία φθηνών, υψηλής ενεργειακής πυκνότητας (150-240 Wh/kg), ενισχυμένης χωρητικότητας αποθήκευσης ενέργειας μπαταριών που λειτουργούν με ενεργές ουσίες που βρίσκονται σε υγρή φάση. Το χαμηλό κόστος οφείλεται στην διαθεσιμότητα και το χαμηλό κόστος των υλικών κατασκευής, με την τάση, αυτά τα υλικά, να ανακυκλώνονται για επαναχρησιμοποίηση. Αυτό το σύστημα μπαταρίας χρησιμοποιείται ευρέως στην Ιαπωνία και στις Η.Π.Α. Για αυτή την μπαταρία, χρησιμοποιούνται τήγματα ηλεκτροδίων, όπου για το αρνητικό χρησιμοποιείται νάτριο και για το θετικό χρησιμοποιείται θείο. Κατά την εκφόρτιση, ιόντα νατρίου ανάγονται για να ελευθερώσουν ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα μέσω του τήγματος νατρίου και τότε τροφοδοτούν με εξωτερικό κύκλωμα τα συστήματα ηλεκτρικού φορτίου. Απαιτείται μια υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (270-300 °C) για την διατήρηση των κατάλληλων συνθηκών για την ηλεκτροχημική αντίδραση, αλλά αυτή η θερμοκρασία παράγεται κατά την διάρκεια των κύκλων φόρτισης και εκφόρτισης, χωρίς να απαιτείται εξωτερική πηγή θερμότητας. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται είναι στερεός ηλεκτρολύτης β-αλουμίνας ( $Al_2O_3$ ), ο οποίος πολλές φορές αναγράφεται ως μεμβράνη BASE (Beta-Alumina Solid Electrolyte). Ο ρόλος της μεμβράνης BASE, εκτός από μέσο για την μεταφορά ενέργειας, περιλαμβάνει και τον διαχωρισμό των ηλεκτροδίων, ενώ αφήνει επιλεκτικά τα θετικά ιόντα νατρίου να την διαπεράσουν και να προκαλέσουν χημικές αντιδράσεις με το θείο και την παραγωγή πολυσουλφιδίων νατρίου. Σε μεγαλύτερο βάθος εκφόρτισης, η μπαταρία έχει διάρκεια ζωής 2500 κύκλους φόρτισης/εκφόρτισης περίπου. Αυτός ο τύπος μπαταριών έχει χρησιμοποιηθεί κυρίως σε εφαρμογές όπως ρύθμιση τάσης και σταθεροποίηση ισχύος ειδικά σε αιολικά πάρκα. Πρόκειται για ανερχόμενη τεχνολογία και αναμένεται περαιτέρω διεύρυνση στον τομέα των ΑΠΕ. [24,26]

#### 5.5.5) Μπαταρία νικελίου-καδμίου (Ni-Cd)

Πρόκειται για άλλη μια επαναφορτιζόμενη μπαταρία, η οποία έχει ενεργειακή πυκνότητα μεγαλύτερη από την ενεργειακή πυκνότητα της μπαταρίας μολύβδου οξέος (50-75 Wh/kg και 30-50 Wh/kg αντίστοιχα), μεγάλη διάρκεια ζωής (3000 κύκλοι φόρτισης/εκφόρτισης), καλή απόδοση συστήματος σε χαμηλή θερμοκρασία και μεγάλο εύρος σε μεγέθη. Οι μπαταρίες νικελίου καδμίου είναι ανθεκτικές και η τεχνολογία τους είναι αρκετά ώριμη για να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες μολύβδου-οξέος. Σε αυτό τον τύπο μπαταρίας χρησιμοποιείται υδροξείδιο του οξειδίου του νικελίου ( $NiO(OH)$ ) ως θετικό ηλεκτρόδιο και νικέλιο για το αρνητικό ηλεκτρόδιο. Υδροξείδιο του καλίου χρησιμοποιείται ως ηλεκτρολύτης και το περιεχόμενο της μπαταρίας είναι κλεισμένο σε ένα σφραγισμένο μεταλλικό περίβλημα. Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα κατά την φόρτιση και εκφόρτιση είναι οι εξής:



Ένα από τα πιο σημαντικά προβλήματα που σχετίζονται με τις μπαταρίες νικελίου -καδμίου είναι το υψηλό κόστος το οποίο οφείλεται στο ότι τα υλικά κατασκευής (νικέλιο και κάδμιο) είναι ακριβά. Επίσης, υπάρχουν και περιβαλλοντικοί περιορισμοί σχετικοί με την απόρριψη αυτών των υλικών, αφού το κάδμιο ανήκει στα βαρέα μέταλλα και όπως είναι γνωστό, τα βαρέα μέταλλα είναι άκρως τοξικά και έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην υγεία των ανθρώπων. Εξαιτίας αυτού του γεγονότος, οι μπαταρίες νικελίου- καδμίου τείνουν να αντικατασταθούν από μπαταρίες νικελίου-υδριδίου μετάλλου. Σε αυτές τις μπαταρίες το ηλεκτρόδιο καδμίου αντικαθίσταται από ένα μείγμα υδριδίων μετάλλων (συνήθως κράματα λανθανίου), των οποίων η τεχνολογία περιλαμβάνει την χρήση ακριβών υλικών, αυξάνοντας έτσι το κόστος της μπαταρίας. Για την αντιστάθμιση αυτού του κόστους, αυτές οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται σε μικρές φορητές εφαρμογές. [24-26]

## **5.6)Κυψέλες καυσίμου**

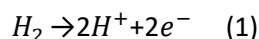
### **5.6.1)Ιστορική αναδρομή**

Η έρευνα και ανάπτυξη, η οποία οδήγησε σε μια λειτουργική κυψέλη καυσίμου, ξεκινά από τις αρχές του 1800. Ο Γουίλιαμ Ρόμπερτ Γκροβ (William Grove), ένας χημικός και δικηγόρος διπλωμάτων ευρεσιτεχνίας, θεωρείται ευρέως ως ο πρωτοπόρος της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου χάρις την διάσημη του πειραματική επίδειξη ηλεκτρόλυσης νερού/κυψέλης καυσίμου. Ο Γουίλιαμ Γκροβ χρησιμοποίησε το γνωστικό υπόβαθρο που είχε σχετικά με την ηλεκτρόλυση για να συλλάβει μια αντίστροφη διαδικασία, η οποία θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Βασιζόμενος σε αυτό, ο Γκροβ κατάφερε να κατασκευάσει μια συσκευή η οποία συνδυάζει υδρογόνο και οξυγόνο για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (αντί να τα διαχωρίζει χρησιμοποιώντας ηλεκτρική ενέργεια). Η συσκευή, αρχικά ονομάστηκε μπαταρία αερίου, έγινε γνωστή ως κυψέλη καυσίμου. Περαιτέρω έρευνα έγινε κατά την διάρκεια του εικοστού αιώνα. Το 1959, ο Φράνσις Τόμας Μπέικον (άγγλος μηχανικός) επέδειξε την πρώτη πλήρως-λειτουργική κυψέλη καυσίμου. Το αποτέλεσμα ήταν αρκετά εντυπωσιακό για να τραβήξει την προσοχή της NASA, καθώς και να υιοθετηθεί από αυτή. Οι PEMFCs και οι αλκαλικές κυψέλες καυσίμου (AFCs), συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν από τη NASA τη δεκαετία του '60 ως μέρος των επανδρωμένων διαστημικών προγραμμάτων Gemini και Apollo. Αυτές οι κυψέλες καυσίμου ήταν ειδικά προσαρμοσμένες, μη-εμπορικές, αντιμετώπισαν αρκετές δυσλειτουργίες, και χρησιμοποίησαν καθαρό οξυγόνο και υδρογόνο ως οξειδωτικό και καύσιμο, αντίστοιχως. Ωστόσο, οι κυψέλες καυσίμου σήμερα χρησιμοποιούνται σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών και υιοθετούνται σταδιακά από ιδιωτικούς και δημόσιους τομείς, καθώς γίνονται όλο και πιο αξιόπιστες στην χρήση και ανθεκτικές για μακροπρόθεσμη λειτουργία και μπορούν να λειτουργήσουν χρησιμοποιώντας αέρα και υδρογόνο (το οποίο μπορεί να παραχθεί με διάφορους τρόπους, βλέπε Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου), ως οξειδωτικό και καύσιμο, αντίστοιχα. [30]

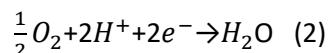
### **5.6.2)Μια επισκόπηση των βασικών αρχών των κυψελών καυσίμου**

Μια κυψέλη καυσίμου αποτελείται από τρία ενεργά μέρη: ένα ηλεκτρόδιο καυσίμου (άνοδος), ένα οξειδωτικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) και έναν ηλεκτρολύτη ανάμεσα τους. Τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από ένα πορώδες υλικό που καλύπτεται από μια στρώση καταλύτη (συνήθως λευκόχρυσο στις PEMFCs). Μοριακό υδρογόνο ( $H_2$ ) απελευθερώνεται από ένα ρεύμα ροής αερίου στην άνοδο, όπου αντιδρά ηλεκτροχημικά. Το υδρογόνο

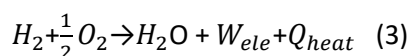
οξειδώνεται και παράγει ιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια, όπως φαίνεται στην παρακάτω εξίσωση:



Τα ιόντα υδρογόνου μετακινούνται μέσω του όξινου ηλεκτρολύτη ενώ τα ηλεκτρόνια ωθούνται μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος μέχρι την κάθοδο. Στην κάθοδο, τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα υδρογόνου αντιδρούν με το οξυγόνο που παρέχεται από ένα εξωτερικό ρεύμα ροής αέρα για να σχηματίσουν νερό, όπως φαίνεται στη παρακάτω εξίσωση:



Η συνολική αντίδραση στη κυψέλη καυσίμου παράγει νερό, θερμότητα και ηλεκτρικό έργο:



Τα υποπροϊόντα νερού και θερμότητας πρέπει να αφαιρούνται συνεχώς προκειμένου να διατηρηθεί η συνεχής ισοθερμική λειτουργία για ιδανική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια κυψέλη καυσίμου μπορεί να χαρακτηριστεί ως έμμεσο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας. Οι κυψέλες καυσίμου μετατρέπουν ενέργεια ηλεκτροχημικά για την αποθήκευση και την μετέπειτα παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, όταν ζητηθεί. Παρουσιάζουν κοινά κατασκευαστικά χαρακτηριστικά με τις μπαταρίες, με την διαφορά ότι η κυψέλη καταναλώνει καύσιμο (κυρίως υδρογόνο αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μεθανόλη, αιθανόλη αλλά και άλλοι υδρογονάνθρακες) από εξωτερικό σύστημα (για παράδειγμα από σύστημα αποθήκευσης υδρογόνου) με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αντίθετα, οι μπαταρίες περιορίζονται αποκλειστικά στην αποθήκευση ενέργειας μέσω την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε χημική, κατά την φόρτιση, και την μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική, κατά την εκφόρτιση. Σε μια κυψέλη καυσίμου νερό, θερμότητα και ηλεκτρισμός παράγονται μέσω μιας επικρατούσας ηλεκτροχημικής αντίδρασης των αντιδραστηρίων. Η χημική αλληλουχία είναι τέτοια ώστε τα αντιδραστήρια να ρέουν προς το εσωτερικό της κυψέλης καυσίμου και τα προϊόντα της αντίδρασης να ρέουν προς το εξωτερικό, ενώ ο ηλεκτρολύτης μένει μέσα στην κυψέλη. Υπάρχουν πολλά είδη κυψελών καυσίμου, τα οποία ταξινομούνται με βάση διάφορα κριτήρια όπως τα είδη των αντιδράσεων που χρησιμοποιούν διαφορετικά αντιδραστήρια και ηλεκτρολύτες. Τα είδη κυψελών καυσίμου διαφέρουν ως προς την απόδοση, την θερμοκρασία λειτουργίας, την ισχύ εξόδου, καθώς και τις εφαρμογές στις οποίες χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, οι κυψέλες καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων θεωρούνται ιδανικοί υποψήφιοι για εφαρμογές μεταφοράς χάρις την υψηλή πυκνότητα ισχύος, γρήγορο χρόνο εκκίνησης, υψηλή απόδοση, χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας και τον εύκολο και ασφαλή χειρισμό. Ωστόσο, πρόκειται για μια ακριβή τεχνολογία που ακόμα δεν μπορεί να ανταγωνιστεί τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Η απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου κυμαίνεται, συνήθως, 40-65% και τείνει να αυξηθεί (για παράδειγμα σε εφαρμογές όπου χρησιμοποιείται η θερμότητα που παράγεται κατά την λειτουργία της κυψέλης καυσίμου). Το μειονέκτημα, το οποίο επιβραδύνει την ευρεία χρήση της κυψέλης καυσίμου και την περαιτέρω εμπορευματοποίηση της, είναι το κόστος,



το οποίο εκτιμάται από €500/kW και €8000/kW. Ωστόσο, αυτό το κόστος αναμένεται να μειωθεί μετά την περαιτέρω έρευνα, ανάπτυξη και ωρίμανση της τεχνολογίας αυτής. Η ηλεκτρική απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου ( η μετατροπή της χημικής ενέργειας του καυσίμου σε ηλεκτρικό ρεύμα) δίνεται από την εξής σχέση:

$$\eta_{FC} = \frac{P_{FC}}{\dot{m}_{H_2} LHV_{H_2}}$$

όπου  $P_{FC}$  είναι η ηλεκτρική ισχύς της κυψέλης καυσίμου,  $\dot{m}_{H_2}$  (kg/s) είναι ο ρυθμός ροής μάζας υδρογόνου και  $LHV_{H_2}$  είναι η κατώτερη θερμογόνος δύναμη του υδρογόνου ( $LHV=120$  MJ/kg). Αξίζει να σημειωθεί πως το καύσιμο υδρογόνο έχει μεγαλύτερη τιμή κατώτερης θερμογόνου δύναμης από την βενζίνη (44.5 MJ/kg) και το πετρέλαιο (42.5 MJ/kg). [30,31]

