

# Τεχνικοοικονομική ανάλυση συστήματος παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου.

Αναστασόπουλος Στυλιανός

Επιβλέπων καθηγητής  
Παπαευθυμίου Σπυρίδων

Χανιά, Σεπτέμβριος 2021

## Περίληψη

Η παραγωγή υδρογόνου μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας πρωτοεμφανίστηκε στις αρχές της δεκαετίας του 90 με αποτέλεσμα η συνεχής τεχνολογική εξέλιξη να οδηγήσει σε πληθώρα πειραματικών δοκιμών την προηγούμενη δεκαετία. Πιο αναλυτικά, η τεχνολογία παραγωγής υδρογόνου βασίζεται πάνω στη εγκατάσταση μονάδας ηλεκτρόλυσης η οποία λειτουργεί μέσω της πλεονάζουσας ενέργειας που παράγουν οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Έτσι, το αέριο υδρογόνο που παράγει πλέον ο ηλεκτρολύτης μπορεί να αποθηκευτεί σε συμβατικές δεξαμενές υπό πίεση ενώ δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι η σημασία του υδρογόνου είναι διττή καθώς αποτελεί μέσο μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ανανεώσιμης ενέργειας ενώ παράλληλα είναι το ίδιο ένας ανανεώσιμος φορέας ενέργειας καθώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου (fuel cells) για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος.

Πιο συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία θα πραγματοποιηθεί η μελέτη ενός συστήματος παραγωγής ενέργειας αποτελούμενο από συστοιχίες φωτοβολταϊκών και ανεμογεννήτριες στο νομό Χανίων και Ρεθύμνου με σκοπό την κάλυψη των αναγκών φορτίου ρεύματος της περιοχής, την παραγωγή και αποθήκευση υδρογόνου. Τέλος, τα παραπάνω θα υλοποιηθούν με την συνδρομή του λογισμικού HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables), ενός λογισμικού που καθορίζει την οικονομική βιωσιμότητα ενός υβριδικού ενεργειακού συστήματος, βελτιώνει τον σχεδιασμό της εγκατάστασης και επιτρέπει στους χρήστες να κατανοήσουν το πως λειτουργούν στην πραγματικότητα τα υβριδικά συστήματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

## Abstract.

Hydrogen production through renewable energy sources appeared in the early 90's with the result that continuous technological development led to a variety of experimental tests in the last decade. More specifically, hydrogen production technology is based on the installation of an electrolysis unit that operates through the excess energy produced by renewable energy sources. Thus, the hydrogen gas that the electrolyte now produces can be stored in conventional pressure tanks while we must not forget that the importance of hydrogen is twofold as it is a means of long-term storage of renewable energy while it is itself a renewable energy carrier as it can be used in fuel cells for the production of electric power.

More specifically, in the present work will be carried out an energy production system consisting of photovoltaic arrays and wind turbines in the prefecture of Chania and Rethimno in order to meet the electricity load needs of the areas, the production and storage of hydrogen. Finally, the above will be implemented with the assistance of HOMER software (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables), a software that determines the

economic viability of a hybrid energy system, improves installation design and allows users to understand how hybrid renewable energy systems actually work.

# Περιεχόμενα

Περίληψη.....	2
Περιεχόμενα.....	4
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	7
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	7
1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	11
1.2.1 Παραγωγή υδρογόνου μέσω ορυκτών καυσίμων.....	13
1.2.1.1 Αναμόρφωση ατμού.....	13
1.2.1.2 Αεριοποίηση άνθρακα.....	13
1.2.2 Παραγωγή υδρογόνου μέσω πυρηνικής ενέργειας.....	14
1.2.2.1 Θερμοχημική διάσπαση νερού.....	14
1.2.2.2 Ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας.....	15
1.2.3 Παραγωγή υδρογόνου μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.....	15
1.2.3.1 Ηλεκτρόλυση.....	15
1.2.3.2 Electrolyzers πολυμερικής μεμβράνης.....	17
1.2.3.3 Αλκαλικοί electrolyzers.....	17
1.2.3.4 Electrolyzers από στερεά οξείδια.....	17
1.2.3.5 Παραγωγή υδρογόνου μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ.....	18
1.2.3.6 Παραγωγή υδρογόνου μέσω ανεμογεννητριών.....	19
1.2.4. Παραγωγή υδρογόνου μέσω βιομάζας.....	21
1.2.4.1 Πυρόλυση βιομάζας.....	21
1.2.4.2 Αεριοποίηση βιομάζας.....	21
1.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.....	22
1.3.1 Συμπιεσμένο υδρογόνο.....	22
1.3.2 Υγροποιημένο υδρογόνο.....	22
1.3.3 Υβρίδια μετάλλων.....	23
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	24
2.ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ HOMER Pro.....	24

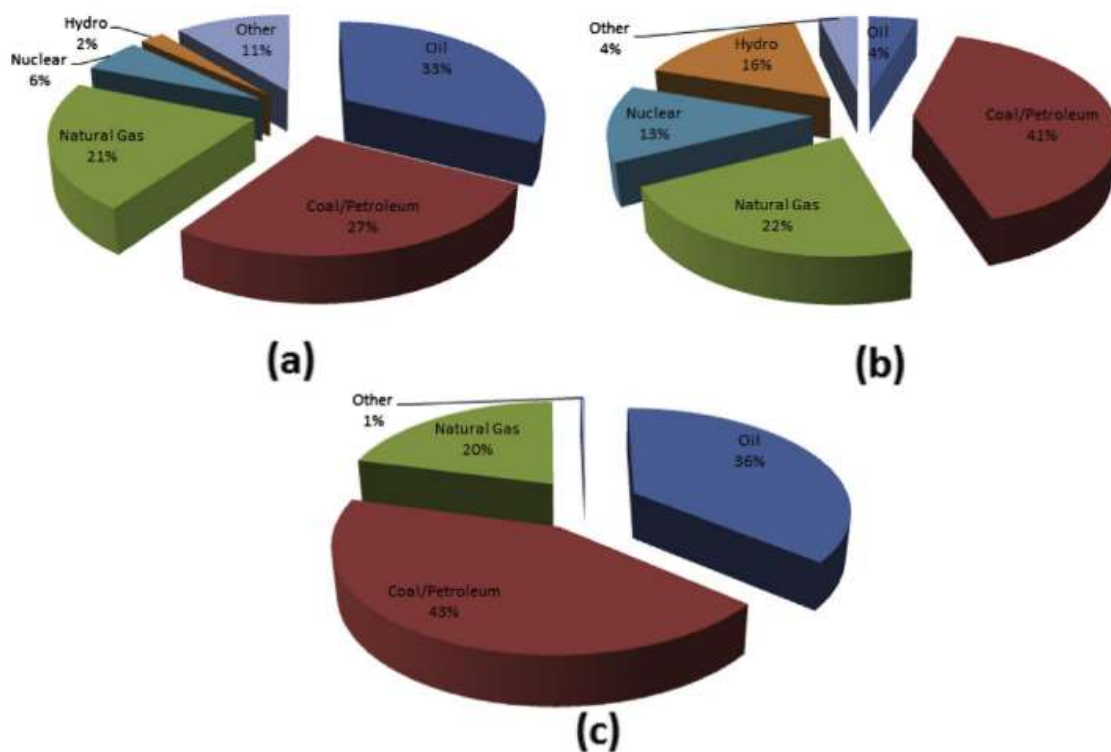
2.1 Εισαγωγή.....	24
2.2 Προσομοίωση.....	26
2.3 Βελτιστοποίηση.....	27
2.4 Ανάλυση Ευαισθησίας.....	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	30
3.ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ $H_2$ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΥΣ ΝΟΜΟΥΣ ΧΑΝΙΩΝ-ΡΕΘΥΜΝΟΥ.....	30
3.1 Εισαγωγή.....	30
3.2 Τοποθεσία.....	30
3.3 Φορτίο.....	32
3.4 Αιολικά δεδομένα.....	33
3.5 Ηλιακά δεδομένα.....	36
3.6 Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των στοιχείων συστήματος προσομοίωσης...36	
3.6 Περιορισμοί συστήματος.....	46
3.7 Οικονομικά δεδομένα συστήματος.....	47
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	48
4.ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ $H_2$ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΧΑΝΙΩΝ...48	
4.1 Περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος.....	48
4.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	48
4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.....	51
4.4 Ενεργειακά χαρακτηριστικά.....	52
4.5 Οικονομική ανάλυση.....	59
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	64
5. ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ $H_2$ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΡΕΘΥΜΝΟΥ .....	64
5.1 Περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος.....	65
5.2Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.....	65
5.3 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.....	67
5.4 Ενεργειακά χαρακτηριστικά.....	69

5.5 Οικονομική ανάλυση.....	75
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	79
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ.....	79
Βιβλιογραφία.....	81

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Μερικές από τις σημαντικότερες προκλήσεις του 21ου αιώνα είναι η κάλυψη των αυξανόμενων ενεργειακών αναγκών λόγω του αυξανόμενου πληθυσμού και του αυξανόμενου βιοτικού επιπέδου, η αναμενόμενη εξάντληση των ορυκτών καυσίμων σε απόθεμα, η αντιστροφή της κλιματικής αλλαγής και συνάμα η προστασία του περιβάλλοντος. Εντούτοις, στα παρακάτω γραφήματα απεικονίζονται ο συνολικός εφοδιασμός παγκόσμιας ενέργειας, η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και οι κυριότερες ενεργειακές πηγές εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα κατά των 21ο αιώνα ως αντιστοιχία των παραπάνω κρίσεων.



**Σχήμα 1.1.** Ζήτηση παγκόσμιας ενέργειας (α), παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (β), παγκόσμιες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα (γ) στις αρχές του 21ου αιώνα..[1]

Όπως φαίνεται από το σχήμα, περίπου το 80% της παγκόσμιας ενέργειας προήλθε από ορυκτά καύσιμα, ενώ με τη μεση παγκόσμια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στις αρχές του 21ου αιώνα να κυμαίνεται στα 21.400 Twh δείχνει ότι το 70% αυτής της ποσότητας

δημιουργήθηκε χρησιμοποιώντας ορυκτά καύσιμα. Παράλληλα, οι παγκόσμιες εκπομπές CO<sub>2</sub> καθιστούν ξεκάθαρη τη χρήση ορυκτών καυσίμων ως αιτία των μέγιστων αυτών εκπομπών. Πιο συγκεκριμένα, λόγω της περιορισμένης φύσης και της μη ομοιογενούς διανομής τους, τα ορυκτά καύσιμα δεν αναμένεται να συμβαδίσουν με την αύξηση της ζήτησης ενέργειας. Επίσης, τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων καθίστανται λιγότερο προσβάσιμα καθώς καταναλώνονται και οι τιμές των ορυκτών καυσίμων συνεχίζουν να αυξάνονται. Έτσι, λόγω της απώλειας προσβασιμότητας μαζί με τα οικονομικά ζητήματα που προκύπτουν με τη χρήση τους αλλά και τη συμβολή τους στην υπερθέρμανση του πλανήτη, δημιουργούν σοβαρές περιβαλλοντικές ανησυχίες. Επομένως, η μετάβαση σε πηγή ενέργειας χωρίς ορυκτά καύσιμα θα μπορούσε να μειώσει σημαντικά τις εκπομπές που σχετίζονται με το CO<sub>2</sub> και τις αρνητικές τους επιπτώσεις στην υπερθέρμανση του πλανήτη. Η μείωση της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα και η ελαχιστοποίηση των επιβλαβών για το περιβάλλον εκπομπών μπορούν να επιτευχθούν από βιώσιμες πηγές ενέργειας. Συνεπώς, καθίσταται η ανάγκη για καθίδρυση νέων φορέων ενέργειας οι οποίες θα πρέπει να είναι σε θέση να εγγυηθούν ένα αειφόρο, ασφαλές και φιλικό προς το περιβάλλον ενεργειακό σύστημα.

Ως απάντηση με σχεδόν μηδενικές ή μηδενικές εκπομπές τελικής χρήσης και συνεχώς ανανεωμένους πόρους, το υδρογόνο μπορεί να είναι ένας ιδανικός φορέας βιώσιμης ενέργειας και αυτό διότι η αξία του κρύβεται στη διττή του σημασία στη φύση. Πιο συγκεκριμένα, όντας το ίδιο ένας ανανεώσιμος φορέας ενέργειας, το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κυψέλες καυσίμου (fuel cells) για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος με μεγάλη απόδοση και μηδενική εκπομπή ρύπων ενώ παράλληλα αποτελεί ένα μέσο μακροπρόθεσμης αποθήκευσης ανανεώσιμης ενέργειας καθώς η περίσσεια ανανεώσιμης ενέργειας μπορεί να μετατραπεί σε υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης και να αποθηκευτεί ή να μεταφερθεί όπου υπάρχει ανάγκη. Μερικά από τα πλεονεκτήματα του υδρογόνου τα οποία αξίζει να αναφερθούν είναι αρχικά η ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού, το υδρογόνο είναι ένας μη ρυπογόνος φορέας ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από πρωτογενής πηγές, από πυρηνική ενέργεια αλλά και από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, έτσι αυτή η ποικιλιότητα των μεθόδων παραγωγής συνδράμει στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κεντρικές και αποκεντρωμένες ή αυτόνομες εφαρμογές για παραγωγή ενέργειας. Ακόμη όπως προαναφέρθηκε η χρήση του συνοδεύεται από πολύ χαμηλές έως και μηδενικές εκπομπές ρύπων, βρίσκεται σε μεγάλη αφθονία στη γη κυρίως στο νερό και στις οργανικές ενώσεις, ενώ μπορεί να παραχθεί με πολλές μεθόδους και από διαφορετικές πρώτες ύλες. Τέλος, έχει τη δυνατότητα να αποθηκευτεί σε διαφορετικές μορφές όπως σε υγρά, αέρια ή και μαζί σε μεταλλικά υδρίδια καθώς και σαν χημική ουσία χαρακτηρίζεται με τα υψηλότερα lower heating value (LHV) και higher heating value (HHV) από τα περισσότερα συμβατικά ορυκτά καύσιμα.



**Πίνακας 1.1.** Χαμηλότερη τιμή θέρμανσης (LHV) και η υψηλότερη τιμή θέρμανσης (HHV) για το υδρογόνο και τα κοινά ορυκτά καύσιμα στους 25C και 1atm .[1]

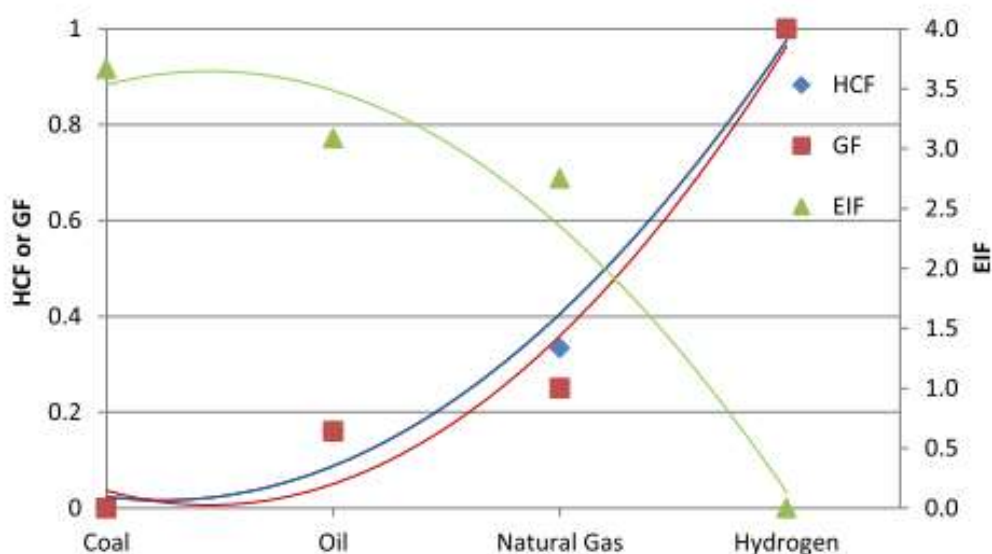
Fuel	HHV (kJ/g)	LHV (kJ/g)
Hydrogen	141.9	119.9
Methane	55.5	50.0
Gasoline	47.5	44.5
Diesel	44.8	42.5
Methanol	20.0	18.1

Συνεχίζοντας, προκειμένου να τονιστεί η σημασία του υδρογόνου ως μία εξαιρετικής και ελπιδοφόρας πηγής ενέργειας θα συγκρίνουμε το υδρογόνο με άλλα συμβατικά καύσιμα μέσω ορισμένων δεικτών από πλευράς περιβαλλοντικών επιπτώσεων (EIF), παράγοντα πράσινης ενέργειας (Greenization Factor ,GF) και δείκτη υδρογόνου (Hydrogen Content Factor, HCF).

$EIF = \text{kg CO}_2 \text{ product of combustion reaction / kg fuel}$  (1).

$GF = EIF_{\text{max}} - EIF / EIF_{\text{max}}$  (2).

$HCF = \text{kg of H}_2 \text{ in the fuel / kg fuel}$  (3).

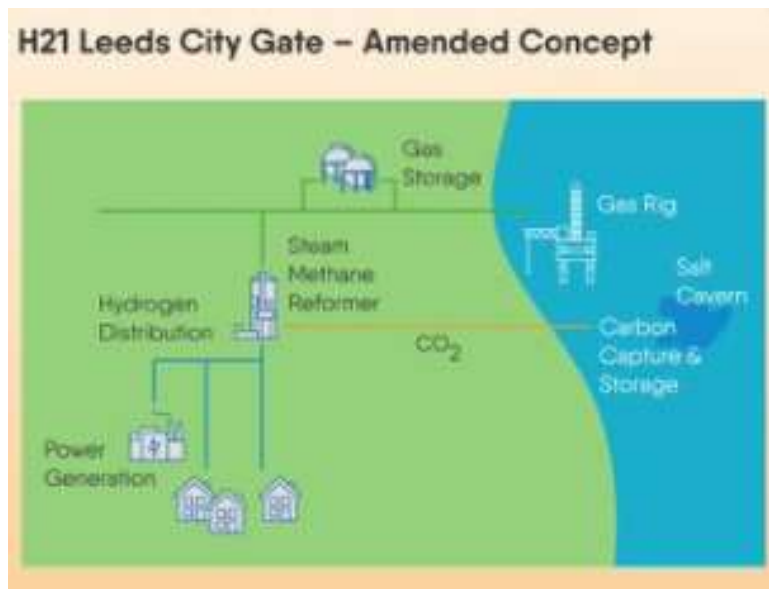


**Σχήμα 1.2.** Hydrogen Content Factor (HCF), Greenization Factor (GF), and Environmental Impact Factor (EIF) υδρογόνου και άλλων ορυκτών καυσίμων..[1]

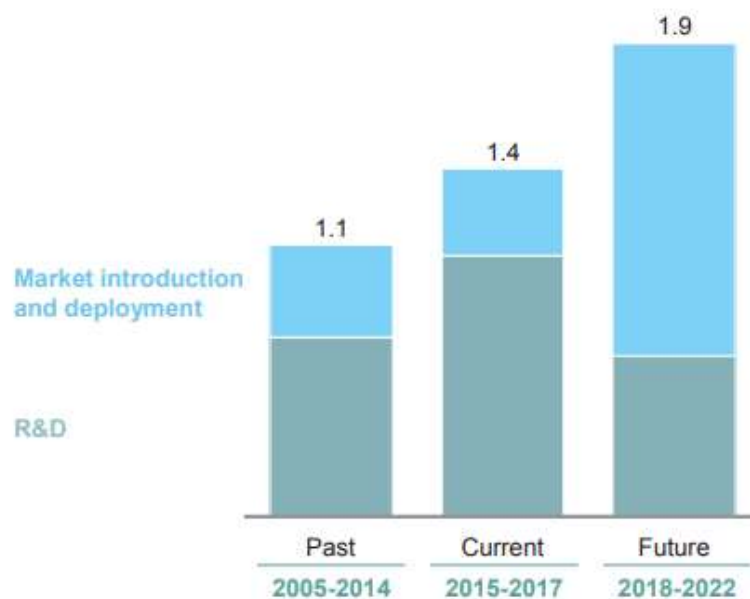
Όπως φαίνεται από το Σχήμα 1.2 , με την αύξηση του υδρογόνου(HCF), οι πηγές ενέργειας γίνονται πιο πράσινες (αυξανόμενη GF) και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις (EIF) μειώνονται. Αυτό είναι ένα σαφές πλεονέκτημα του υδρογόνου όσον αφορά τη μείωση των εκπομπών

που σχετίζονται με τον άνθρακα. Για να εκμεταλλευτεί πλήρως την οικονομία του υδρογόνου, πρέπει να παραχθεί κυρίως από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Ενδεικτικά, η ευρωπαϊκή ένωση έχει ορίσει όραμα μέχρι το 2030 κατά το οποίο ένα στα 10 τρένα θα αντλούν την απαιτούμενη ισχύ μέσω υδρογόνου, ενώ θα κυκλοφορούν περισσότερα από 80 εκατομμύρια αυτοκίνητα μηδενικών εκπομπών. Παράλληλα, το υδρογόνο θα χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα σε εφαρμογές συμπαραγωγής (ηλεκτρικής & θερμικής ενέργειας) όπως το έργο “H21 Leeds City Gate” στην Μεγάλη Βρετανία το οποίο στοχεύει στην μετατροπή όλων των κατοικιών σε χρήση υδρογόνου μέχρι το 2030. Τέλος, 250 με 300 TWh πλεονάζουσας ισχύος από φωτοβολταϊκά και ανεμογεννήτριες θα μετατρέπονται σε υδρογόνο, ενώ τα μέλη του Συμβουλίου Υδρογόνου σχεδιάζουν να προσανατολίσουν τις αυξανόμενες ετήσιες επενδύσεις τους στο υδρογόνο σχετικά με την ανάπτυξη της αγοράς με επενδύσεις τουλάχιστον 1,9 δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως στην τεχνολογία υδρογόνου για τα επόμενα 5 χρόνια, η επιτάχυνση των επενδύσεων αντικατοπτρίζεται στο παρακάτω γράφημα.



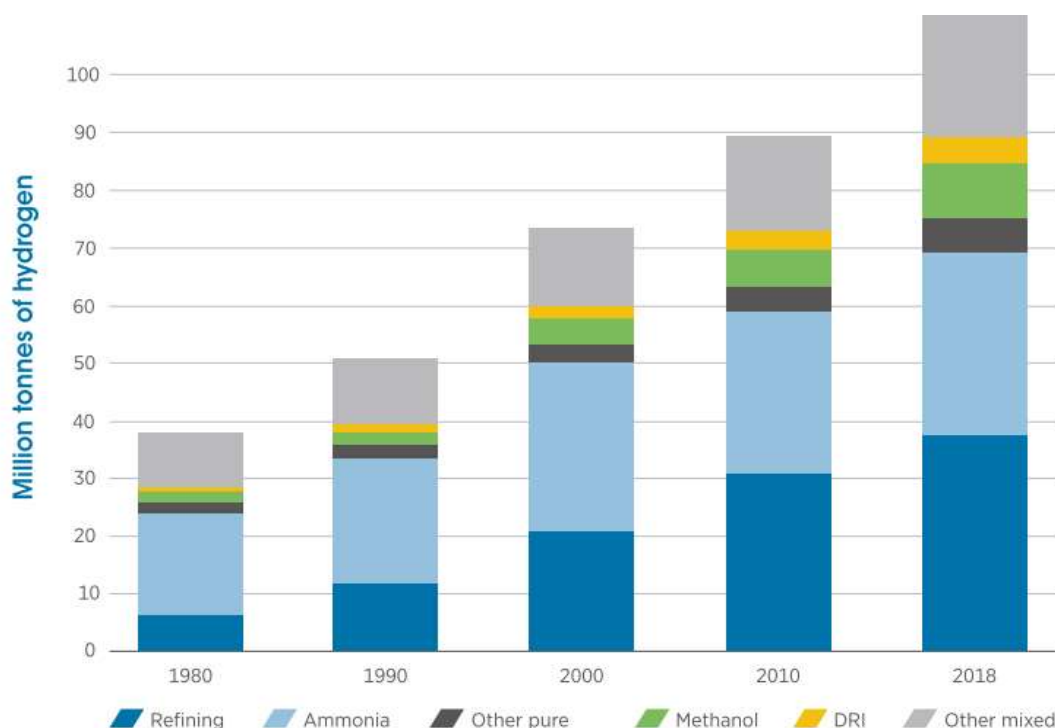
Σχήμα 1.3. Μοντέλο ενεργειακής αυτονομίας μέσω υδρογόνου στη περιοχή του Leeds.[2]



**Σχήμα 1.4.**Επενδύσεις των μελών του Συμβουλίου Υδρογόνου, σε δισεκατομμύρια ευρώ ετησίως [3]

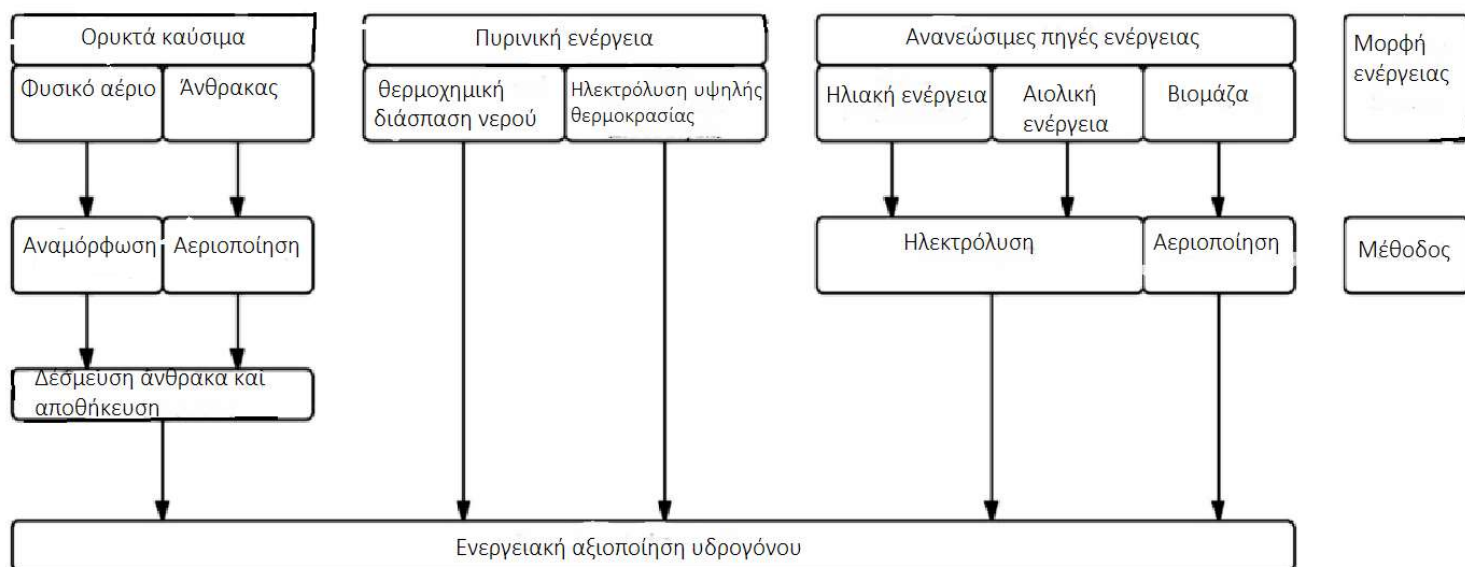
## 1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.

Το υδρογόνο ως ένα άφθονο στοιχείο της φύσης μπορεί βρεθεί σε ποικίλα συστατικά της όπως είναι το νερό κάθε μορφής, η βιομάζα, τα ορυκτά καύσιμα, το υδρόθειο και πολλά άλλα. Σύμφωνα μάλιστα με τον διεθνή οργανισμό ανανεώσιμων πηγών ενέργειας IRENA και την ανάλυση του χάρτη ενέργειας που έχει πραγματοποιηθεί το 2019 αναφέρει ότι το υδρογόνο έως το έτος 2050 θα κατέχει ποσοστό της τάξης του 6% στη συνολική παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας την ίδια ώρα που το παγκόσμιο συμβούλιο υδρογόνου σε παρόμοια έκθεση το 2017 αναφέρει ποσοστό της τάξης του 18%. Σήμερα η συντριπτική πλειοψηφία του υδρογόνου που παράγεται χρησιμοποιείται επί τόπου στη βιομηχανία. Η παραγωγή αμμωνίας και διύλισης ορυκτών καυσίμων είναι οι πρωταρχικοί σκοποί, που αντιπροσωπεύουν τα δύο τρίτα της χρήσης υδρογόνου. Η αμμωνία χρησιμοποιείται ως λίπασμα αζώτου και για την παραγωγή άλλων χημικών ουσιών ενώ στα διυλιστήρια πετρελαίου, υδρογόνο προστίθεται σε βαρύτερο λάδι για την παραγωγή καυσίμων μεταφοράς.



Σχήμα 1.5. Παγκόσμια ζήτηση υδρογόνου 1980-2018.[4]

Παρόλα αυτά η ευρεία μέθοδος παραγωγής υδρογόνου στη βιομηχανία μέσα από φυσικό αέριο και άνθρακα παρουσιάζει έντονο αν όχι μεγάλο περιβαλλοντικό αντίκτυπο με αποτέλεσμα η τάση και η τεχνολογία της εποχής να έχει οδηγηθεί στη παραγωγή “γκρι υδρογόνου” δηλαδή παραγωγή υδρογόνου από ορυκτά καύσιμα μέσα από την δέσμευση και αποθήκευση διοξειδίου του άνθρακα και άλλων βλαβερών ουσιών για το περιβάλλον (Carbon capture and storage, CCS) με χαμηλό περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Παράλληλα, το υδρογόνο το οποίο παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως η αιολική και η ηλιακή ενέργεια, αποτελεί το “πράσινο υδρογόνο” με μηδενικούς ρύπους και περιβαλλοντικό αντίκτυπο, πιο συγκεκριμένα είναι εκείνο που παράγεται μέσω ηλεκτρόλυσης από την ενέργεια των φωτοβολταϊκών που χάνεται, είτε διότι δεν απορροφάται από το δίκτυο, είτε διότι η ζήτηση τις ώρες που παράγεται είναι χαμηλή. Για τον παραπάνω λόγο το «Πράσινο» υδρογόνο αποτελεί βασικό πυλώνα του ευρωπαϊκού «Green Deal», της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας με στόχο τη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 50-55% έως το 2030, με απώτερο σκοπό έως το 2050 η Ε.Ε να έχει καταστεί κλιματικά ουδέτερη. Στη συνέχεια, απεικονίζονται οι βασικότεροι μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου που θα αναλυθούν στη πορεία.

