

**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**

**Τμήμα Ηλεκτρονικών Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών**

**ΔΥΝΑΜΙΚΗ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ  
ΕΝΟΣ ΥΒΡΙΔΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΜΙΚΡΗΣ  
ΑΝΕΜΟΓΕΝΝΗΤΡΙΑΣ – ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ ΚΑΥΣΙΜΟΥ.**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**του**

**ΛΑΟΥΛΑΚΟΥ ΧΑΡΙΛΑΟΥ**

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ**

**ΣΤΑΥΑΡΑΚΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Καθηγητής**

**ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ**

**ΣΤΑΥΑΡΑΚΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, Καθηγητής**

**ΚΑΛΑΪΤΖΑΚΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, Καθηγητής**

**ΚΟΛΟΚΟΤΣΑ ΔΙΟΝΥΣΙΑ, Επ. Καθηγήτρια(ΤΕΙ Κρήτης)**

**ΧΑΝΙΑ**

**ΙΟΥΝΙΟΣ 2008**

## Περιεχόμενα

Περιεχόμενα.....	2
1. Εισαγωγή .....	4
2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Οικονομία του Υδρογόνου.....	6
2.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας .....	6
2.2 Παγκόσμιο αιολικό δυναμικό.....	7
2.3 Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας .....	8
2.4 Οικονομία του υδρογόνου .....	10
2.5 Κεντρικοποιημένο, αποκεντρικοποιημένο και καταναμημένο σύστημα ενέργειας .....	12
2.6 Επιλογές για παραγωγή υδρογόνου από ηλιακή και αιολική ενέργεια. ....	16
3. Στοιχεία καυσίμου .....	17
3.1 Ιστορία .....	17
3.2 Πλεονεκτήματα των Στοιχείων Καυσίμου .....	18
3.3 Μειονεκτήματα των Στοιχείων Καυσίμου .....	22
3.4 Εφαρμογές .....	24
3.4.1 Μονάδες Παραγωγής Ενέργειας (Stationary Powerplants) .....	24
3.4.2 Υποβρύχια .....	24
3.4.3 Λεωφορεία και αυτοκίνητα .....	24
3.4.4 Φορητά συστήματα τροφοδοσίας.....	27
3.5 Αρχές λειτουργίας.....	28
3.5.1 Γαλβανικά στοιχεία .....	29
3.5.2 Στοιχεία καυσίμου .....	30
3.5.3 Σύγκριση Στοιχείων Καυσίμου με Μπαταρίες.....	31
3.5.4 Σύγκριση των Στοιχείων Καυσίμου με τις μηχανές εσωτερικής καύσης.....	32
3.6 Είδη στοιχείων καυσίμου .....	33
3.7 Απόδοση .....	35
3.7.1 Ορισμοί της απόδοσης .....	35
3.7.2 Χαρακτηριστικές τιμές .....	36
3.7.3 Απόδοση πλήρους διαδρομής (Round-trip efficiency) .....	36
4. State of the Art .....	37
4.1 Σύγκριση των υπαρχόντων μοντέλων και μεθόδων ανάλυσης.....	37
4.1.1 WinDS-H2 .....	38
4.1.2 CETEEM .....	39
4.1.3 HOMER .....	39
4.2 Πρόσφατες επιστημονικές δημοσιεύσεις.....	43
4.2.1 Μοντελοποίηση και έλεγχος μίας μικρής ανεμογεννήτριας .....	44
4.2.2 Μελέτη βιωσιμότητας ενός ανεξάρτητου υβριδικού συστήματος ενέργειας για εφαρμογές στο Newfoundland.....	47
4.2.3 Μοντελοποίηση και έλεγχος ενός υβριδικού συστήματος ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου.....	49
4.2.4 Προσομοίωση ενός μικρού υβριδικού συστήματος ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου .....	50
4.2.5 Δυναμική μοντελοποίηση ενός ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων .....	51