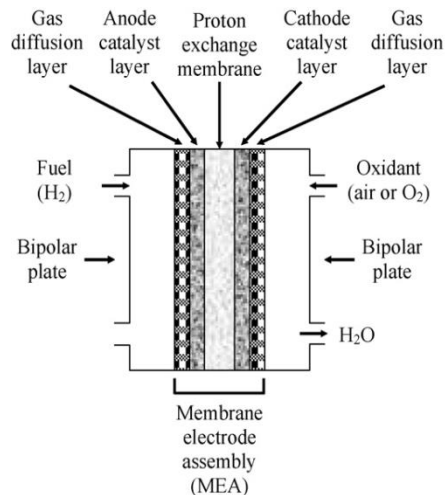
### 5.6.3) Κυψέλη καυσίμου υδρογόνου

Το υδρογόνο είναι το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο καύσιμο στις κυψέλες καυσίμου με σκοπό την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το υδρογόνο παράγεται είτε με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είτε από συμβατικά καύσιμα. Το υδρογόνο από ΑΠΕ προτιμάται και αυτό οφείλεται στις περιζήτητες καθαρές ιδιότητες που έχει ως καύσιμο με μικρό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Ωστόσο, το υδρογόνο που παράγεται από ΑΠΕ (αιολική ενέργεια, ηλιακή ενέργεια ή βιομάζα) είναι από δυο έως τρεις φορές πιο ακριβό από αυτό που παράγεται από φυσικό αέριο, έτσι απαιτείται περαιτέρω έρευνα και βελτιστοποίηση αυτής της τεχνολογίας για να μπορέσει να υπερισχύσει των συμβατικών μεθόδων παραγωγής υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα. Οι κυψέλες καυσίμου έχουν πολλούς πιθανούς τομείς εφαρμογής για τεχνολογική ανάπτυξη όπως την αντικατάσταση της βενζίνης σε οχήματα. Τα οχήματα κυψελών καυσίμου υδρογόνου (HFCVs-Hydrogen Fuel Cell Vehicles) είναι έχουν αναδειχθεί, τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν αναδειχθεί ως υποκατάστατο των ηλεκτρικών οχημάτων μπαταρίας (EV-Electric Vehicle), χάρις τις μηδενικές εκπομπές αέριων ρύπων. Η ηλεκτροχημική αντίδραση, στην οποία οφείλεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, είναι τέτοια ώστε το καύσιμο υδρογόνο (αναγωγικό) να περνάει μέσω της ανόδου ενώ το οξειδωτικό (οξυγόνο του ατμοσφαιρικού αέρα) περνάει μέσω της καθόδου. Αυτή η διασταυρούμενη κίνηση επιτρέπει τον σχηματισμό ιόντων υδρογόνου και ηλεκτρονίων στην άνοδο και εγγυάται έτσι την ροή των ηλεκτρονίων μέσω ενός εξωτερικού κυκλώματος για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. [24]

### 5.6.4) Κυψέλη καυσίμου με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC-Proton Exchange Membrane Fuel Cell)

Άλλος τύπος κυψέλης καυσίμου με δυνατότητα χρήσης υδρογόνου ως καύσιμο είναι η PEM κυψέλη καυσίμου. Θεωρείται ως μια από τις πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες για καθαρή, βιώσιμη και αποδοτική παραγωγή ενέργειας. Τα κύρια εξαρτήματα αυτής της κυψέλης καυσίμου είναι: το ηλεκτρόδιο ανόδου, το κανάλι αερίου ανόδου, ο διαχυτής αερίου ανόδου, πλάκα συλλογής ανόδου, στρώμα καταλύτη καθόδου, ηλεκτρόδιο καθόδου, διαχυτής αερίου καθόδου και μεμβράνη.





Διάγραμμα 11:Κυψέλη καυσίμου PEM

Η PEM κυψέλη καυσίμου, σε αντίθεση με άλλους τύπους κυψελών, χρησιμοποιεί πολυμερή μεμβράνη ηλεκτρολύτη και συνδέεται με χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας και πίεση. Το σύστημα της κυψέλης καυσίμου χρησιμοποιεί καταλύτη πλατίνας για να διαχωρίσει τα μόρια του υδρογόνου σε πρωτόνια (ιόντα υδρογόνου) τα οποία πρέπει να αχθούν κατά μήκος της μεμβράνης για τις κατάλληλες λειτουργίες της κυψέλης καυσίμου. Η ικανότητα παράδοσης ισχύος των PEMκυψελών καυσίμου κυμαίνεται από 100W έως 100 kW και η απόδοση λειτουργίας είναι συνήθως 40-50%. Πλεονεκτήματα αυτού του τύπου κυψελών καυσίμου περιλαμβάνουν μικρό βάρος, υψηλή πυκνότητα ισχύος, δυνατότητα χρήσης ατμοσφαιρικού αέρα (οξυγόνο από τον ατμοσφαιρικό αέρα) και ελάχιστες εκπομπές αερίων ρύπων. Ως τώρα οι PEMκυψέλες καυσίμου έχουν χρησιμοποιηθεί σε αρκετούς τομείς σχετικούς με παραγωγή ενέργειας, όπως σε γεννήτριες ενέργειας σε σταθερές εφαρμογές όπως οικίες, σε δημόσια κτίρια ή σε τηλεπικοινωνιακές εφαρμογές, σε οχήματα μικρού βάρους και σε υβριδικά συστήματα. Πέρα από τις PEM κυψέλες καυσίμου, υπάρχουν και άλλα είδη κυψελών που βασίζονται στο υδρογόνο όπως η κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFCs-Phosphoric Acid Fuel Cells) και η αλκαλική κυψέλη καυσίμου (AFCs-Alkaline Fuel Cells).Σημαντικά μειονεκτήματα αυτού του είδους κυψελών καυσίμου είναι το υψηλό κόστος και η απαίτηση υδρογόνου υψηλής καθαρότητας.[24]

### 5.6.5)Κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος (MCFCs-Molten Carbonate Fuel Cells)

Η κυψέλη καυσίμου τηγμένου ανθρακικού άλατος χρησιμοποιεί ανθρακικά άλατα λιθίου-νατρίου ή λιθίου-καλίου ως ηλεκτρολύτη σε υψηλή θερμοκρασία (περίπου 650 °C). Το αέριο καύσιμο, που χρησιμοποιείται σε αυτό το σύστημα είναι υγροποιημένο μείγμα υδρογόνου ( $H_2$ ) και μονοξειδίου του άνθρακα (CO). Το οξειδωτικό που χρησιμοποιείται είναι ένα μείγμα οξυγόνου ( $O_2$ ) και διοξειδίου του άνθρακα ( $CO_2$ ), το οποίο μπορεί να περιέχει υδρατμούς. Η πίεση λειτουργίας της κυψέλης είναι ανάμεσα σε 1 και 10 atm. Εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας που απαιτείται για την λειτουργία της κυψέλης, ένα μη-πολύτιμο μέταλλο χρησιμοποιείται (συνήθως νικέλιο) ως ηλεκτρόδιο ανόδου, ενώ το οξείδιο του νικελίου (NiO) είναι κατάλληλο για ηλεκτρόδιο καθόδου. Κατά την διάρκεια της λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας λιώνει τα άλατα για να παράγει ανθρακικά ιόντα στο ηλεκτρόδιο καθόδου. Τα ιόντα ( $CO_3^{2-}$ ) πηγαίνουν στην άνοδο όπου συνδυάζονται με υδρογόνο και παράγουν ατμό, διοξείδιο του άνθρακα,

θερμότητα και ηλεκτρόνια. Τα ελεύθερα ηλεκτρόνια κινούνται προς ένα εξωτερικά συνδεδεμένο κύκλωμα για την παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Οι MCFCs έχουν την δυνατότητα να χρησιμοποιήσουν διάφορα είδη καυσίμων σε αντίθεση με άλλες κυψέλες καυσίμου. Στην Ιαπωνία και στις Η.Π.Α. , οι MCFCs υπόκεινται σε τεχνολογικές τροποποιήσεις για να μπορούν να χρησιμοποιήσουν καύσιμα όπως το βιοαέριο ή συνθετικό αέριο για την παραγωγή ενέργειας. Αυτού του τύπου οι κυψέλες καυσίμου είναι πιο ευέλικτες ως προς το είδος του καυσίμου σε σύγκριση με άλλους τύπους τεχνολογίας κυψελών χαμηλής θερμοκρασίας και είναι κατάλληλες για στρατιωτικές, θαλάσσιες εφαρμογές καθώς και για εφαρμογές μεταφοράς. Έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί και σε υβριδικά συστήματα ενέργειας. Πολλά υβριδικά συστήματα, που βρίσκονται υπό ανάπτυξη, με MCFCs μπορούν να φτάσουν αποδόσεις έως 70%. Ωστόσο, υπάρχουν ορισμένα μειονεκτήματα που πρέπει να ληφθούν υπόψη σχετικά με τις MCFCs όπως το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα που απαιτείται για την επίτευξη της θερμοκρασίας λειτουργίας και η περιορισμένη διείσδυση στην αγορά λόγω του γεγονότος ότι αυτή η τεχνολογία δεν είναι ακόμα αρκετά ώριμη. Επιπλέον, οι υγροί ηλεκτρολύτες των MCFCs έχουν ορισμένες δυσκολίες στον χειρισμό.[24]

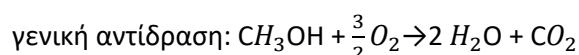
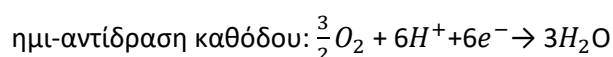
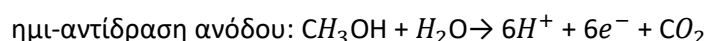
#### 5.6.6) Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC-Solid Oxide Fuel Cell)

Οι κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου έλκουν το ενδιαφέρον των χρηστών κυψελών καυσίμου χάρις την υψηλή τους απόδοση για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και προβλέπεται η περαιτέρω διείσδυση τους στην αγορά στο κοντινό μέλλον. Οι SOFCs χρησιμοποιούν ηλεκτρολύτη στερεού οξειδίου για να άγουν αρνητικά ιόντα οξειδίου ( $O^{2-}$ ) από την κάθοδο στην άνοδο, ηλεκτρόδια νικελίου ή κοβαλτίου που λειτουργούν υπό υψηλή θερμοκρασία (μεταξύ 700 και 1000 °C). Ορισμένα από τα πλεονεκτήματα αυτού του τύπου κυψελών καυσίμου περιλαμβάνουν το μέτριο κόστος αυτής της τεχνολογίας, υψηλή απόδοση, σχετικά χαμηλές εκπομπές, γρήγορες εσωτερικές χημικές αντιδράσεις και δυνατότητα χρήσης σε εφαρμογές από μερικές εκατοντάδες watt ηλεκτρικής ισχύος έως 2MW περίπου. Ωστόσο, διεξάγονται έρευνες για την ανάπτυξη μιας νέας εκδοχής της SOFC χαμηλής θερμοκρασίας με σκοπό την αντικατάσταση των ιόντων οξυγόνου για αγωγιμότητα με βάση πρωτόνια και ονομάζεται κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου αγωγιμότητας πρωτονίων (Proton Conducting Solid Oxide Fuel Cell). Επιπλέον, από πλευράς συμπαραγωγής, η κατάσταση υψηλότερης θερμοκρασίας των SOFCs έχει κάνει, αυτό το σύστημα, κατάλληλο για εφαρμογές συνδυασμένης παραγωγής θερμότητας και ισχύος (Combined Heat and Power-CHP). Αυτή η κατάσταση λειτουργίας υψηλής θερμοκρασίας της κυψέλης περιορίζει την ανάγκη χρήσης ακριβού καταλύτη πλατίνας, που απαιτείται σε τύπους κυψελών καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας.[24]

#### 5.6.7) Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης

Πρόκειται για υποκατηγορία της PEM κυψέλης καυσίμου και χρησιμοποιεί μεθανόλη κατευθείαν ως καύσιμο για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η μεθανόλη ( $CH_3OH$ ) από βιομάζα θεωρείται περιβαλλοντικά βιώσιμη ως βιοκαύσιμο. Οι κυψέλες καυσίμου μεθανόλης έχουν μικρότερη απόδοση και θερμοκρασία λειτουργίας, σε σχέση με άλλους τύπους κυψέλης καυσίμου, αλλά θεωρούνται αξιόπιστο σύστημα αποθήκευσης ενέργειας χάρις την μεγαλύτερη διάρκεια ζωής τους και ενεργειακή πυκνότητα σε σύγκριση με τις κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου και τις μπαταρίες ιόντων λιθίου. Λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα πλεονεκτήματα, οι DMFCs μπορούν να αντικαταστήσουν τις συμβατικές μπαταρίες

σε χρήσιμες εφαρμογές. Η βασική αρχή λειτουργίας των DMFCs είναι η εξαγωγή υδρογόνου από την μεθανόλη με ηλεκτρο-οξείδωση για την παραγωγή διοξειδίου του άνθρακα στην άνοδο χωρίς την ανάγκη αναμόρφωσης. Τα ιόντα υδρογόνου ( $H^+$ ) μετακινούνται προς την κάθοδο αφού διασχίσουν την μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων και τότε ενώνονται με οξυγόνο και παράγουν νερό. Ο ηλεκτρολύτης που χρησιμοποιείται σε αυτή την διαμόρφωση της κυψέλης καυσίμου είναι παρόμοιος με αυτόν που χρησιμοποιείται στις PEM κυψέλες καυσίμου. Οι ημι-αντιδράσεις της κυψέλης καυσίμου μεθανόλης δίνονται παρακάτω:



Το δυναμικό ηλεκτρικής ισχύος της DMFC είναι έως κάποιο βαθμό περιορισμένο αλλά έχει αποτελεσματική λειτουργική ευκολία. Αυτό συμβαίνει επειδή τα μέσα αποθήκευσης και μεταφοράς της μεθανόλης είναι λιγότερο δυσκίνητα σε σχέση με το υδρογόνο που απαιτεί κάποιο επίπεδο διαχείρισης πίεσης. Μεγάλο πρόβλημα αυτού του είδους κυψέλης καυσίμου αποτελεί είναι οι εκπομπές  $CO_2$  με δυνατότητα συμβολής στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και, συνεπώς, στην παγκόσμια υπερθέρμανση. Έχει επίσης αναφερθεί και ένα διασταυρούμενο φαινόμενο κατά την οξείδωση της μεθανόλης. Είναι ένα σοβαρό πρόβλημα το οποίο μειώνει την τάση της κυψέλης, την πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος (ηλεκτρικό φορτίο ανά μονάδα επιφάνειας), την χρήση καυσίμου και, ως εκ τούτου, την απόδοση της κυψέλης καυσίμου επειδή λιγότερο από 30% της αποθηκευμένης χημικής ενέργειας μπορεί να αξιοποιηθεί για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.[24]