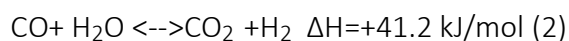
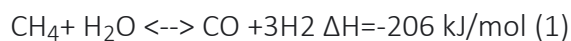


Σχήμα 1.6. Μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου.

### 1.2.1 Παραγωγή υδρογόνου μέσω ορυκτών καυσίμων.

#### 1.2.1.1 Αναμόρφωση ατμού.

Αυτή τη στιγμή η αναμόρφωση ατμού αποτελεί τη λιγότερο ακριβή και πιο κοινή μέθοδος παραγωγής υδρογόνου. Κατά την αναμόρφωση του ατμού, το φυσικό αέριο καθαρίζεται πρώτα από ακαθαρσίες, αναμιγνύεται με ατμό και περνά πάνω από έναν εξωτερικό θερμαινόμενο αντιδραστήρα, όπου παράγονται μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και υδρογόνο (H<sub>2</sub>). Μετά από αυτό το βήμα, μια αντίδραση καταλυτικής μετατόπισης μετατρέπει το CO και το νερό σε υδρογόνο και διοξείδιο του άνθρακα (CO<sub>2</sub>), το αέριο υδρογόνο κατόπιν καθαρίζεται. Με αυτήν την τεχνολογία, είναι δυνατή η επίτευξη αποδόσεων υψηλότερων από 80% σε μεγάλους μετασχηματιστές με παραγωγή υδρογόνου έως και 100.000 τόνων ετησίως. Χαμηλότερη απόδοση παρατηρείται σε μετασχηματιστές μικρότερης κλίμακας ειδικά για μικρές κυψέλες καυσίμου.



#### 1.2.1.2 Αεριοποίηση άνθρακα.

Τα παγκόσμια αποθέματα άνθρακα και οι διαθέσιμες στο εμπόριο τεχνολογίες καθιστούν τον άνθρακα μια πρακτική επιλογή για την παραγωγή υδρογόνου σε μεγάλες εγκαταστάσεις. Σε σύγκριση με τις υπάρχουσες μεθόδους όπως είναι η ηλεκτρόλυση, η αεριοποίηση είναι πιο κατάλληλη για τη μετατροπή του άνθρακα σε υδρογόνο. Κατά τη διαδικασία αεριοποίησης

άνθρακα, ο άνθρακας οξειδώνεται μερικώς με ατμό και οξυγόνο σε αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης. Τα προϊόντα είναι κυρίως CO και H<sub>2</sub>, αναμειγνύονται με ατμό και CO<sub>2</sub>. Η κύρια ανησυχία για την αεριοποίηση του άνθρακα είναι η υψηλή περιεκτικότητα άνθρακα, καθώς οι εκπομπές CO<sub>2</sub> είναι υψηλότερες σε σύγκριση με άλλες επιλογές πρώτων υλών. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί αυτό το πρόβλημα, αναπτύσσονται οι τεχνολογίες CCS (Carbon Capture and Storage). Σήμερα, το κόστος παραγωγής υδρογόνου σε μια μεγάλη μονάδα αεριοποίησης άνθρακα είναι ελαφρώς υψηλότερο από ό,τι αν ήταν κατασκευασμένο από φυσικό αέριο. Ωστόσο, οι τεχνικές αεριοποίησης άνθρακα είναι λιγότερο καλά καθορισμένες από αυτές που χρησιμοποιούνται στην αναμόρφωση του ατμού φυσικού αερίου. Όσον αφορά τα οικονομικά, η παραγωγή υδρογόνου από άνθρακα διαφέρει από άλλα ορυκτά καύσιμα, το κόστος πρώτης ύλης ανά μονάδα είναι χαμηλότερο, ενώ το μοναδιαίο κόστος κεφαλαίου είναι υψηλότερο για τις μονάδες αεριοποίησης άνθρακα.

## 1.2.2 Παραγωγή υδρογόνου μέσω πυρηνικής ενέργειας.

### 1.2.2.1 Θερμοχημική διάσπαση νερού.

Η θερμοχημική διάσπαση νερού είναι μια τεχνική που χρησιμοποιεί πολύ υψηλές θερμοκρασίες (500 °C - 2.000 °C) ώστε να οδηγηθούν μια σειρά από χημικές αντιδράσεις με αποτέλεσμα την παραγωγή υδρογόνου από διάσπαση του νερού. Τα χημικά αντιδραστήρια που χρησιμοποιούνται σε αυτές τις αντιδράσεις επαναχρησιμοποιούνται σε κάθε κύκλο. Οι υψηλές θερμοκρασίες που απαιτούνται για να πραγματοποιηθεί η διάσπαση του νερού μπορούν επιτευχθούν είτε με ηλιακή ενέργεια ή με πυρηνική. Υπάρχουν μια πληθώρα θερμοχημικών κύκλων διάσπασης του νερού που έχουν μελετηθεί για παραγωγή υδρογόνου, ο καθένας έχει τις δικές του συνθήκες λειτουργίας και τεχνικές δυσκολίες. Έχουν αναγνωριστεί περισσότερους από 150 χημικούς κύκλους που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάσπαση του νερού. Αυτοί οι θερμοχημικοί κύκλοι χρειάζονται ειδικούς αντιδραστήρες που έχουν κατασκευαστεί χρησιμοποιώντας ειδικά χημικά αδρανή υλικά ικανά να αντιστέκονται σε υψηλές θερμοκρασίες. Η ανάπτυξη αυτών των ειδικών υλικών με οικονομικά εφικτό τρόπο είναι μια άλλη σημαντική πρόκληση των θερμοχημικών κύκλων. Ένας από τους σπουδαιότερους αυτούς θερμοχημικούς κύκλους είναι αυτός Cu-Cl, ο οποίος προτάθηκε για πρώτη φορά στη δεκαετία του 1970. Προς το παρόν υπάρχουν μερικοί διαθέσιμοι κύκλοι Cu-Cl που δοκιμάζονται ενώ σε θερμοκρασίες λειτουργίας περίπου 550 °C, οι κύκλοι Cu-Cl εκτιμάται ότι αποδίδουν απόδοση περίπου 40% (αγνοείται η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού) με τη μείωση των απαιτούμενων θερμοκρασιών για υψηλή απόδοση να αποτελεί βασική πρόκληση των θερμοχημικών κύκλων Cu-Cl.

### 1.2.2.2 Ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας.

Η ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας είναι μια μέθοδος ηλεκτρόλυσης όπου ο ατμός αποσυνδέεται με  $H_2$  και  $O_2$  σε θερμοκρασίες μεταξύ 700 και 1000 ° C. Αυτή η μέθοδος θεωρείται γενικά πιο αποτελεσματική από τη συμβατική ηλεκτρόλυση θερμοκρασίας δωματίου καθώς η απόδοση αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας. Σε ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας, το νερό μετατρέπεται σε ατμό χρησιμοποιώντας θερμική ενέργεια και τα εξαρτήματα του συστήματος είτε θερμαίνονται απευθείας από την παροχή ατμού είτε έμμεσα με μεταφορά θερμότητας. Έτσι, η ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας αυτού του τύπου ηλεκτρόλυσης είναι χαμηλότερη από εκείνη των συμβατικών μεθόδων ηλεκτρόλυσης. Ένα άλλο πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η δυνατότητα μηδενικών εκπομπών αερίων θερμοκηπίου όταν χρησιμοποιείται ως πηγή εξωτερικής θερμότητας μια καθαρή πηγή θερμότητας δηλαδή πυρηνική, γεωθερμική και ηλιακή. Ωστόσο, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, τα εξαρτήματα του συστήματος πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις για μια αποτελεσματική παραγωγή υδρογόνου. Οι τρέχουσες προκλήσεις της ηλεκτρόλυσης υψηλής θερμοκρασίας μπορούν να αναφερθούν ως η χημικώς σταθερή ανάπτυξη ηλεκτρολυτών με υψηλή ιοντική και χαμηλή ηλεκτρονική αγωγιμότητα, η πορώδης, χημικά σταθερή έρευνα ηλεκτροδίων σε περιβάλλοντα υψηλής οξειδώσεως με καλή ηλεκτρονική αγωγιμότητα και συντελεστή θερμικής διαστολής παρόμοια στον ηλεκτρολύτη και τέλος μηχανικά χημικά σταθερά υλικά σε υψηλές θερμοκρασίες.

Αν και η απόδοση μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο μπορεί να φτάσει το 80% υπό πίεση, η συνολική απόδοση αυτής της μεθόδου είναι πολύ χαμηλότερη επειδή περιορίζεται από την αποτελεσματικότητα του πυρηνικού σταθμού (περίπου 33% με τους τρέχοντες αντιδραστήρες). Η ανάπτυξη αντιδραστήρων που λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες εξόδου είναι ένας πιθανός τρόπος για την επίλυση του προβλήματος χαμηλής απόδοσης. Για παράδειγμα, η απόδοση 20% στους 350 ° C αυξάνεται σε περίπου 50% στους 950 ° C.

### 1.2.3 Παραγωγή υδρογόνου μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

#### 1.2.3.1 Ηλεκτρόλυση.

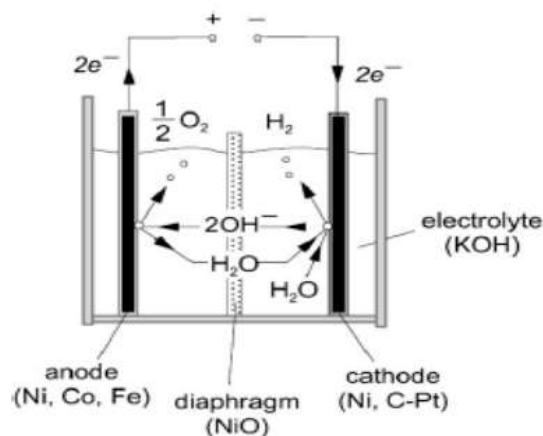
Όπως προαναφέρθηκε το υδρογόνο είναι ένα από τα πιο άφθονα χημικά στοιχεία που συναντώνται στην φύση. Στη Γη το συναντάμε κυρίως στο νερό και τις ενώσεις των υδρογονανθράκων. Μια μέθοδος για να πάρουμε το υδρογόνο στη μοριακή του μορφή από αυτές τις πηγές είναι με την ηλεκτρόλυση όπου ηλεκτρική ενέργεια διασπά το νερό σε

υδρογόνο και οξυγόνο. Η αντίδραση αυτή παίρνει μέρος μέσα σε μια συσκευή ηλεκτρόλυσης όπου αποτελείται από μια κάθοδο και μια άνοδο χωρισμένα από μια διαχωριστική μεμβράνη. Οι electrolyzers μπορούν να είναι από διάφορα υλικά όπου και καθορίζουν και τον τρόπο που λειτουργούν όπως μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM). Το υδρογόνο που παράγεται από ηλεκτρόλυση μπορεί να έχει ακόμα και μηδενικά αποτελέσματα όσο αφορά την παράγωγή θερμοκηπικών αερίων, καθώς εξαρτάται από την πηγή ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται. Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας από πηγές όπως αιολικές, ηλιακές ή πυρηνικές έχουν σχεδόν μηδαμινές εκπομπές θερμοκηπικών αερίων.

Η ηλεκτρόλυση του νερού φαίνεται να είναι η μόνη 100 % «καθαρή» και φιλική προς το περιβάλλον «λύση», καθώς παράγει υδρογόνο, το οποίο στη συνέχεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο, με την προϋπόθεση όμως ότι αυτή συνδυάζεται με κάποια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, όπως ηλιακή ή αιολική. Η ηλεκτρόλυση του νερού έχει απόδοση που μπορεί να φτάσει στις καλύτερες περιπτώσεις ίσως και πάνω από 70 %, όμως λόγω της χρήσης ηλεκτρικής ενέργειας στην όλη διαδικασία το συνολικό κόστος παραγωγής του υδρογόνου αυξάνει και μπορεί να γίνει μεγαλύτερο των 17 ευρώ/GJ (για κόστος kWh στα 0,04 ευρώ). Επομένως όχι μόνο για περιβαλλοντικούς λόγους, αλλά και για οικονομικούς είναι απαραίτητος ο συνδυασμός της με ηλεκτρική ενέργεια η οποία παρέχεται είτε από φωτοβολταϊκά στοιχεία, είτε από ανεμογεννήτριες, είτε ακόμα από υδροηλεκτρικά εργοστάσια ή ενεργειακά φυτά. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται από φωτοβολταϊκά στοιχεία είναι οικονομικά ασύμφορη, καθώς αυτή η τεχνολογία ναί μεν είναι καλώς ανεπτυγμένη αλλά το κόστος της είναι ακόμα υψηλό. Βέβαια θα μπορούσε στο μέλλον να χρησιμοποιηθεί για μεγάλης κλίμακας παραγωγή ενέργειας με σκοπό την παραγωγή υδρογόνου, η αιολική ενέργεια φαίνεται να είναι ο τομέας από τον οποίο μπορεί να παραχθεί υδρογόνο με χαμηλό κόστος, σε περιοχές κυρίως που είναι προικισμένες με μεγάλο αιολικό δυναμικό, τέτοιες περιοχές μπορεί να χρησιμοποιηθούν και για μεγάλης κλίμακας παραγωγή.



. Μια παραστατική απεικόνιση μιας τέτοιας διαδικασίας δίνεται στο σχήμα παρακάτω.





**Σχήμα 1.7.** Διαδικασία ηλεκτρόλυσης.[4]

### **1.2.3.2 Electrolyzers πολυμερικής μεμβράνης.**

Οι ηλεκτρολύτες πολυμερικής μεμβράνης είναι ειδικευμένα πολυμερικά υλικά τα οποία είναι υπεύθυνα για την επαγωγή των πρωτονίων, τον διαχωρισμό των παραγόμενων αερίων και την ηλεκτρική απομόνωση των ηλεκτροδίων. Οι μεμβράνες αυτές χαρακτηρίζονται από γρήγορους χρόνους απόκρισης, μεγάλο εύρος λειτουργίας, υψηλές αποδόσεις και πολύ υψηλή καθαρότητα αερίων. Ο τρόπος λειτουργίας τους αναφέρονται συνοπτικά στα εξής παρακάτω βήματα, το νερό αντιδρά στην άνοδο σχηματίζοντας αέριο οξυγόνο και πρωτόνια., από μια εξωτερική πηγή ρέουν ηλεκτρόνια στο κύκλωμα και τα πρωτόνια μεταφέρονται μέσω της πολυμερικής μεμβράνης στην κάθοδο. Στην κάθοδο τα πρωτόνια αντιδρούν με τα ηλεκτρόνια του εξωτερικού κυκλώματος και σχηματίζουν αέριο υδρογόνο .

Άνοδος:  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$  (4)

Κάθοδος:  $4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2$  (5)

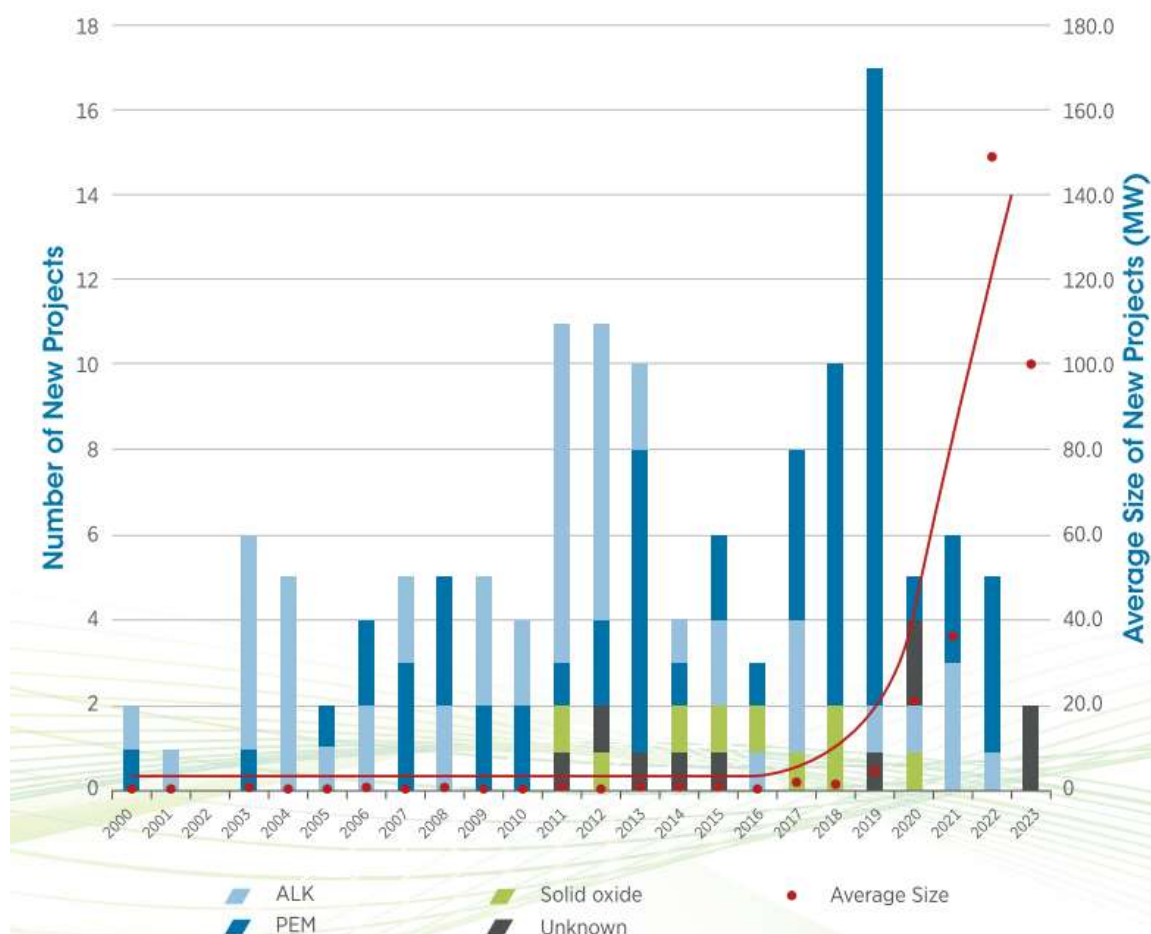
### **1.2.3.3 Αλκαλικοί electrolyzers.**

Οι αλκαλικοί electrolyzers λειτουργούν μεταφέροντας ιόντα υδροξυλίων ( $\text{OH}^-$ ) από την κάθοδο στην άνοδο παράγοντας υδρογόνο στην κάθοδο. Οι υγροί αλκαλικοί ηλεκτρολύτες είναι ένα διάλυμα από υδροξύλιο του νατρίου ή του καλίου και είναι εμπορικοί διαθέσιμοι πολλά χρόνια τώρα, υπάρχουν όμως ερευνητικές προσπάθειες για να γίνει χρήση στερεών αλκαλικών μεμβρανών που μέχρι αυτή την στιγμή δείχνουν ελπιδοφόρα αποτελέσματα σε εργαστηριακή κλίμακα.

### **1.2.3.4 Electrolyzers από στερεά οξείδια.**

Οι electrolyzers αυτοί παράγουν υδρογόνο με ένα διαφορετικό τρόπο από ότι οι άλλοι, χρησιμοποιούν μια στερεά κεραμική μεμβράνη όπου αφήνουν επιλεκτικά να περνούν αρνητικά ιόντα οξυγόνου ( $\text{O}^{2-}$ ) σε ανεβασμένες θερμοκρασίες. Η λειτουργία της ηλεκτρόλυσης με βάση τους κεραμικούς electrolyzers αποτελείται από δύο βασικά βήματα, στην κάθοδο συνδυάζεται το νερό με ηλεκτρόνια από ένα εξωτερικό κύκλωμα σχηματίζοντας υδρογόνο και αρνητικά φορτισμένο οξυγόνο ( $\text{O}^{2-}$ ). Το αρνητικά φορτισμένο οξυγόνο ( $\text{O}^{2-}$ ) διαπερνά την κεραμική μεμβράνη και αντιδρά στην άνοδο σχηματίζοντας αέριο οξυγόνο και παράγοντας ηλεκτρόνια που διοχετεύονται πίσω στο κύκλωμα. Για να λειτουργήσει αποδοτικά η ηλεκτρόλυση με ηλεκτρολύτες από στερεά οξείδια πρέπει η όλη διαδικασία να πραγματοποιηθεί σε υψηλές θερμοκρασίες της τάξης των  $700\text{ }^\circ\text{C}$  -  $800\text{ }^\circ\text{C}$ , θερμοκρασίες πολύ υψηλότερες από αυτές που απαιτούνται για την ηλεκτρόλυση με πολυμερικές μεμβράνες ( $70\text{ }^\circ\text{C}$  -  $90\text{ }^\circ\text{C}$ ). Οι κεραμικοί ηλεκτρολύτες μπορούν να χρησιμοποιήσουν αποτελεσματικά την θερμότητα σε αυτές τις υψηλές θερμοκρασίες ώστε να μειωθεί η ανάγκη ηλεκτρικής ενέργειας για παραγωγή υδρογόνου.

Στη συνέχεια, απεικονίζεται η ταχεία αναβάθμιση των electrolyzers projects και η γκάμα αυτών με το πέρασ των ετών με στόχο την παραγωγή “πράσινου υδρογόνου”.



Σχήμα 1.8.Χρονοδιάγραμμα έργων ισχύος-υδρογόνου με τεχνολογία ηλεκτρολύτη .[4]

#### 1.2.3.5 Παραγωγή υδρογόνου μέσω φωτοβολταϊκών πάνελ.

Η διαδικασία ηλεκτρόλυσης με βάση τις συστοιχίες φωτοβολταϊκών περιλαμβάνει φωτοβολταϊκά πάνελ, πλέγμα εναλλασσόμενου ρεύματος, σείτ συσσωρευτών, ηλεκτρικές συσκευές ψύξης και δοχεία αποθήκευσης υδρογόνου, ενώ ηλεκτρόλυση με βάση τα PV είναι μια από τις πιο ακριβές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου. Αν και η ηλιακή ενέργεια είναι η μεγαλύτερη πηγή ενέργειας του πλανήτη, λιγότερο από το 0,06% της παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας τροφοδοτείται από ηλιακή ενέργεια. Προκειμένου να σταματήσει η κατάχρηση των πόρων ορυκτών καυσίμων και τελικά να αντιμετωπιστούν τα φαινόμενα αερίων θερμοκηπίου, προτάθηκε η διάσπαση νερού από την ηλιακή ενέργεια και το σύστημα ηλιακής ενέργειας προς υδρογόνο (Solar to Hydrogen System, SHS). Στο σύστημα αυτό, η φωτοβολταϊκή ενέργεια σπάει τα μόρια  $H_2O$  σε  $H_2$  και  $O_2$  τα οποία εφαρμόζονται αργότερα σε κυψέλες καυσίμου υδρογόνου για να παράγουν ηλεκτρισμό όταν ο ήλιος δεν λάμπει. Η

υποδομή του πρώτου SHS κατασκευάστηκε στο El Segundo της Καλιφόρνια το 1995. Ένα σύμπλεγμα προηγμένων φωτοβολταϊκών κυττάρων και ηλεκτρολυτών παρήγαγε περίπου 50-70 m<sup>3</sup> υδρογόνου την ημέρα. Έκτοτε, δημιουργήθηκε ένας αριθμός SHS για να μελετήσει τη σκοπιμότητα παραγωγής υδρογόνου με ηλιακή ενέργεια και να βρει τρόπους για την εξοικονόμηση αυτής της τεχνολογίας.

Με την τρέχουσα τεχνολογία, το κόστος υδρογόνου από φωτοβολταϊκή ηλεκτρόλυση είναι περίπου 25 φορές υψηλότερο από αυτό των εναλλακτικών ορυκτών καυσίμων. Παρόλα αυτά, το κόστος της μεθόδου αυτής όλο ένα και συνεχώς μειώνεται με αποτέλεσμα να αυξάνεται η εδραίωση της.

Πιο συγκεκριμένα για τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες τα κοινώς διαθέσιμα φωτοβολταϊκά συστήματα χρησιμοποιούν συνήθως κρυσταλλικά ή πολυκρυσταλλικά κύτταρα. Ένα φωτοβολταϊκό στοιχείο έχει τη δυνατότητα να μετατρέπει την ενέργεια φωτονίων σε ηλεκτρική ενέργεια με τη μορφή συνεχούς ρεύματος (DC). Αυτό είναι δυνατό λόγω δύο βασικών ιδιοτήτων των φωτοβολταϊκών κυττάρων. Αρχικά, τα ηλεκτρόνια απελευθερώνονται σε ημιαγωγό όταν απορροφούνται φωτόνια με επαρκή ενέργεια, ενώ όταν οι διαφορετικοί ημιαγωγοί ενώνονται σε ένα κοινό όριο, ένα σταθερό ηλεκτρικό πεδίο προκαλείται συνήθως πέρα από αυτό το όριο.

#### **1.2.3.6 Παραγωγή υδρογόνου μέσω ανεμογεννητριών.**

Αρχικά, η χρησιμοποίηση ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανεμογεννήτριες για ηλεκτρόλυση, παρουσιάζει πιθανώς την μεγαλύτερη προοπτική μεταξύ ανανεώσιμων πηγών για την παραγωγή “πράσινου υδρογόνου”. Ενδεικτικά, το 2012, περίπου 282.275 MW ηλεκτρικής ενέργειας παρήχθη από αιολική ενέργεια που ήταν περίπου το 2% της συνολικής παγκόσμιας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, με τις ΗΠΑ, Κίνα, Γερμανία, Ισπανία και Ινδία να παράγουν περισσότερο από το 73% της ετήσιας παγκόσμιας αιολικής ενέργειας. Πράγματι, οι μετεωρολογικές μεταβολές δημιουργούν διακυμάνσεις της αιολικής ενέργειας, οι οποίες αυξάνουν την ανάγκη εξισορρόπησης ισχύος στον έλεγχο συχνότητας φορτίου. Η στρατηγική συστήματος αιολικού δυναμικού προς υδρογόνο (Wind To Hydrogen, WTH) με ηλεκτρόλυση νερού θα μπορούσε να προσφέρει λύση σε τέτοια προβλήματα. Το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας αποθηκεύεται ως υδρογόνο και μπορεί να μετατραπεί ξανά σε ηλεκτρισμό σε περιόδους χαμηλού δυναμικού ανέμου ή όταν σταματήσει η συμφόρηση δικτύου. Το δυναμικό του ηλεκτρολυτικού υδρογόνου ως μέσου αποθήκευσης αιολικής ενέργειας στην εξισορρόπηση δικτύου διερευνάται τόσο για τα συστήματα συνδεδεμένα στο δίκτυο όσο και για τα απομονωμένα συστήματα δικτύου. Η συνέργεια των αιολικών σταθμών και των ενεργειακών ταμείων υδρογόνου καθιστά το υδρογόνο ρυθμιστικό μηχανισμό για τους αιολικούς σταθμούς να περιορίζουν τις διακυμάνσεις στην αιολική ενέργεια.

Μία από τις προκλήσεις αυτής της διαδικασίας είναι το κόστος των ανεμογεννητριών και των ηλεκτρολυτών αλλά και η βελτιστοποίηση του συστήματος αποθήκευσης στροβίλων. Το

κόστος παραγωγής υδρογόνου με χρήση ανεμογεννητριών εκτιμάται σχεδόν 6-10 φορές υψηλότερο από αυτό των εναλλακτικών ορυκτών καυσίμων ενώ το κενό αναμένεται να μειωθεί στο άμεσο στο μέλλον .Το υψηλό κόστος του παραγόμενου υδρογόνου από την αιολική ενέργεια αποδίδεται στο κόστος του πρόσφατα εγκατεστημένου εξοπλισμού και της απώλειας ενέργειας λόγω αναποτελεσματικότητας στις διαδικασίες μετατροπής ενέργειας .Παράλληλα,το Εθνικό Ανανεώσιμο Εργαστήριο Ενέργειας (NREL) στις ΗΠΑ επιβλέπει τη δοκιμή μιας πιλοτικής κλίμακας WTH που συνδέει εκατό χιλιάδες ανεμογεννήτριες με μεμβράνη πολυμερούς ηλεκτρολυτών (PEM) για την παραγωγή 20 kg / ημέρα υδρογόνου. Το κόστος του παραγόμενου υδρογόνου από αυτήν τη διαδικασία είναι περίπου 5,50 ευρώ / kg, το οποίο μπορεί να μειωθεί με την εγκατάσταση προηγμένων ανεμογεννητριών με τον στόχο κόστους για τα επόμενα έτη να είναι 2 ευρώ / kg. Αξίζει να σημειωθεί ότι η παραγωγή υδρογόνου από την τεχνολογία WTH θα μπορούσε να είναι ανταγωνιστική με την παραγωγή υδρογόνου με βάση τα ορυκτά καύσιμα, όταν το κόστος του συστήματος WTH μειώνεται στα 0,015 ευρώ / kWh.

## **1.2.4. Παραγωγή υδρογόνου μέσω βιομάζας.**

### **1.2.4.1 Πυρόλυση βιομάζας.**

Η διαδικασία πυρόλυσης χωρίζεται σε γρήγορη πυρόλυση και συμβατική (αργή) πυρόλυση. Η πίσσα χαμηλής θερμοκρασίας και το αέριο υψηλής θερμοκρασίας παράγονται στη γρήγορη πυρόλυση της βιομάζας, ενώ η αργή πυρόλυση συνδέεται με την παραγωγή υψηλής ποιότητας άνθρακα. Η γρήγορη πυρόλυση ενδείκνυται για την παραγωγή υδρογόνου λόγω των υψηλών θερμοκρασιών και των χαμηλών χρόνων αναμονής σε αντίθεση με την συμβατική πυρόλυση όπου το προϊόν είναι άνθρακας. Αναλυτικότερα, στη διαδικασία ταχείας πυρόλυσης, η πρώτη ύλη βιομάζας θερμαίνεται γρήγορα απουσία αέρα για σχηματισμό ατμών και συμπύκνωση σε ένα σκούρο καφέ κινητό βιο-υγρό. Τα προϊόντα της ταχείας πυρόλυσης περιλαμβάνουν αέρια προϊόντα  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  και άλλα αέρια με βάση την οργανική φύση της πρώτης ύλης βιομάζας, υγρά προϊόντα όπως πίσσα και έλαια όπως οξικό οξύ και ακετόνη, τα οποία είναι υγρά σε θερμοκρασία δωματίου και στερεά προϊόντα αποτελούμενα από άνθρακα και καθαρό άνθρακα συν άλλα αδρανή υλικά. Αν και εφαρμόζονται διαδικασίες πυρόλυσης για παραγωγή βιοκαυσίμων, το υδρογόνο με βάση τη βιομάζα μπορεί να παραχθεί απευθείας μέσω γρήγορης πυρόλυσης σε υψηλή θερμοκρασία και επαρκή χρόνο παραμονής πτητικής φάσης.