4.2.6 Μοντελοποίηση και ανάλυση των ηλεκτροχημικών, θερμικών και δυναμικών συμπεριφορών αντιδρώντων ροών για ένα σύστημα στοιχείου καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων.....	52
4.2.7 Παράλληλη λειτουργία ανεμογεννήτριας, στοιχείου καυσίμου και πετρελαιογεννήτριας .....	53
4.2.8 Ένα απλοποιημένο μοντέλο ηλεκτρικού κυκλώματος για την ανάλυση υβριδικών συστημάτων ανεμογεννήτριας – στοιχείων καυσίμου.....	55
4.2.9 Μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός βασισμένου στο υδρογόνο συστήματος φωτοβολταϊκού - ανεμογεννήτριας .....	57
4.2.10 Δυναμική μοντελοποίηση, σχεδίαση και προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου – υπερπυκνωτή .....	58
5. Μοντελοποίηση σε SIMULINK .....	59
5.1 Εισαγωγή .....	59
5.2 Περιγραφή συστήματος .....	60
5.3 Μοντέλα δυναμικών συστημάτων .....	61
5.4 Μοντέλο ανεμογεννήτριας .....	61
5.5 Μοντέλο Στοιχείου Καυσίμου .....	62
5.6 Μοντέλο ηλεκτρολύτη.....	65
5.7 Μοντέλο Ελεγκτή ισχύος.....	66
5.8 Μοντέλο Υπερπυκνωτή .....	66
5.9 Μοντέλο μετασχηματιστή.....	68
5.10 Ελεγκτές .....	68
5.11 Προσομοίωση .....	69
6. Μοντελοποίηση σε HOMER .....	74
6.1 Περιγραφή συστήματος .....	74
6.2 Αιολικά δεδομένα .....	75
6.3 Μονάδα ανεμογεννήτριας .....	76
6.4 Μονάδα στοιχείου καυσίμου.....	77
6.5 Μονάδα μετασχηματιστή .....	79
6.6 Μονάδα ηλεκτρολύτη.....	80
6.7 Μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου .....	81
6.8 Φορτίο ζήτησης .....	82
7. Αποτελέσματα .....	83
7.1 Προσομοίωση στο Simulink .....	83
7.2 Προσομοίωση στο Homer.....	87
8. Συμπεράσματα .....	91
Βιβλιογραφία .....	92
Παράρτημα Α : Πίνακας εικόνων .....	96

# 1. Εισαγωγή

Αυτή η εργασία περιγράφει τη δυναμική μοντελοποίηση και τα αποτελέσματα προσομοίωσης ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας. Το σύστημα αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια 400W, ένα στοιχείο καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC), υπερπυκνωτές, έναν ηλεκτρολύτη και ένα μετασχηματιστή. Η διακύμανση της ισχύος της ανεμογεννήτριας μειώνεται με τη χρήση μίας συστοιχίας στοιχείων καυσίμου.

Η μακροχρόνια αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από ανεμογεννήτριες σε απομακρυσμένες περιοχές πάντα αποτελούσε πρόβλημα. Οι μπαταρίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για μία περιορισμένη ποσότητα ενέργειας για λίγες μέρες. Για μακροχρόνια αποθήκευση η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε υδρογόνο μέσω ηλεκτρόλυσης για χρήση σε στοιχεία καυσίμου. Μετά από πολλές τεχνολογικές προόδους, τα στοιχεία καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων έχουν φτάσει λειτουργούν αποτελεσματικά και η εμπορική τους αξιοποίηση προβλέπεται να επιτευχθεί πολύ σύντομα. Η πρόσφατη διαθεσιμότητα των μικρών μονάδων στοιχείων καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων έχει δημιουργήσει πολλές νέες ευκαιρίες για σχεδίαση υβριδικών συστημάτων ενέργειας για απομακρυσμένες περιοχές.

Στο δεύτερο κεφάλαιο ορίζονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ( παρουσιάζονται οι δυνατότητες αξιοποίησης του παγκόσμιου αιολικού δυναμικού ), τα υβριδικά συστήματα ενέργειας, η οικονομία του υδρογόνου, και οι έννοιες του κεντριοποιημένου, αποκεντριοποιημένου και κατανεμημένου συστήματος ενέργειας. Επίσης παρουσιάζονται οι επιλογές που υπάρχουν για παραγωγή υδρογόνου από ηλιακή και αιολική ενέργεια.

Στο τρίτο κεφάλαιο παρουσιάζεται η θεωρία λειτουργίας των στοιχείων καυσίμου, συγκρίνονται με τις μπαταρίες και τις μηχανές εσωτερικής καύσης, αναλύονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα τους και παρουσιάζονται οι κύριες εφαρμογές τους (όπως σταθερές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, υποβρύχια, αυτοκίνηση και φορητά συστήματα). Επίσης αναφέρονται τα διαφορετικά είδη καυσίμου και αναλύονται οι κατηγοριοποιήσεις τους.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορα μοντέλα και μέθοδοι ανάλυσης των υβριδικών συστημάτων (όπως WinDS-H2, CETEEM και HOMER ). Επίσης παρουσιάζονται ορισμένες πρόσφατες επιστημονικές δημοσιεύσεις των M.J. Khan , M.T. Iqbal, Mamadou Lamine Doumbia, Kodjo Agbossou, Évelyne Granger, O.C. Onar, M. Uzunoglu και M.S. Alam.