Πίνακας 6: Χαρακτηριστικά διαφορετικών τύπων κυψελών καυσίμου [30]

|                         | Θερμοκρασία λειτουργίας (°C) | Ηλεκτρολύτης                                 | Καύσιμο κυψέλης | Ηλεκτρική απόδοση (%) | Ισχύς (kW) |
|-------------------------|------------------------------|--|-----------------|-----------------------|------------|
| Αλκαλική (AFC)          | 70-100                       | KOH (υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του καλίου) | $H_2$           | 60-70                 | 10-100     |
| PEMFC                   | 50-100                       | Φθοριούχο-σουλφονωμένο πολυμερές (στερεό)    | $H_2$           | 30-50                 | 0.1-500    |
| DMFC                    | 90-120                       | Φθοριούχο-σουλφονωμένο πολυμερές (στερεό)    | Μεθανόλη        | 20-30                 | 100-1000   |
| Φωσφορικού οξέος (PAFC) | 150-220                      | Φωσφορικό οξύ (ακίνητοποιημένο υγρό)         | $H_2$           | 40-55                 | 5-10,000   |

|                                  |          |   |                                 |       |          |
|----------------------------------|----------|---|---------------------------------|-------|----------|
| MCFC                             | 650-700  | Αλκαλικό ανθρακικό άλας ακινητοποιημένο υγρό      | Ανασχηματίζει CO/H <sub>2</sub> | 50-60 | 100-300  |
| SOFC                             | 800-1000 | Η σταθεροποιημένη με υτρίαζirkονία (YSZ) (στερεή) | Ανασχηματίζει CO/H <sub>2</sub> | 50-60 | 0.5-100  |
| Κυψέλη καυσίμου αιθανόλης (DEFC) | 90-120   | Φθοριούχο-σουλφονωμένο πολυμερές (στερεό)         | Αιθανόλη                        | 20-30 | 100-1000 |

Πίνακας 7:Τεχνοοικονομική σύγκριση ανάμεσα σε κυψέλη καυσίμου μεθανόλης και ανταγωνιστικές τεχνολογίες στον φορητό τομέα ενέργειας [30]

| Φορητή τεχνολογία ενέργειας         | Βαρυμετρική πυκνότητα ενέργειας (Wh/kg) | Ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα (Wh/L) | Πυκνότητα ισχύος (W/kg) | Κόστος κεφαλαίου (\$/kWh) |
|-------------------------------------|---|---|-------------------------|---------------------------|
| Κυψέλη καυσίμου μεθανόλης           | >1000                                   | 700-1000                                | 100-200                 | 200 (\$/kW)               |
| Μπαταρία μολύβδου-οξέος             | 20-50                                   | 50-100                                  | 150-300                 | 70                        |
| Μπαταρία νικελίου-καδμίου           | 40-60                                   | 75-150                                  | 150-200                 | 300                       |
| Μπαταρία νικελίου-υδριδίου μετάλλου | 60-100                                  | 100-250                                 | 200-300                 | 300-500                   |
| Μπαταρία ιόντων-λιθίου              | 100-160                                 | 200-300                                 | 200-400                 | 200-700                   |
| Σφόνδυλος                           | 50-400                                  | 200                                     | 200-400                 | 400-800                   |
| Υπερπυκνωτής                        | 10                                      | 10                                      | 500-10,000              | 20,000                    |

Πίνακας 8:Τεχνοοικονομική σύγκριση μεταξύ συστημάτων κυψελών καυσίμου και ανταγωνιστικών τεχνολογιών στον στατικό τομέα παραγωγής/συμπαγωγής ενέργειας.[30]

| Στατική τεχνολογία παραγωγής/συμπαγωγής ενέργειας | Ισχύς (MW) | Απόδοση (%) | Διάρκεια ζωής (έτη) | Κόστος κεφαλαίου (\$/kW) |
|---|------------|-------------|---------------------|--------------------------|
| Κυψέλη καυσίμου φωσφορικού οξέος                  | 0.2-10     | 30-45       | 5-20                | 1500                     |
| MCFC/ υβριδικός αεριοστρόβιλος                    | 0.1-100    | 55-65       | 5-20                | 1000                     |
| SOFC/ υβριδικός αεριοστρόβιλος                    | 0.1-100    | 55-65       | 5-20                | 1000                     |
| Κύκλος ατμού (κάρβουνο)                           | 10-1000    | 33-40       | >20                 | 1300-2000                |
| Κύκλος αεριοστρόβιλου (φυσικό αέριο)              | 0.03-1000  | 30-40       | >20                 | 500-800                  |
| Υδροηλεκτρικό σύστημα                             | 0.1-2000   | 65-90       | >40                 | 1500-3500                |
| Φωτοβολταϊκό σύστημα                              | 0.001-1    | 10-20       | 15-25               | 2000-4000                |

### 5.6.8)Εφαρμογές κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου κατέχουν πολλά υποσχόμενες δυνατότητες για να γίνουν ανταγωνιστικές τεχνολογίες σε μια πληθώρα αγορών χάρις το ευρύ φάσμα εφαρμογών τους. Ως αποτέλεσμα του μεγάλου εύρους ισχύος και της διαφοροποίησης των τεχνικών χαρακτηριστικών ανάμεσα στα διάφορα είδη κυψελών καυσίμου, οι κυψέλες καυσίμου έχουν εύρος εφαρμογών που περιλαμβάνει από σκούτερ μέχρι μεγάλες εγκαταστάσεις συμπαγωγής, καθώς μπορούν να χρησιμοποιηθούν θεωρητικά για οποιαδήποτε εφαρμογή που απαιτεί ενέργεια. Τις τελευταίες δεκαετίες γίνονται προσπάθειες για περαιτέρω εμπορευματοποίηση των κυψελών καυσίμου σε τομείς όπως η στατική παραγωγή ενέργειας, οι μεταφορές και τα φορητά ηλεκτρονικά συστήματα. Συγκεκριμένα, οι αποστολές κυψελών καυσίμου παγκοσμίως αυξήθηκαν κατά 214% στο χρονικό διάστημα 2008-2011, με τις κυψέλες καυσίμου να γίνονται αναδυόμενος ανταγωνιστής στον τομέα εφεδρικής παροχής ενέργειας για την αγορά δικτύων τηλεπικοινωνιών και στην αγορά εξοπλισμού υποστήριξης εδάφους αεροδρομίου. Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να έχουν έναν αναπόσπαστο ρόλο στους τομείς στατικής (stationary) παραγωγής ενέργειας για κατοικίες, δημόσια κτίρια και βιομηχανικές μονάδες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν και σε

αυτόνομα συστήματα (συστήματα εκτός δικτύου) και σε συστήματα υποβοηθούμενα από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης.[30]

Πίνακας 9:Συνήθεις χρήσεις τύπων κυψέλης καυσίμου ανάλογα την εφαρμογή και την ισχύ.

| Εφαρμογή                    | Αναλογία ισχύος | Χρησιμοποιούμενος τύπος κυψέλης καυσίμου |
|-----------------------------|-----------------|--|
| Φορητή εφαρμογή             | Μέχρι 500W      | PEMFC,DMFC                               |
| Οικιακές εφαρμογές          | 5-10kW          | PEMFC,SOFC                               |
| Εφαρμογή μεταφοράς          | 50-100kW        | PEMFC                                    |
| Κεντρική παραγωγή ενέργειας | 100kW-100MW     | SOFC,MCFC                                |

#### **5.6.8.1)Εφεδρική παροχή ενέργειας έκτακτης ανάγκης (EPS-Emergency back-up power supply)**

Χάρης την υψηλή ενεργειακή πυκνότητα των κυψελών καυσίμου, τους μεγαλύτερους χρόνους λειτουργίας τους (2-10 φορές μεγαλύτεροι από τους χρόνους των μπαταριών μολύβδου-οξέος), το συμπαγές μέγεθος και την δυνατότητα λειτουργίας υπό μη ευνοϊκές συνθήκες, οι κυψέλες καυσίμου αποτελούν μια αξιοσημείωτη εναλλακτική επιλογή στην EPSαγορά, ειδικά στην αγορά των τηλεπικοινωνιών, με τις PEMFCs και DMFCs να αποτελούν τους βασικούς τύπους κυψέλης καυσίμου που επιλέγονται σε τέτοιες εφαρμογές. Λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι η EPSαγορά απαιτεί μεγάλη αξιοπιστία και όχι απαραίτητα μεγάλη διάρκεια ζωής, αποτελεί την πιο πετυχημένη αγορά των κυψελών καυσίμου. Σε αυτή περιλαμβάνονται και νοσοκομεία, κέντρα δεδομένων και κυβερνητικές υπηρεσίες. Σε όλα τα παραπάνω, η συνεχόμενη παροχή ισχύος (συνήθως ανάμεσα σε 2 και 8 kW) είναι κρίσιμης σημασίας, όταν το κεντρικό δίκτυο δεν είναι διαθέσιμο.[30]

#### **5.6.8.2)Παροχή ενέργειας σε απομακρυσμένες περιοχές (RAPS-Remote Area Power Supply)**

Σε απομονωμένες από το δίκτυο περιοχές, όπως νησιά, έρημοι, δασικές εκτάσεις, απομακρυσμένες τεχνικές εγκαταστάσεις, καταφύγια και απομακρυσμένες ερευνητικές εγκαταστάσεις, η παροχή ενέργειας μπορεί να είναι προβληματική. Συνήθως, η παροχή ενέργειας σε αγροτικές και αστικές περιοχές εκτός δικτύου είναι πιο βιώσιμη οικονομικά όταν γίνεται από αυτόνομα δίκτυα ειδικά σχεδιασμένα για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών της εκάστοτε περίπτωσης, σε σύγκριση με την επέκταση του κεντρικού δικτύου. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου το ανάγλυφο της περιοχής δεν είναι ομαλό (δάση, βουνά, κτλ.) όπου η επέκταση του δικτύου είναι από δύσκολη έως μη πραγματοποιήσιμη. Επίσης, η επέκταση του κεντρικού δικτύου σε τέτοιες περιοχές δεν θεωρείται βιώσιμη και για λόγους όπως οι υψηλές απώλειες λόγω απόστασης, οι χαμηλές πυκνότητες φορτίου τέτοιων περιοχών και το υψηλό κόστος των απαιτούμενων υποδομών που συνοδεύουν την επέκταση δικτύου. Ειδικά οι αγροτικές περιοχές εκτός δικτύου σε αναπτυσσόμενες χώρες αποτελούν σήνηθες παράδειγμα των σημαντικών οφελών των αυτόνομων συστημάτων ενέργειας. [30]

### **5.6.8.3) Αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας/Συμπαράγωγή ενέργειας-ψύξη-θέρμανση-ηλεκτρική ενέργεια (CHP-Cooling Heating Power)**

Οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να συνεισφέρουν σημαντικά στην μετάβαση από μεγάλη κεντρική παραγωγή ενέργειας που θα διανέμεται σε καταναλωτές και υπηρεσίες, σε αποκεντρωμένη κατανομημένη παραγωγή ενέργειας. Οι χαμηλότερες εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η υψηλή τους απόδοση και η ανταπόκριση στην κάλυψη του ηλεκτρικού φορτίου, οι κυψέλες καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών (είτε πρόκειται για σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είτε για σύστημα συμπαράγωγής ενέργειας) σε επίπεδο κατοικίας ή σε επίπεδο οικοδομικού τετραγώνου. Ένα σύστημα συμπαράγωγής ενέργειας (CHP) μπορεί να έχει εύρος από μερικά κιλοβάτ έως λίγα μεγαβάτ. Ένα σύστημα συμπαράγωγής ενέργειας για μια κατοικία μπορεί να παρέχει ηλεκτρική ενέργεια, θέρμανση χώρων καθώς και θέρμανση νερού. Επίσης μπορεί να προστεθεί ακόμη και η ψύξη χώρου, με την ενσωμάτωση μιας ειδικής αντλίας θερμότητας ή ψύκτη απορρόφησης στο σύστημα ή με κάποια άλλη μέθοδο μέσω της οποίας αξιοποιείται η θερμότητα που αποβάλλεται από τις κυψέλες καυσίμου σε έναν κύκλο διπλής λειτουργίας θέρμανσης /ψύξης. Τα συστήματα CHP (συμπεριλαμβανομένου και τα συστήματα συμπαράγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, θέρμανσης και ψύξης) μπορούν να φτάσουν συνολικές αποδόσεις έως και 80%, ωστόσο γίνονται περαιτέρω μελέτες και έρευνα για την επίλυση τεχνικών προβλημάτων και την μείωση του κόστους κεφαλαίου. Οι PEM κυψέλες καυσίμου θεωρούνται ιδανικές για συστήματα συμπαράγωγής σε επίπεδο κατοικίας, ενώ κυψέλες καυσίμου υψηλών θερμοκρασιών θεωρούνται ιδανικότερες για μεγαλύτερα οικοδομικά τετράγωνα. Τα συστήματα κυψελών καυσίμου που χρησιμοποιούνται για συμπαράγωγή μπορούν να είναι υποβοηθούμενα από το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης ή τελείως ανεξάρτητα από αυτό. Ωστόσο, όσο αφορά τα αυτόνομα συστήματα, η πολυπλοκότητα του συστήματος και η αύξηση του συνολικού κόστους (αφού το σύστημα θα πρέπει να αντιμετωπίσει δυναμικές διακυμάνσεις φορτίου) γίνεται περισσότερη αισθητή σε επίπεδο οικίας. Η υπερδιαστασιολόγηση των συστημάτων κυψελών καυσίμου και η ενσωμάτωση μπαταριών ή υπερπυκνωτών στο σύστημα είναι δυο πιθανές λύσεις του παραπάνω προβλήματος, αλλά και οι δυο αυτές λύσεις έχουν ως επακόλουθο την αύξηση του κόστους και την πολυπλοκότητα του συστήματος. Από την άλλη πλευρά, τα συστήματα τα οποία είναι υποβοηθούμενα από το κεντρικό δίκτυο εξάγουν ηλεκτρικό ρεύμα στο δίκτυο κατά την διάρκεια περιόδων χαμηλής ζήτησης και παίρνουν ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο κατά την διάρκεια περιόδων υψηλής ζήτησης. Και στις δυο περιπτώσεις, είναι απαραίτητο ένα σύστημα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας για ένα αποδοτικό σύστημα συμπαράγωγής. Όσο αφορά εκπομπές βλαβερών αερίων, σε βάση αξιολόγησης κύκλου ζωής, οι κυψέλες MCFCs και PAFCs, όταν χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ως καύσιμο για συμπαράγωγή ενέργειας, εκπέμπουν 78-88% λιγότερα οξειδία του αζώτου ( $NO_x$ ) και 90-99% λιγότερο μονοξείδιο του άνθρακα σε σύγκριση με άλλες τεχνολογίες εσωτερικής καύσης για συστήματα CHP. [30]