### **1.2.4.2 Αεριοποίηση βιομάζας.**

Η αεριοποίηση της βιομάζας είναι μια θερμική διαδικασία που παράγει υψηλά αέρια προϊόντα και μικρές ποσότητες κάρβουνο. Γενικά, η αεριοποίηση αποτελείται από διεργασίες καύσης και πυρόλυσης για την προετοιμασία της θερμότητας για τις αντιδράσεις ενδοθερμικής πυρόλυσης. Για να ενισχυθεί ο ρυθμός παραγωγής αερίου, η αεριοποίηση πραγματοποιείται συνήθως σε υψηλές θερμοκρασίες. Ένας συνδυασμός υδρογόνου, μεθανίου, μονοξειδίου του άνθρακα, αζώτου και διοξειδίου του άνθρακα και άλλων αέριων υδρογονανθράκων ( $\text{CH}_4$ ) παράγεται στο τέλος της διαδικασίας αεριοποίησης, ενώ στα συστήματα αεριοποίησης βιομάζας, αέρας ή οξυγόνο χρησιμοποιείται σε διαδικασίες καύσης ή μερικής οξείδωσης. Η θερμική αποσύνθεση της στερεάς βιομάζας λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες περίπου 875–1275 K. Ο συνδυασμός παραγόμενων αέριων αγωγών στη διαδικασία αεριοποίησης επηρεάζεται από τη σύνθεση της πρώτης ύλης βιομάζας, τον παράγοντα εξαερισμού και τη διαδικασία αεριοποίησης. η παρακάτω εξίσωση δείχνει τη διαδικασία αεριοποίησης βιομάζας.

### **1.3 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗΣ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ.**

Από τα κυριότερα προβλήματα για να χρησιμοποιηθεί το υδρογόνο σε ευρύ κλίμακα είναι ο αποτελεσματικός τρόπος αποθήκευσης του. . Στον ενεργειακό τομέα τα πιο σημαντικά σημεία κλειδιά είναι η ικανότητα να αποθηκεύεται το υδρογόνο αποτελεσματικά, γρήγορα και φθηνά. Το μοριακό υδρογόνο έχει υψηλό ενεργειακό περιεχόμενο σε σχέση με το βάρος του, αλλά από την άλλη μεριά το ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα όγκου είναι σχετικά χαμηλό. Αυτό το χαρακτηριστικό εγείρει σημαντικές προκλήσεις στον τρόπο αποθήκευσης του σε σύγκριση με την αποθήκευση της βενζίνης η οποία είναι υγρό καύσιμο. Οι τρόποι αποθήκευσης υδρογόνου μπορούν να διακριτοποιηθούν με διάφορους τρόπους. Ο πρώτος τρόπος είναι η αποθήκευση υπό μορφή συμπιεσμένου αερίου σε δεξαμενές υψηλής πίεσης. Ο δεύτερος τρόπος είναι η αποθήκευση του υπό μορφή υγρού σε κρυογενικές συνθήκες και ο τρίτος τρόπος είναι η αποθήκευση του σε νανοϋλικά, είτε σε μοριακή μορφή είτε σε ατομική μορφή. Ο συνδυασμός των παραπάνω μεθόδων δεν είναι απαγορευτικός και είναι πολύ πιθανόν ικανοποιητικές λύσεις για την αποθήκευση του υδρογόνου να προκύψουν από ένα τέτοιο συνδυασμό.

#### **1.3.1 Συμπιεσμένο υδρογόνο.**

Η αποθήκευση υδρογόνου υπό πίεση έχει χρησιμοποιηθεί για πολλά χρόνια με επιτυχία. Οι τρεις κύριοι τύποι δεξαμενών που χρησιμοποιούνται είναι οι εξής: από ατσάλι, από αλουμίνιο εσωκλεισμένο σε fiberglass και από πλαστικό εσωκλεισμένο σε fiberglass. Σε σταθερά συστήματα όπου το βάρος και το μέγεθος δεν είναι πρόβλημα οι δεξαμενές από ατσάλι είναι μια πολύ καλή λύση. Τα τελευταία χρόνια έχει υπάρξει σημαντική πρόοδος στην ανάπτυξη ενός νέου τύπου, σύνθετης δεξαμενής όπου μπορεί να αποθηκευτεί το υδρογόνο υπό πίεση 350 bar και να πληρεί τους κανόνες ασφαλείας. Οι δεξαμενές αυτού του τύπου αποθηκεύουν το υδρογόνο σε ποσοστό 10 - 12% κατά βάρος λύνοντας το πρόβλημα του βάρους. Πρόοδος έχει γίνει και σε δεξαμενές που αποθηκεύουν υδρογόνο υπό πίεση 700 bar, αυτές οι δεξαμενές θα λύσουν το πρόβλημα του όγκου, απαραίτητο για να επιτευχθεί ο στόχος της απόστασης οδήγησης οχημάτων. Επίσης έχουν σχεδιαστεί ελαφριές, σύνθετες δεξαμενές όπου εκμεταλλεύονται τον χώρο καλύτερα από τις συνήθεις δεξαμενές κυλινδρικού τύπου. Η τεχνολογία αποθήκευσης υδρογόνου με συμπίεση αντιμετωπίζει και διάφορα τεχνικά προβλήματα, όπως τα αδιαβατικά φαινόμενα που υπάρχουν κατά την εκτόνωση και τη συμπίεση του υδρογόνου κατά τη διάρκεια των κύκλων εκφόρτωσης-φόρτισης.

#### **1.3.2 Υγροποιημένο υδρογόνο.**

Για τα κρυογενικά συστήματα ένα μειονέκτημα που παρουσιάζουν είναι ότι απαιτούν μεγάλο ποσό ενέργειας ώστε να υγροποιηθεί το αέριο, τιμή που αγγίζει σχεδόν το 40-50 % της χαμηλότερης τιμής θερμότητας του καυσίμου. Η συνολική πρακτικότητα του συστήματος περιορίζεται εξ' αιτίας της πεπερασμένης μεταφοράς θερμότητας μέσω του μονωμένου

τοιχώματος της δεξαμενής, οδηγώντας σε μια απώλεια της τάξης του 2-3% εξατμισμένου αερίου υδρογόνου ανά μέρα. Για να αποφευχθεί η κατασκευή μια διάταξης υψηλής πίεσης για την αποθήκευση η κρίσιμη θερμοκρασία του υδρογόνου είναι στα 32K, η υπερπίεση από τη δεξαμενή πρέπει να εκτονώνεται.

### **1.3.3 Υβρίδια μετάλλων.**

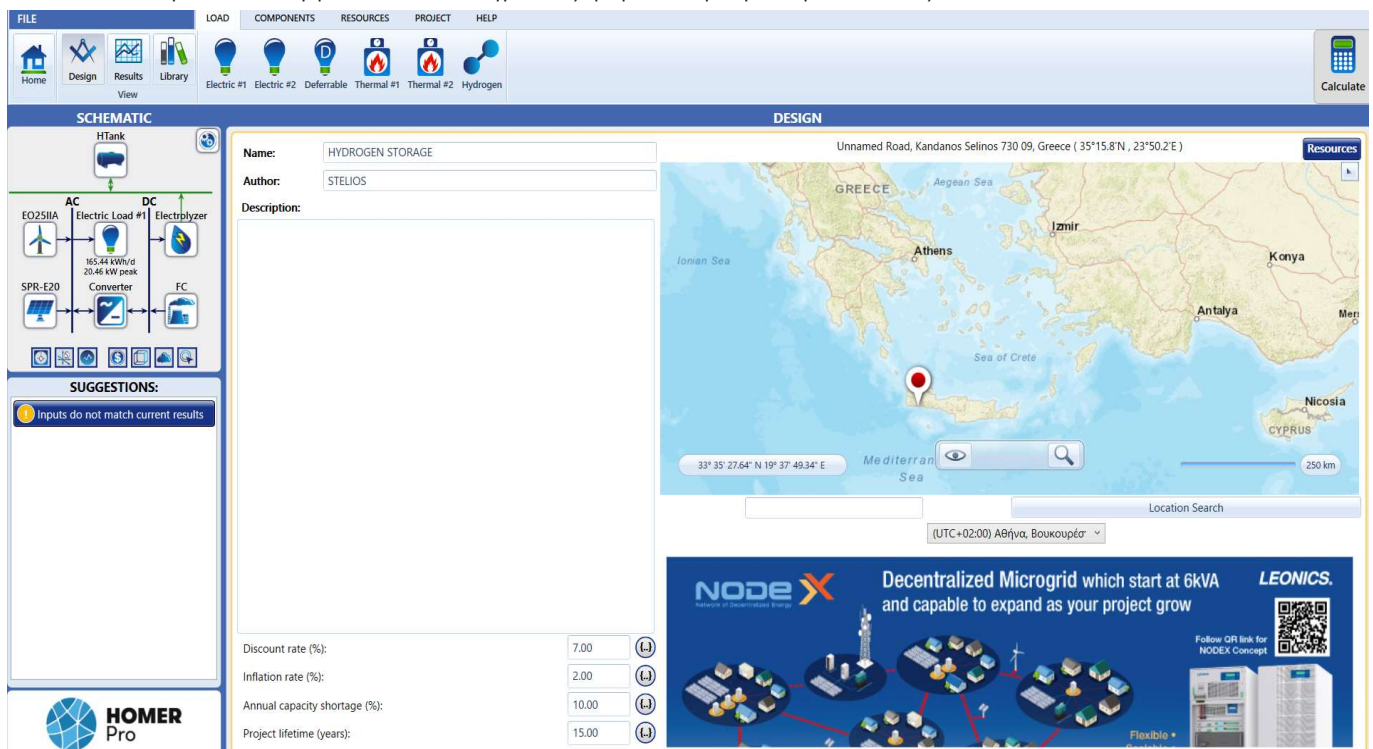
Ένας πιο αποδοτικός τρόπος για αποθήκευση υδρογόνου είναι η χρήση νανοδομημένων υλικών σαν προσροφητικά υποστρώματα, όπως τα στερεά μεταλλικά υδρίδια, τα οποία έχουν μελετηθεί για αρκετά χρόνια κυρίως ως προς τον μηχανισμό με τον οποίο διαχέεται το ατομικό υδρογόνο εσωτερικά της δομής του. Οι βασικοί μηχανισμοί για την αποθήκευση υδρογόνου σε νανοδομημένα υλικά είναι με φυσιόρροφηση (physisorption) μοριακού υδρογόνου στο νανοϋλικό, με χημειορόφηση (chemisorption) μοριακού υδρογόνου και με χημειορόφηση μέσω διάσπασης (dissociative chemisorption), όπου αποτελεί και το μηχανισμό αποθήκευσης στα μεταλλικά υδρίδια.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.

## 2.ΑΝΑΛΥΣΗ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟΥ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ HOMER Pro.

### 2.1 Εισαγωγή.

Το λογισμικό HOMER Pro αποτελεί ένα υπολογιστικό εργαλείο βελτιστοποίησης σχεδιασμού υβριδικού συστήματος παραγωγής και διανομής ενέργειας σε περιβάλλον συνδεδεμένου δικτύου ή μη .Αρχικά, το λογισμικό αναπτύχθηκε από το Εθνικό Εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας των ΗΠΑ(National Renewable Energy Laboratory) με στόχο τη διαμόρφωση συστημάτων παραγωγής ενέργειας αλλά και την σύγκριση ποικίλων τεχνολογιών παραγωγής δια μέσω μεγάλου φάσματος εφαρμογών .Πιο αναλυτικά,τα ερωτήματα που καλείται να απαντήσει το λογισμικό εξαρχής για τη μοντελοποίηση συστήματος είναι ποιά στοιχεία θα χρησιμοποιηθούν,πόσα και σε τι μέγεθος θα είναι τα συγκεκριμένα αλλά και ποιά σχεδίαση του παραπάνω υβριδικού συστήματος φέρει το μικρότερο κόστος .



Σχήμα 2.1. Επιφάνεια εργασίας Homer pro.

Τα δεδομένα εισόδου του προγράμματος περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, στοιχεία των ανανεώσιμων πηγών (αναμενόμενες ταχύτητες ανέμου, ηλιακή ακτινοβολία κτλ.), δεδομένα του φορτίου ζήτησης, κόστη λειτουργίας και συντήρησης του συστήματος, αρχικό κόστος της επένδυσης και άλλα .Επί πρόσθετα,ο σχεδιασμός και η ανάλυση συστημάτων παραγωγής ενέργειας είναι αρκετά ενδιαφέροντα και ποικίλλουν , λόγω του μεγάλου αριθμού επιλογών σχεδιασμού και βασικών παραμέτρων , όπως το μέγεθος φορτίων .Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας προσθέτουν περαιτέρω πολυπλοκότητα επειδή η παραγωγή ενέργειας τους είναι



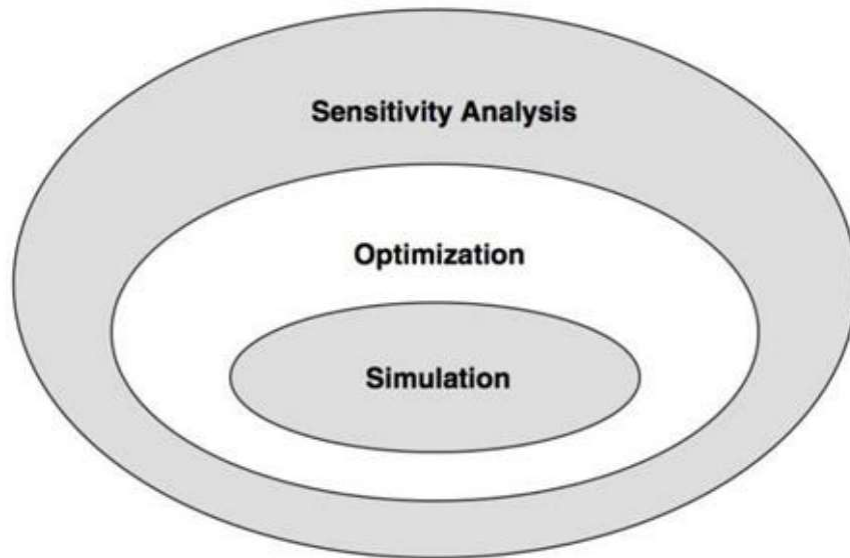
εποχιακή και η διαθεσιμότητα ανανεώσιμων πηγών είναι αβέβαιη, το πρόγραμμα αυτό έχει ως σκοπό να υπερνικήσει αυτές τις δυσκολίες. Όσον αφορά το ενεργειακό πεδίο του λογισμικού αναφέρονται ανανεώσιμες αλλά και συμβατικές πηγές ενέργειας.

Πίνακας 2.1.Ενεργειακό πεδίο HOMER Pro.

<u>ΠΗΓΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</u>	<u>ΑΠΟΘΗΚΕΥΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ</u>
Φωτοβολταϊκά	Συστοιχία μπαταριών
Ανεμογεννήτριες	Μπαταρίες ροής
Υδροστρόβιλοι	Δεξαμενή υδρογόνου
Γεννήτριες:ντίζελ, βενζίνη,ενναλακτικά καυσίμα	
Ηλεκτρικό δίκτυο	<u>ΦΟΡΤΙΑ</u>
Κυψέλες καυσίμου	Καθημερινό προφίλ ηλεκτρικού φορτίου
Electrolyzers	Θερμικά (θέρμανση χώρων)
	Κάλυψη ζήτησης υδρογόνου

Το πρόγραμμα λαμβάνει υπόψη του τις οικονομικές και τεχνικές δυνατότητες του επιθυμητού συστήματος και δημιουργεί αναλυτικές εκθέσεις, οι οποίες παρουσιάζουν πλήθος χαρακτηριστικών του εκάστοτε συστήματος (αρχικό κόστος επένδυσης, ετήσιο κόστος λειτουργίας, βαθμός εισχώρησης ανανεώσιμων πηγών κτλ.).Αναλυτικότερα,το λογισμικό πραγματοποιεί τρεις βασικές λειτουργίες για τη λήψη αποφάσεων την προσομοίωση,την βελτιστοποίηση και την ανάλυση ευαισθησίας .Κατά χρονολογική σειρά στο στάδιο της προσομοίωσης διαμορφώνεται η αρχιτεκτονική του συγκεκριμένου υβριδικού συστήματος που φτιάξαμε με σκοπό να πληρούνται οι στόχοι της ενεργειακής απόδοσης των τεχνολογικών χαρακτηριστικών και του χαμηλότερου καθαρού παρόντος κόστους .Εν συνεχεία,το στάδιο της βελτιστοποίησης βελτιστοποιεί μεγάλη ποικιλία υβριδικών συστημάτων με σκοπό να επιλυθούν οι προαναφερθέντες στόχοι .Τέλος,η ανάλυση ευαισθησίας πραγματοποιεί έλεγχο αβεβαιότητας για ενδεχόμενα τιμών όπου ο χρήστης δεν

μπορεί να γνωρίζει εξ αρχής όπως είναι η ταχύτητα του ανέμου, η ηλιακή ακτινοβολία και η τιμή του καυσίμου, παρακάτω εντοπίζεται το γράφημα των παραπάνω λειτουργιών αποτυπώνοντας ότι το ένα είναι υπ πυρήνας του άλλου.



**Σχήμα 2.2.** Η Αλληλεπίδραση των τριών βασικών λειτουργιών του προγράμματος.[8]

## 2.2 Προσομοίωση.

Στον πυρήνα του, το HOMER είναι ένα μοντέλο προσομοίωσης. Θα προσπαθήσει να προσομοιώσει ένα βιώσιμο σύστημα για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς του εξοπλισμού που θα εξετάσει ο χρήστης. Ανάλογα με τον τρόπο ρύθμισης του προβλήματος, το λογισμικό μπορεί να προσομοιώσει εκατοντάδες ή ακόμη και χιλιάδες συστήματα, έτσι προσομοιώνεται η λειτουργία ενός υβριδικού μικροπυρήνα για έναν ολόκληρο χρόνο, σε χρονικά βήματα από ένα λεπτό έως μία ώρα. Το HOMER μοντελοποιεί μια διαμόρφωση συστήματος με το να εκτελεί μια ωριαία εξομοίωση κάθε φορά. Το βήμα είναι κάθε μια ώρα, υπολογίζοντας τη διαθέσιμη ανανεώσιμη ενέργεια, συγκρίνοντας την με το ηλεκτρικό φορτίο και αποφασίζοντας τι να κάνει με το πλεόνασμα ανανεώσιμης ενέργειας σε περιόδους που παράγεται αρκετή ή πόση παραπάνω να παράγει σε περιόδους που έχουμε έλλειψη. Όταν ολοκληρώσει ένα έτος υπολογισμών, αξιολογεί εάν το σύστημα ικανοποιεί τους περιορισμούς που επιβάλλονται από το χρήστη στις απαιτούμενες ποσότητες όπως η συνολική απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας, το ποσό της ενέργειας που παράγεται από τις ανανεώσιμες πηγές, ή οι εκπομπές ορισμένων ρύπων. Το HOMER υπολογίζει επίσης τις ποσότητες που απαιτούνται για να υπολογίσουν το κόστος κύκλου ζωής του συστήματος, όπως η ετήσια κατανάλωση καυσίμων, οι ετήσιες ώρες λειτουργίας των γεννητριών, η αναμενόμενη διάρκεια ζωής μπαταριών, ή η ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται ετησίως από το δίκτυο. Συμπερασματικά, η προσομοίωση επιτελείται πρώτον για να αποδείξει ότι το σύστημα που διαμορφώθηκε είναι υλοποιήσιμο και ικανοποιεί του προηγούμενους περιορισμούς αλλά και τα ηλεκτρικά-θερμικά φορτία που έχει θέσει ο χρήστης. Δεύτερον, υπολογίζεται το συνολικό κόστος του διαμορφωμένου υβριδικού

συστήματος, οι υπολογισμοί του κόστους των συστημάτων αναφέρονται σε δαπάνες όπως το κόστος κεφαλαίου, το κόστος αντικατάστασης και λειτουργίας καθώς και το κόστος συντήρησης.

## 2.3 Βελτιστοποίηση.














































Όπως αναφέρθηκε στο προηγούμενο στάδιο της προσομοίωσης για λήψη της αρχιτεκτονικής του συστήματος ορίζονται τα στοιχεία του κάθε συστήματος, το μέγεθος του αλλά και ο τύπος τους, έτσι σειρά έχει το κομμάτι της βελτιστοποίησης. Αρχικά, διεξοδικά το πρόγραμμα δημιουργεί αλληπαλλήλες συγκρίσεις διαφορετικών διαμορφώσεων παρόμοιων με αυτών που του έχουν δοθεί στο προηγούμενο στάδιο, εν συνεχεία το λογισμικό έχει την δυνατότητα να βελτιστοποιήσει το πλήθος, το μέγεθος και τη λειτουργία των μελών της αρχιτεκτονικής του χρήστη προκειμένου να προταθεί το βέλτιστο υβριδικό σύστημα ενέργειας, παραδείγματος χάρη είναι ικανό να παρέμβει στις τιμές των στοιχείων που του έχει δώσει εξαρχής ο χρήστης όπως είναι ο αριθμός ανεμογεννητριών το μέγεθος των φωτοβολταϊκών ή της κυψέλης καυσίμου, της μπαταρίας και άλλα. Το προηγούμενο μπορεί να συμβεί με τη δυνατότητα που δίνεται από το λογισμικό να εισάγει ο χρήστης μεγάλο εύρος τιμών για κάθε μεταβλητή απόφασης. Παρακάτω αποτυπώνεται ο χώρος αναζήτησης του προγράμματος και πιο συγκεκριμένα αυτός που θέσαμε στη παρούσα τεχνοοικονομική μελέτη.

Converter Capacity (kW) <input checked="" type="checkbox"/> Optimizer	Electrolyzer Capacity (kW)	FC Capacity (kW)	HTank Capacity (kg)	SPR-E20 Size (kW) <input type="checkbox"/> Optimizer	EO25IIA Quantity (#) <input type="checkbox"/> Optimizer
0	0	0	0	0	0
31	20	24	50	20	2
	40		100	40	4
	60		150	60	6
	80		200	80	8
	100			100	10
	120				

**Σχήμα 2.3.** Τιμές αναζήτησης στοιχείων υβριδικού συστήματος.

Εν κατακλείδι, μετά τη σύγκριση των διαφόρων μοντέλων συστήματος και αφού το λογισμικό απορρίψει πλήθος αυτών εξαιτίας των περιορισμών που έχουν ορισθεί το πρόγραμμα παρουσιάζει σε πίνακα τα αναλυτικά αποτελέσματα της βελτιστοποίησης. Κάθε σειρά του πίνακα αντιπροσωπεύει μια εφικτή διαμόρφωση του συστήματος. Οι έξι πρώτες στήλες περιέχουν τα εικονίδια των στοιχείων που διαμορφώνουν το σύστημα, οι επόμενες έξι αναφέρονται στον αριθμό ή το μέγεθος του κάθε στοιχείου, ενώ οι επόμενες πέντε στήλες περιέχουν μερικά από τα βασικά αποτελέσματα της προσομοίωσης: Δηλαδή, το συνολικό

κόστος κεφαλαίου του συστήματος, το συνολικό καθαρό παρόν κόστος, το κόστος ενέργειας ανά κιλοβατώρα, την ετήσια κατανάλωση καυσίμου και τον αριθμό των ωρών της γεννήτριας που λειτουργεί ανά έτος. Ο χρήστης στη συνέχεια έχει πρόσβαση σε λεπτομερή αποτελέσματα για κάθε πραγματοποιήσιμη διαμόρφωση του συστήματος. Η βέλτιστη μορφή του υβριδικού συστήματος βρίσκεται στη πρώτη γραμμή με το χαμηλότερο καθαρό παρόν κόστος καθώς ιεραρχείται από το χαμηλότερο στο μεγαλύτερο.

Optimization Results																			Categorized		Overall	
Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.																						
Architecture											Cost				System		FC					
    	SPR-E20 (kW)	EO25IIA	FC (kW)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (€)	COE (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren. Frac (%)	Total Fuel (kg/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (kg)	O&M Cost (€/yr)	Fuel Cost (€/yr)				
    	20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.1	LF	€353,184	€0.594	€5,384	€296,925	100	2,218	2,602	17,054	2,218	1,873	0				
    	20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.1	CC	€353,184	€0.594	€5,384	€296,925	100	2,218	2,602	17,054	2,218	1,873	0				
    	20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.2	LF	€353,454	€0.594	€5,405	€296,973	100	2,232	2,616	17,166	2,232	1,884	0				
    	20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.2	CC	€353,454	€0.594	€5,405	€296,973	100	2,232	2,616	17,166	2,232	1,884	0				
    	20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.4	LF	€353,723	€0.594	€5,427	€297,022	100	2,245	2,630	17,277	2,245	1,894	0				
    	20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.4	CC	€353,723	€0.594	€5,427	€297,022	100	2,245	2,630	17,277	2,245	1,894	0				
    	20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.7	LF	€354,308	€0.594	€5,473	€297,119	100	2,272	2,661	17,489	2,272	1,916	0				
    	20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.7	CC	€354,308	€0.594	€5,473	€297,119	100	2,272	2,661	17,489	2,272	1,916	0				

Σχήμα 2.4 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.





























## 2.4 Ανάλυση Ευαισθησίας.

Το γεγονός κατά τον οποίο ο χρήστης δεν μπορεί να ελέγξει όλες τις πτυχές ενός συστήματος και δεν μπορεί να γνωρίζει τη σημασία μιας συγκεκριμένης μεταβλητής ή επιλογής χωρίς να εκτελέσει εκατοντάδες ή χιλιάδες προσομοιώσεις και να συγκρίνει τα αποτελέσματα τού οδήγησε τους δημιουργούς του λογισμικού στη κατασκευή της ανάλυσης ευαισθησίας.

Πιο αναλυτικά, η ανάλυση ευαισθησίας μελετά τις συνέπειες που υφίσταται η βέλτιστη λύση ενός γραμμικού μοντέλου, ως συνέπεια αλλαγών στις τιμές των παραμέτρων του. Μια μεταβλητή για την οποία ο χρήστης έχει εισάγει πολλαπλές τιμές καλείται μεταβλητή ευαισθησίας. Σχεδόν κάθε αριθμητική μεταβλητή στο HOMER που δεν είναι μια μεταβλητή απόφασης μπορεί να είναι μια μεταβλητή ευαισθησίας. Παραδείγματα που περιλαμβάνουν είναι η τιμή της ενέργειας δικτύου, η τιμή καυσίμων, το επιτόκιο, η μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας, μέση τιμή ταχύτητας ανέμου και άλλα.

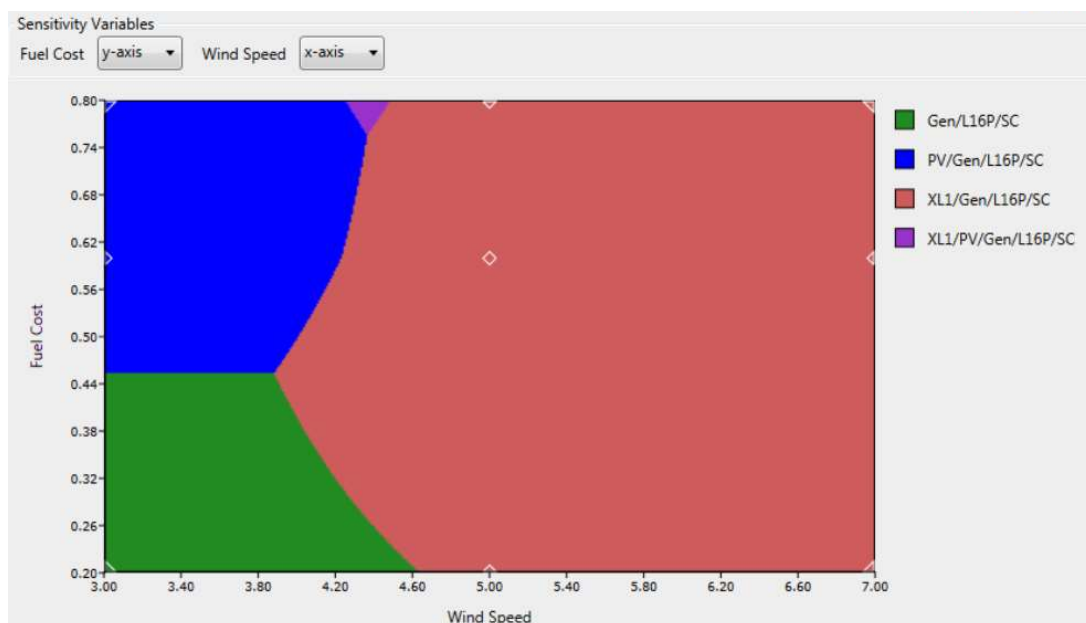
Κάθε συνδυασμός μεταβλητών τιμών ευαισθησίας καθορίζει μια ευδιάκριτη περίπτωση ευαισθησίας. Παραδείγματος χάριν, εάν ο χρήστης διευκρινίζει έξι τιμές για την τιμή καυσίμου ντίζελ και τέσσερις τιμές για την ταχύτητα του ανέμου, αυτός καθορίζει 24 ευδιάκριτες περιπτώσεις ευαισθησίας. Τα αποτελέσματα ευαισθησίας σε πίνακα αποτελούνται από μια λίστα του συστήματος με το χαμηλότερο κόστος για κάθε περίπτωση ευαισθησίας. Στο παράδειγμα που φαίνεται παρακάτω, οι δύο πρώτες στήλες εμφανίζουν τις τιμές των δύο μεταβλητών ευαισθησίας: την τιμή καυσίμου ντίζελ (τιμή καυσίμου βενζίνης) και την ταχύτητα ανέμου (μέσος κλιμακωτός άνεμος). Οι επόμενες πέντε στήλες περιέχουν

τιμές που δείχνουν στο σύστημα με το χαμηλότερο κόστος την παρουσία και το μέγεθος των πέντε υπό εξέταση στοιχείων. Από αριστερά προς τα δεξιά, είναι μπαταρίες, η γεννήτρια ντίζελ, ανεμογεννήτριες, φωτοβολταϊκά πάνελ και ο μετατροπέας. Ακολουθούν αρκετές στήλες με συνοπτικές τιμές που προέρχονται από τα αποτελέσματα προσομοίωσης του συστήματος χαμηλότερου κόστους, συμπεριλαμβανομένου του αρχικού κεφαλαίου, του λειτουργικού κόστους και του συνολικού καθαρού παρόντος κόστους.

Sensitivity		Architecture											Cost					
Gasoline Fuel Price (\$/L)	Wind Scaled Average (m/s)								PV (kW)	XL1	Gen (kW)	L16P	Converter (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$)	Initial capital (\$)
0.40	3.00								2.0		3	12	1	CC	\$0.62	\$29,283	\$850	\$18,290
0.40	4.00								1.0	1	3	12	1	CC	\$0.61	\$28,921	\$1,062	\$15,190
0.40	5.00								1.0	1	3	12	1	CC	\$0.54	\$25,575	\$803	\$15,190
0.40	6.00								1.0	1	3	12	1	LF	\$0.48	\$22,882	\$595	\$15,190
0.40	7.00									1	3	12	2	CC	\$0.42	\$19,958	\$852	\$8,940

Σχήμα 2.5.Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.

Το λογισμικό παρέχει και γραφική απεικόνιση η οποία συχνά μεταφέρει τα αποτελέσματα με πιο ουσιαστικό τρόπο από έναν πίνακα. Το παρακάτω παράδειγμα εμφανίζει τις ίδιες πληροφορίες όπως στην παραπάνω οθόνη σε μορφή πίνακα. Η γραφική μορφή διευκολύνει την προβολή υπό ποιες συνθήκες οι διαφορετικοί τύποι συστημάτων είναι βέλτιστοι. Τα διαμάντια υποδεικνύουν σημεία όπου ο HOMER βρήκε το σύστημα με το μικρότερο κόστος καυσίμου. Όλα τα άλλα σημεία χρωματίζονται χρησιμοποιώντας παρεμβολή.



Σχήμα 2.6.Διάγραμμα ανάλυσης ευαισθησίας.[8]

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.

## 3.ΜΕΛΕΤΗ ΚΑΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ $H_2$ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΑΝΑΝΕΩΣΙΜΩΝ ΠΗΓΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΣΤΟΥΣ ΝΟΜΟΥΣ ΧΑΝΙΩΝ-ΡΕΘΥΜΝΟΥ.

### 3.1 Εισαγωγή.

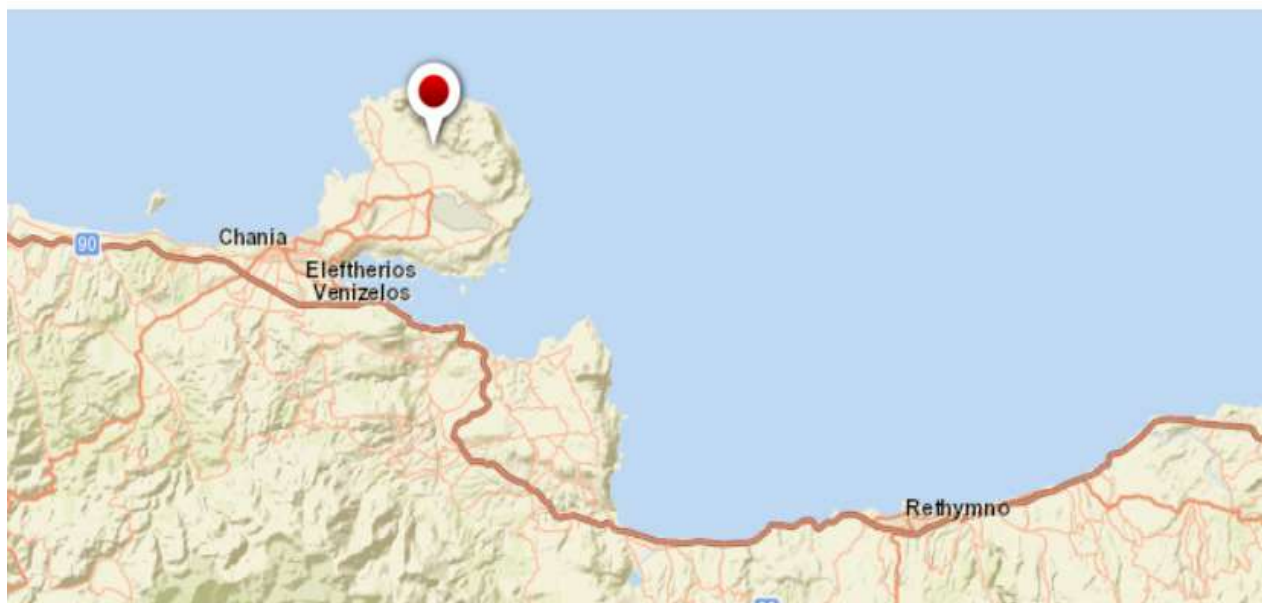
Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται η μελέτη και ο σχεδιασμός υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, που εμπεριέχουν τεχνολογίες ΑΠΕ για τη κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ενός οικισμού. Στόχος είναι να μελετηθούν διαφορετικές τεχνολογικές λύσεις ώστε να γίνει απεξάρτηση από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής με ταυτόχρονη διείσδυση συστημάτων παραγωγής ΑΠΕ και επικουρικών συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας .Συγκεκριμένα,η αντικατάσταση των γεννητριών diesel και των μπαταριών από τα κύτταρα καυσίμου (FC) που λειτουργούν με βάση το άφθονο υδρογόνο θα ελαχιστοποιήσει την εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας έτσι στη μείωση την περιβαλλοντικών επιδράσεων .Συνεπώς,η αποθήκευση της ανανεώσιμης ενέργειας υπό μορφή ηλεκτρολυτικά παραχθέντος υδρογόνου στα αυτόνομα ηλεκτρικά συστήματα και επανηλέκτριση του υδρογόνου στα κύτταρα καυσίμου πρόκειται να ερευνηθεί σε δύο συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας το ένα στην περιοχή του Ακρωτηρίου στο νομό Χανίων και το άλλο στη περιοχή του Αγίου Βασιλείου στο νομό Ρεθύμνου .Για να είναι ρεαλιστική η προσέγγιση χρησιμοποιήθηκαν στοιχεία και από τις δύο περιοχές ενώ η μελέτη αυτή πραγματοποιήθηκε με τη βοήθεια του λογισμικού HOMER.

### 3.2 Τοποθεσία.

- Δήμος Ακρωτηρίου,νομός Χανίων.

Για την προσομοίωση επιλέχθηκε στη περιφέρεια του νομού Χανίων η περιοχή του Ακρωτηρίου, νομός έχει εγκατεστημένη ισχύ της τάξεως των 345 MW ως συνδεδεμένη νήσος .Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη που πραγματοποιείται αναφέρεται σε μια μικρή περιοχή του δήμου κατά την οποία το προσεχώς υβριδικό σύστημα καλείται να καλύψει τις ανάγκες ηλεκτρικού φορτίου από δέκα μέχρι δεκαπέντε κατοικιών της περιοχής.





**Σχήμα 3.1.**Γεωγραφικό μήκος 35 34.11N ,γεωγραφικό πλάτος 24 7.8E περιοχής Ακρωτηρίου.

➤ Δήμος Αγίου Βασιλείου, νομός Ρεθύμνου.

Εν συνεχεία, η αμέσως επόμενη προσομοίωση που πραγματοποιείται βρίσκεται στο νομό Ρεθύμνου, στη περιοχή του Αγίου Βασιλείου, η οποία σύμφωνα με την ιστοσελίδα βάσης δεδομένων Global Wind Atlas παρέχει ένα από τα υψηλότερα αιολικά δυναμικά της Κρήτης. Το υβριδικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πρόκειται να εξασφαλίσει τις απαιτήσεις ηλεκτρικού φορτίου για δέκα μέχρι δεκαπέντε κατοικιών.



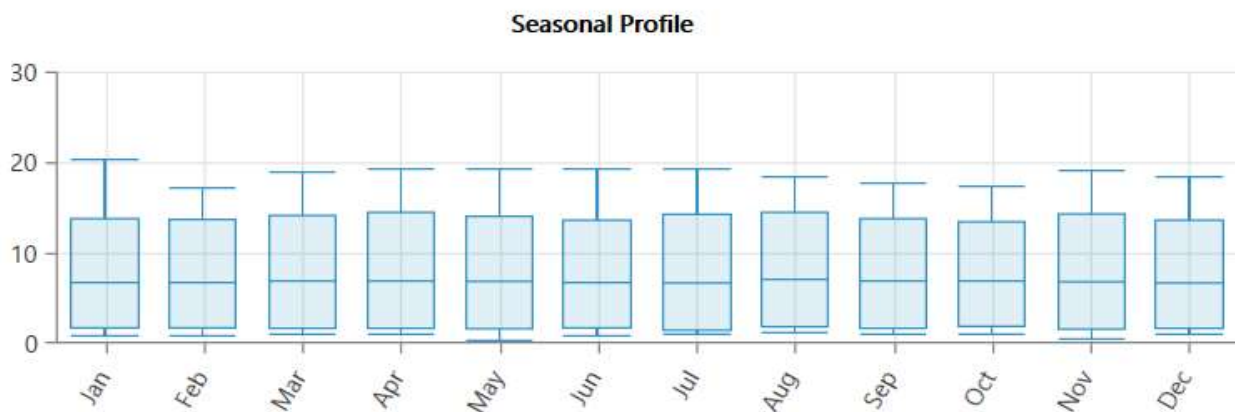
**Σχήμα 3.2.**Γεωγραφικό μήκος 35 12.3N ,γεωγραφικό πλάτος 24 23.9.E περιοχής Αγίου Βασιλείου

### 3.3 Φορτίο.

Η ετήσια μέση κατανάλωση ενέργειας και για τις δύο περιοχές είναι οι 165 kWh ανά ημέρα και η ετήσια μέγιστη τιμή ισχύος είναι τα 20.466 kW. Ο παράγοντας φορτίου (load factor) υπολογίζεται, αν διαιρέσουμε τον μέσο όρο του ηλεκτρικού φορτίου με την καθημερινή αιχμή. Στη συνέχεια στο σχήμα βλέπουμε την ετήσια κατανομή φορτίου σε kW σε κάθε περιοχή αλλά και την ημερήσια.

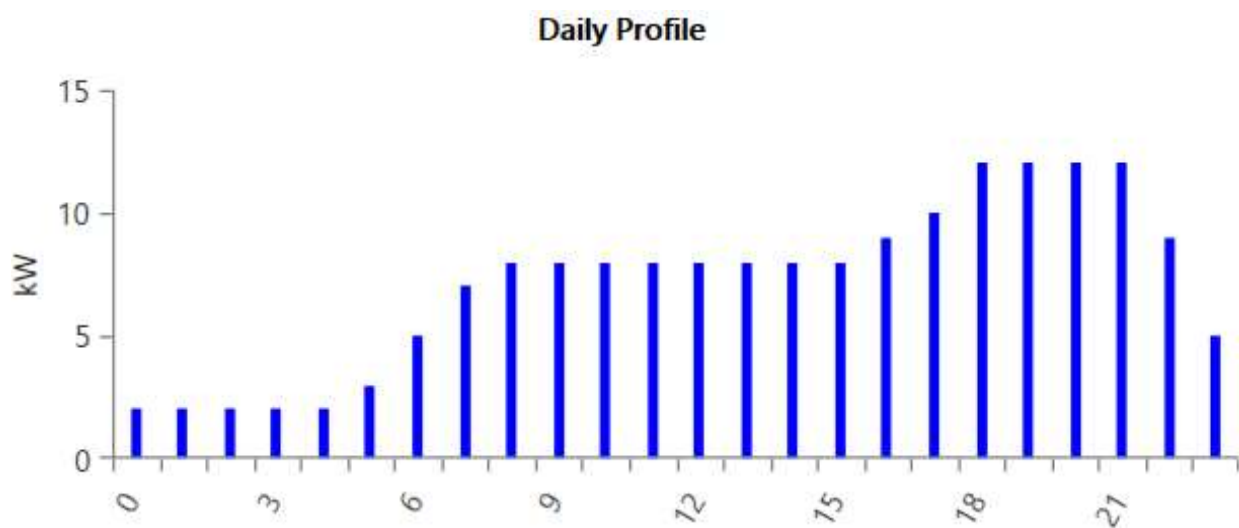
Metric	Baseline	Scaled
Average (kWh/day)	165.44	165.44
Average(kW)	6.89	6.89
Peak (kW)	20.46	20.46
Load factor	.34	.34

Σχήμα 3.3.Μετρήσεις φορτίου στο νομό Χανίων-Ρεθύμνου.



Σχήμα 3.4.Ετήσια κατανομή φορτίου και στους δύο νομούς .



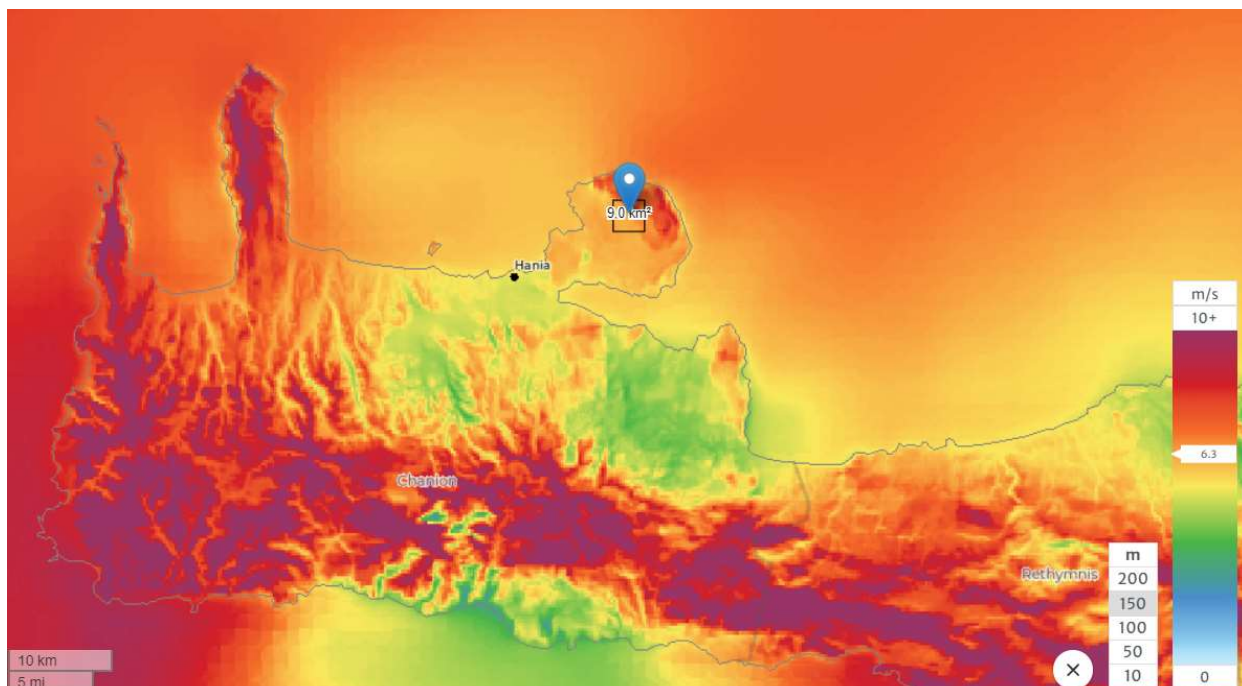


Σχήμα 3.5. Ημερήσια κατανομή φορτίου στους δύο νομούς .

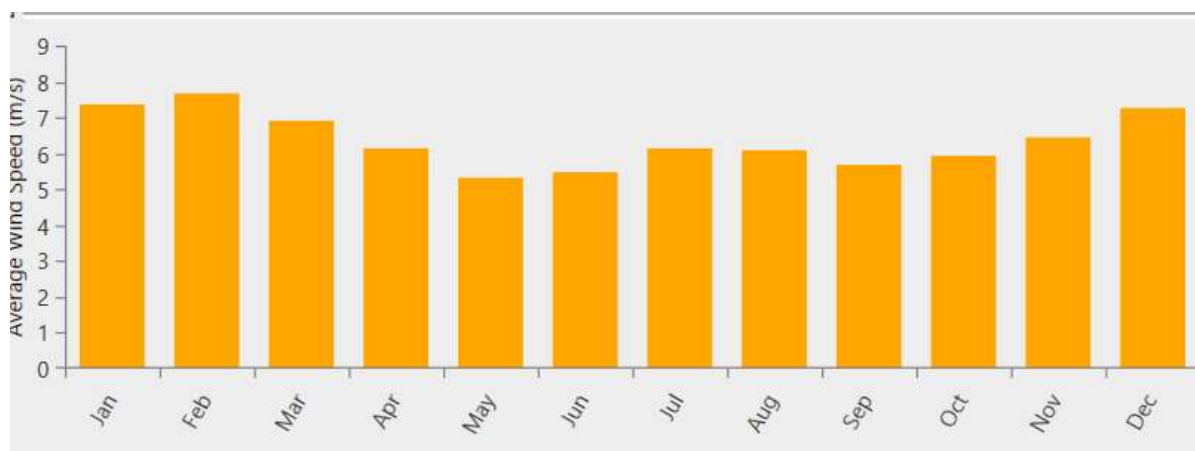
### 3.4 Αιολικά δεδομένα.

➤ Δήμος Ακρωτηρίου, νομός Χανίων.

Τα δεδομένα για την εύρεση της ταχύτητας ανέμου της περιοχής θα ληφθούν από τη διαδικτυακή εφαρμογή βάσης δεδομένων Global Wind Atlas η οποία αναπτύχθηκε για να βοηθήσει τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, τους σχεδιαστές και τους επενδυτές να εντοπίσουν περιοχές υψηλού ανέμου για την παραγωγή αιολικής ενέργειας σχεδόν οπουδήποτε στον κόσμο και στη συνέχεια να εκτελέσουν προκαταρκτικούς υπολογισμούς .Ακόμη από τα δεδομένα του παραπάνω σχήματος παρατηρούμε πως η περιοχή έχει αιολικό δυναμικό μέσης τιμής  $6.32\text{m/s}$ , με τους χειμερινούς μήνες να έχουν τις μεγαλύτερες ταχύτητες.



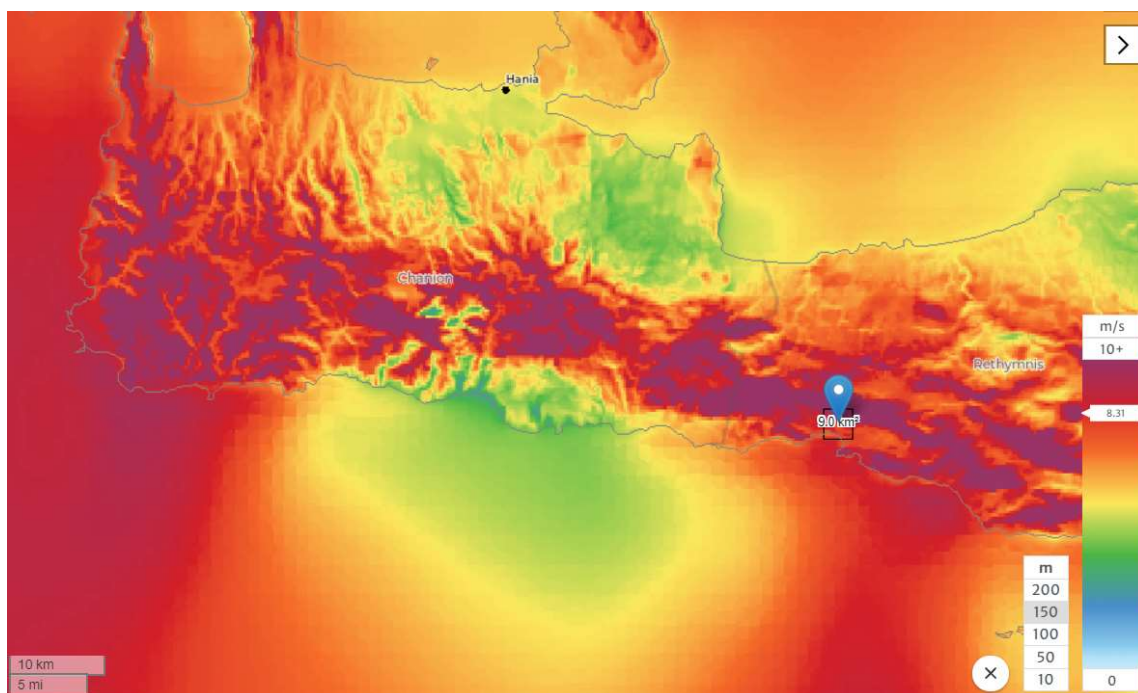
Σχήμα 3.6.Αιολικός χάρτης εφαρμογής Global Wind Atlas.[8]



Σχήμα 3.7.Ετήσια κατανομή μέσης ταχύτητας ανέμου στον περιοχή του Ακρωτηρίου.

➤ Δήμος Αγίου Βασιλείου, νομός Ρεθύμνου.

Για την δεύτερη προσομοίωση συστήματος έπειτα από ενδελεχής έρευνα στη διαδικτυακή βάση δεδομένων Global Wind Atlas εντοπίστηκε πως στη περιοχή του Αγίου Βασιλείου συναντάτε ένα από τα μεγαλύτερα αιολικά δυναμικά της Κρήτης .Επιπλέον, από τα δεδομένα του παραπάνω σχήματος τα οποία αντλήθηκαν από την εφαρμογή παρατηρούμε πως η περιοχή έχει αιολικό δυναμικό μέσης τιμής 10.48m/s.



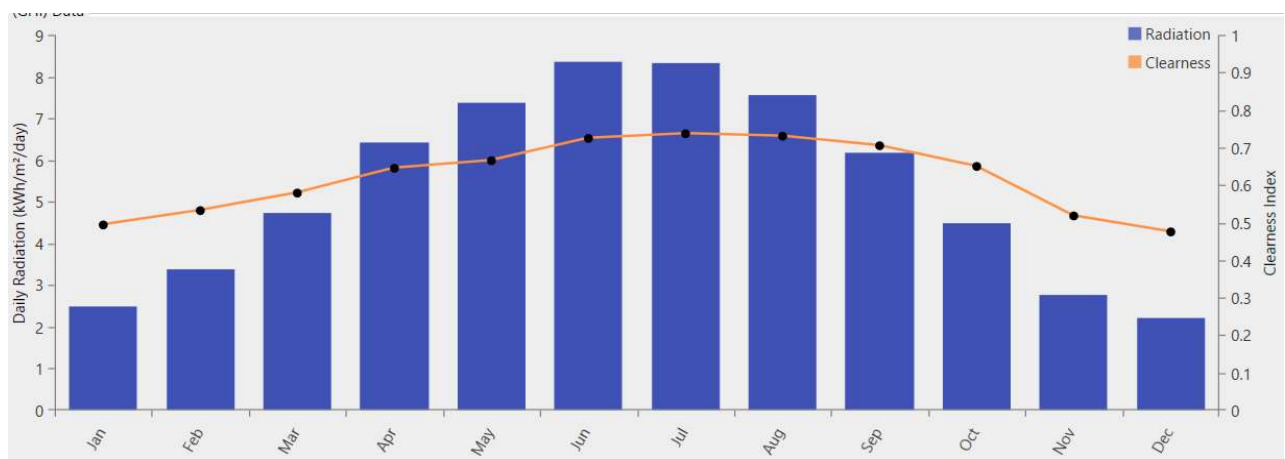
Σχήμα 3.8.Αιολικός χάρτης εφαρμογής Global Wind Atlas.[8]



Σχήμα 3.9.Ετήσια κατανομή μέσης ταχύτητας ανέμου στον περιοχή του Αγίου Βασιλείου.

### 3.5 Ηλιακά δεδομένα.

Τα δεδομένα, όσον αφορά την ηλιακή ακτινοβολία στο νομό Χανίων αλλά και στο νομό Ρεθύμνου και συγκεκριμένα ο δείκτης αιθριότητας και η ημερήσια ακτινοβολία φαίνονται στο σχήμα. Οι μετρήσεις της ωριαίας ηλιακής ακτινοβολίας για την χρονική περίοδο ενός έτους, προκειμένου να υπολογιστούν οι μηνιαίες μέσες τιμές του δείκτη αιθριότητας και της καθημερινής ακτινοβολίας, εισήχθησαν αυτόματα στο πρόγραμμα προσομοίωσης HOMER, εφόσον το πρόγραμμα έχει πρόσβαση στα καιρικά στοιχεία της NASA, με την προϋπόθεση του ορισμού από τον εκάστοτε χρήστη του γεωμετρικού πλάτους και γεωμετρικού μήκους της περιοχής, την οποία ενδιαφέρεται να μελετήσει. Όπως είναι προφανές, η ηλιακή ακτινοβολία είναι υψηλή κυρίως μεταξύ Μαΐου και Σεπτεμβρίου. Γι' αυτές τις τοποθεσίες, ο μέσος ετήσιος δείκτης αιθριότητας είναι 0,625 και η μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία είναι 5,365 kWh/ m<sup>2</sup>.



Σχήμα 3.10.Ετήσια κατανομή ημερήσιας ακτινοβολίας στο νομό Χανίων-Ρεθύμνου.

### 3.6 Τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των στοιχείων συστήματος προσομοίωσης.

#### Ανεμογεννήτρια

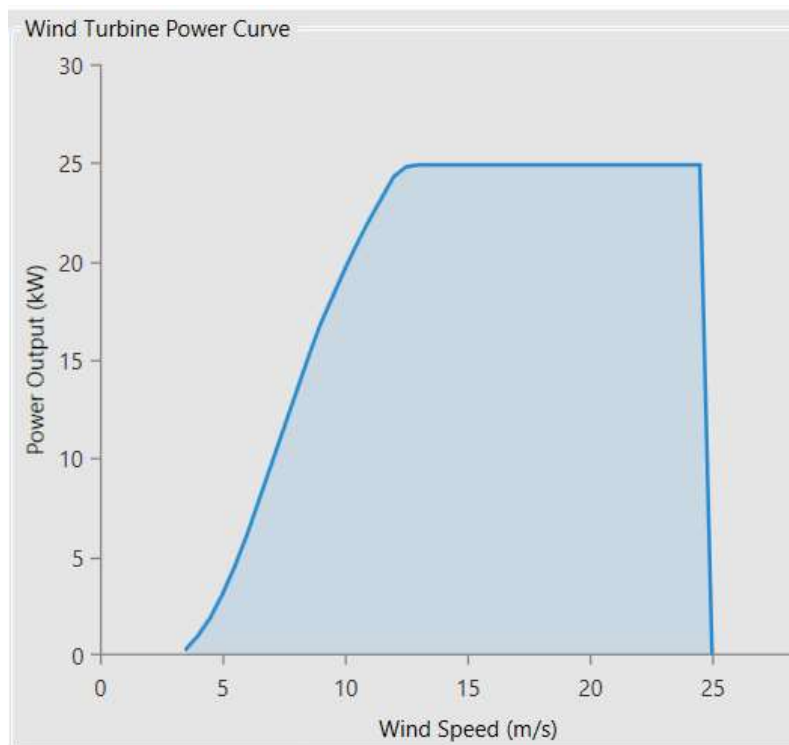
Στη προσομοίωση του υβριδικού συστήματος επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ανεμογεννήτρια της Eocycle,καναδικής εταιρίας παραγωγής ενέργειας αιολικού δυναμικού,την Eocycle 25 Class II 25kW.Στη συνέχεια παρατίθενται βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της επιλεγμένης ανεμογεννήτριας

### Τεχνικά χαρακτηριστικά

Πίνακας 3.1. Τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννήτριας Eocycle. [10]

Rated Power	25kW
Cut-In Speed	3.5 m/s
Cut-Out Speed	25 m/s
Rotor Diameter	12.6 m
Hub Height	30 m
Lifetime	20 years
Blade Length	7.6 m

Η καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα μέσα από το πρόγραμμα Homer ,όπου φαίνεται η ονομαστική της ισχύς 25kW.



Σχήμα 3.11. Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας Eocycle.

Τα κόστη της επιλεγμένης ανεμογεννήτριας Eocycle 25 Class II 25kW συνοψίζονται παρακάτω μέσα από το πρόγραμμα Hommer.

Quantity	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (\$/year)
1	€85,000.00	€65,000.00	€1,000.00

**Σχήμα 3.12.**Συνολικά κόστη ανεμογεννήτριας Eocycle

### **Φωτοβολταϊκά**

Τα φωτοβολταϊκά που θα χρησιμοποιήσουμε στο μοντέλο προσομοίωσης είναι μονοκρυσταλλικού τύπου πάνελ (N-type) ονομαστικής ισχύος 327 W, της εταιρίας Sunpower Solar μιας αμερικανικής εταιρείας ενέργειας που σχεδιάζει και κατασκευάζει φωτοβολταϊκά κύτταρα κρυσταλλικού πυριτίου και ηλιακούς συλλέκτες, η οποία ανήκει στη γαλλική πολυεθνική Total .Στη συνέχεια παρατίθενται βασικά μηχανολογικά και ηλεκτρικά δεδομένα του επιλεγμένου πάνελ SPR-E20-327-COM .

### **Τεχνικά χαρακτηριστικά.**

**Πίνακας 3.2.**Τεχνικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών Sunpower.[11]

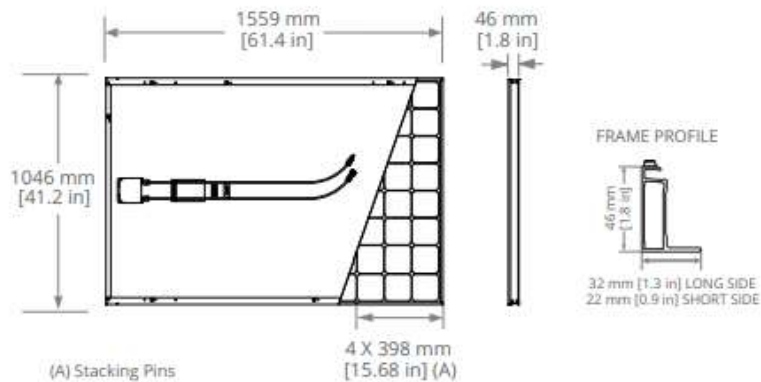
Nominal Power (P <sub>nom</sub> ) <sup>5</sup>	327 W
Avg. Panel Efficiency	21.4%
Solar Cells	96 Monocrystalline Maxeon Gen II
Temperature	-40° F to +185° F (-40° C to +85° C)
Weight	41 lbs (18.6 kg)
Max. Load	Wind: 50 psf, 2400 Pa front & back Snow: 112 psf, 5400 Pa front
Tempered Glass	High-transmission tempered anti- reflective
Temperature coef.	-0.380

### Ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά

Πίνακας 3.3. Ηλεκτρολογικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκων Sunpower.[11]

Open Circuit Voltage (VOC)	40.8V
Short-Circuit Current (Isc)	6.46 A
Rated Voltage (Vmpp)	54.7 V
Rated Current (Impp)	5.98 A
Max. System Voltage	1000 V UL & 1000 V IEC
Maximum Series Fuse	15 A

### Μηχανολογικό σχέδιο φωτοβολταϊκού πάνελ SPR-E20-327-COM



Σχήμα 3.13. Σχέδιο φωτοβολταϊκων Sunpower.[11]

Επιπλέον,στη προσπάθεια εύρεσης βέλτιστης λύσης το πρόγραμμα Homer μας δίνει την δυνατότητα να εισάγουμε επιπρόσθετα στοιχεία για τα εισαγόμενα φωτοβολταϊκά πάνελ,έτσι και εμείς εισάγαμε τα παρακάτω.