### **5.6.8.4) Εφαρμογές μεταφοράς**

Η βιομηχανία μεταφορών έχει σημαντικό μερίδιο στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου παγκοσμίως. Έως το 2010 εθεωρείτο υπεύθυνη για το 17% των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, κάθε χρόνο παγκοσμίως. Για αυτό το λόγο, οι προοπτικές της συγκεκριμένης

βιομηχανίας είναι η επένδυση στην ανάπτυξη τεχνολογίας, η οποία μειώνει τις βλαβερές εκπομπές αερίων και ταυτόχρονα είναι πολύ αποδοτική. Τα τελευταία χρόνια φαίνεται πως οι αυτοκινητοβιομηχανίες στρέφονται σε ηλεκτρικά οχήματα, υβριδικά ή ακόμη και οχήματα με κυψέλες καυσίμου υδρογόνου, σε μια προσπάθεια να ακολουθήσουν το παραπάνω μοντέλο. Οι κυψέλες καυσίμου συγκεκριμένα, προσφέρουν σχεδόν μηδενικές εκπομπές βλαβερών αερίων χωρίς να χρειάζεται να μειωθεί η απόδοση και οι επίδοσης του οχήματος. Συγκεκριμένα οι κυψέλες καυσίμου έχουν συνήθως αποδόσεις από 53-59% οι οποίες είναι σχεδόν διπλάσιες σε σύγκριση με τις αποδόσεις των συμβατικών κινητήρων εσωτερικής καύσης. Όταν λαμβάνονται υπόψη οι χαμηλές απαιτήσεις για συντήρηση, η ευελιξία καυσίμου και η στατική λειτουργία, οι κυψέλες καυσίμου γίνονται ιδανική εναλλακτική για τους κινητήρες εσωτερικής καύσης. Αυτό ισχύει, όταν η ανθεκτικότητα, η υποδομή υδρογόνου, το κόστος και οι τεχνικοί στόχοι επιτυγχάνονται σύμφωνα με τον σχεδιασμό και τις απαιτήσεις του κάθε συστήματος. Το μερίδιο των αποστολών κυψελών καυσίμου που σχετίζονται με τον τομέα των μεταφορών σε παγκόσμια κλίμακα συνέβαλε 35% και 25% των συνολικών συστημάτων κυψελών καυσίμου που αποστάλθηκαν σε επίπεδο μονάδας και σε επίπεδο MW αντίστοιχα, το 2010, με τις PEM κυψέλες καυσίμου ως την κυριαρχούσα επιλογή τύπου κυψέλης. Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες αγορών του τομέα μεταφοράς, όπως τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου ελαφρού φορτίου (L-FCEVs, Light-Fuel Cell Electric Vehicles), τα οποία έχουν πιο λιγότερο θορυβώδη λειτουργία (χάρη στην στατική φύση των κυψελών καυσίμου-απουσία κινούμενων μερών) σε σύγκριση με τους κινητήρες εσωτερικής καύσης, υψηλότερη απόδοση, λιγότερες-σχεδόν μηδενικές εκπομπές βλαβερών αερίων (για την περίπτωση όπου χρησιμοποιούνται ΑΠΕ για την παραγωγή του υδρογόνου και επίσης είναι πιο ευέλικτα ως προς τον σχεδιασμό τους. Σε σύγκριση με τα ηλεκτρικά οχήματα με μπαταρία, τα ηλεκτρικά οχήματα με κυψέλη καυσίμου παρέχουν μεγαλύτερο εύρος, μικρότερο χρόνο ανεφοδιασμού (διάρκειας μερικών λεπτών), μεγαλύτερο ανθεκτικότητα προς τις χαμηλές θερμοκρασίες και μικρότερο βάρος. Ωστόσο, το συνολικό κόστος του κύκλου ζωής και η διάρκεια ζωής των κυψελών καυσίμου είναι ο λόγος για τον οποίο τα ηλεκτρικά οχήματα κυψελών καυσίμου δεν είναι διαδεδομένα ευρέως στην αγορά. Άλλα τεχνικά προβλήματα που χρήζουν επίλυσης σχετίζονται με την εκκίνηση σε πολύ κρύο καιρό και υπό συνθήκες ψύχους, η αντοχή των κυψελών σε συχνούς κύκλους εκκίνησης και τερματισμού λειτουργίας, τα σπάντα ασφαλείας του υδρογόνου, η ύγρανση της μεμβράνης και άλλα. Λόγω των εγγενών πλεονεκτημάτων (που σχετίζονται με τη δυναμική απόκριση, θερμοκρασία λειτουργίας, μέγεθος συστήματος, κ.α.), οι PEM κυψέλες καυσίμου υπερτερούν των άλλων τύπων κυψέλης καυσίμου και συγκεκριμένα οι PEM κυψέλες καυσίμου υδρογόνου χρησιμοποιούνται συνήθως σε έρευνες για ηλεκτρικά οχήματα κυψέλης καυσίμου. Τεράστιες εταιρίες κατασκευής αυτοκινήτων όπως οι Toyota, Mazda, Volvo, Hyundai, Nissan, Volvo και Volkswagen προχωρούν σταθερά προς την διάδοση στην αγορά τέτοιου τύπου οχημάτων.[30]



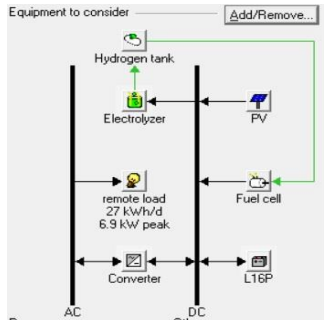
## Κεφάλαιο 6: Τεχνοοικονομική αξιολόγηση με λογισμικό HOMER

Το HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) είναι λογισμικό που αναπτύχθηκε από το εθνικό εργαστήριο ανανεώσιμης ενέργειας (NREL-National Renewable Energy Laboratory) των Η.Π.Α. Το HOMER εκτελεί ωριαίες προσομοιώσεις του κάθε πιθανού συνδυασμού εξαρτημάτων (και μεγέθη αυτών), που έχουν εισαχθεί από τον χρήστη για το απαιτούμενο σύστημα. Οι συνδυασμοί αυτοί γίνονται με κριτήρια καθορισμένα από τον χρήστη όπως το κόστος ενέργειας (COE-Cost Of Energy) και κόστη κεφαλαίου (CC-Capital Costs). Γενικά, το HOMER είναι διαδεδομένο εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως για την διαστασιολόγηση και την βελτιστοποίηση συστημάτων ενέργειας, αυτόνομα ή όχι. Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, χρησιμοποιήθηκε το HOMER για την βέλτιστη διαστασιολόγηση συστήματος, το οποίο αποτελείται από φωτοβολταϊκά πάνελ, μπαταρίες, κυψέλη καυσίμου, ηλεκτρολύτη, δεξαμενή αποθήκευση υδρογόνου αλλά και inverter και rectifier. Για το κάθε κομμάτι του συστήματος δόθηκαν διάφορα μεγέθη, έτσι ώστε να βρεθεί η κατάλληλη διαστασιολόγηση και το κόστος αυτής. Η διαδικασία της βελτιστοποίησης ολοκληρώνεται αφού εκτελεστούν οι προσομοιώσεις όλων των πιθανών διαμορφώσεων του συστήματος. Η έκδοση του HOMER που χρησιμοποιήθηκε στα πλαίσια αυτής της εργασίας είναι η HOMER Legacy.

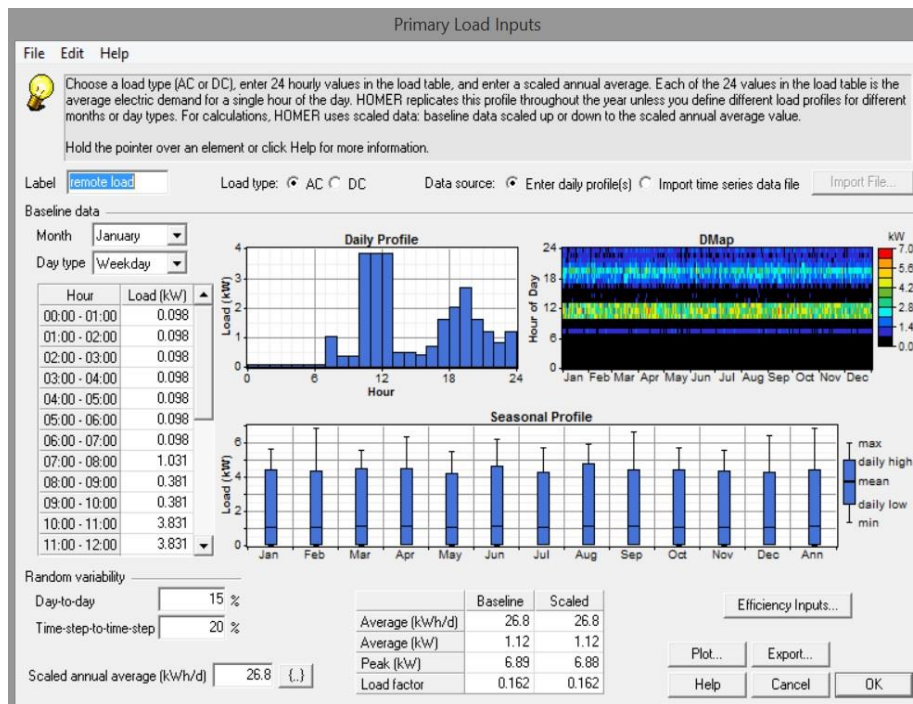
Το αυτόνομο υβριδικό σύστημα, το οποίο θα αξιολογηθεί και διαστασιολογηθεί στο HOMER, θα πρέπει να παράγει και να αποθηκεύει αρκετή ενέργεια για την κάλυψη των αναγκών μιας οικίας τετραμελούς οικογένειας στην Ζάκυνθο, κατά την διάρκεια όλου του έτους. Για την σχεδίαση του συστήματος θεωρήθηκε πως κατά την διάρκεια του έτους θα γίνεται η μέγιστη κατανάλωση ενέργειας, η οποία είναι 27 kWh. Η λειτουργία του συστήματος και η διαχείριση της ενέργειας συνοψίζεται στα εξής βήματα:

- Κατά την διάρκεια της μέρας, η φωτοβολταϊκή συστοιχία θα παράγει ενέργεια για την κάλυψη της ενεργειακής ζήτησης (του φορτίου). Η περίσσεια ενέργειας θα φορτίζει τις μπαταρίες και θα παρέχει ενέργεια στον ηλεκτρολύτη για την παραγωγή υδρογόνου και την αποθήκευση του στη δεξαμενή.
- Κατά την διάρκεια της νύχτας (ή τις μέρες με λίγη ηλιοφάνεια), οι μπαταρίες θα εκφορτίζονται και το υδρογόνο που παράχθηκε θα χρησιμοποιείται στην κυψέλη καυσίμου με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Οι μπαταρίες και η κυψέλη καυσίμου θα πρέπει να καλύπτουν πλήρως το φορτίο στην περίπτωση μηδενικής ηλιοφάνειας.

Το μέσο AC φορτίο, η κατανάλωση ημερησίως, καθώς και μηνιαίως στο HOMER, φαίνονται στο διάγραμμα 12:

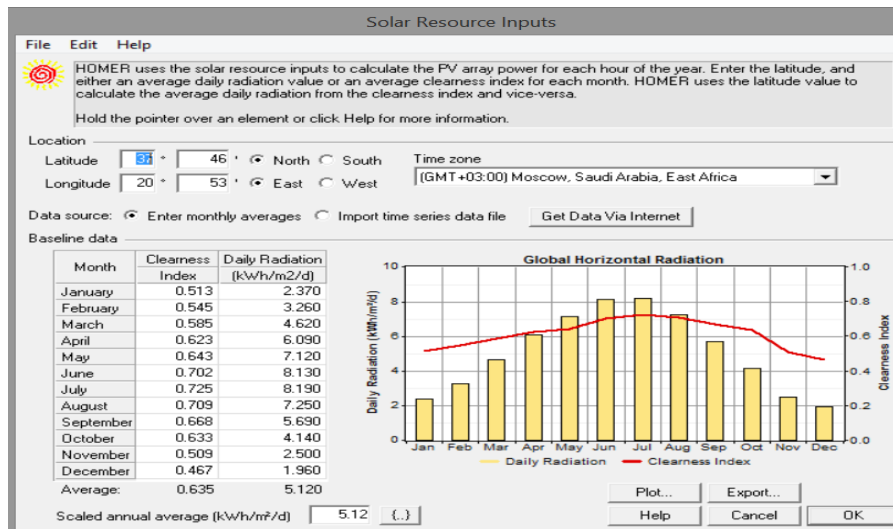


Διάγραμμα 12:Προτεινόμενη διάταξη συστήματος και εξοπλισμός.