### Εισαγόμενα στοιχεία

Πίνακας 3.4.Εισαγόμενα στοιχεία φωτοβολταϊκών Sunpower.

Lifetime	20 years
Directing factor	88.00 %
Ground reflectance	20.00 %
Tracking System	Horizontal axis, weekly adjustment
Temperature effects on power	-0.380 %
Nominal operating cell temperature	47°
Efficiency at standard effect cond.	20.40 %

Τα κόστη του φωτοβολταϊκού πάνελ SPR-E20-327-COM συνοψίζονται παρακάτω μέσα από το πρόγραμμα Homer.

Capacity (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	1,500.00	1,000.00	10.00

Σχήμα 3.14.Συνολικά κόστη φωτοβολταϊκών Sunpower.

### Μετατροπέας

Προκειμένου ένα ολοκληρωμένο υβριδικό σύστημα να εξυπηρετήσει φορτίο από τις πηγές εξόδου συνεχούς ρεύματος απαιτείται η λειτουργία ενός μετατροπέα .Συνεπώς,για τη προσομοίωση στο πρόγραμμα Homer θα χρησιμοποιηθούν συστοιχίες αντιστροφών DC-AC .Αν ο μετατροπέας λειτουργεί ως αντιστροφέας πρέπει να σημειώσουμε τη διάρκεια ζωής του και την απόδοσή του. Αν, αντίθετα, λειτουργεί ως ανορθωτής πρέπει να ορίσουμε την ονομαστική χωρητικότητα του ανορθωτή σε σχέση με τον αντιστροφέα.



Επίσης ,σημειώνουμε και την απόδοση του ανορθωτή. , δηλαδή το ποσοστό της AC ηλεκτρικής ενέργειας που μετατρέπεται σε DC ηλεκτρική ενέργεια.

### Εισαγόμενα στοιχεία

Πίνακας 3.5.Εισαγόμενα στοιχεία μετατροπέα.

Inverter input lifetime	15 years
Inverter input efficiency	95 %
Rectifier input relative capacity	100 %
Rectifier input efficiency	95 %

Τα κόστη του μετατροπέα συνοψίζονται παρακάτω μέσα από το πρόγραμμα Hommer.

Capacity (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	€300.00	€300.00	€0.0

Σχήμα 3.15.Συνολικά κόστη μετατροπέα.

### Electrolyzer

Για τη προσομοίωση στο πρόγραμμα Homer θα χρησιμοποιηθεί ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων(PEM) για την παραγωγή υδρογόνου,στη πορεία της προσομοίωσης θα χρησιμοποιηθούν διάφορες ισχύς για την επιλογή της βέλτιστης,στη συνέχεια παρατίθενται βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά του επιλεγμένου ηλεκτρολύτη.

### Τεχνικά χαρακτηριστικά

Πίνακας 3.6. Τεχνικά χαρακτηριστικά ηλεκτρολύτη.[12]

Nominal production capacity of purified hydrogen e	5 Nm <sup>3</sup> /h (0.45 kg/h)
Capacity controllable in the range	15-100 %
Operating temperature	80°C
Design pressure	22 bar
Hydrogen purity before purification (dry gas, full load)	99'8 % vol
Electrolyte concentration	25-30 %w

### Εισαγόμενα στοιχεία

Πίνακας 3.7. Εισαγόμενα στοιχεία ηλεκτρολύτη

Lifetime	20 years
Efficiency	85.00 %

Τα κόστη του ηλεκτρολύτη συνοψίζονται παρακάτω μέσα από έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε στο διαδίκτυο για τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρολύτη.

Costs			
Capacity (kW)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	€2,000.00	€2,000.00	€100.00

Σχήμα 3.16. Συνολικά κόστη ηλεκτρολύτη.

### **Κυψέλη καυσίμου**

Αλλιώς, η γεννήτρια ενέργειας που χρησιμοποιεί ως καύσιμο το αποθηκευμένο υδρογόνο, η οποία χρησιμοποιείται συμπληρωματικά για την παραγωγή του απαιτούμενου φορτίου παράλληλα με την λειτουργία των φωτοβολταϊκών πάνελ και των ανεμογεννητριών .Η γεννήτρια που επιλέγουμε από το πρόγραμμα Homer επιλέγει αυτόματα την βέλτιστη ισχύ της για την έκβαση της βέλτιστης αρχιτεκτονικής του συστήματος .Στη συνέχεια, παρατίθενται βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά της επιλεγμένης κυψέλης καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων(PEM) σύμφωνα με το πρόγραμμα Homer,,όπως και η απόδοση της κυψέλης υδρογόνου.

#### **Τεχνικά χαρακτηριστικά**

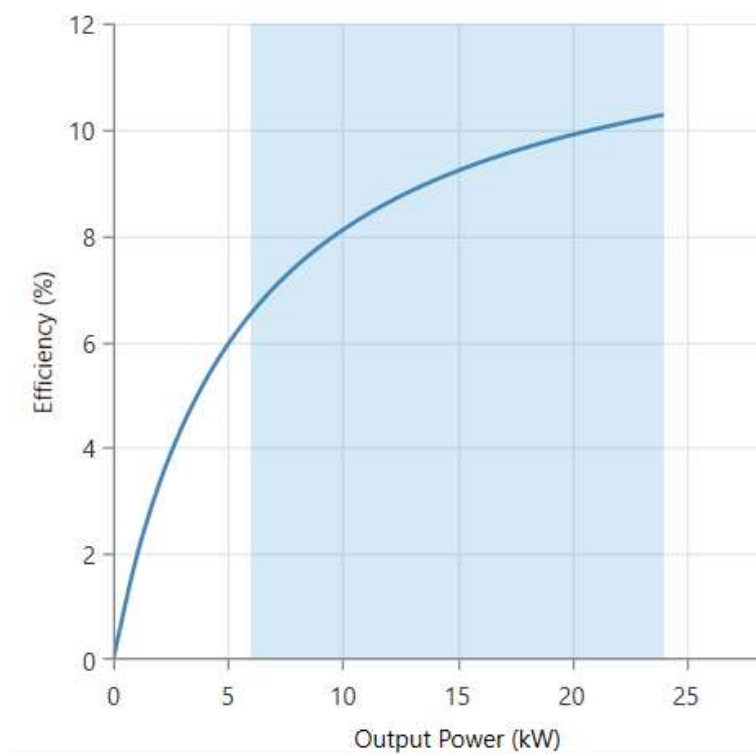
**Πίνακας 3.8.**Τεχνικά χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου.

Fuel curve intercept	0.396 kg/hr
Fuel curve slope	0.0697 kg/hr/kW
Lower heating value	120 MJ/kg
Density	0.09 kg/m <sup>3</sup>

#### **Εισαγόμενα στοιχεία**

**Πίνακας 3.9.**Εισαγόμενα στοιχεία κυψέλης καυσίμου.

Lifetime	15,000 hours
Minimum Load Rate	25.00 %



Σχήμα 3.17..Καμπύλη απόδοσης κυψέλης καυσίμου.

Τα κόστη της κυψέλης καυσίμου συνοψίζονται παρακάτω μέσα από έρευνα αγοράς που πραγματοποιήθηκε στο διαδίκτυο για τα παραπάνω τεχνικά χαρακτηριστικά της κυψέλης καυσίμου.

**Generator Cost**  
 In €/kW of capacity.
 

Initial Capital (€):	<input type="text" value="1,000.00"/>
Replacement (€):	<input type="text" value="500.00"/>
O&M (€/op. hour):	<input type="text" value="0.030"/>
Fuel Price (€/kg):	<input type="text" value="0"/>

Σχήμα 3.18.Συνολικά κόστη κυψέλης καυσίμου.

### Δεξαμενή υδρογόνου

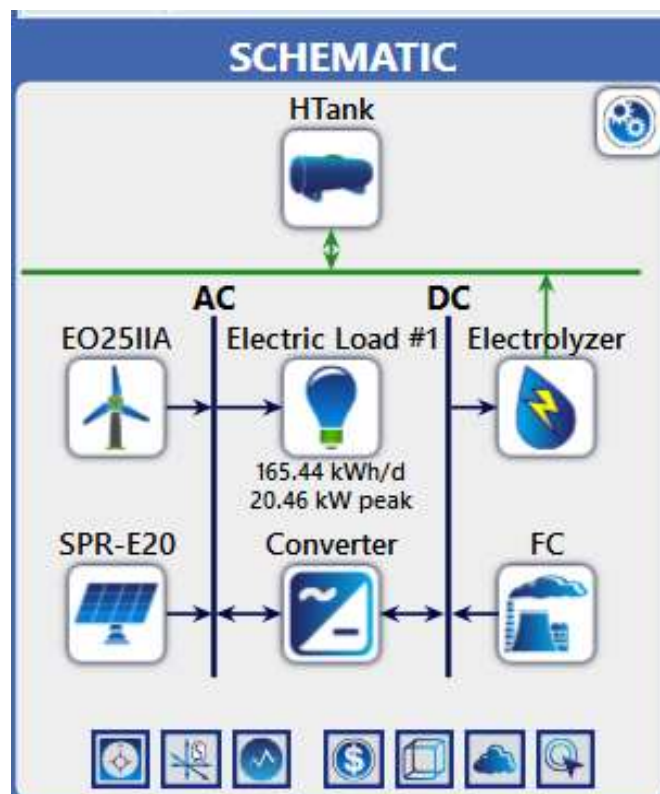
Για τη προσομοίωση στο πρόγραμμα Homer θα χρησιμοποιηθεί δεξαμενή υδρογόνου, θα εξετάσουμε διάφορες χωρητικότητες για την καλύτερη έκβαση, με διάρκεια ζωής 25 έτη, το κόστος παρουσιάζεται παρακάτω.

Τα κόστη της δεξαμενής υδρογόνου συνοψίζονται μέσα από το πρόγραμμα Hommer.

Costs			
Size (kg)	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€/year)
1	€150.00	€150.00	€2.50
Click here to add new item			

Σχήμα 3.19.Συνολικά κόστη δεξαμενής υδρογόνου.

Παρακάτω παρουσιάζεται το υπό μελέτη σύστημα,



Σχήμα 3.20.Μοντέλο υβριδικού συστήματος.

### 3.6 Περιορισμοί συστήματος.

Το λογισμικό επιτρέπει την τροποποίηση των περιορισμών του συστήματος, οι οποίοι είναι συνθήκες που πρέπει να πληρούνται από τα συστήματα. Το HOMER απορρίπτει συστήματα που δεν ικανοποιούν τους καθορισμένους περιορισμούς, ώστε να μην εμφανίζονται στα αποτελέσματα βελτιστοποίησης ή στα αποτελέσματα ευαισθησίας, παρακάτω στον πίνακα απεικονίζεται η εισαγωγή των περιορισμών του υβριδικού συστήματος που εξετάζεται.

**Πίνακας 3.10.** Περιορισμοί συστήματος.

Μέγιστη ετήσια έλλειψη παραγωγικής ικανότητας	10%
Πρόσθετο ποσοστό φόρτωσης στο τρέχον φορτίο	10%
Πρόσθετο ποσοστό απαιτούμενης αποθεματικής λειτουργίας φωτοβολταϊκών	80%
Πρόσθετο ποσοστό απαιτούμενης αποθεματικής λειτουργίας ανεμογεννητριών.	60%

Όσον αφορά, τη μέγιστη ετήσια έλλειψη παραγωγικής ικανότητας ορίστηκε ως 10% αποτελώντας τη μέγιστη επιτρεπόμενη τιμή του κλάσματος έλλειψης δυναμικότητας η οποία είναι η συνολική έλλειψη δυναμικότητας διαιρούμενη διά του συνολικού ετήσιου ηλεκτρικού φορτίου, σε %, εν συνεχεία το πρόσθετο ποσοστό φόρτωσης στο τρέχον φορτίο και η τιμή 10% ορίζει ότι το σύστημα πρέπει να διατηρεί αρκετή πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα για να εξυπηρετήσει μια ξαφνική αύξηση του φορτίου κατά 10%. Τέλος, το απαιτούμενο ποσοστό αποθεματικής λειτουργίας και η τιμή της τάξης του 60% αντικατοπτρίζει ότι το σύστημα πρέπει να διατηρεί αρκετή πλεονάζουσα παραγωγική ικανότητα για την εξυπηρέτηση του φορτίου, ακόμη και αν η παραγωγή ανεμογεννητριών μειώνεται ξαφνικά κατά 60%, αντίστοιχα και για τα φωτοβολταϊκά πάνελ.

### 3.7 Οικονομικά δεδομένα συστήματος.

Το λογισμικό επιτρέπει στον χρήστη την εισαγωγή ορισμένων οικονομικών στοιχείων σε κάθε μελέτη με στόχο την ρεαλιστικότερη έκβαση λύσης.

**Πίνακας 3.11.**Οικονομικά δεδομένα συστήματος.

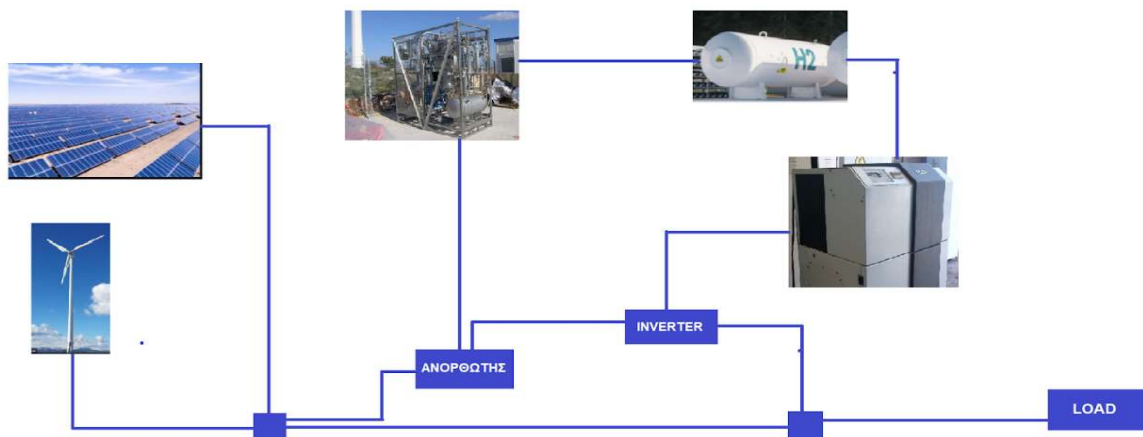
Προεξοφλητικό επιτόκιο.	7%
Αναμενόμενο ποσοστό πληθωρισμού.	2%
Διάρκεια ζωής έργου.	15 έτη.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.

## 4.ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ $H_2$ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΧΑΝΙΩΝ.

### 4.1 Περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος.

Το παρόν σύστημα παραγωγής ενέργειας που θα εξετάσουμε αποτελείται από συστοιχία φωτοβολταϊκών και ανεμογεννητριών τα οποία τροφοδοτούν το φορτίο και τον ηλεκτρολύτη μέσω ενός μετατροπέα ισχύος. Όταν η παραγόμενη ενέργεια μέσα στην ημέρα είναι μεγαλύτερη από τις ανάγκες του φορτίου, χρησιμοποιείται για την τροφοδοσία του ηλεκτρολύτη οποίος παράγει υδρογόνο στις δεξαμενές με αυτό εν συνεχεία να χρησιμοποιείται ως καύσιμο για την λειτουργία της κυψέλης καυσίμου όταν η ενέργεια των φωτοβολταϊκών και των ανεμογεννητριών δεν επαρκεί. Στο Σχήμα 4.1 απεικονίζονται γραφικά τα επιμέρους στοιχεία του υβριδικού συστήματος που προαναφέρθηκαν.



Σχήμα 4.1.Γραφική απεικόνιση υβριδικού συστήματος.

### 4.2 Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.

Ένα από τα δυσκολότερα προβλήματα στον σχεδιασμό αυτόνομων συστημάτων είναι η βελτιστοποίηση διαφορετικών μεγεθών των στοιχείων του συστήματος όσον αφορά το κόστος της ενέργειας και την ολική απόδοση του συστήματος. Το HOMER χρησιμοποιήθηκε




για την βελτιστοποίηση διαφορετικών μεγεθών του συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του συστήματος και μειώνοντας όσο το περισσότερο δυνατόν το συνολικό αρχικό κόστος. Για το σκοπό αυτό και την προσέγγιση της βέλτιστης λύσης ορίσαμε με την βοήθεια του search space μέσω του Homer ένα εύρος κιλοβάτ εγκατάστασης για τα φωτοβολταϊκά πάνελ και ηλεκτρολύτη, εύρος χωρητικότητας δεξαμενής αλλά και ποσότητας ανεμογεννητριών.

Converter Capacity (kW) <input checked="" type="checkbox"/> Optimizer	Electrolyzer Capacity (kW)	FC Capacity (kW)	HTank Capacity (kg)	SPR-E20 Size (kW) <input type="checkbox"/> Optimizer	EO25IIA Quantity (#) <input type="checkbox"/> Optimizer
0	0	0	0	0	0
31	20	24	50	20	2
	40		100	40	4
	60		150	60	6
	80		200	80	8
	100			100	10
	120				

**Σχήμα 4.2.**Εύρος μεταβλητών των στοιχείων βελτιστοποίησης υβριδικού συστήματος.

Έπειτα την προσομοίωση διαφορετικών συνδυασμών ,φωτοβολταϊκών ,ανεμογεννητριών , ηλεκτρολύτη και δεξαμενής υδρογόνου παρουσιάζουμε την αναλυτική έκθεση υπολογισμών του προγράμματος Homer .Πιο συγκεκριμένα,εκτελέστηκαν 381,760 προσομοιώσεις εκ των οποίων οι 174,738 ήταν λειτουργικές,οι υπόλοιπες 207,002 ήταν μη λειτουργικές λόγω του περιορισμού έλλειψης χωρητικότητας. Τέλος, 156,958 προσομοιώσεις παραλείφθηκαν εξαιτίας είτε προβλήματος είτε λάθος μετατροπέα αλλά και έλλειψης παροχής υδρογόνου και γεννήτριας ενέργειας.

#### Έκθεση υπολογισμών προγράμματος Hommer.


**Calculation Report**
—
□
×

381,760 solutions were simulated:

- 174,738 were feasible.
- 207,022 were infeasible due to the capacity shortage constraint.

---

156,958 were omitted:

- 0 due to infeasibility.
- 108,268 for lacking a converter.
- 3,150 for having an unnecessary converter.
- 3,240 for lacking a hydrogen source.
- 270 for no sources of power generation.

**Σχήμα 4.3:** Έκθεση υπολογισμών αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Παράλληλα, μόλις το πρόγραμμα τελειώσει την προσομοίωση εμφανίζει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς που πραγματοποιήθηκαν από τη βέλτιστη ως την χειρότερη κατανομημένων με βάση το καθαρό παρόν κόστος, αυτό πραγματοποιείται μέσω δύο μορφών της κατηγοριοποιημένης δομής και της συνολικής δομής. Συνεπώς, εμείς επιλέγουμε τη βέλτιστη λύση και μέσω παραθύρων του λογισμικού αντλούμε ποικίλα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία.

Optimization Results																			
Export...		Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.																	
Architecture										Cost				System		FC			
SPR-E20 (kW)	EO25IIA	FC (kW)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (€)	COE (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren. Frac (%)	Total Fuel (kg/yr)	Hours	Production (kWh)	Fuel (kg)	O&M Cost (€/yr)	Fuel Cost (€/yr)		
20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.1	CC	€353,184	€0.594	€5,384	€296,925	100	2,218	2,602	17,054	2,218	1,873	0		
2	2	24.0	40.0	50.0	31.7	CC	€375,969	€0.644	€8,130	€291,018	100	2,542	2,923	19,871	2,542	2,105	0		

**Σχήμα 4.4:** Αποτελέσματα προσομοίωσης.

Το υβριδικό σύστημα με το μικρότερο καθαρό παρόν κόστος είναι το βέλτιστο και παρουσιάζεται συνοπτικά.

**Πίνακας 4.1:** Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.

Είδος συστήματος	Ποσότητα	Ισχύς
Φωτοβολταϊκά SPR-E20-327-COM	-	20 kW
Ανεμογεννήτρια Eocycle	2	25 kW
Μετατροπέας	1	18.1 kW
Electrolyzer	1	20 kW
Κυψέλη καυσίμου	1	24 kW
Δεξαμενή υδρογόνου	1	50 kg

### 4.3 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.

Αρχικά, το στάδιο της ανάλυσης ευαισθησίας καλείται να απαντήσει στο ζήτημα της αβεβαιότητας, κατά το οποίο ο χρήστης αρκετές φορές είναι αβέβαιος για την τιμές που έχει ορίσει στο σύστημα. Το HOMER λοιπόν, εκτελεί μια ξεχωριστή διαδικασία βελτιστοποίησης για κάθε περίπτωση ευαισθησίας και παρουσιάζει τα αποτελέσματα με διάφορα συνοπτικά και γραφικά σχήματα. Για παράδειγμα, εάν καθοριστεί η ταχύτητα αέρα ως μεταβλητή ευαισθησίας, το HOMER θα αναλύσει όλους τους συνδυασμούς των συστημάτων ενέργειας χρησιμοποιώντας τις τιμές της ταχύτητας αέρα που δόθηκαν.

Στη παρούσα εγκατάσταση επιλέχθηκε η ανάλυση ευαισθησίας των μεταβλητών της μέσης τιμής ηλιακής ακτινοβολίας και της μέση τιμής ταχύτητας του ανέμου. Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας αλλά ανέμου εφόσον το πρόγραμμα έχει πρόσβαση στα καιρικά στοιχεία της NASA αλλά και στη βάση δεδομένων του Global Wind Atlas, με την προϋπόθεση του ορισμού από τον εκάστοτε χρηστή του γεωμετρικού πλάτους και γεωμετρικού μήκους της περιοχής την οποία ενδιαφέρεται να μελετήσει αλλά επιλέχθηκαν και οι επιπλέον παράμετροι.

Solar Scaled Average (kWh/m <sup>2</sup> /day)	Wind Scaled Average (m/s)
5.355	6.3191
5	5.5
6	7

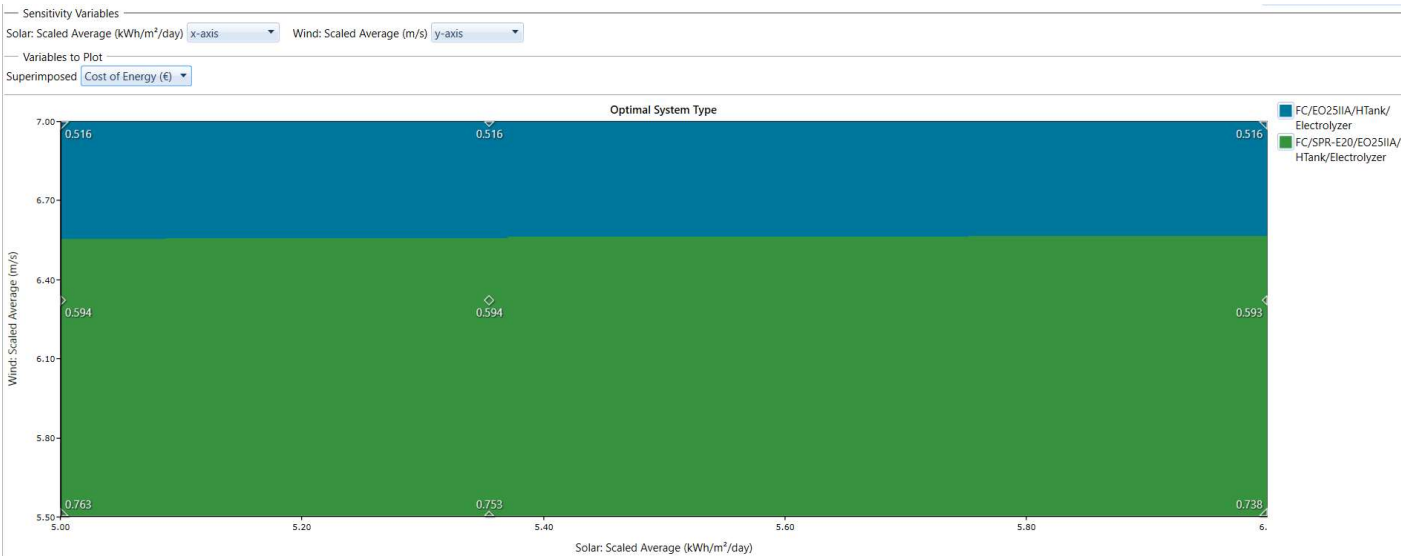
**Σχήμα 4.5.** Φόρμα εισαγωγής τιμών ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας.

Στην πορεία το πρόγραμμα θα εκτελέσει πολλές προσομοιώσεις αφού θα προσομοιώσει την κάθε περίπτωση του συστήματος 9 φορές, έχουμε 3 τιμές για τη μέση ταχύτητα του ανέμου και 3 για την ηλιακή ακτινοβολία συνεπώς  $3 \times 3 = 9$ . Στο παρακάτω σχήμα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης ευαισθησίας για κάθε περίπτωση.

Export...	Export All...	Sensitivity Cases															Compare Economics		Column Choices...		
		Left Click on a sensitivity case to see its Optimization Results.																			
Sensitivity		Architecture										Cost				System		FC			
Solar Scaled Average (kWh/m <sup>2</sup> /day)	Wind Scaled Average (m/s)						SPR-E20 (kW)	EO25IIA	FC (kW)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (€)	COE (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren. Frac. (%)	Total Fuel (kg/yr)	Hours	Production (kWh)
5.36	5.50						20.0	2	24.0	40.0	150	39.5	CC	€448,328	€0.753	€8,612	€358,343	100	2,938	3,424	22,705
5.36	6.32						20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.1	CC	€353,184	€0.594	€5,384	€296,925	100	2,218	2,602	17,054
5.36	7.00							2	24.0	20.0	50.0	17.1	CC	€301,989	€0.516	€5,298	€246,634	100	2,049	2,371	15,940
5.00	5.50						60.0	2	24.0	20.0	50.0	19.4	CC	€449,694	€0.763	€5,013	€397,313	100	2,330	2,710	18,047
5.00	6.32						20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.6	CC	€353,677	€0.594	€5,418	€297,070	100	2,240	2,624	17,234

Σχήμα 4.6.Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.

Παρουσιάζεται και γραφική απεικόνιση της ανάλυσης με τις τιμές των μεταβλητών σε άξονες x,y, αναλυτικότερα με πράσινο χρώμα αποδεκτό σύστημα για τις τιμές των μεταβλητών είναι αυτό με τις ανεμογεννήτριες,τα φωτοβολταικά και των ηλεκτρολύτη ενώ με μπλέ χρώμα αποδεκτό σύστημα είναι αυτό με τις ανεμογεννήτριες και τον ηλεκτρολύτη .Τέλος παρουσιάζεται και διαγραμματικά το κόστος ενέργειας ανά περίπτωση.



Σχήμα 4.7.Διάγραμμα ανάλυσης ευαισθησίας.

4.4 Ενεργειακά χαρακτηριστικά.

Εν συνεχεία, παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος μέσα από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης .Πιο αναλυτικά, το σύστημα παράγει ετησίως 238,237 kWh/y ηλεκτρικής ενέργειας,η οποία προέρχεται σε ποσοστό 77% (183,359 kWh/y) από τις ανεμογεννήτριες,σε ποσοστό 15,9%(37,824 kWh/y) από τα φωτοβολταικά πάνελ και σε ποσοστό 7.16% (17,054 kWh/y) από την κυψέλη καυσίμου υδρογόνου .Επιπλέον,

παρατηρούμε τη μέση ετήσια κατανάλωση φορτίου σε ποσοστό 35.6% (56,928 kWh/y) ενώ το ποσοστό ανεκμετάλλευτης ενέργειας να ανέρχεται στο 30.7% (73,033 kWh/y) φαινόμενο το οποίο αιτιολογείται εξαιτίας της μεταβαλλόμενης ζήτησης φορτίου ανά μήνα του έτους αλλά και της αλλαγής των καιρικών φαινομένων .Τέλος,τα παραπάνω συνοψίζονται στους εξής πίνακες.

Production	kWh/yr	%
SunPower E20-327	37,824	15.9
FC	17,054	7.16
Eocycle EO25 Class IIA	183,359	77.0
Total	238,237	100

**Σχήμα 4.8.**Μέση ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος.

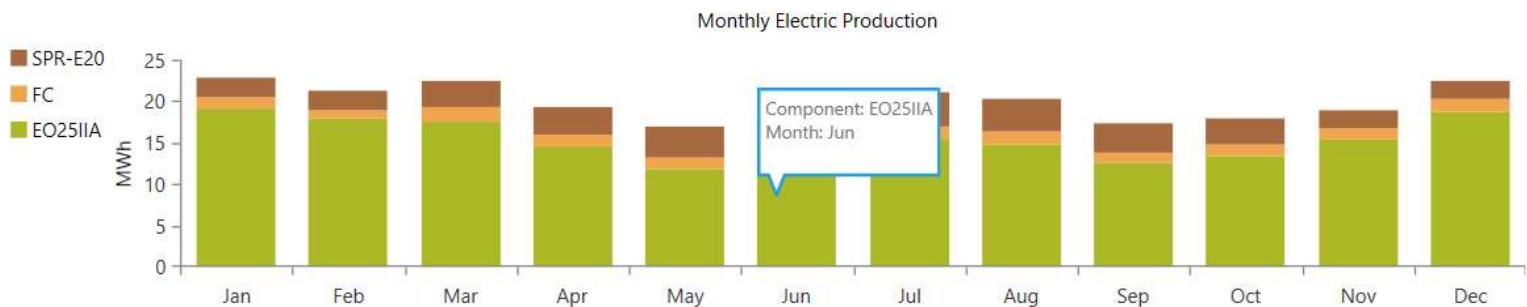
Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	56,928	35.6
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Total	160,041	100

**Σχήμα 4.9.**Μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Quantity	kWh/yr	%
Excess Electricity	73,033	30.7
Unmet Electric Load	3,458	5.73
Capacity Shortage	6,062	10.0

**Σχήμα 4.10.**Σχέση της μέσης παραγόμενης ενέργειας με τη μέση κατανάλωση.

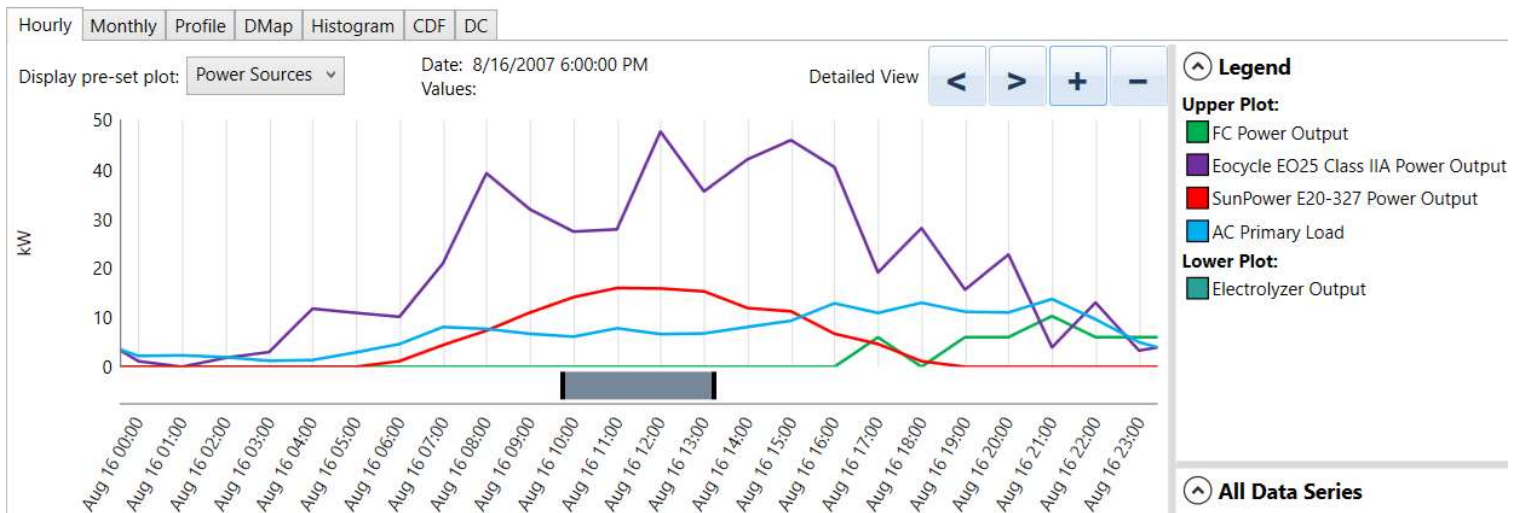
Ακολούθως, παρουσιάζεται η μέση μηνιαία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με τα αντίστοιχα μερίδια προσφοράς των μελών του συστήματος,έτσι παρατηρείται μεγάλη προσφορά των ανεμογεννητριών ιδιαίτερα τους χειμερινούς μήνες και αυξημένη ενεργειακή συνεισφορά των φωτοβολταϊκών πάνελ τους καλοκαιρινούς μήνες,η συμβολή της κυψέλης καυσίμου συναντάται σταθερή όλο το χρόνο.



Σχήμα 4.11. Μηνιαία μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το υβριδικό σύστημα.

Ενδεικτικά,στη συνέχεια επιλέγεται μια ημέρα ενός θερινού μήνας αυτός του Αυγούστου για να απεικονίσει τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος στο πέρας της ημέρας,έτσι στο γράφημα φαίνονται το απαιτούμενο φορτίο AC,η παραγόμενη ισχύς φωτοβολταϊκών,ανεμογεννητριών αλλά και κυψέλης καυσίμου .Πιο συγκεκριμένα,στο γράφημα παρατηρείται κατά κύριο λόγο παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω ανεμογεννήτριας σχεδόν καθ'όλη την διάρκεια της ημέρας, τέλος συνεπικουρικά παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος έχουμε μέσω φωτοβολταϊκών από τις 6.00 έως τις 17.00, ενώ τις βραδινές ώρες 19.00-00.00 εκεί συνεισφέρει ενεργά και η κυψέλη καυσίμου για την κάλυψη του φορτίου.

Time Series Detail Analysis

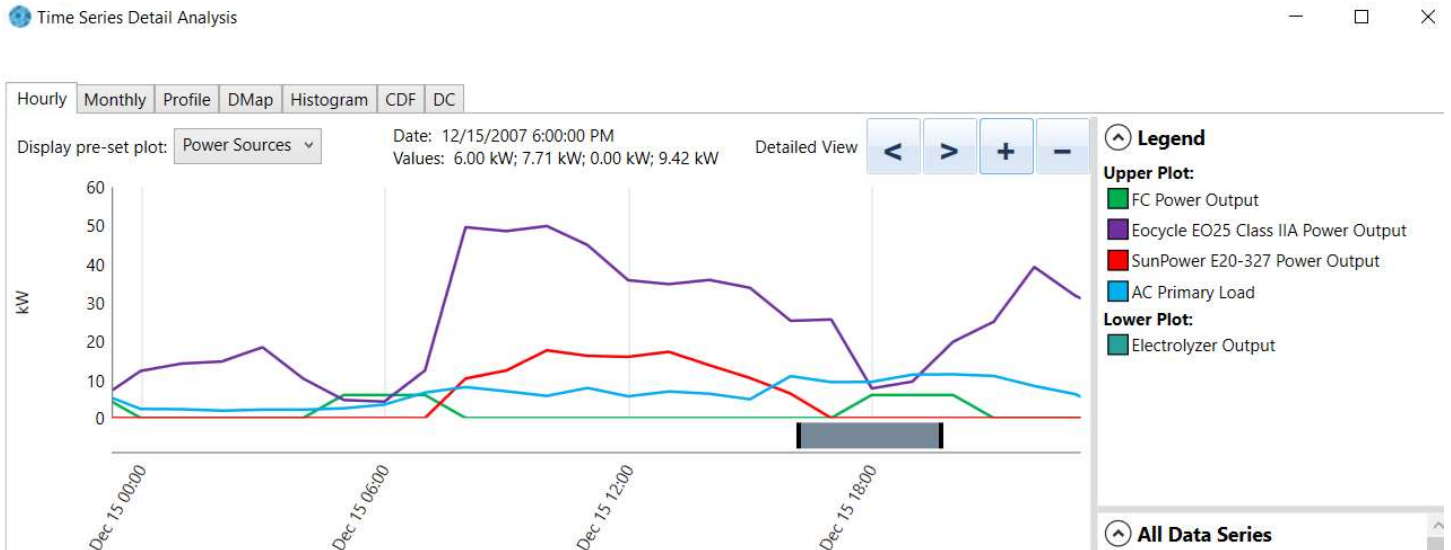


Σχήμα 4.12. Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος για το μήνα Άυγουστο.

Αντίθετα,μια ημέρα ενός χειμερινού μήνα αυτός του Δεκέμβρη απεικονίζει και αυτή τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος ενέργειας εντός της ημέρας .Στο γράφημα πέραν από τη ζήτηση φορτίου AC απεικονίζεται μειωμένη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος μέσω



φωτοβολταϊκών τις ώρες 8.00-16.00 αλλά αυξημένη παραγωγική ικανότητα ανεμογεννητριών σχεδόν καθόλη την ημέρα, ενώ η κυψέλη καυσίμου τίθεται σε λειτουργία τις βραδινές ώρες με σκοπό την κάλυψη φορτίου την στιγμή που ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά δεν είναι ικανά για αυτόνομη κάλυψη.



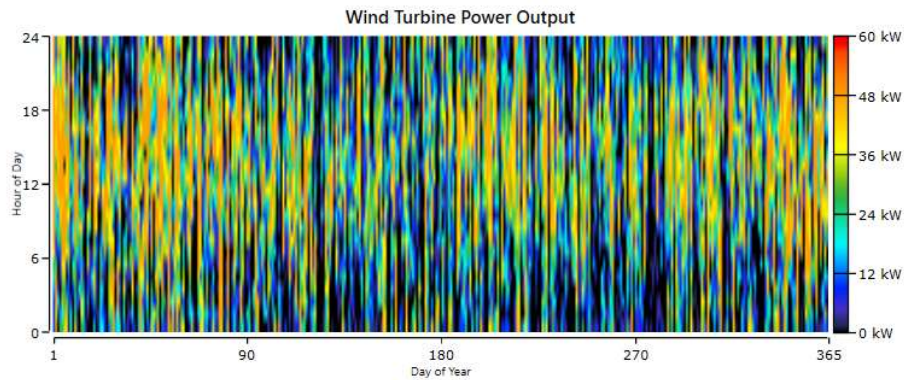
**Σχήμα 4.13.** Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος για το μήνα Δεκέμβριο.

Στη πορεία παρουσιάζονται τα ενεργειακά στοιχεία των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών αντίστοιχα. Αναλυτικότερα, παρουσιάζονται η ονομαστικής ισχύς εξόδου σε κάθε εγκατάσταση, η μέση ισχύς εξόδου αλλά και η συνολική παραγωγή ενέργειας σε kWh/yr.

Παράλληλα, προσφέρονται οι ώρες λειτουργίας ενός έτους αλλά και η μέγιστη, ελάχιστη παραγωγή ισχύος σε kW, ο συντελεστής διείσδυσης ενέργειας όπως και το κόστος ενέργειας. Τέλος, τα γραφήματα Dmap απεικονίζουν την παραγόμενη ισχύ συναρτήσει των ωρών ενός έτους.

Quantity	Value	Units
Total Rated Capacity	50.0	kW
Mean Output	20.9	kW
Capacity Factor	41.9	%
Total Production	183,359	kWh/yr

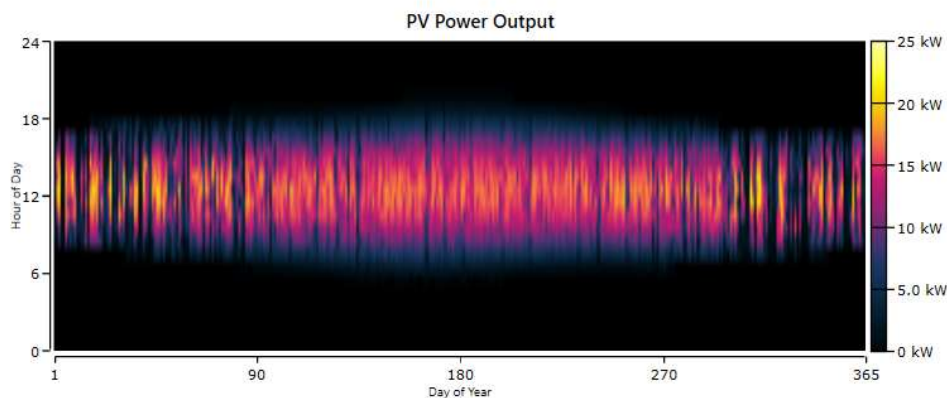
Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	50.2	kW
Wind Penetration	304	%
Hours of Operation	7,279	hrs/yr
Levelized Cost	0.0914	€/kWh



Σχήμα 4.14.Λειτουργικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών Eocycle.

Quantity	Value	Units
Rated Capacity	20.0	kW
Mean Output	4.32	kW
Mean Output	104	kWh/d
Capacity Factor	21.6	%
Total Production	37,824	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	21.6	kW
PV Penetration	62.6	%
Hours of Operation	4,381	hrs/yr
Levelized Cost	0.119	€/kWh



Σχήμα 4.15.Λειτουργικά χαρακτηριστικά φωτοβολταϊκών Sunpower.

Επί πρόσθετα,δεν πρέπει να ξεχνάμε την συμπαραγωγή ενέργειας μέσω κυψέλης καυσίμου υδρογόνου η οποία είναι ιδιαίτερα σημαντική,έτσι συνοψίζονται οι ώρες λειτουργίας της γεννήτριας,πόσες φορές ξεκίνησε η γεννήτρια μέσα στη χρονιά αλλά και τη μέγιστη,μέση και ελάχιστη παραγόμενη ισχύ,χαρακτηριστικά η κυψέλη καυσίμου στο εύρος του έργου καταναλώνει 2,218 kg υδρογόνου με ειδική κατανάλωση καυσίμου υδρογόνου 0,130 kg/kWh

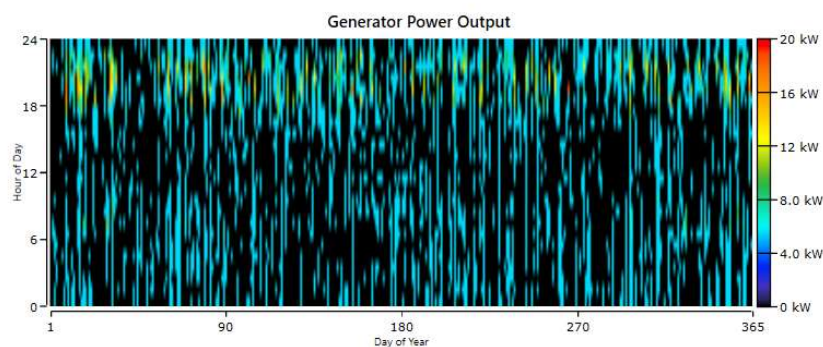


αλλά και ολική περιεκτικότητα καυσίμου τα 73,947 kWh/yr. Το γράφημα Dmap μας δίνει το προφίλ της λειτουργίας της κυψέλης υδρογόνου, όπου φαίνεται η χρήση της τις βραδινές κυρίως ώρες 18.00-24.00.

Quantity	Value	Units
Hours of Operation	2,602	hrs/yr
Number of Starts	779	starts/yr
Operational Life	5.76	yr
Capacity Factor	8.11	%
Fixed Generation Cost	1.52	€/hr
Marginal Generation Cost	0	€/kWh

Quantity	Value	Units
Electrical Production	17,054	kWh/yr
Mean Electrical Output	6.55	kW
Minimum Electrical Output	6.00	kW
Maximum Electrical Output	19.0	kW

Quantity	Value	Units
Fuel Consumption	2,218	kg
Specific Fuel Consumption	0.130	kg/kWh
Fuel Energy Input	73,947	kWh/yr
Mean Electrical Efficiency	23.1	%



Σχήμα 4.16.Λειτουργικά χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου.

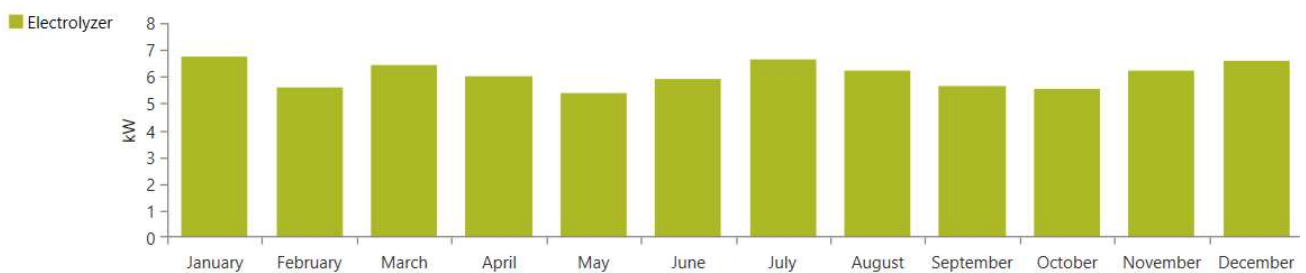
Στη συνέχεια , δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι στόχος της παρούσας προσομοίωσης υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας είναι η παρουσίαση μιας πρωτοπόρας και ολοένα εξελίξιμης τεχνολογίας,αυτής της παραγωγής και αποθήκευσης υδρογόνου .Συνεπώς,χρήσιμα συμπεράσματα συνοψίζονται μέσα από τις εκθέσεις ενεργειακών χαρακτηριστικών από τη μία του ηλεκτρολύτη και από την άλλη της δεξαμενής υδρογόνου. Πιο αναλυτικά, ο ηλεκτρολύτης παράγει 2,222 kg/yr υδρογόνο ενώ καταναλώνονται 2,218 kg/yr, παρακάτω εντοπίζεται διαγραμματικά η παραγωγή ισχύος μηνιαία σε βάθος ενός έτους .Αναφορικά με τη δεξαμενή υδρογόνου επιλέχθηκε χωρητικότητα 50 kg με αυτονομία 242 ωρών και χωρητικότητα αποθήκευσης 1,667 kWh,ενώ στα γραφήματα εντοπίζονται η συχνότητα παραγωγής υδρογόνου σε kg ανά ώρα αλλά και η μηνιαία στάθμη της δεξαμενής σε βάθος ενός έτους .Εν κατακλείδι παρατηρείται χαμηλή στάθμη υδρογόνου τους μήνες του Απριλίου ,Μαρτίου,Ιουνίου και Σεπτεμβρίου καθώς τότε συναντάτε μικρή έλλειψη παραγωγικής ικανότητας κυρίως από τις ανεμογεννήτριες αλλά και τα φωτοβολταϊκά πάνελ με αποτέλεσμα την αυξημένη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου που καταναλώνει υδρογόνο.

Production	kg/yr	%
Electrolyzer	2,222	100
Reformer	0	0
Total	2,222	100

Consumption	kg/yr	%
FC	2,218	100
Hydrogen load	0	0
Total	2,218	100

Quantity	kg/yr	%
Excess hydrogen	0	0

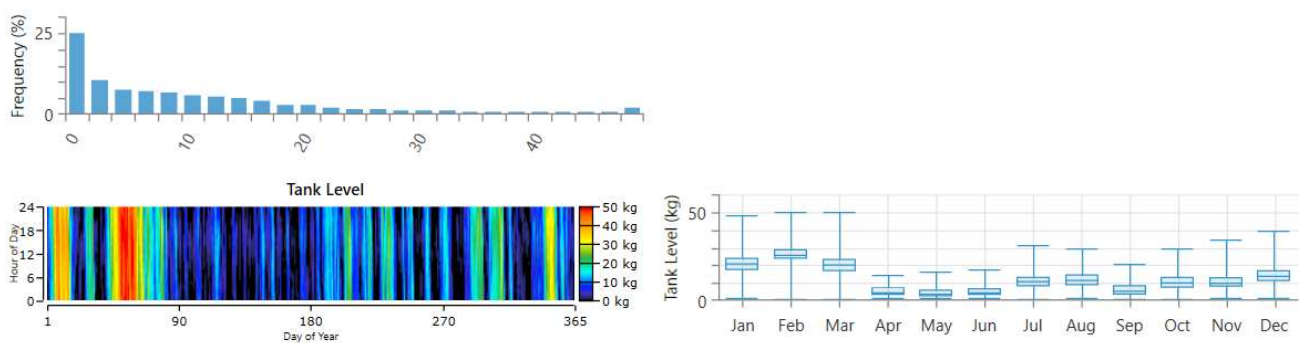
Quantity	Value
Levelized COH	15.2



Σχήμα 4.17.Λειτουργικά χαρακτηριστικά ηλεκτρολύτη.

Quantity	Value	Units
Hydrogen storage capacity	50.0	kg
Energy storage capacity	1,667	kWh
Tank autonomy	242	hr

Quantity	Value	Units
Content at beginning of year	0	kg
Content at end of year	3.61	kg



Σχήμα 4.18.Λειτουργικά χαρακτηριστικά δεξαμενής υδρογόνου..

Επιλογικά,χρήσιμα συμπεράσματα μπορούν να αποτυπωθούν μέσα από τα παρακάτω γραφήματα στα οποία παρουσιάζεται η διαφορά ισχύος του ηλεκτρολύτη όπως και η παραγωγή kg υδρογόνου ανά ώρα σε συνδυασμό με την στάθμη του υδρογόνου στο πέρας

μιας ολόκληρης ημέρας. Έτσι, παρατηρείται υψηλή απόδοση ηλεκτρολύτη ενώ τις ώρες που ο ηλεκτρολύτης βρίσκεται σε αδράνεια η στάθμη του υδρογόνου εντός της ημέρας παραμένει σταθερή είτε μειώνεται σταδιακά.

#### Time Series Detail Analysis



Σχήμα 4.19. Διάγραμμα απόδοσης ηλεκτρολύτη και αποθήκευσης υδρογόνου.

## 4.5 Οικονομική ανάλυση.

Όσον αφορά το οικονομικό πλάνο του υβριδικού συστήματος, το λογισμικό Homer μας δίνει μια σαφή ανάλυση για το εύρος διάρκειας ζωής που έχουμε ορίσει τα δεκαπέντε έτη.

Αρχικά, παρουσιάζονται τα βασικά οικονομικά χαρακτηριστικά του συστήματος μέσα από τη βελτιστοποιημένη διαδικασία.

**Πίνακας 4.2.**Οικονομικά χαρακτηριστικά βέλτιστου υβριδικού συστήματος.

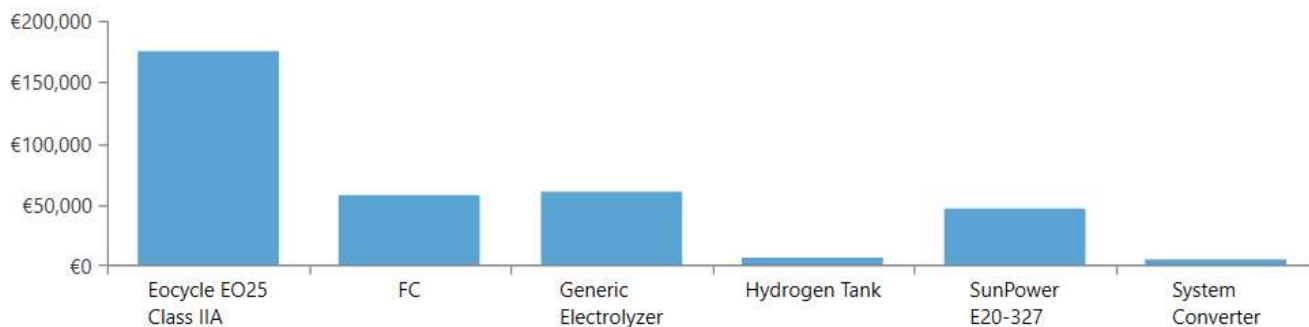
Αρχιτεκτονική Συστήματος	Αρχικό Κόστος (€)	Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας (€/yr)	Καθαρό Παρόν Κόστος (€)	Κόστος Ενέργειας (€/kWh)
Βέλτιστη	296,925 €	5,384 €	353,184.40 €	0.59 €

Η ιεράρχηση διαφορετικών αρχιτεκτονικών υβριδικού συστήματος μέσα από το λογισμικό πραγματοποιείται με γνώμονα το ελάχιστο καθαρό παρόν κόστος,συνεπώς η ενδεδειγμένη εγκατάσταση είναι αυτή των 353,184 € ενώ τα αναλυτικά κόστη του προγράμματος το κεφάλαιο,η αντικατάσταση,η συντήρηση και η διάσωση συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα και αθροίζουν το καθαρό παρόν κόστος.

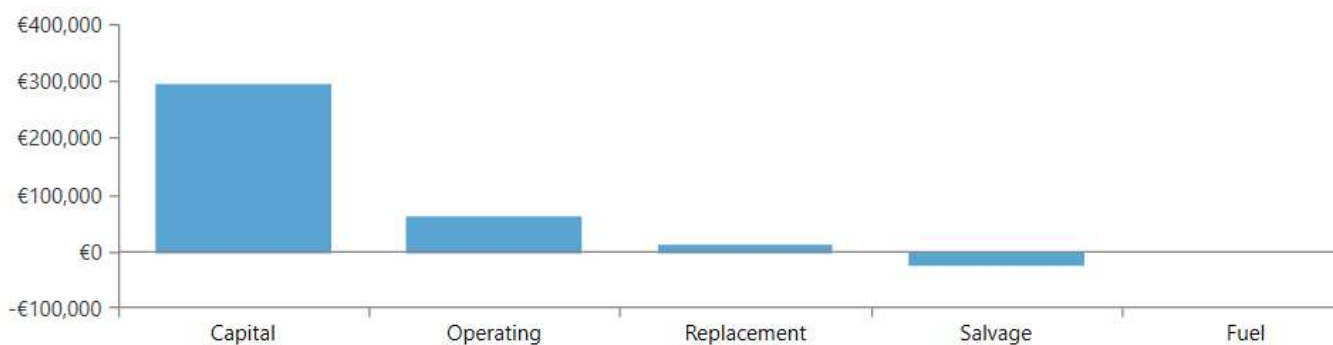
Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
Eocycle EO25 Class IIA	€170,000.00	€0.00	€20,897.57	€0.00	-€15,853.65	€175,043.92
FC	€24,000.00	€16,018.07	€19,575.17	€0.00	-€2,329.75	€57,263.48
Generic Electrolyzer	€40,000.00	€0.00	€20,897.57	€0.00	€0.00	€60,897.57
Hydrogen Tank	€7,500.00	€0.00	€1,306.10	€0.00	-€1,463.41	€7,342.68
SunPower E20-327	€50,000.00	€0.00	€2,089.76	€0.00	-€4,878.05	€47,211.71
System Converter	€5,425.00	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€5,425.00
System	€296,925.00	€16,018.07	€64,766.17	€0.00	-€24,524.87	€353,184.37

**Σχήμα 4.20.** Συνολικό παρόν κόστος του υβριδικού συστήματος.

Στη συνέχεια, απεικονίζονται χρήσιμα συμπεράσματα για το συνολικό καθαρό παρόν κόστος κάθε συστήματος ξεχωριστά,χαρακτηριστικά το μεγαλύτερο κόστος συμπεριλαμβάνεται στη προμήθεια και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών έπειτα του electrolyzer, της κυψέλης καυσίμου και των φωτοβολταϊκών πάνελ με την συντήρηση και την αντικατάσταση των στοιχείων του συστήματος να αποτελεί συγκριτικά χαμηλή σε κόστος.

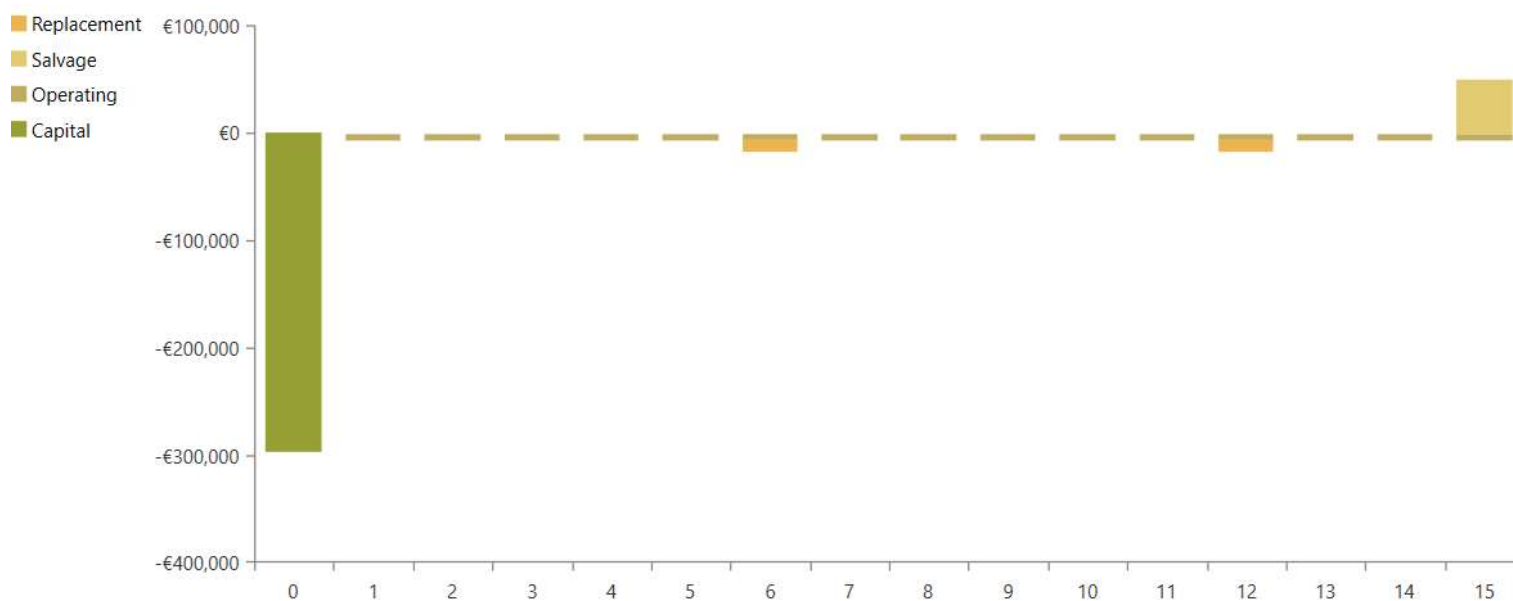


**Σχήμα 4.21.** Κατανομή κόστους του υβριδικού συστήματος ανα στοιχείο.



**Σχήμα 4.22.** Κατανομή κόστους του υβριδικού συστήματος ανα τύπο.

Ο χρονικός ορίζοντας του έργου στη περιοχή του νομού Χανίων είναι τα δεκαπέντε έτη συνεπώς το λογισμικό υπολογίζει την ταμειακή ροή της επένδυσης για τα προβλεπόμενα αυτά έτη. Αρχικά, επιλέγεται η προβολή της ταμειακής ροής με γνώμονα τα αναλυτικά κόστη του προγράμματος το κεφάλαιο, την αντικατάσταση, τη συντήρηση και τη διάσωση των στοιχείων του έργου. Στο οικονομικό πλάνο που αναπτύσσεται λοιπόν απεικονίζονται τα κόστη προμήθειας, εγκατάστασης στο έτος (0) έναρξης του έργου ενώ στα υπόλοιπα τα κόστη συντήρησης των μηχανημάτων αλλά και το κόστος αντικατάστασης της κυψέλης καυσίμου στο έκτο και δωδέκατο έτος ενώ στο τελευταίο έτος της επένδυσης παρουσιάζεται η εξοικονόμηση των μηχανημάτων του συστήματος δηλαδή η υπολειμματική αξία.



Σχήμα 4.23. Χρηματοροή συνολικού κόστους του υβριδικού συστήματος.




























Παράλληλα,συγκεντρώνονται και τα αναλυτικά ετήσια κόστη του προγράμματος το κεφάλαιο,η αντικατάσταση,η συντήρηση και η διάσωση όπου συνοψίζονται στο συγκεντρωτικό ετήσιο κόστος.

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
Eocycle EO25 Class IIA	€16,269.83	€0.00	€2,000.00	€0.00	-€1,517.27	€16,752.56
FC	€2,296.92	€1,533.01	€1,873.44	€0.00	-€222.97	€5,480.40
Generic Electrolyzer	€3,828.20	€0.00	€2,000.00	€0.00	€0.00	€5,828.20
Hydrogen Tank	€717.79	€0.00	€125.00	€0.00	-€140.06	€702.73
SunPower E20-327	€4,785.25	€0.00	€200.00	€0.00	-€466.85	€4,518.39
System Converter	€519.20	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€519.20
System	€28,417.18	€1,533.01	€6,198.44	€0.00	-€2,347.15	€33,801.48

Σχήμα 4.24.Ετήσιο κόστος υβριδικού συστήματος.