Διάγραμμα 13: Προφίλ κύριου φορτίου

Στο διάγραμμα 13 φαίνεται το ημερήσιο προφίλ του φορτίου και παρατηρείται ότι κατά τις 12:00 μ.μ. το φορτίο που πρέπει να καλυφθεί είναι το μέγιστο(περίπου 4kW). Έπειτα υπάρχει μια πτώση στο φορτίο που δεν ξεπερνά το 1kW μέχρι τις 6:00μ.μ., όπου παρατηρείται μια αύξηση στο φορτίο (κοντά στα 3kW) μέχρι τα μεσάνυχτα με αυξομειώσεις. Το διάστημα από τις 12:00π.μ. έως 7:00μ.μ. το φορτίο είναι ελάχιστο (σχεδόν μηδενικό). Τα βασικά κομμάτια του συστήματος είναι: φωτοβολταϊκά πάνελ, μπαταρίες, ηλεκτρολύτη για την παραγωγή υδρογόνου, δοχεία για την αποθήκευση υδρογόνου υπό την μορφή συμπιεσμένου αερίου και κυψέλη καυσίμου για την παραγωγή ενέργειας από υδρογόνο. Το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας θα παράγεται από τα φωτοβολταϊκά και για την κατάλληλη διαστασιολόγηση τους είναι απαραίτητος ο υπολογισμός της ηλιακής ακτινοβολίας στην περιοχή που βρίσκεται η οικία. Τα δεδομένα σχετικά με την ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία βρέθηκαν μέσω του HOMER και είναι τα εξής:



Διάγραμμα 14:Στοιχεία ηλιακής ακτινοβολίας

Στην μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία (διάγραμμα 14) δίνεται η τιμή 5.12 kWh/m<sup>2</sup>/d. Για λόγους σύγκρισης χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό PVGISόπου βρέθηκε η μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία για τα έτη 2015 και 2016 στην περιοχή ενδιαφέροντος, όπως φαίνεται στον πίνακα 10:

| ΜΗΝΑΣ       | 2015   | 2016    | 2015<br>(kW/m <sup>2</sup> /day) | 2016<br>(kWh/m <sup>2</sup> /day) |
|-------------|--------|---------|----------------------------------|-----------------------------------|
| ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ  | 86,49  | 97,59   | 2,88                             | 3,25                              |
| ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ | 87,83  | 84,46   | 2,92                             | 2,82                              |
| ΜΑΡΤΙΟΣ     | 74,82  | 106,06  | 2,49                             | 3,54                              |
| ΑΠΡΙΛΙΟΣ    | 177,9  | 168,16  | 5,93                             | 5,60                              |
| ΜΑΙΟΣ       | 214,91 | 191,73  | 7,16                             | 6,39                              |
| ΙΟΥΝΙΟΣ     | 219,57 | 212,21  | 7,32                             | 7,07                              |
| ΙΟΥΛΙΟΣ     | 266,69 | 266,26  | 8,89                             | 8,87                              |
| ΑΥΓΟΥΣΤΟΣ   | 215,09 | 229,74  | 7,17                             | 7,66                              |
| ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ | 167,5  | 162,49  | 5,58                             | 5,42                              |
| ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ   | 108    | 118,33  | 3,60                             | 3,94                              |
| ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ   | 109,24 | 83,31   | 3,64                             | 2,78                              |
| ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ  | 99,09  | 113,84  | 3,30                             | 3,79                              |
|             |        | Average | 5,07                             | 5,09                              |

Πίνακας 10:Μέση ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία για τα έτη 2015 και2016.

Η φωτοβολταϊκή συστοιχία επιλέχθηκε με βάση δυο κύριες παραμέτρους: το κόστος και η ισχύς. Για το σύστημα, το οποίο αναλύθηκε στο HOMER, επιλέχθηκε το μονοκρυσταλλικό πάνελMAXEONSPR-MAX2-360W. Αυτό το φωτοβολταϊκό πάνελ έχει ισχύ αιχμής ίση με 360W και το κόστος ανά πάνελ ανέρχεται σε 305€. Η φωτοβολταϊκή συστοιχία έχει νότια κατεύθυνση (αζιμούθιο 0). Τα φωτοβολταϊκά πάνελ θα έχουν μόνιμη ετήσια κλίση 27°, που θεωρείται βέλτιστη για την περιοχή της Ζακύνθου με τις δοθείσες συντεταγμένες (Βόρεια: 37° 46' 57", Νότια: 20° 53' 50").Το μήκος του επιλεγθέντος πάνελ είναι: 1,69mκαι το πλάτος είναι: 1,046m.

Στο HOMER καταχωρήθηκε το κόστος 1 kW, δηλαδή το κόστος περίπου τριών φωτοβολταϊκών πάνελ. Επιπλέον, στο HOMER υπάρχει μια στήλη με το όνομα: sizes to consider. Αυτή η στήλη υπάρχει για κάθε εξάρτημα, το οποίο αποτελεί μέρος του συστήματος που αξιολογείται, και έχει ως στόχο την επεκτασιμότητα του βέλτιστου συστήματος. Το HOMER χρησιμοποιεί τις τιμές, που έχει βάλει ο χρήστης στη στήλη sizes to consider, για να προσομοιώσει συστήματα με διαφορετικά μεγέθη εξαρτημάτων. Τελικά, το πρόγραμμα καθορίζει ποιο μέγεθος καλύπτει τις ανάγκες του συστήματος με βάση το χειρότερο σενάριο (στην περίπτωση των φωτοβολταϊκών πάνελ, το χειρότερο σενάριο αποτελεί ο μήνας με την λιγότερη μέση ηλιοφάνεια). Για παράδειγμα, αν μια φωτοβολταϊκή συστοιχία εγκατεστημένης ισχύος 10kW παρέχει αρκετή ενέργεια για την κάλυψη του φορτίου για το 90% του έτους, το πρόγραμμα θα απορρίψει το σύστημα καθώς το 10% των ενεργειακών αναγκών δεν πληρούνταν. Οπότε το πρόγραμμα βρίσκει τα κατάλληλα μεγέθη των βασικών κομματιών του συστήματος με σκοπό την κάλυψη του 100% των ενεργειακών αναγκών. Για την εύρεση του ζητούμενου βέλτιστου συστήματος, δίνονται επιπλέον διάφορες τιμές για το μέγεθος της κυψέλης καυσίμου, του ηλεκτρολύτη, της δεξαμενής υδρογόνου και της ποσότητας των μπαταριών. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για το κάθε κομμάτι του συστήματος φαίνονται στους παρακάτω πίνακες (πίνακες 11,12):

Πίνακας 11: Τα κόστη των βασικών εξαρτημάτων του συστήματος

|                                      | Κόστος κεφαλαίου | Κόστος αντικατάστασης | Κόστη λειτουργίας και συντήρησης |
|--------------------------------------|------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Φωτοβολταϊκά πάνελ                   | 1000\$/kW        | 1000\$/kW             | 5\$/yr                           |
| Ηλεκτρολύτης                         | 100\$/kW         | 100\$/kW              | 8\$/yr                           |
| Υδρογόνο                             | 10000\$/100kg    | 10000\$/100kg         | 1000\$/yr                        |
| Κυψέλη καυσίμου                      | 400\$/kW         | 400\$/kW              | 0.010\$/hr                       |
| Μπαταρίες                            | 500\$/μπαταρία   | 500\$/μπαταρία        | 5\$/yr                           |
| Μετατροπείς (inverter και rectifier) | 100\$/kW         | 100\$/kW              | 10\$/yr                          |

Πίνακας 12: Παράμετροι εξαρτημάτων συστήματος

|                                      | Επιλογές στα μεγέθη των εξαρτημάτων | Διάρκεια ζωής |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| Φωτοβολταϊκά πάνελ                   | 5,8,9,10,12,15,20,25 kW             | 25 έτη        |
| Ηλεκτρολύτης                         | 1,5,10,20,30 kW                     | 15 έτη        |
| Υδρογόνο                             | 1,2,5,8,10 kg                       | 20 έτη        |
| Κυψέλη καυσίμου                      | 0.5,0.8,1,2,5 kW                    | 50000 ώρες    |
| Μπαταρίες                            | 4,8 μπαταρίες                       | 7 έτη         |
| Μετατροπείς (inverter και rectifier) | 1,2,4,8,10,12 kW                    | 20 έτη        |

## 6.1) Τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης

Η βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος βρέθηκε μετά την διεξαγωγή πολλών προσομοιώσεων με μέση ηλιακή ακτινοβολία  $5.12 \text{ kWh/m}^2/\text{μέρα}$  και λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά μεγέθη ισχύος για τα εξαρτήματα ή μονάδες ποσότητας. Η εγκατεστημένη ισχύς της φωτοβολταϊκής συστοιχίας ποικίλλει από 5 έως 25kW, η κυψέλη καυσίμου μπορούσε να έχει μέγεθος μέσα στο εύρος 0.5-5kW, ο ηλεκτρολύτης από 1 έως 30kW και το μέγεθος των μετατροπέων μπορούσε να είναι μέσα στο εύρος 1-12kW. Για την αποθήκευση του υδρογόνου επιλέχθηκε η μέθοδος του συμπιεσμένου αερίου και η ποσότητα του υδρογόνου που δύναται να αποθηκευτεί στο σύστημα μπορούσε να είναι από 1 έως 10kg. Επιλέχθηκε αυτή η μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου επειδή είναι η πιο διαδεδομένη, η απλούστερη από άποψη εξοπλισμού και έχει χαμηλότερο κόστος σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους αποθήκευσης υδρογόνου που αναφέρθηκαν παραπάνω. Σε αυτό το πλαίσιο, το HOMER βρήκε το βέλτιστο σύστημα για την κάλυψη του φορτίου, το οποίο φαίνεται στον πίνακα 13:

Πίνακας 13: Βέλτιστη διαστασιολόγηση σύμφωνα με το HOMER

|  |            |
|--|------------|
| <b>Φωτοβολταϊκά πάνελ (kW)</b>         | <b>20</b>  |
| <b>*Κυψέλη καυσίμου (kW)</b>           | <b>0.8</b> |
| <b>Μπαταρίες (μονάδες συσσωρευτών)</b> | <b>8</b>   |
| <b>Inverter (kW)</b>                   | <b>8</b>   |
| <b>Rectifier (kW)</b>                  | <b>8</b>   |
| <b>Ηλεκτρολύτης (kW)</b>               | <b>10</b>  |
| <b>Δεξαμενή υδρογόνου (kg)</b>         | <b>2</b>   |

\*Ένας προσεγγιστικός τρόπος για τον υπολογισμό της κατάλληλης ισχύος της κυψέλης καυσίμου για τη κάλυψη του φορτίου είναι η διαίρεση του φορτίου με 365 μέρες/έτος και 24 ώρες/μέρα. Στην συγκεκριμένη περίπτωση έχουμε  $(27\text{kWh} \cdot 365 \text{ μέρες} = 9855\text{kWh}/\text{έτος})$   $9855\text{kWh}/365 \text{ μέρες}/24 \text{ ώρες}/\text{μέρα} = 1,125\text{kW}$ . Αυτό το αποτέλεσμα έχει απόκλιση 0,325kW από την ισχύ, που εμφάνισε το HOMER ως ιδανική. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι στην παραπάνω σχέση, η χρήση της κυψέλης καυσίμου είναι 24ωρη για την κάλυψη όλου του φορτίου κατά τη διάρκεια ολόκληρης της μέρας, για όλο το έτος, κάτι που δεν ισχύει για το συγκεκριμένο σύστημα όπου το 91% της παραγόμενης ενέργειας για την κάλυψη του φορτίου γίνεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ.

Η βέλτιστη εγκατεστημένη ισχύ για τα φωτοβολταϊκά πάνελ, σύμφωνα με το HOMER, είναι 20kW. Οπότε απαιτούνται  $\frac{20000 \text{ W}}{360 \text{ W}/\text{πάνελ}} = 55,55 \rightarrow 56$  φωτοβολταϊκά πάνελ. Η επιφάνεια που καλύπτει ένα φωτοβολταϊκό πάνελ είναι  $(1,69\text{m} \cdot 1,046\text{m}) 1,77\text{m}^2$ . Συνεπώς, η συνολική επιφάνεια των φωτοβολταϊκών πάνελ είναι  $(56 \text{ πάνελ} \cdot 1,77 \text{ m}^2 / \text{πάνελ}) 99,12 \text{ m}^2$ . Η απόσταση των φωτοβολταϊκών σειρών δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$d=L \cdot \cos(\beta)+2 \cdot L \cdot \sin(\beta)$$

όπου L: το μήκος του φωτοβολταϊκού πάνελ και  $\beta$  η σταθερή ετήσια κλίση των πάνελ.

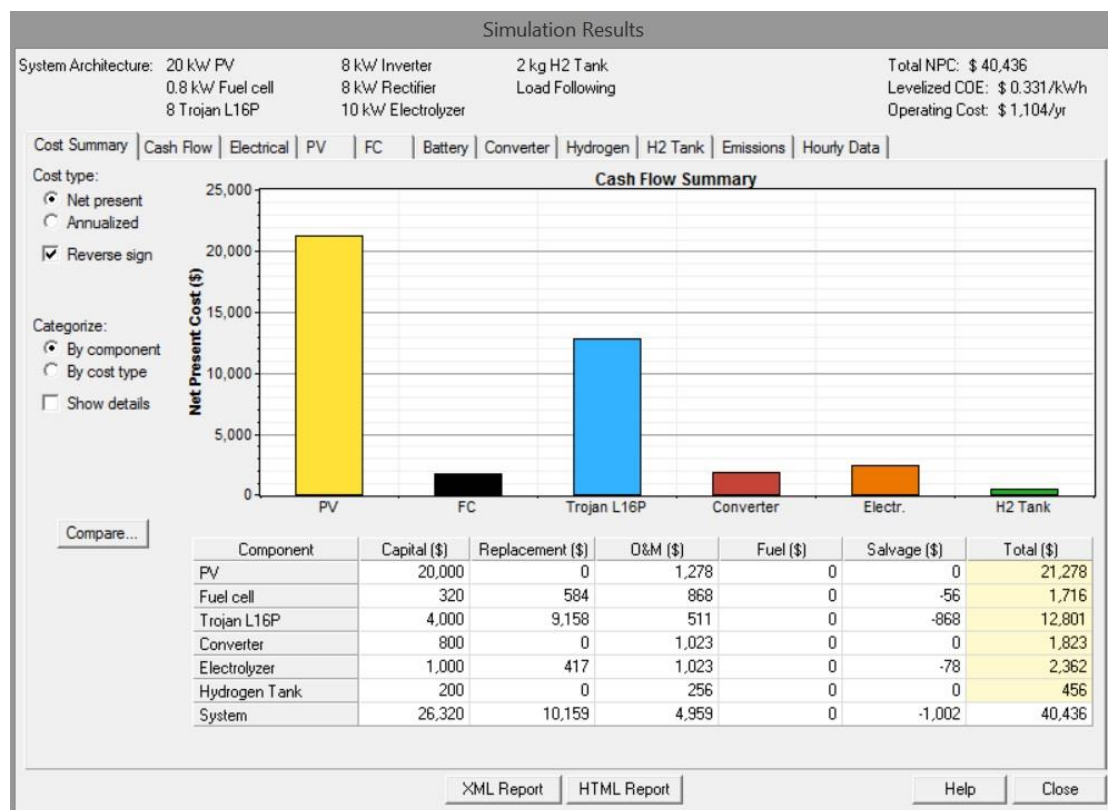
Οπότε:  $d=1.69 \cdot \cos(27^\circ)+2 \cdot 1.69 \cdot \sin(27^\circ)=3.04\text{m}$

Κοντά στην οικία υπάρχει διαθέσιμη έκταση που μπορεί να αξιοποιηθεί για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πάνελ και δεν βρίσκεται κοντά εμπόδια ή σε δρόμο.