Επί πρόσθετα, παρουσιάζεται και η αμέσως επόμενη εναλλακτική λύση για το σύστημα με εμφανές μεγαλύτερο καθαρό παρόν κόστος,κόστος συντήρησης και κόστος ενέργειας από την πρώτη δεδομένα τα οποία φαίνονται στα παρακάτω σχήματα,αναλυτικότερα το εναλλακτικό σύστημα συνίσταται από 2 ανεμογεννήτριες απουσία φωτοβολταϊκών και μεγαλύτερη ισχύς electrolyzer και μετατροπέα .Τέλος,διαγραμματικά φαίνεται η μεταβολή της συγκεντρωτικής χρηματοροής με την πάροδο των ετών και για τις δύο αρχιτεκτονικές έργων.

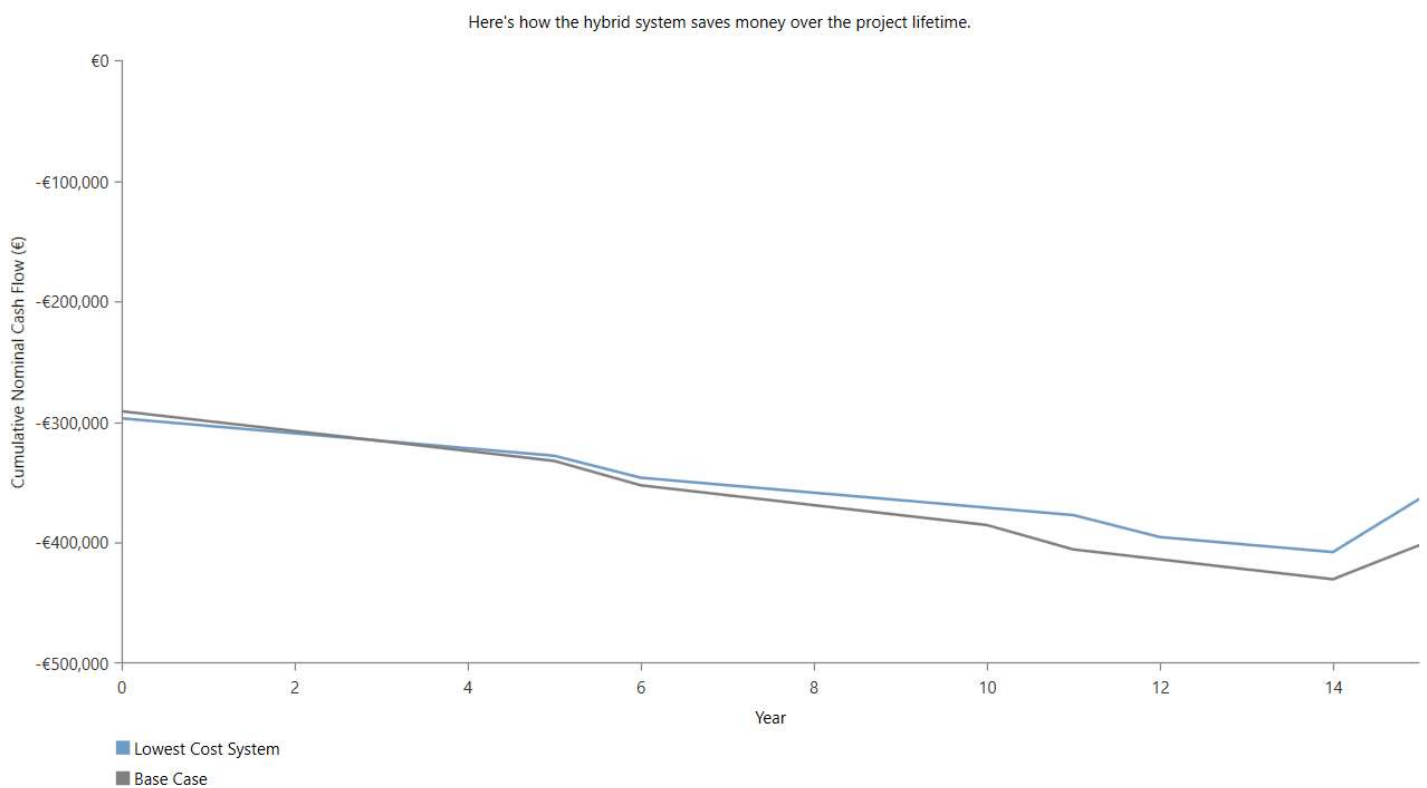


		Architecture										Cost			
								SPR-E20 (kW) 	EO25IIA 	FC (kW) 	Electrolyzer (kW) 	HTank (kg) 	Converter (kW) 	NPC (€)  	Initial capital (€) 
Base system									2	24.0	40.0	50.0	31.7	€375,969	€291,018
Proposed system								20.0	2	24.0	20.0	50.0	18.1	€353,184	€296,925

Σχήμα 4.25. Σύγκριση εναλλακτικού πλάνου.

	Base Case	Lowest Cost System
NPC ⓘ	€375,969	€353,184
Initial Capital	€291,018	€296,925
O&M ⓘ	€8,130/yr	€5,384/yr
LCOE ⓘ	€0.644/kWh	€0.594/kWh

Σχήμα 4.26. Σύγκριση κόστους εναλλακτικού πλάνου.



Σχήμα 4.27. Χρηματοροή εναλλακτικών πλάνων.





# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.

## 5. ΤΕΧΝΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ $H_2$ ΣΤΟ ΝΟΜΟ ΡΕΘΥΜΝΟΥ

### 5.1 Περιγραφή του υπό μελέτη συστήματος.

Το παρόν σύστημα παραγωγής ενέργειας στη περιοχή του Αγίου Βασιλείου δεν διαφέρει ως προς τη φιλοσοφία του από το προηγούμενο σύστημα παραγωγής υδρογόνου που εξετάστηκε στο δήμο Ακρωτηρίου. Παρόλα αυτά,στη προσομοίωση που ακολουθεί θα εξεταστεί πως οι διαφορετικές τιμές των φυσικών πόρων του συστήματος θα επηρεάσουν την διαμόρφωση της αρχιτεκτονικής μέσα από το λογισμικό βελτιστοποίησης Homer .Πιο συγκεκριμένα,θα ελεγχθεί πως η τιμή της ετήσιας μέσης ταχύτητας του ανέμου μπορεί να επηρεάσει το σύστημα καθώς ο δήμος Αγίου Βασιλείου αναγνωρίστηκε σύμφωνα με την εφαρμογή βάσης αιολικών δεδομένων Global Wind Atlas ως μια από τις πλουσιότερες περιοχές αιολικού δυναμικού της Κρήτης.

### 5.2Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.

Λαμβάνοντας υπόψη τα τεχνικά χαρακτηριστικά της λειτουργίας του συστήματος και μειώνοντας όσο το περισσότερο δυνατόν το συνολικό αρχικό κόστος το λογισμικό έδρασε αναλόγως, με την βοήθεια του search space που εισήχθη από εμάς με το παρόμοιο εύρος τιμών της προηγούμενης προσομοίωσης για τα κιλοβάτ εγκατάστασης φωτοβολταϊκών πάνελ και ηλεκτρολύτη, χωρητικότητας δεξαμενής αλλά και ποσότητας ανεμογεννητριών.

Στη συνέχεια,η αναλυτική έκθεση υπολογισμών της προσομοίωσης μας δείχνει μια πρώτη εικόνα για την έκβαση των αποτελεσμάτων, αναλυτικότερα εκτελέστηκαν 645,342 προσομοιώσεις εκ των οποίων οι 491,732 ήταν λειτουργικές,οι υπόλοιπες 153,610 ήταν μη λειτουργικές λόγω του περιορισμού έλλειψης χωρητικότητας. Τέλος, 162,712 προσομοιώσεις παραλείφθηκαν εξαιτίας είτε προβλήματος είτε λάθος μετατροπέα αλλά και έλλειψης παροχής υδρογόνου και γεννήτριας ενέργειας.

## Έκθεση υπολογισμών προγράμματος Hommer

### Calculation Report

645,342 solutions were simulated:

491,732 were feasible.

153,610 were infeasible due to the capacity shortage constraint.

162,712 were omitted:

0 due to infeasibility.

114,022 for lacking a converter.




















































3,150 for having an unnecessary converter.

3,240 for lacking a hydrogen source.

270 for no sources of power generation.

Σχήμα 5.1. Έκθεση υπολογισμών αποτελεσμάτων προσομοίωσης.

Επιπλέον, το λογισμικό πραγματοποιώντας την προσομοίωση εμφανίζει με βάση το καθαρό παρόν κόστος όλους τους πιθανούς συνδυασμούς που πραγματοποιήθηκαν από τη βέλτιστη ως την χειρότερη. Τη βέλτιστη λύση λοιπόν, αποτελεί το σύστημα στο οποίο απουσιάζουν τα φωτοβολταϊκά πάνελ καθώς οι δύο ανεμογεννήτριες είναι ικανές να λειτουργήσουν αυτόνομα εξαιτίας του ισχυρού αιολικού δυναμικού της περιοχής της τάξης των 10.45m/s ταχύτητας ανέμου, έπειτα μέσω παραθύρων του λογισμικού αντλούμε ποικίλα τεχνικά και οικονομικά στοιχεία.

Optimization Results																			<input checked="" type="radio"/> Categorized <input type="radio"/> Overall	
Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.																				
Architecture										Cost				System		Compare Economics		FC		
                                                  																				

Σχήμα 5.2. Αποτελέσματα προσομοίωσης.

Το υβριδικό σύστημα με το μικρότερο καθαρό παρόν κόστος είναι το βέλτιστο και παρουσιάζεται συνοπτικά.

Πίνακας 5.1.Αποτελέσματα βελτιστοποίησης.

Είδος συστήματος	Ποσότητα	Ισχύς
Φωτοβολταϊκά SPR-E20-327-COM	-	-
Ανεμογεννήτρια Eocycle	2	25 kW
Μετατροπέας	1	8.1 kW
Electrolyzer	1	20 kW
Κυψέλη καυσίμου	1	24 kW
Δεξαμενή υδρογόνου	1	50 kg

### 5.3 Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.

Στη παρούσα εγκατάσταση όπως και σε αυτή του Ακρωτηρίου επιλέχθηκε η ανάλυση ευαισθησίας των μεταβλητών της μέσης τιμής ηλιακής ακτινοβολίας και της μέση τιμής ταχύτητας του ανέμου .Στα παρακάτω σχήματα φαίνεται η μέση τιμή ηλιακής ακτινοβολίας και ανέμου εφόσον το πρόγραμμα έχει πρόσβαση στα καιρικά στοιχεία της NASA αλλά και στη βάση δεδομένων του Global Wind Atlas,οι υπόλοιποι άνω και κάτω παράμετροι επιλέχθηκαν για μια αναλυτικότερη ανάλυση αβεβαιότητας.

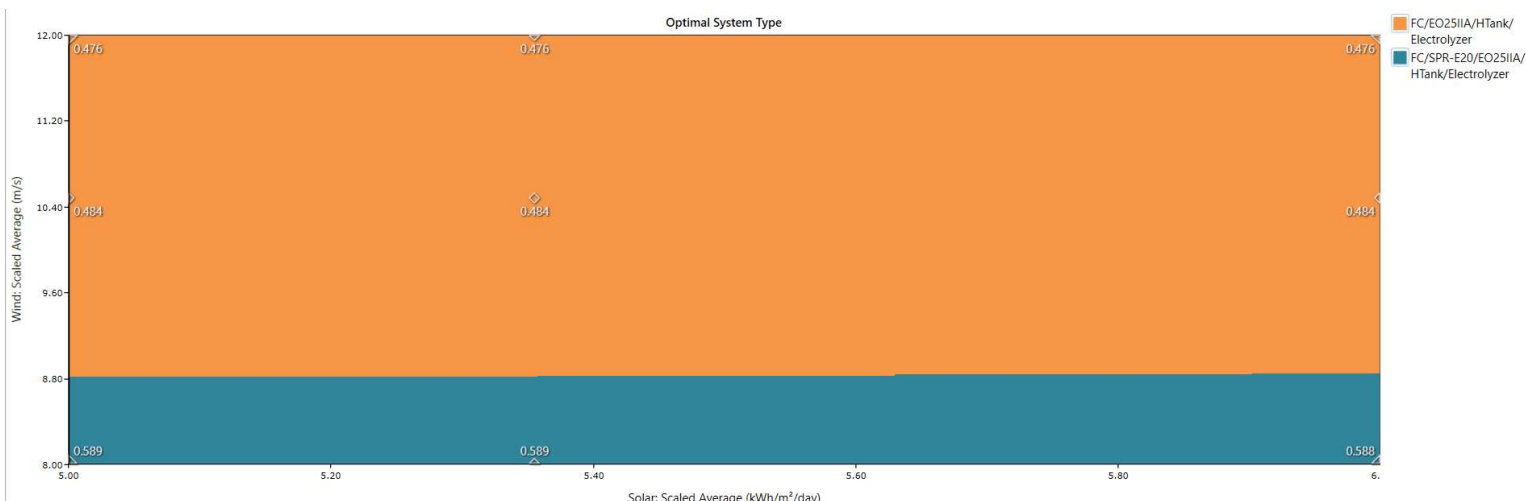
Solar Scaled Average (kWh/m <sup>2</sup> /day)	Wind Scaled Average (m/s)
5.355	10.48
5	12
6	8

Σχήμα 5.3.Φόρμα εισαγωγής τιμών ταχύτητας ανέμου και ηλιακής ακτινοβολίας.

Εν συνεχεία όπως παρουσιάστηκε λεπτομερώς στην πρώτη μελέτη το λογισμικό ολοκληρώνει εννέα διαφορετικές προσομοιώσεις εξαιτίας των έξι διαφορετικών παραμέτρων ανάλυσης ευαισθησίας που ορίστηκαν, συνεπώς αποτυπώνονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων που διενεργήθηκαν ενώ παράλληλα απεικονίζεται το γράφημα των παραμέτρων αβεβαιότητας σε x,y άξονες με επικρατέστερο το σύστημα με πορτοκαλί χρώμα ανεμογεννήτριας, κυψέλης καυσίμου, electrolyzer και μετ έπειτα αυτό με μπλέ χρώμα φωτοβολταϊκών ανεμογεννήτριας, κυψέλης καυσίμου, electrolyzer.

Export...		Export All...		Sensitivity Cases															Compare Economics	
Left Click on a sensitivity case to see its Optimization Results.																				
Sensitivity		Architecture												Cost				System		
Solar Scaled Average (kWh/m²/day)	Wind Scaled Average (m/s)						SPR-E20 (kW)	EO25IIA	FC (kW)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	Converter (kW)	Dispatch	NPC (€)	COE (€)	Operating cost (€/yr)	Initial capital (€)	Ren. Frac. (%)	Total Fuel (kg/yr)	
5.36	10.5							2	24.0	20.0	50.0	8.07	CC	€285,673	€0.484	€3,996	€243,922	100	1,271	
5.36	12.0							2	24.0	20.0	50.0	5.97	CC	€280,302	€0.476	€3,542	€243,292	100	997	
5.36	8.00						20.0	2	24.0	20.0	50.0	16.0	CC	€349,636	€0.589	€5,105	€296,295	100	2,058	
5.00	10.5							2	24.0	20.0	50.0	8.07	CC	€285,673	€0.484	€3,996	€243,922	100	1,271	
5.00	12.0							2	24.0	20.0	50.0	5.97	CC	€280,302	€0.476	€3,542	€243,292	100	997	

Σχήμα 5.4. Αποτελέσματα ανάλυσης ευαισθησίας.



Σχήμα 5.5. Διάγραμμα ανάλυσης ευαισθησίας.

## 5.4 Ενεργειακά χαρακτηριστικά.

Ταυτόχρονα, παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος μέσα από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα παράγει ετησίως 262,476 kWh/y ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία προέρχεται σε ποσοστό 96,3% (252,815 kWh/y) από τις ανεμογεννήτριες, και σε ποσοστό 3.68% (9.661 kWh/y) από την κυψέλη καυσίμου υδρογόνου. Επιπλέον, παρατηρούμε τη μέση ετήσια κατανάλωση φορτίου σε ποσοστό 48.8% (56,471 kWh/y) ενώ το ποσοστό ανεκμετάλλευτης ενέργειας να ανέρχεται στο 6.48% (3,915 kWh/y) φαινόμενο το οποίο αιτιολογείται και πάλι εξαιτίας της μεταβαλλόμενης

ζήτησης φορτίου ανά μήνα του έτους αλλά και της αλλαγής των καιρικών φαινομένων. Τέλος, τα παραπάνω συνοψίζονται στους εξής πίνακες.

Production	kWh/yr	%
FC	9,661	3.68
Eocycle EO25 Class IIA	252,815	96.3
Total	262,476	100

**Σχήμα 5.6.** Μέση ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος

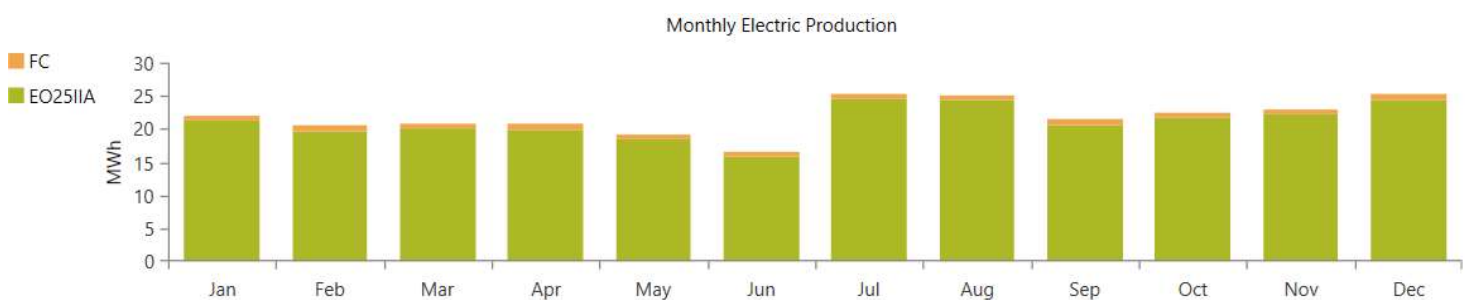
Consumption	kWh/yr	%
AC Primary Load	56,471	48.8
DC Primary Load	0	0
Deferrable Load	0	0
Total	115,792	100

**Σχήμα 5.7.** Μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας

Quantity	kWh/yr	%
Excess Electricity	143,646	54.7
Unmet Electric Load	3,915	6.48
Capacity Shortage	6,003	9.94

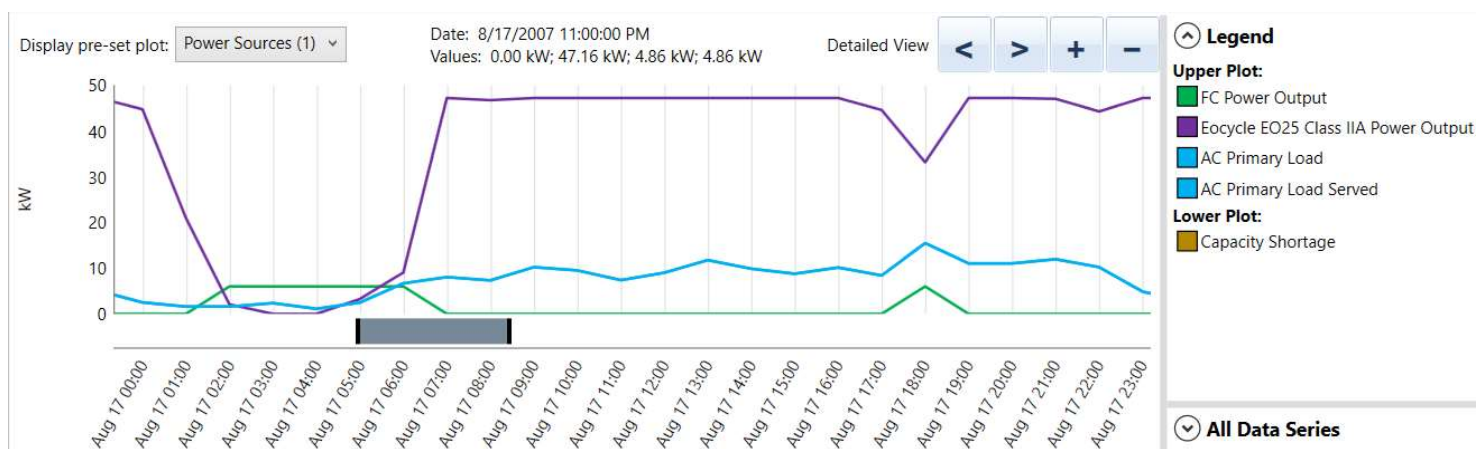
**Σχήμα 5.8** Σχέση της μέσης παραγόμενης ενέργειας με τη μέση κατανάλωση.

Συμπληρωματικά, παρουσιάζεται η μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το υβριδικό σύστημα στη περιοχή του Αγίου Βασιλείου η οποία ανταποκρίνεται εμφανώς στο αιολικό δυναμικό της περιοχής καθώς η ανεμογεννήτριες αποτελούν δομικό συστατικό του συστήματος ενώ η συνεισφορά της κυψέλης καυσίμου χαρακτηρίζεται σταθερή.



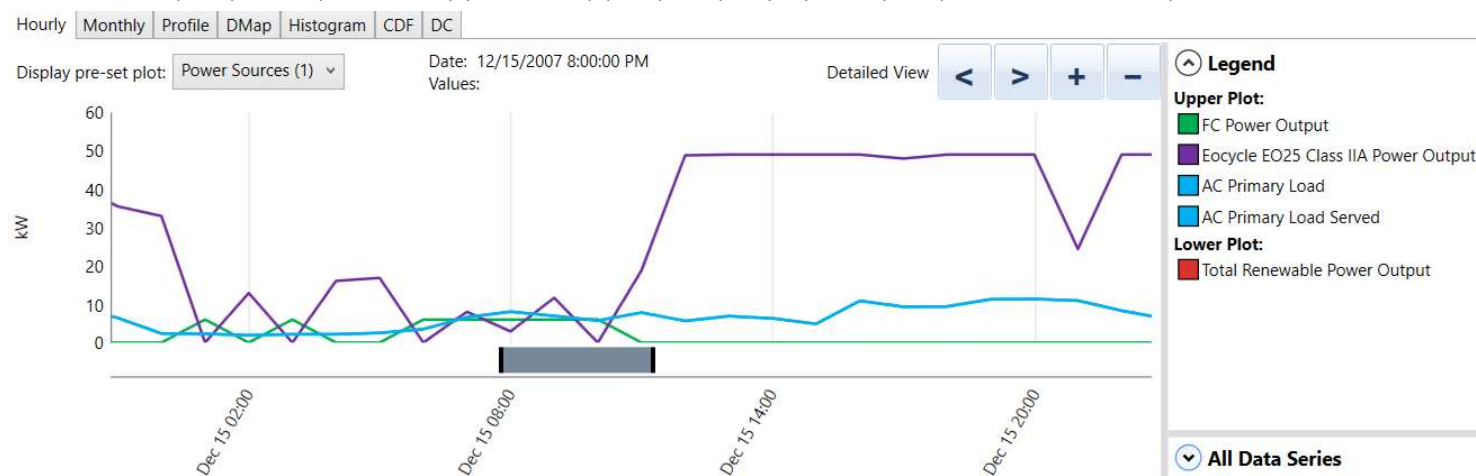
**Σχήμα 5.9.** Μηνιαία μέση παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για το υβριδικό σύστημα.

Ακολουθώντας με την παραπάνω μελέτη στη περιοχή του Ακρωτηρίου θα επιλεχθεί και εδώ μία τυχαία ημέρα ενός θερινού μήνα έτσι ώστε να αποτυπωθούν τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ολόκληρου του συστήματος στο πέρας μιας ημέρας .Ενδεικτικά,η παραγωγή ισχύος αποτελείται κατά κύριο λόγο από τις δύο ανεμογεννήτριες ενώ όπως εντοπίζεται κατά το χρονικό διάστημα 1.00-7.00 π.μ όταν εκείνες δεν είναι σε θέση να παράξουν ισχύ λόγω των καιρικών συνθηκών τότε λειτουργεί συνεπικουρικά η κυψέλη καυσίμου υδρογόνου προκειμένου να καλυφθεί το απαιτούμενο φορτίο.



Σχήμα 5.10. Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος για το μήνα Άυγουστο.

Αντίστοιχα,μία τυπική μέρα του Δεκεμβρίου αντικατοπτρίζει και αυτή την συμπεριφορά του υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας σε διαφορετικές καιρικές συνθήκες,έτσι απεικονίζεται αισθητή έλλειψη αιολικού δυναμικού κατά τις ώρες 1.00-9.00π.μ με την κυψέλη καυσίμου να λαμβάνει ενεργό δράση παράγοντας έως και 10 kW ανά ώρα.



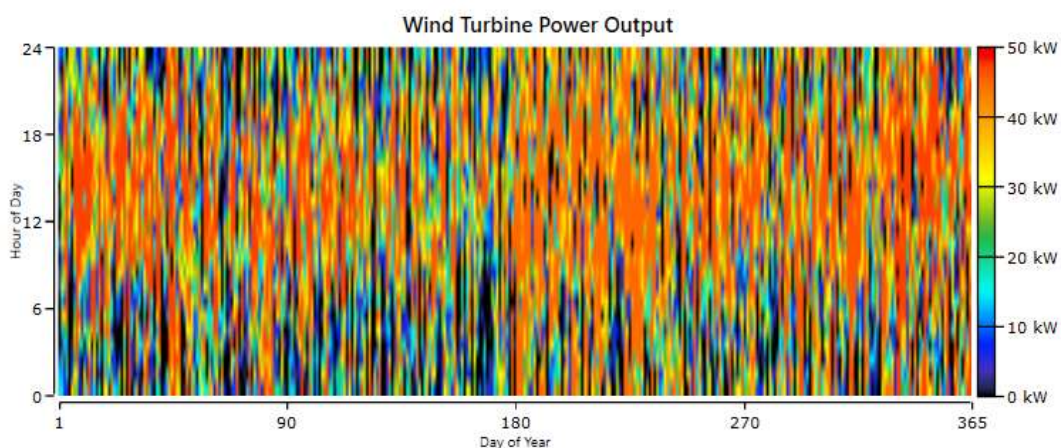
Σχήμα 5.11. Λειτουργικά χαρακτηριστικά του συστήματος για το μήνα Δεκέμβριο.



Επίσης, παρουσιάζονται τα ενεργειακά στοιχεία των ανεμογεννητριών με την ονομαστική ισχύς εξόδου σε κάθε εγκατάσταση, τη μέση ισχύς εξόδου αλλά και η συνολική παραγωγή ενέργειας σε kWh/yr. Ταυτόχρονα, οι ώρες λειτουργίας ενός έτους των ανεμογεννητριών αποτελούν τις 7,919 αλλά και η μέγιστη παραγωγή ισχύος σε kW ανέρχεται στα 49,4 kW, το κόστος ενέργειας είναι 0.0663 ευρώ/kWh. Τέλος, τα γραφήματα Dmap απεικονίζουν την παραγόμενη ισχύ συναρτήσει των ωρών ενός έτους.

Quantity	Value	Units
Total Rated Capacity	50.0	kW
Mean Output	28.9	kW
Capacity Factor	57.7	%
Total Production	252,815	kWh/yr

Quantity	Value	Units
Minimum Output	0	kW
Maximum Output	49.4	kW
Wind Penetration	419	%
Hours of Operation	7,919	hrs/yr
Levelized Cost	0.0663	€/kWh



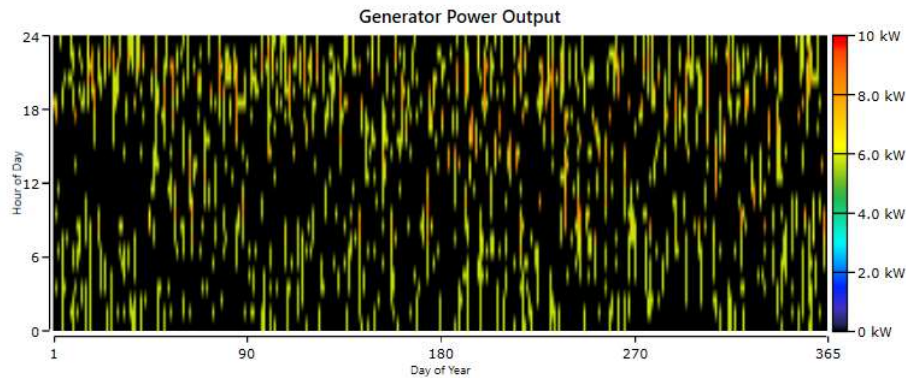
Σχήμα 5.12. Λειτουργικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών Eocycle.

Επιπλέον, στη παραγωγή ενέργειας μέσω κυψέλης καυσίμου υδρογόνου είναι εξίσου μεγάλης σημασίας όπως και αυτής των ανεμογεννητριών, έτσι οι ώρες λειτουργίας της γεννήτριας αποτελούν τις 1,511 ώρες, ενώ μέσα στη χρονιά ξεκίνησε 627 φορές, ενδεικτικά η κυψέλη καυσίμου στο εύρος του έργου καταναλώνει 1,271 kg υδρογόνου με ειδική κατανάλωση καυσίμου υδρογόνου 0,132 kg/kWh αλλά και ολική περιεκτικότητα καυσίμου τα 42,378 kWh/yr. Το γράφημα Dmap μας δίνει το προφίλ της λειτουργίας της κυψέλης υδρογόνου, όπου φαίνεται η χρήση της τις βραδινές κυρίως ώρες 18.00-24.00.

Quantity	Value	Units
Hours of Operation	1,511	hrs/yr
Number of Starts	627	starts/yr
Operational Life	9.93	yr
Capacity Factor	4.60	%
Fixed Generation Cost	1.52	€/hr
Marginal Generation Cost	0	€/kWh

Quantity	Value	Units
Electrical Production	9,661	kWh/yr
Mean Electrical Output	6.39	kW
Minimum Electrical Output	6.00	kW
Maximum Electrical Output	8.50	kW

Quantity	Value	Units
Fuel Consumption	1,271	kg
Specific Fuel Consumption	0.132	kg/kWh
Fuel Energy Input	42,378	kWh/yr
Mean Electrical Efficiency	22.8	%



Σχήμα 5.13.Λειτουργικά χαρακτηριστικά κυψέλης καυσίμου.