Διάγραμμα 15: Αεροφωτογραφία της διαθέσιμης περιοχής για την εγκατάσταση των φωτοβολταϊκών πάνελ

Πρόκειται για έκταση 352 τ.μ. με περίμετρο 77,4 μέτρα. Στην βέλτιστη εκδοχή του συστήματος (βέλτιστες διαστάσεις εξαρτημάτων), το οποίο έχει διάρκεια ζωής 25 έτη, το HOMER εξήγαγε μια περίληψη των χρηματικών ροών για το σύστημα, η οποία συνοψίζεται στο παρακάτω πίνακα:



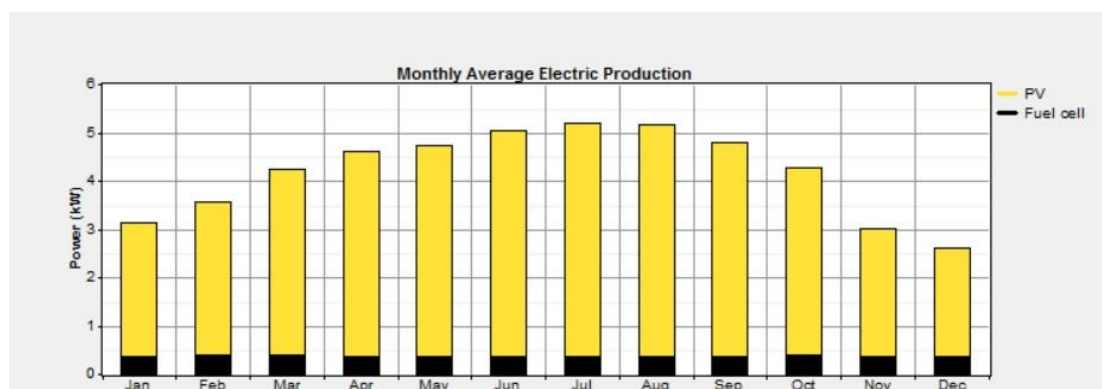
Διάγραμμα 16: Σύνοψη ταμειακών ροών (παρακάτω έχουν γίνει μετατροπές από \$ σε €)

Για τη βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος εξήγαγε και το συνολικό NPC (Net Present Cost), το οποίο είναι ίσο με 33,176.90€. Το συνολικό NPC (ή συνολικό καθαρό τρέχον κόστος) ενός συστήματος είναι η παρούσα αξία όλων των δαπανών που πραγματοποιεί το σύστημα κατά τη διάρκεια της ζωής του, μείον την παρούσα αξία όλων των εσόδων που



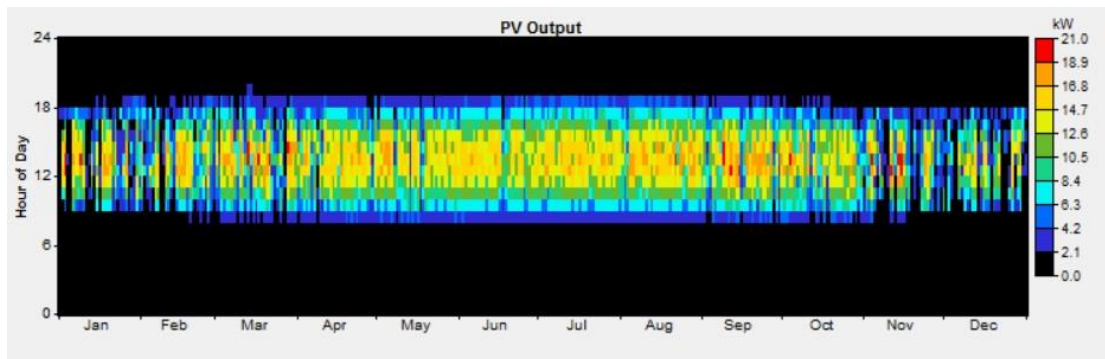
κερδίζει κατά τη διάρκεια της ζωής του. Επιπλέον, εμφανίζεται και το LCOE (ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας), το οποίο είναι ένα μέτρο του μέσου καθαρού παρόντος κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μιας μονάδας ή ενός συστήματος καθόλη τη διάρκεια ζωής του. Το LCOE αντιπροσωπεύει τα μέσα έσοδα ανά μονάδα παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας που θα απαιτηθεί για την ανάκτηση του κόστους κατασκευής και λειτουργίας (ή αγοράς) κατά τη διάρκεια ενός υποτιθέμενου οικονομικού κύκλου ζωής και λειτουργίας και υπολογίζεται ως ο λόγος μεταξύ όλων των προεξοφλημένων δαπανών κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διαιρεμένη με ένα μειωμένο άθροισμα των πραγματικών ενεργειακών ποσοτήτων που παραδόθηκαν. Το LCOE του συστήματος είναι 0.272€/kWh. Για λόγους σύγκρισης, αναφέρεται ότι η μέση τιμή κιλοβατώρας στην Ελλάδα το 2020, σύμφωνα με το <https://www.globalpetrolprices.com>, είναι 0.186€ για νοικοκυριά. Το αρχικό κόστος κεφαλαίου του συστήματος είναι 22,379\$. Το ακριβότερο κομμάτι του συστήματος είναι τα φωτοβολταϊκά πάνελ, των οποίων το κόστος κεφαλαίου είναι 17,005.36€ και αντιστοιχούν σχεδόν στο 50% του συνολικού NPC. Ωστόσο, παρατηρείται ότι τα πάνελ δεν αντικαταστάθηκαν ούτε μια φορά κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος (25 έτη).

Η συνολική παραγωγή ενέργειας του συστήματος είναι 36,863kWh/έτος, και το μεγαλύτερο μέρος αυτής παράγεται από τα φωτοβολταϊκά πάνελ (33,557kWh/έτος →91% της συνολικής παραγωγής ενέργειας). Από την κυψέλη καυσίμου παράγονται 3,306kWh/έτος που αντιστοιχεί στο 9% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας του συστήματος.



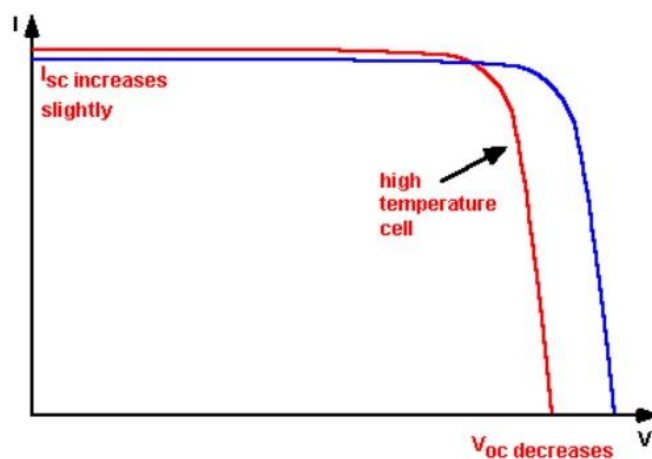
Διάγραμμα 17: Μέση μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας

Η προτινόμενη εγκατεστημένη ισχύς για τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι 20kW με μέση παραγωγή ενέργειας (meanPVoutput) 91.9kWh/μέρα. Γενικά, αναμένεται τα πάνελ να παράγουν ενέργεια σχεδόν κάθε μέρα του έτους με κάποιες εξαιρέσεις εξαιτίας των καιρικών συνθηκών. Κατά μέσο όρο, οι φωτοβολταϊκές συστοιχίες ξεκινούν να παράγουν ενέργεια από τις 7:00-8:00 π.μ. και σταματούν κατά τις 6:00 μ.μ. το οποίο φαίνεται στο διάγραμμα 18.



Διάγραμμα 18: Μέση ετήσια έξοδος πάνελ

Τα φωτοβολταϊκά πάνελ, σύμφωνα με τα αποτελέσματα του HOMER, λειτουργούν για 4380 ώρες/έτος με ισοσταθμισμένο κόστος ενέργειας 0.04€/kWh. Σύμφωνα με τη διαβαθμισμένη χρωματικά κλίμακα ισχύος, που βρίσκεται στα δεξιά του διαγράμματος, φαίνεται πως τα φωτοβολταϊκά πάνελ αποδίδουν την μεγαλύτερη ισχύ τους κατά τη διάρκεια του μεσημεριού των μερών των φθινοπωρινών (Σεπτέμβριος, Οκτώβριος, Νοέμβριος) και ανοιξιάτικων μηνών (Μάρτιος, Απρίλιος), όταν χρησιμοποιούνται σε κλίμα όπως αυτό της Ζακύνθου. Παρά το γεγονός ότι τους καλοκαιρινούς μήνες οι ώρες ηλιοφάνειας, καθώς και η ηλιακή ακτινοβολία είναι μεγαλύτερες από ότι τον υπόλοιπο χρόνο τα φωτοβολταϊκά πάνελ δεν φτάνουν την μέγιστη ισχύ τους. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι η ισχύς των πάνελ επηρεάζεται από την αύξηση της θερμοκρασίας. Η ονομαστική ισχύς (ισχύς αιχμής) του εκάστοτε πάνελ μετράται στους 25 βαθμούς Κελσίου (στις λεγόμενες STC συνθήκες, με  $G=1000\text{W}/\text{m}^2$ ) και με οποιαδήποτε αύξηση της θερμοκρασίας υπάρχουν απώλειες ισχύος. Συνήθως, η απώλεια ισχύος είναι της τάξης  $\sim 1\%$  για κάθε αύξηση των  $2^\circ\text{C}$  (διάγραμμα 19).

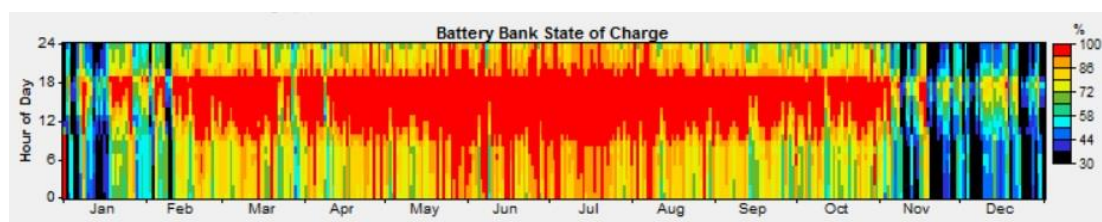


Διάγραμμα 19: Καμπύλη σύγκρισης ενός φωτοβολταϊκού στοιχείου υψηλής και χαμηλής θερμοκρασίας

Στη βέλτιστη διάταξη του συστήματος παραγωγής ενέργειας υπάρχουν 8 μπαταρίες Trojan L16P (1 στοιχειοσειρά συνδεδεμένη σε σειρά και 8 παράλληλα με συνολική τάση 6V). Η ονομαστική τους χωρητικότητα είναι 17.3kWh και η ονομαστική χρησιμοποιούμενη είναι 12.1kWh. Αυτές οι 8 μπαταρίες προσφέρουν 10.8 ώρες αυτονομίας στο σύστημα ημηρεσίως. Η ενέργεια που ( $E_{in}$ ) εισέρχεται στις μπαταρίες είναι 1,877kWh/έτος και αυτή που εξέρχεται ( $E_{out}$ ) είναι 1,607kWh/έτος. Πιο πάνω έχει γίνει αναφορά στο ρυθμό αυτο-εκφόρτισης που παρουσιάζουν οι μπαταρίες. Για τις

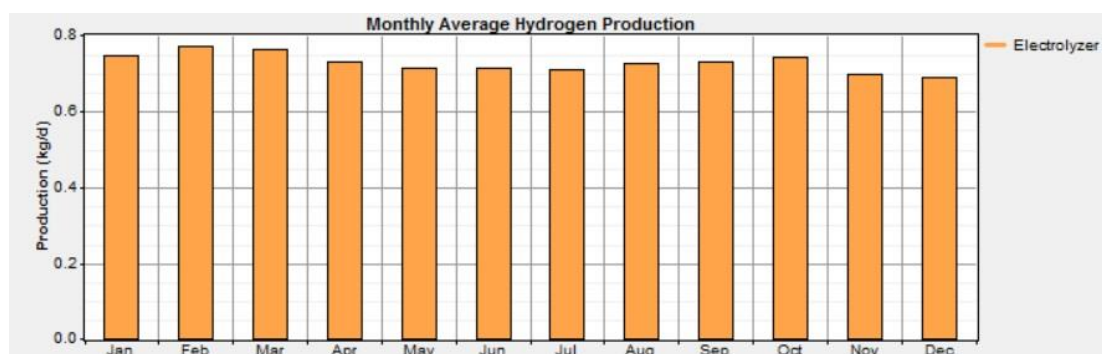


συγκεκριμένες μπαταρίες του συστήματος, το HOMERέβγαλε πως η μείωση της απόθηκευσης των μπαταριών είναι 12kWh/έτος και η αναμενόμενη διάρκεια ζωής τους, περίπου 5 χρόνιακαι με κόστος φθοράς μπαταρίας 0.43€/kWh και μέσο κόστος ενέργειας 0€/kWh.Στο διάγραμμα που σχετίζεται με τη κατάσταση φόρτισης της μπαταρίας (StateofCharge-SoC) φαίνεται πως κατά την διάρκεια των ωρών λειτουργίας (και παραγωγής ενέργειας) των πάνελ, οι μπαταρίες είναι φορτισμένες στο 100% σχεδόν για όλους τους μήνες του έτους. Οι μήνες κατά τους οποίους η κατάσταση φόρτισης των μπαταριών είναι χαμηλή για τις περισσότερες ώρες της μέρας είναι ο Νοέμβριος, ο Δεκέμβριος και ο Ιανουάριος, όπως φαίνεται στο διάγραμμα 20. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτοί οι μήνες είναι οι λιγότερο παραγωγικοί μήνες των φωτοβολταϊκών πάνελ.