Σειρά έχουν οι εκθέσεις ενεργειακών χαρακτηριστικών από τη μία του ηλεκτρολύτη και από την άλλη της δεξαμενής υδρογόνου. Πιο αναλυτικά, ο ηλεκτρολύτης παράγει 1,728 kg/yr υδρογόνο, παρακάτω εντοπίζεται διαγραμματικά η παραγωγή ισχύος μηνιαία σε βάθος ενός έτους. Αναφορικά με τη δεξαμενή υδρογόνου επιλέχθηκε χωρητικότητας 50 kg με αυτονομία 242 ωρών και χωρητικότητα αποθήκευσης 1,667 kWh, ενώ στα γραφήματα εντοπίζονται η συχνότητα παραγωγής υδρογόνου σε kg ανά ώρα αλλά και η μηνιαία στάθμη της δεξαμενής σε βάθος ενός έτους. Τέλος, παρατηρείται χαμηλή στάθμη υδρογόνου τους μήνες του Μαΐου και Ιουνίου καθώς τότε συναντάτε μικρή έλλειψη παραγωγικής ικανότητας από τις ανεμογεννήτριες με αποτέλεσμα την αυξημένη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου που καταναλώνει υδρογόνο.

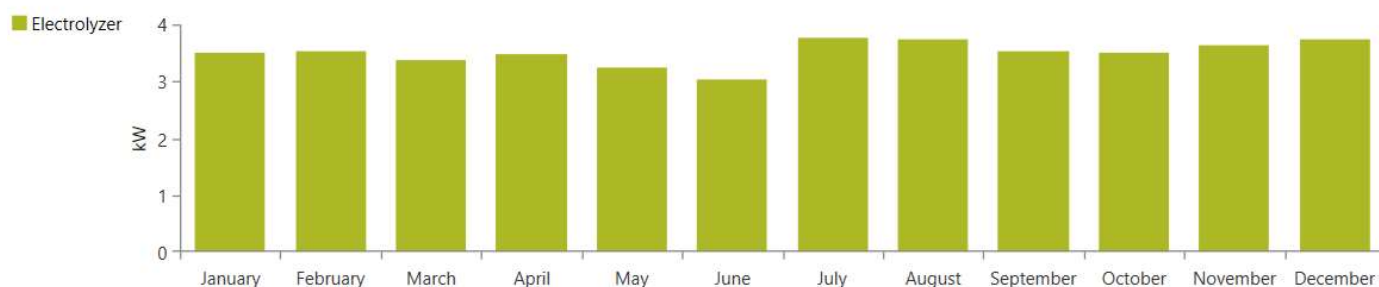


Production	kg/yr	%
Electrolyzer	1,278	100
Reformer	0	0
Total	1,278	100

Consumption	kg/yr	%
FC	1,271	100
Hydrogen load	0	0
Total	1,271	100

Quantity	kg/yr	%
Excess hydrogen	0	0

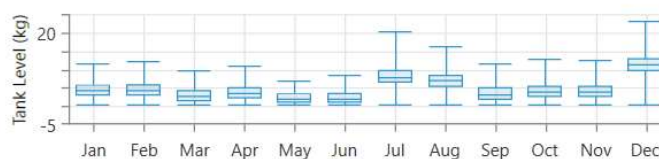
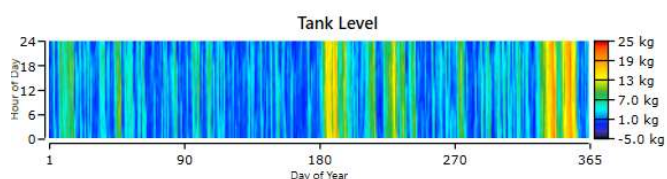
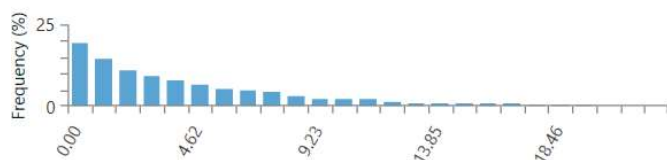
Quantity	Value
Levelized COH	21.4



Σχήμα 5.14.Λειτουργικά χαρακτηριστικά ηλεκτρολύτη.

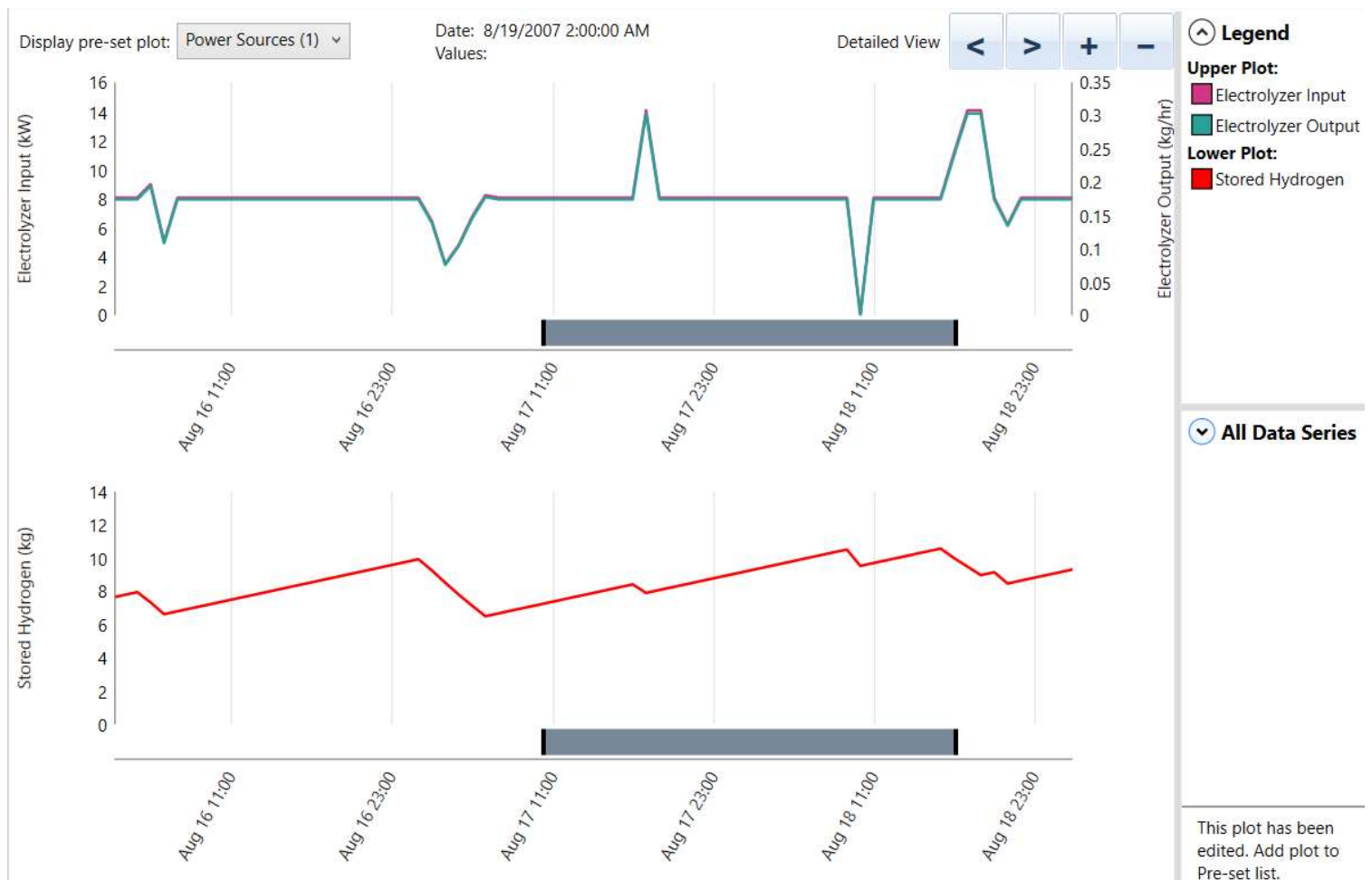
Quantity	Value	Units
Hydrogen storage capacity	50.0	kg
Energy storage capacity	1,667	kWh
Tank autonomy	242	hr

Quantity	Value	Units
Content at beginning of year	0	kg
Content at end of year	7.00	kg



Σχήμα 5.15.Λειτουργικά χαρακτηριστικά δεξαμενής υδρογόνου.

Αντιστοίχως εμφανίζεται η διαγραμματική απόδοση του ηλεκτρολύτη σε συνδυασμό με την στάθμη υδρογόνου εντός της δεξαμενής κατά τη διάρκεια της ημέρας καθώς παρατηρείται μέγιστη απόδοση ηλεκτρολύτη και μείωση της στάθμης υδρογόνου τις ώρες που ο ηλεκτρολύτης μένει αδρανής.



Σχήμα 5.16. Διάγραμμα απόδοσης ηλεκτρολύτη και αποθήκευσης υδρογόνου.

## 5.5 Οικονομική ανάλυση.

Η βελτιστοποιημένη διαδικασία όπως και παραπάνω μας παρέχει μια σαφή εικόνα των βασικότερων οικονομικών χαρακτηριστικών του υβριδικού συστήματος τα οποία παρουσιάζονται παρακάτω.

**Πίνακας 5.2.** Οικονομικά χαρακτηριστικά υβριδικού συστήματος.

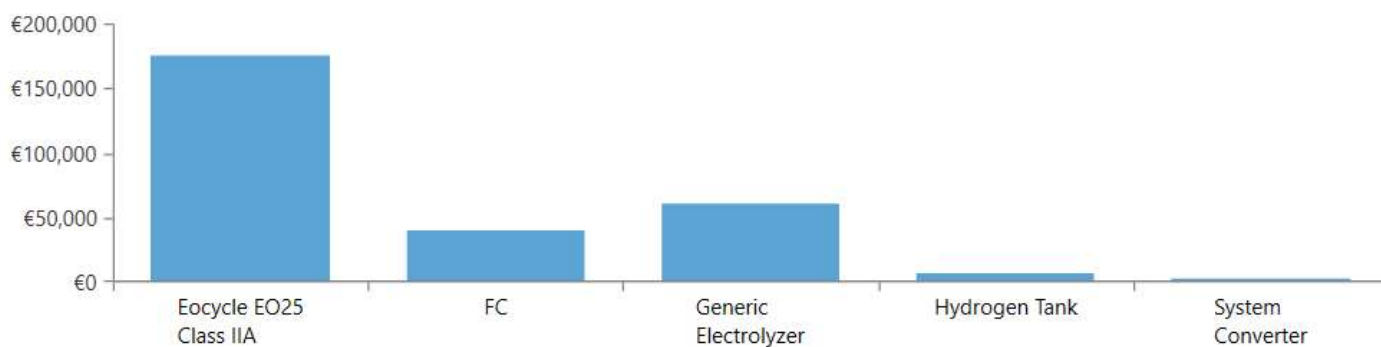
Αρχιτεκτονική Συστήματος	Αρχικό Κόστος (€)	Ετήσιο Κόστος Λειτουργίας (€/yr)	Καθαρό Παρόν Κόστος (€)	Κόστος Ενέργειας (€/kWh)
Βέλτιστη	243,921 €	3,996 €	285,673 €	0.48 €

Η ενδεδειγμένη εγκατάσταση στη περιοχή του Αγίου Βασιλείου, Ρεθύμνου είναι αυτή των 285,673 € ενώ τα αναλυτικά κόστη του προγράμματος το κεφάλαιο, η αντικατάσταση, η συντήρηση και η διάσωση συνοψίζονται στο παρακάτω σχήμα και αθροίζουν το καθαρό παρόν κόστος.

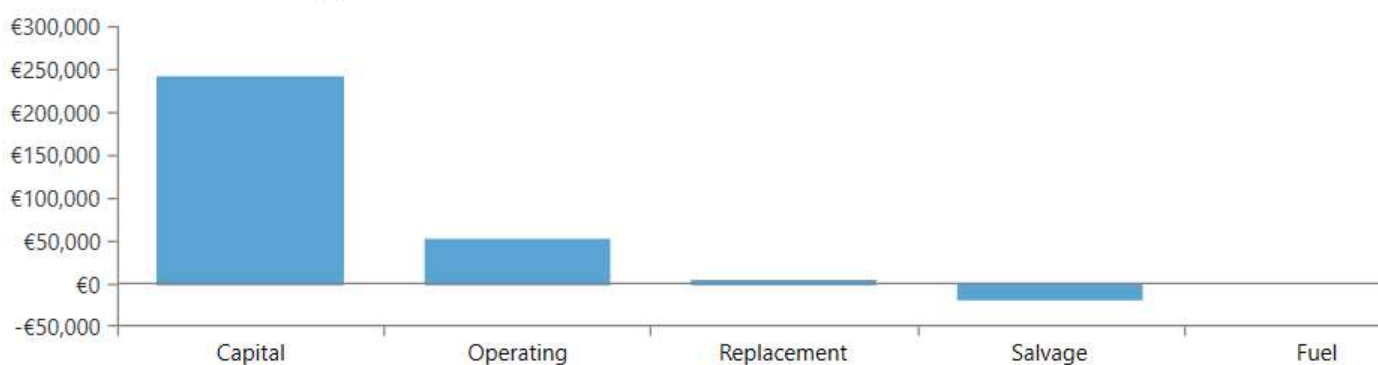
Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
Eocycle EO25 Class IIA	€170,000.00	€0.00	€20,897.57	€0.00	-€15,853.65	€175,043.92
FC	€24,000.00	€7,462.05	€11,367.44	€0.00	-€2,862.44	€39,967.06
Generic Electrolyzer	€40,000.00	€0.00	€20,897.57	€0.00	€0.00	€60,897.57
Hydrogen Tank	€7,500.00	€0.00	€1,306.10	€0.00	-€1,463.41	€7,342.68
System Converter	€2,421.88	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€2,421.88
System	€243,921.88	€7,462.05	€54,468.68	€0.00	-€20,179.50	€285,673.11

**Σχήμα 5.17.** Συνολικό παρόν κόστος του υβριδικού συστήματος

Όσον αφορά το συνολικό καθαρό παρόν κόστος κάθε συστήματος ξεχωριστά, το μεγαλύτερο κόστος συμπεριλαμβάνεται στη προμήθεια και εγκατάσταση των ανεμογεννητριών έπειτα του electrolyzer και της κυψέλης καυσίμου με την συντήρηση και την αντικατάσταση των στοιχείων του συστήματος να αποτελεί συγκριτικά χαμηλή σε κόστος.

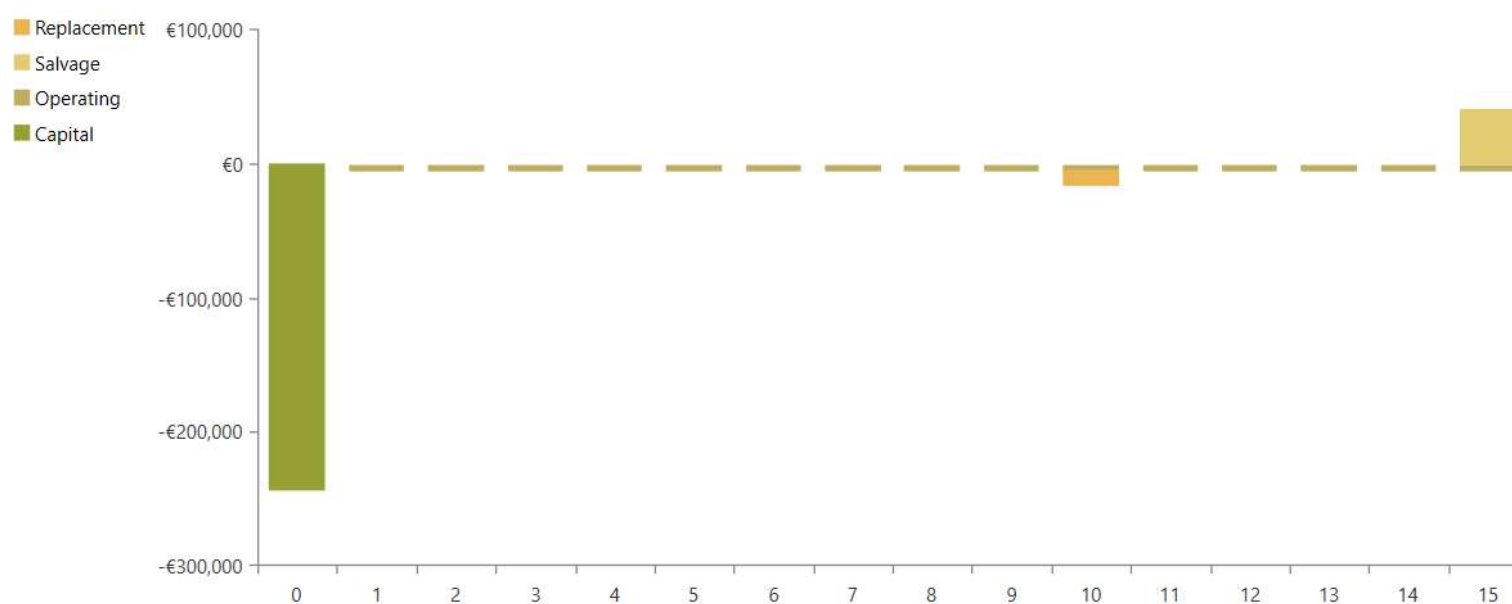


**Σχήμα 5.18.** Κατανομή κόστους του υβριδικού συστήματος ανα στοιχείο.



**Σχήμα 5.19.** Κατανομή κόστους του υβριδικού συστήματος ανα τύπο.

Στην εγκατάσταση του νομού Ρεθύμνου όπως και στην προηγούμενη εγκατάσταση ορίστηκε χρονικός ορίζοντας τα δεκαπέντε έτη συνεπώς το λογισμικό υπολογίζει την ταμειακή ροή της επένδυσης για τα προβλεπόμενα αυτά έτη .Η ταμειακή ροή απεικονίζει τα αναλυτικά κόστη του προγράμματος το κεφάλαιο,την αντικατάσταση,τη συντήρηση και τη διάσωση των στοιχείων του έργου .Στο οικονομικό πλάνο που αναπτύσσεται λοιπόν φαίνονται τα κόστη προμήθειας,εγκατάστασης στο έτος (0) έναρξης του έργου ενώ στα υπόλοιπα τα κόστη συντήρησης των μηχανημάτων αλλά και το κόστος αντικατάστασης της κυψέλης καυσίμου στο δέκατο έτος ενώ στο τελευταίο έτος της επένδυσης παρουσιάζεται η εξοικονόμηση των μηχανημάτων του συστήματος δηλαδή η υπολειμματική αξία.



























Σχήμα 5.20. Χρηματοροή συνολικού κόστους του υβριδικού συστήματος.

Παράλληλα,συγκεντρώνονται και τα αναλυτικά ετήσια κόστη του προγράμματος το κεφάλαιο,η αντικατάσταση,η συντήρηση και η διάσωση οπου συνοψίζονται στο συγκεντρωτικό ετήσιο κόστος.

Component	Capital (€)	Replacement (€)	O&M (€)	Fuel (€)	Salvage (€)	Total (€)
Eocycle EO25 Class IIA	€16,269.83	€0.00	€2,000.00	€0.00	-€1,517.27	€16,752.56
FC	€2,296.92	€714.15	€1,087.92	€0.00	-€273.95	€3,825.04
Generic Electrolyzer	€3,828.20	€0.00	€2,000.00	€0.00	€0.00	€5,828.20
Hydrogen Tank	€717.79	€0.00	€125.00	€0.00	-€140.06	€702.73
System Converter	€231.79	€0.00	€0.00	€0.00	€0.00	€231.79
System	€23,344.52	€714.15	€5,212.92	€0.00	-€1,931.28	€27,340.32

Σχήμα 5.21.Ετήσιο κόστος υβριδικού συστήματος.

Επίσης, παρουσιάζεται και η αμέσως επόμενη εναλλακτική λύση για το σύστημα με εμφανές μεγαλύτερο καθαρό παρόν κόστος και κόστος ενέργειας από την πρώτη αλλά με μικρότερο κόστος συντήρησης, δεδομένα τα οποία φαίνονται στα παρακάτω σχήματα,αναλυτικότερα το εναλλακτικό σύστημα συνίσταται από 2 ανεμογεννήτριες προσθήκη 20kW φωτοβολταϊκών και μεγαλύτερη ισχύς μετατροπέα .Τέλος,διαγραμματικά φαίνεται η μεταβολή της συγκεντρωτικής χρηματοροής με την πάροδο των ετών και για τις δύο αρχιτεκτονικές έργων.

		Architecture											
								SPR-E20 (kW) 	EO25IIA 	FC (kW) 	Electrolyzer (kW) 	HTank (kg) 	Converter (kW) 
Base system								20.0	2	24.0	20.0	50.0	6.46
Proposed system									2	24.0	20.0	50.0	8.07

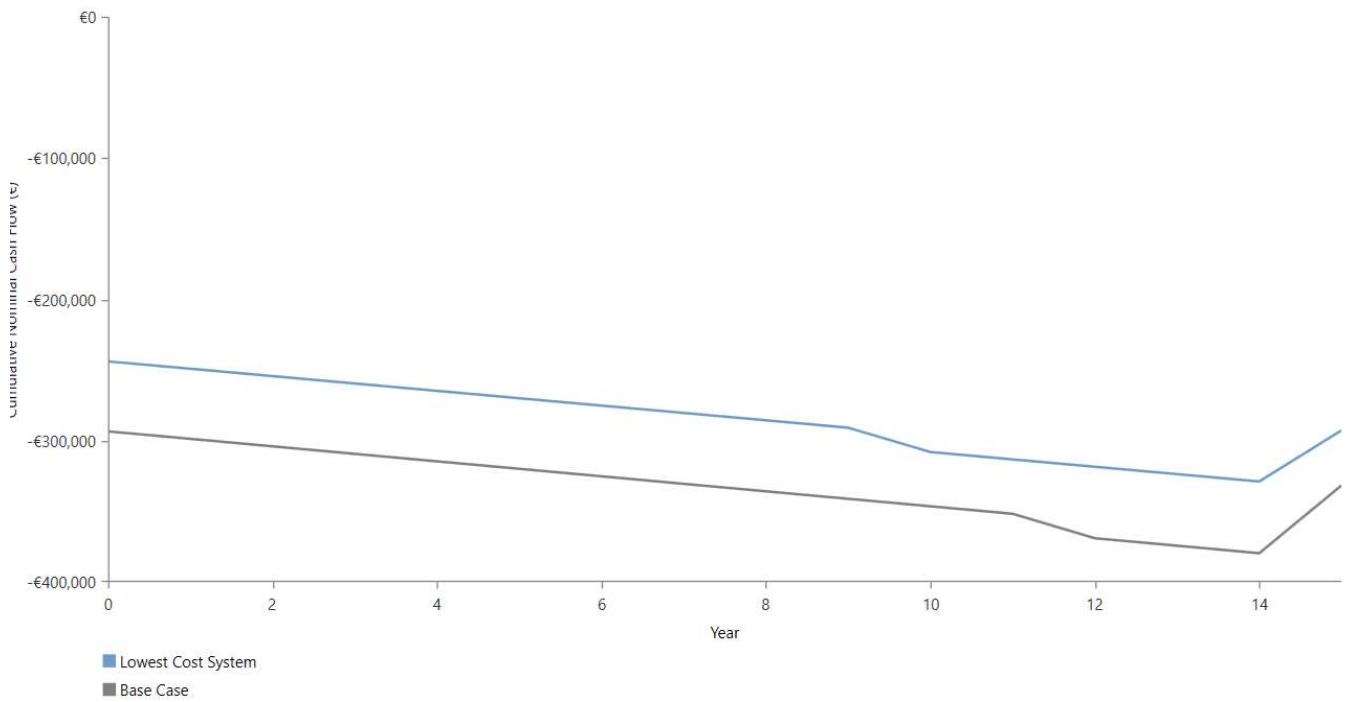
Σχήμα 5.22.Σύγκριση εναλλακτικού πλάνου.

### Cost Summary

	Base Case	Lowest Cost System
NPC ⓘ	€329,933	€285,673
Initial Capital	€293,438	€243,922
O&M ⓘ	€3,493/yr	€3,996/yr
LCOE ⓘ	€0.552/kWh	€0.484/kWh

Σχήμα 5.23. Σύγκριση κόστους εναλλακτικού πλάνου.

Here's how the hybrid system saves money over the project lifetime.



Σχήμα 5.24 Χρηματοροή εναλλακτικών πλάνων.

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ

Στόχος της παρούσας μελέτης ήταν ο σχεδιασμός υβριδικών συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρής κλίμακας, που εμπεριέχουν τεχνολογίες ΑΠΕ για τη κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας ενός οικισμού δέκα με δεκαπέντε κατοικιών .Η καινοτομία λοιπόν της παραπάνω σχεδίασης οφείλεται στην τεχνολογία αποθήκευσης ενέργειας,μίας ανανεώσιμης ενέργειας υπό μορφή ηλεκτρολυτικά παραχθέντος υδρογόνου σε δεξαμενές και επανηλέκτρισης του μέσω κυψελών καυσίμου .Η ανάγκη για εύρεση όμως της αποδοτικότερης αρχιτεκτονικής και βέλτιστης οικονομικά δομής η οποία εμπεριέχει σημαντικές δυσκολίες, λόγω της ύπαρξης ενός μεγάλου αριθμού εναλλακτικών επιλογών σχεδίασης καθώς και εξαιτίας της αβεβαιότητας στις τιμές πολλών και σημαντικών παραμέτρων των συστημάτων μας οδήγησε να χρησιμοποιήσουμε ένα από τα πιο γνωστά υπολογιστικά εργαλεία βελτιστοποίησης το λογισμικό HOMER .Οι προσομοιώσεις που διενεργήθηκαν ήταν δύο, η μία στην περιοχή του Ακρωτηρίου στο νομό Χανίων και η άλλη στην περιοχή του Αγίου Βασιλείου στο νομό Ρεθύμνου ένα από τα υψηλότερα σημεία αιολικού δυναμικού της Κρήτης,παρακάτω συνοψίζονται τα σημαντικότερα στοιχεία των προσομοιώσεων ενώ ακολουθεί ο σχολιασμός και η σύγκριση των αποτελεσμάτων

Πίνακας 6.1 Στοιχεία προσομοιώσεων.

	ΤΕΧΝΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΝΟΜΟΥ ΧΑΝΙΩΝ.	ΤΕΧΝΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΝΟΜΟΥ ΡΕΘΥΜΝΟΥ.
ΚΑΘΑΡΟ ΠΑΡΟΝ ΚΟΣΤΟΣ	353,184.40 €	285,673 €
ΕΤΗΣΙΟ ΚΟΣΤΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ	5,384 €	3,996 €
ΚΟΣΤΟΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	0,54 €	0,48 €
ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	238,237 kWh/y	262,476 kWh/y

Η οικονομικότερη λύση, όπως αυτή προκρίνεται μέσω του συνολικού παρόντος κόστους αλλά και του γραμμικά ανάλογου σε αυτό κόστους ενέργειας ανά κιλοβατώρα ,είναι το υβριδικό σύστημα στο νομό Ρεθύμνου γεγονός που οφείλεται στην σύσταση του συστήματος αποκλειστικά από ανεμογεννήτριες εξαιτίας του υψηλού αιολικού δυναμικού της περιοχής,ταυτόχρονα εντοπίζεται ότι οι ώρες λειτουργίας της γεννήτριας υδρογόνου σχεδόν διπλασιάζονται στη περιοχή του νομού Χανίων, οπότε αντιστοίχως μεγαλώνει και το κόστος. Αντίστοιχα,όσον αφορά τη μέση ετήσια παραγωγή ενέργειας εντοπίζουμε ότι προκρίνεται η

μελέτη του νομού Ρεθύμνου με 262,476 kWh/y με κατανάλωση 9,661 kWh/y από τη κυψέλη καυσίμου του συστήματος με σκοπό τη σταθερή παραγωγική ικανότητα του ακόμα και σε ασταθείς καιρικά συνθήκες .Στη συνέχεια έπεται η μελέτη του νομού Χανίων με 238,237 kWh/y η οποία προέρχεται με 17,054 kWh/y από την κυψέλη καυσίμου υδρογόνου.Τέλος και τα δύο υβριδικά συστήματα παραγωγής που μελετήθηκαν δεν δημιουργούν εκπομπές CO<sub>2</sub> κατά την λειτουργία τους, γεγονός που τα καθιστά φιλικά προς το περιβάλλον.



## Βιβλιογραφία.

- [1] C. Acar and I. Dincer, “Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources,” *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 1. pp. 1–12, Jan. 02, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2013.10.060.
- [2] “Eurogas в Twitter: ‘Using #gasgrids for #hydrogen? The H21 Leeds City Gate project is attempting to fully convert the existing grid to hydrogen by removing #CO2 from #natgas supplies. <https://t.co/FVzpVKQuzM> <https://t.co/wLOyUObbaQ> / Twitter.” [https://twitter.com/Eurogas\\_Eu/status/1031898464391639040/photo/1](https://twitter.com/Eurogas_Eu/status/1031898464391639040/photo/1) (accessed Jul. 29, 2021).
- [3] “Global Trends and,” no. December, 2017.
- [4] IRENA, *Hydrogen: a Renewable Energy Perspective*, no. September. 2019.
- [5] “ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ και ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΤΕΡΟΓΕΝΩΝ ΜΕΙΓΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΚΑΥΣΗΣ.”
- [6] D. Ipsakis, S. Voutetakis, P. Seferlis, F. Stergiopoulos, and C. Elmasides, “Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 34, no. 16, pp. 7081–7095, 2009, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.06.051.
- [7] S. E. Hosseini and M. A. Wahid, “Hydrogen production from renewable and sustainable energy resources: Promising green energy carrier for clean development,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 57. Elsevier Ltd, pp. 850–866, May 01, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2015.12.112.
- [8] “HOMER Pro - Microgrid Software for Designing Optimized Hybrid Microgrids.” <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html> (accessed Jul. 19, 2021).
- [9] “Global Wind Atlas.” <https://globalwindatlas.info/> (accessed Jul. 29, 2021).
- [10] “Eocycle’s direct-drive wind turbine gains three new certifications.” <https://www.windpowerengineering.com/eocycles-direct-drive-wind-turbine-gains-three-new-certifications/> (accessed Mar. 16, 2021).
- [11] “(Sun Power).” <https://us.sunpower.com/sites/default/files/sunpower-e-series-commercial-solar-panels-e20-327-com-datasheet-505701-revh.pdf> (accessed Mar. 23, 2021).

[12] "EUROPEAN COMMISSION EESD Contract Page:1 of 80 Cluster Pilot Project for the Integration of RES into European Energy Sectors using Hydrogen."

[13] <http://www.cres.gr/cres/index.html>

[14] <https://geo.rae.gr/>