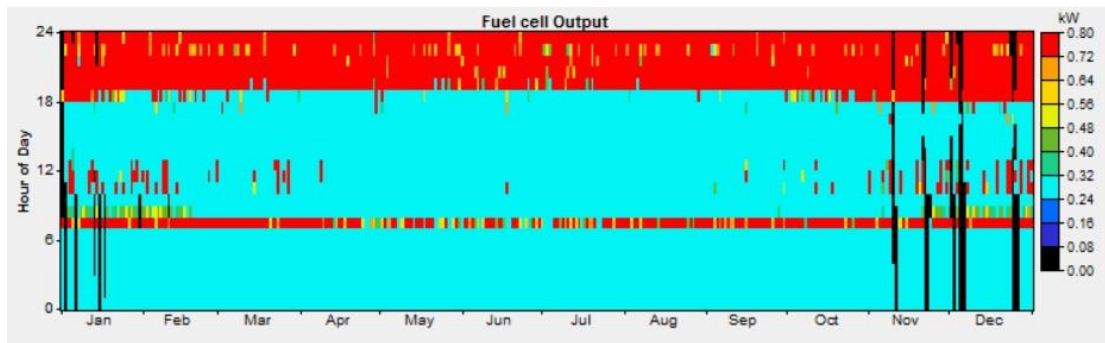
Διάγραμμα 20: Μέση ετήσια κατάσταση φόρτισης μπαταριών

Όσο αφορά το προτεινόμενο μέρος της κυψέλης καυσίμου, η βέλτιστη διάταξη συστήματος περιλαμβάνει μια κυψέλη καυσίμου ισχύος 0.8kW μαζί με ένα ηλεκτρολύτη ισχύος 10kW και μια δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου 2kg. Με αυτό το προτεινόμενο σύστημα, η κυψέλη καυσίμου θα παράγει ενέργεια για 8,492 ώρες ετησίως, με 25 εκκινήσεις λειτουργίας/έτος και η διάρκεια ζωής είναι περίπου 6 χρόνια (5.89 έτη σύμφωνα με τοHOMER). Ο συντελεστής χωρητικότητας της κυψέλης καυσίμου είναι 47.2% και η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 3,3036kWh/έτος, με μέση απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας 37.4% και με σταθερό κόστος παραγωγής 0.01€/ώρα. Η κατανάλωση καυσίμου (υδρογόνου) για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι 265kg/έτος ενώ η κατανάλωση καυσίμου για την παραγωγή 1kWh ενέργειας είναι 0.080kg. Η συνολική παραγωγή υδρογόνου από τον ηλεκτρολύτη είναι 266kg/έτος, με ισοσταθμισμένο κόστος ίσο με 9.74€/kg. Στο διάγραμμα 21 φαίνεται η μέση ημερήσια παραγωγή υδρογόνου για κάθε μήνα του έτους.



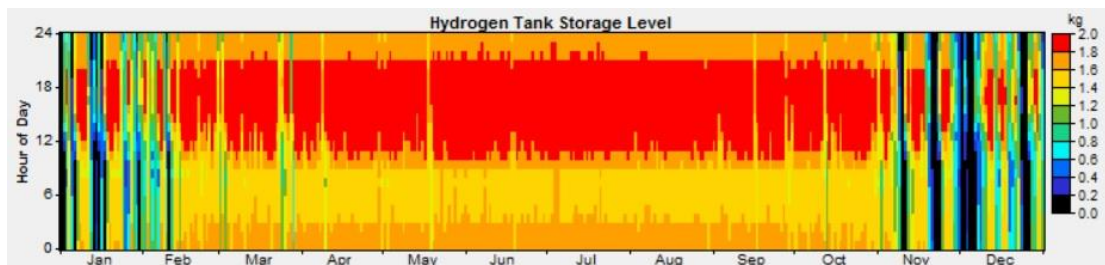
Διάγραμμα 21: Μέση μηνιαία παραγωγή υδρογόνου

Η μέση έξοδος ηλεκτρικής ισχύος (mean electrical output) είναι 0.389kW, ενώ η ελάχιστη είναι 0.240kW και η μέγιστη 0.8kW.Στο διάγραμμα 22 φαίνεται η έξοδος της κυψέλης καυσίμουγια κάθε ώρα της μέρας για ολόκληρο το έτος.



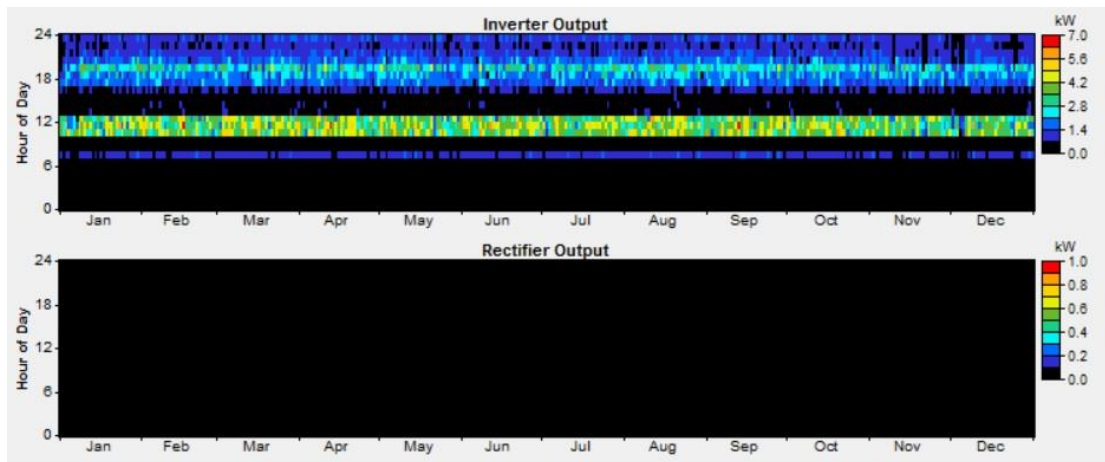
Διάγραμμα 22:Μέση ετήσια έξοδος κυψέλης καυσίμου

Στο διάστημα από της 6:00 μ.μ.-12:00 μ.μ., καθώς και στο διάστημα 7:00π.μ.-8:00π.μ. η έξοδος της κυψέλη καυσίμου είναι κυρίως η μέγιστη (0.8kW). Σχεδόν όλες τις υπόλοιπες ώρες, κατά τη διάρκεια όλου του έτους φαίνεται πως η έξοδος της κυψέλη καυσίμου έχει μια χαμηλή τιμή (0.24-0.40kW). Η κυψέλη καυσίμου και οι μπαταρίες χρησιμοποιούνται στο σύστημα,σε κάποιο βαθμό, σχεδόν ολόκληρη την μέρα, κάθε μήνα του έτους. Αντίθετα, τα φωτοβολταϊκά πάνελ, ναι μεν χρησιμοποιούνται κάθε μέρα του έτους αλλά για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα (τις ώρες της μέρας με ηλιοφάνεια). Οπότε παρατηρείται ότι το χρονικό διάστημα της μέρας όπου τα φωτοβολταϊκά πάνελ είναι παραγωγικά, η λειτουργία της κυψέλης καυσίμου είναι μέτρια και οι μπαταρίες, για το μεγαλύτερο μέρος του έτους, είναι πλήρως φορτισμένες (συνεπώς δεν χρησιμοποιούνται εκείνες τις ώρες για την κάλυψη του φορτίου).Τις υπόλοιπες ώρες της μέρας, το φορτίο καλύπτεται από τις μπαταρίες και την κυψέλη καυσίμου. Αυτό φαίνεται και από το διάγραμμα του επιπέδου της απόθηκευσης της δεξαμενής υδρογόνου (διάγραμμα 23).



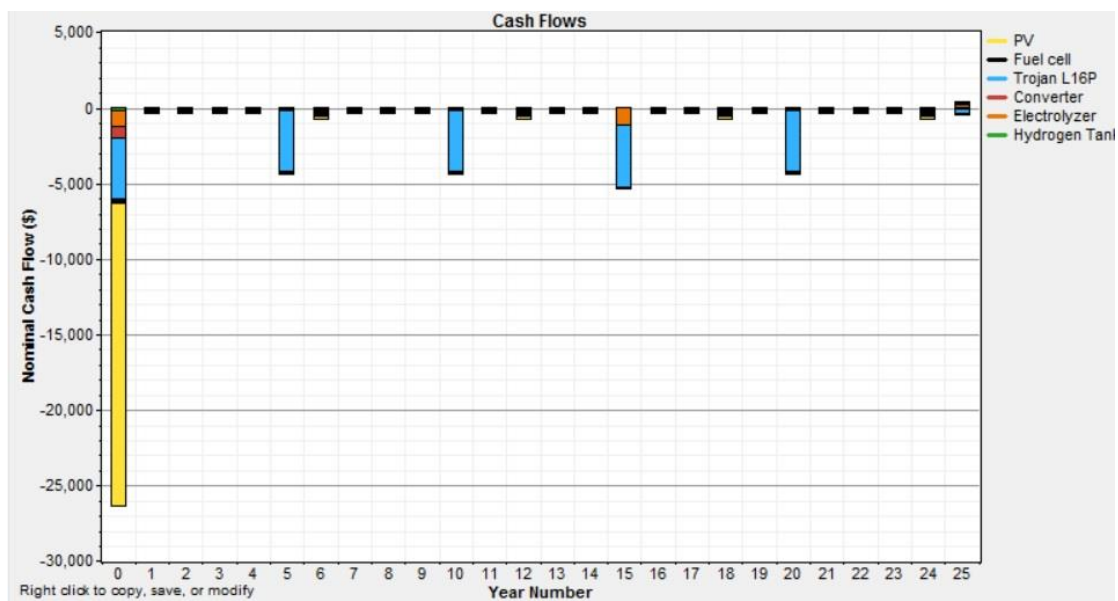
Διάγραμμα 23:Μέσο ετήσιο επίπεδο δεξαμενής υδρογόνου

Στο διάστημα 12:00μ.μ.-7:00μ.μ. η στάθμη του υδρογόνου στη δεξαμενή, η οποία προσφέρει 59.7 ώρες αυτονομίας, είναι μέγιστη (2kg) και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το φορτίο καλύπτεται εξολοκλήρου από τα φωτοβολταϊκά πάνελ (το AC κύριο φορτίο, το οποίο είναι 9,559kWh/έτοςκαι το φορτίο του ηλεκτρολύτη, το οποίο είναι 11,639kWh/έτος).Παρά το γεγονός ότι το HOMER,στη βέλτιστη διάταξη του συστήματος, προτείνει rectifier ισχύος 8kW, στο διάγραμμα εξόδου του rectifier φαίνεται πως δεν χρησιμοποιείται καθόλου. Σε αντίθεση με το διάγραμμα εξόδου του inverter (διάγραμμα 24), στο οποίο φαίνεται ότι χρησιμοποιείται και στις μεσημεριανές ώρες και στις βραδινές, καθώς και στις 7:00-8:00 π.μ. κατά τη διάρκεια του έτους.

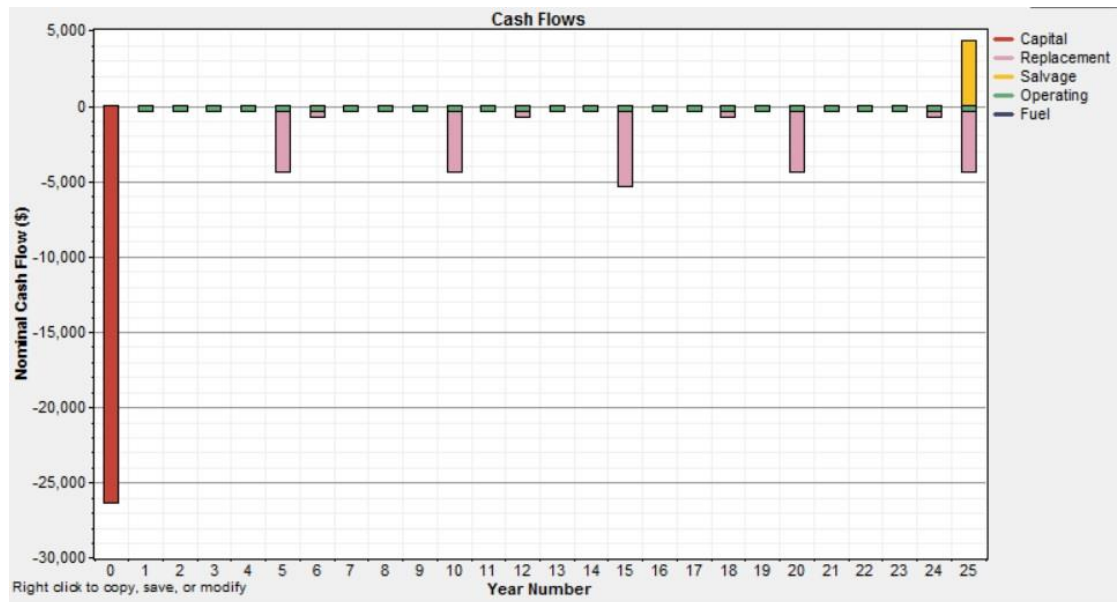


Διάγραμμα 24:Ετήσια έξοδος Inverterκαι Rectifier

Επιπλέον, στα αποτελέσματα του HOMER φαίνονται πως οι ώρες λειτουργίας του inverter είναι 8,661 ώρες/έτος (σε αντίθεση με του rectifier όπου εμφανίζονται 0 ώρες/έτος). Επίσης, η ενέργεια που εισέρχεται στον inverterείναι 10,621kWh/έτος (DC-συνεχούς ρεύματος- ενέργεια) και η ενέργεια που εξέρχεται είναι 9,559kWh/έτος (AC-εναλλασσόμενου ρεύματος- ενέργεια). Οι απώλειες του inverter είναι 1,062kWh/έτος. Στα προαναφερθέντα, τα αποτελέσματα τουHOMER έδειξαν μηδενική είσοδο και έξοδο ενέργειας για τον rectifier. Στα διαγράμματα 25,26 φαίνονται οι ταμειακές ροές κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος (25 έτη), ανά τύπο εξαρτήματος του συστήματος και ανά είδος κόστους, αντιστοίχως.



Διάγραμμα 25:Ταμειακές ροές ανά τύπο εξαρτήματος συστήματος



Διάγραμμα 26:Χρηματικές ροές ανά τύπο κόστους

Στα διαγράμματα 25,26 φαίνεται πως, πέραν του αρχικού κόστους κεφαλαίου για ολόκληρο το σύστημα, τα κόστη λειτουργίας των εξαρτημάτων είναι πολύ χαμηλά (με το κόστος λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου να φαίνεται πως είναι το μεγαλύτερο). Επιπλέον, παρατηρείται πως οι μπαταρίες θέλουν αντικατάσταση ανά 5 περίπου χρόνια και ο ηλεκτρολύτης χρειάζεται να αντικατασταθεί στα 15 χρόνια ζωής του συστήματος.

## Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας εξερευνήθηκε η προοπτική σχεδιασμού ενός αυτόνομου συστήματος παραγωγής ενέργειας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας οικίας στη Ζάκυνθο, στην οποία διαμένει μια τετραμελής οικογένεια. Χρησιμοποιώντας την αναφερόμενη βιβλιογραφία και το λογισμικό HOMER, βρέθηκε ένα σύστημα το οποίο είναι βασιζόμενο 100% σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και τελείως αποκομμένο από τα συμβατικά καύσιμα και το κεντρικό δίκτυο ηλεκτροδότησης και έχει διάρκεια ζωής 25 έτη. Κατά τη διάρκεια της διεξαγωγής της τεχνοοικονομικής αξιολόγησης του προτεινόμενου συστήματος αποκομίσθηκαν κάποια διδάγματα σχετικά με την σχεδίαση ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας. Πιο συγκεκριμένα, διαπιστώθηκε πως η σχεδίαση ενός συστήματος, που βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και όχι συμβατικά καύσιμα, γενικότερα επηρεάζεται από παράγοντες όπως η περιοχή εγκατάστασης του συστήματος, οι διαθέσιμοι πόροι της εκάστοτε περιοχής, το φορτίο που πρέπει να καλυφθεί, και σε συστήματα μεγαλύτερης κλίμακας, το αποτέλεσμα επηρεάζεται και από παράγοντες όπως η κοινή γνώμη. Συνήθως, όμως, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στη σχεδίαση ενός συστήματος τα ακόλουθα:

- Το κόστος μιας μονάδας (εξαρτήματος) επηρεάζει τη διαστασιολόγηση του συστήματος
- Τα βασικά κομμάτια-μέρη του συστήματος πρέπει να διαστασιολογούνται έτσι ώστε να μπορούν να εκπληρώνουν τον σκοπό τους (κάλυψη ενεργειακών αναγκών) υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες ή υπό συνθήκες υψηλής ζήτησης ενέργειας. Για παράδειγμα, σε ώρες αιχμής σε μέρες του έτους με ελάχιστη ηλιακή ακτινοβολία.
- Η απόδοση των εξαρτημάτων, καθώς και η ισχύ αιχμής, επηρεάζει το κόστος και τη διαστασιολόγηση του συστήματος.

Για παράδειγμα ένα φθηνότερο φωτοβολταϊκό πάνελ με μικρότερη ισχύ αιχμής ή απόδοση μπορεί να μοιάζει οικονομικότερη επιλογή από το φωτοβολταϊκό πάνελ που επιλέχθηκε για το προτεινόμενο σύστημα, όμως αν ληφθεί υπόψη πως για το συγκεκριμένο σύστημα που πρέπει να καλύψει μια συγκεκριμένη ημερήσια κατανάλωση (27kWh) θα πρέπει η συνολική εγκατεστημένη ισχύς να είναι 20kW, η πιο συμφέρουσα επιλογή είναι ένα πάνελ με μεγαλύτερη ισχύ αιχμής (kWp-kilowatt peak) ή/και μεγαλύτερη απόδοση. Με αυτό τον τρόπο θα αγοραστούν, τελικά, λιγότερα φωτοβολταϊκά πάνελ για την απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύ αντισταθμίζοντας έτσι το μεγαλύτερο κόστος που έχουν συγκριτικά με ένα φωτοβολταϊκό πάνελ μικρότερης ισχύος ή/και απόδοσης. Γενικά, το κόστος είναι ο πρώτος παράγοντας που εξετάζεται σε ένα σύστημα. Το σύστημα που παρουσιάζεται ως βέλτιστο για τη κάλυψη το φορτίου της οικίας στη Ζάκυνθο είναι μια φωτοβολταϊκή συστοιχία εγκατεστημένης ισχύος 20kW, 1 κυψέλη καυσίμου ισχύος 0.8kW, έναν ηλεκτρολύτη ισχύος 10kW, δεξαμενή αποθήκευσης υδρογόνου 2kg και 8 μπαταρίες Trojan L16P. Η σχεδίαση και διαστασιολόγηση του συστήματος έγινε με σκοπό να καλύπτει το φορτίο της οικίας για όλο το έτος και καλύπτει και τις ακραίες περιπτώσεις καιρικών συνθηκών. Ωστόσο, το σύστημα σκόπιμα υπερδιαστασιολογήθηκε, απαιτώντας την κάλυψη της μέγιστης ημερήσιας κατανάλωσης ενέργειας (27kWh). Υπό κανονικές συνθήκες αυτή η κατανάλωση δεν λαμβάνει χώρα

συχνά μέσα στο έτος. Παρόλα αυτά, διαστασιολογώντας το σύστημα με τέτοιο τρόπο ώστε να μπορεί να καλύπτει την μέγιστη ημερήσια κατανάλωση όλο το χρόνο, καλύπτονται όλα τα δυσμενή σενάρια, όπως μέρες με υψηλή ζήτηση σε ενέργεια ή μέρες με ελάχιστη ηλιοφάνεια.

Τα αποτελέσματα του HOMER, καθώς και η έρευνα στη βιβλιογραφία έδειξαν πως είναι βιώσιμο οικονομικά και περιβαλλοντικά ένα πλήρως αυτόνομο σύστημα παραγωγής ενέργειας χωρίς να βασίζεται καθόλου σε συμβατικά καύσιμα όπως το ντίζελ. Επίσης, η προσθήκη του υδρογόνου ως μέσο αποθήκευσης ενέργειας φαίνεται πολλά υποσχόμενη αυξάνοντας την αυτονομία του συστήματος κατά 59.7 ώρες, ενώ οι μπαταρίες έχουν αυτονομία 10.8 ώρες. Επίσης, το γεγονός ότι στο υδρογόνο δεν συναντάται η αυτό-εκφόρτιση ούτε υφίσταται κάποιος περιορισμός μέγιστου βάθους εκφόρτισης, όπως στις μπαταρίες, καθιστά το υδρογόνο σημαντικό και για την αποθήκευση ενέργειας αλλά και για την αξιοπιστία ενός συστήματος.



## Βιβλιογραφία

1. <https://www.envinow.gr/post/στόχοι-ενεργειακής-πολιτικής-σε-Ευρώπη-και-Ελλάδα-στροφή-προς-το-υδρογόνο> [25/08/2020].
2. <http://www.opengov.gr/minenv/wp-content/uploads/downloads/2012/04/EnPlan-RoadMap-2050-24april2012.pdf>
3. Yilancy, A., Dincer, I. and Ozturk, H., 2008. *A review on solar-hydrogen/fuel cell hybrid energy systems for stationary applications* pp.231-242. Available at: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128508000439>> [29/07/2020].
4. Kalamaras, C. and Efstathiou, A., 2017. *Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments*. [ebook] pp.2-7. Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/274231039\\_Hydrogen\\_Production\\_Technologies\\_Current\\_State\\_and\\_Future\\_Developments](https://www.researchgate.net/publication/274231039_Hydrogen_Production_Technologies_Current_State_and_Future_Developments)> [06/06/2021].
5. Rashid, M., Khaloofah Al Mesfer, M., Naseem, H. and Danish, M., 2015. *Hydrogen production by water electrolysis: A review of alkaline water electrolysis, PEM water electrolysis and High temperature water electrolysis*. [ebook] pp.84-86. Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/273125977\\_Hydrogen\\_Production\\_by\\_Water\\_Electrolysis\\_A\\_Review\\_of\\_Alkaline\\_Water\\_Electrolysis\\_PEM\\_Water\\_Electrolysis\\_and\\_High\\_Temperature\\_Water\\_Electrolysis](https://www.researchgate.net/publication/273125977_Hydrogen_Production_by_Water_Electrolysis_A_Review_of_Alkaline_Water_Electrolysis_PEM_Water_Electrolysis_and_High_Temperature_Water_Electrolysis)>[5/3/3021].
6. Naimi, Y. and Antar, A., 2018. *Hydrogen Generation by Water Electrolysis*. [ebook] pp.9-13. Available at: <<https://www.intechopen.com/books/advances-in-hydrogen-generation-technologies/hydrogen-generation-by-water-electrolysis>> [06/06/2021].
7. Gkanas, E., 2020. *Hydrogen technologies for mobility and stationary applications: hydrogen production, storage and infrastructure development*. [ebook] pp.11-15. Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/344201619\\_Hydrogen\\_Technologies\\_for\\_Mobility\\_and\\_Stationary\\_Applications\\_Hydrogen\\_Production\\_Storage\\_and\\_Infrastructure\\_Development](https://www.researchgate.net/publication/344201619_Hydrogen_Technologies_for_Mobility_and_Stationary_Applications_Hydrogen_Production_Storage_and_Infrastructure_Development)> [06/06/2021].
8. Energy.gov. 2021. *Safe Use of Hydrogen*. [online] Available at: <<https://www.energy.gov/eere/fuelcells/safe-use-hydrogen>>[06/06/2021]
9. Irena.org. 2021. *Wind*. [online] Available at: <<https://www.irena.org/wind>> .[06/06/2021]
10. Irena.org. 2021. *Hydropower*. [online] Available at: <<https://www.irena.org/hydropower>> .[14/05/2021]
11. Irena.org. 2021. *Ocean*. [online] Available at: <<https://www.irena.org/ocean>> [Accessed 7 June 2021]. [14/05/2021]
12. Irena.org. 2021. *Bioenergy*. [online] Available at: <<https://www.irena.org/bioenergy>>.[14/05/2021]

13. Irena.org.2021.Geothermal.[online]Available at:<<https://www.irena.org/geothermal>>.[14/05/2021]
14. Irena.org.2021.Solar.[online]Available at:<<https://www.irena.org/solar>>[14/05/2021]
15. Rhodes, C.,2010, *Solar energy:principles and possibilities*. [ebook] Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/41908709\\_Solar\\_Energy\\_Principles\\_and\\_Possibilities](https://www.researchgate.net/publication/41908709_Solar_Energy_Principles_and_Possibilities)> [07/06/2021].
16. CSP systems.<https://www.seia.org/initiatives/concentrating-solar-power>[06/06/2021]
17. <https://www.energy.gov/eere/solar/concentrating-solar-thermal-power-basics>.[07/06/2021].
18. <https://ourworldindata.org/energy-access>.[06/06/2021]
19. Foroogh, S., Hazelton, J., Mekhilef, S. and Borhanazad, H., 2014. *Stand Alone renewable energy systems for rural development*. [ebook] pp.198-205. Available at: <[https://www.researchgate.net/publication/281641340\\_Stand\\_Alone\\_Renewable\\_Energy\\_Systems\\_for\\_Rural\\_Development](https://www.researchgate.net/publication/281641340_Stand_Alone_Renewable_Energy_Systems_for_Rural_Development)> [15/07/2020].
20. Omar Hazem Mohammed, Yassine Amirat, Mohamed Benbouzid, Adel Elbast. Optimal Design of a PV/Fuel Cell Hybrid Power System for the City of Brest in France. IEEE ICGE 2014 Mar 2014, Sfax, Tunisia. pp.119-123. hal-01023490. Available at:<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01023490>.[07/05/2020]
21. C Ghenai and M Bettayeb 2017 IOP Conf. Ser.:Earth Environ. Sci. 93 012073. [paper] *Optimized design and control of an off grid solar PV/ hydrogen fuel cell power system for green buildings*. Available at:<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/93/1/012073>.[07/05/2020].
22. Santarelli, M., Cali, M. and Macagno, S., 2004. *Design and analysis of stand-alone hydrogen energy systems with different renewable sources*. [ebook] pp.1573-1586. Available at: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319904000631>> [08/05/2020].
23. Dawood, F., Shafiullah, G. and Anda, M., 2020. *Stand-Alone Microgrid with 100% Renewable energy:a case study with hybrid solar PV-battery-hydrogen*. Available at: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/2047>> [08/05/2020].
24. Suberu, M., Mustafa, M. and Bashir, N., 2013. *Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency*. [ebook] pp.500-511. Available at: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114002366>> [10/06/2020].
25. Petrollese, Mario. Published 2015. *Optimal generation scheduling for renewable micro grids using hydrogen storage systems*. PhD thesis. pp. 12-18. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Optimal-generation-scheduling-for-renewable-using-Petrollese/e730832926f87b8eeacb9e8df0760ada1397c281>



26. Evans, A., Strezov, V., Evans, T. J., 2012. *Assessment of utility energy storage options for increased renewable energy penetration*. pp.4142-4146. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/257547970\\_Assessment\\_of\\_utility\\_energy\\_storage\\_options\\_for\\_increased\\_renewable\\_energy\\_penetration](https://www.researchgate.net/publication/257547970_Assessment_of_utility_energy_storage_options_for_increased_renewable_energy_penetration). [08/08/2020]
27. Wang, J.; Lu, K.; Ma, L.; Wang, J.; Dooner, M.; Miao, S.; Li, J.; Wang, D. Overview of Compressed Air Energy Storage and Technology Development. *Energies* **2017**, *10*, 991. <https://doi.org/10.3390/en10070991>. [08/08/2020]
28. M. A. Awadallah and B. Venkatesh, "Energy Storage in Flywheels: An Overview," in *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*, vol. 38, no. 2, pp. 183-193, Spring 2015, doi: 10.1109/CJECE.2015.2420995. [08/08/2020]
29. Sarbu, I., Sebarchievici, C., 2018. *A comprehensive review of thermal energy storage*. Available at: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/1/191>. [10/08/2020]
30. Omar Z. Sharaf, Mehmet F. Orhan, 2014. *An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications*. Available at: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032114000227>. [10/08/2020]
31. Lonchar J., 2017. *The analysis of solar-fuel cell hybrid system*. Thesis for the Degree Master of Science. Available at: [https://repository.asu.edu/attachments/186228/content/Lonchar\\_asu\\_0010N\\_16747.pdf](https://repository.asu.edu/attachments/186228/content/Lonchar_asu_0010N_16747.pdf)