Στο πέμπτο κεφάλαιο περιγράφεται το δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης του υβριδικού συστήματος μικρής ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου. Επίσης περιγράφονται τα υποσυστήματα του μοντέλου : η ανεμογεννήτρια, το στοιχείο καυσίμου, ο ηλεκτρολύτης, ο ελεγκτής ισχύος, ο υπερπυκνωτής, ο μετασχηματιστής και οι ελεγκτές PID. Επίσης παρουσιάζεται ο κώδικας υλοποίησης στο Simulink του Matlab.

Στο έκτο κεφάλαιο εισάγεται το υπάρχον σύστημα στο μοντέλο δυναμικής μοντελοποίησης HOMER. Οι παράμετροι του συστήματος ρυθμίζονται μέσα από συνεχείς προσομοιώσεις ώστε να προσδιορισθεί η πιο οικονομικά συμφέρουσα λύση.

Στο έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων στο Simulink και στο Homer.

Και τελικά στο όγδοο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που εξάγονται από αυτή τη μελέτη.

## **2. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Οικονομία του Υδρογόνου.**

### **2.1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας**

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας ή ΑΠΕ συλλέγουν την ενέργεια τους από υπάρχουσες ροές ενέργειας, από τρέχουσες φυσικές διαδικασίες, όπως η ηλιοφάνεια, ο άνεμος, ρέοντα ύδατα (υδροηλεκτρική ισχύς), βιολογικές διαδικασίες και γεωθερμική ροή. Ο πιο συνήθης ορισμός είναι ότι η ανανεώσιμη ενέργεια προέρχεται από μία πηγή ενέργειας η οποία αναπαράγεται από μία φυσική διαδικασία σε ρυθμό ίσο ή χαμηλότερο από το ρυθμό με τον οποίο καταναλώνεται. Για παράδειγμα, τα ηλιακά φωτοβολταϊκά συλλέγουν ενέργεια από τον ήλιο, αλλά μόνο ένα μέρος της συνολικής ηλιακής ενέργειας συλλέγεται.

Οι περισσότερες ανανεώσιμες μορφές ενέργειας, εκτός από τη γεωθερμική και την παλιρροιακή τελικώς προέρχονται από τον ήλιο. Κάποιες είναι μορφές αποθηκευμένης ηλιακής ενέργειας όπως η βροχόπτωση και η δύναμη του ανέμου, που θεωρούνται βραχυπρόθεσμες, ενώ η ενέργεια στη βιομάζα συσσωρεύεται σε μία περίοδο μηνών, όπως στο άχυρο, ή και πολλών ετών όπως στο ξύλο. Η συλλογή της ανανεώσιμης ενέργειας δεν εξαντλεί την πηγή. Τα ορυκτά καύσιμα, ενώ θεωρητικά ανανεώνονται σε μακροχρόνια κλίμακα, καταναλώνονται με ρυθμούς που ίσως εξαντλήσουν τις πηγές τους στο άμεσο μέλλον.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας χρησιμοποιούνται απευθείας ή μετατρέπονται σε πιο εύχρηστες μορφές ενέργειας. Παραδείγματα άμεσης χρήσης είναι οι ηλιακοί φούρνοι, η γεωθερμική ενέργεια και οι υδρόμυλοι και ανεμόμυλοι. Παραδείγματα έμμεσης χρήσης είναι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μέσω ανεμογεννητριών και φωτοβολταϊκών κελιών, ή η παραγωγή καυσίμων όπως το βιοαέριο από αναερόβιο καταβολισμό ή αιθανόλη από βιομάζα.

Το σύγχρονο ενδιαφέρον για την ανάπτυξη εφαρμογών ανανεώσιμης ενέργειας σχετίζεται με την ανησυχία για την εξάντληση των ορυκτών καυσίμων και για τις περιβαλλοντικές, κοινωνικές και πολιτικές επιπλοκές της εκτεταμένης χρήσης των ορυκτών καυσίμων και της πυρηνικής ενέργειας.

Επιπλέον η εντατικοποίηση της εκμετάλλευσης τους αποτελεί τη μεγαλύτερη πρόκληση της κοινωνίας μας, στο κατώφλι μίας ανεπανόρθωτης περιβαλλοντικής καταστροφής, και για αυτό τα περισσότερα οργανωμένα κράτη έχουν πάρει πολιτικές πρωτοβουλίες για τον περιορισμό των επιζήμιων εκπομπών.<sup>[2.1]</sup>

Στο πλαίσιο αυτών των πρωτοβουλιών κρίνεται απαραίτητη η εντατικοποίηση της εκμετάλλευσης τους.

## 2.2 Παγκόσμιο αιολικό δυναμικό

Οι παγκόσμιοι άνεμοι αποτελούν έναν καλό ενεργειακό πόρο και κατανέμονται εξίσου σε μεγάλες περιοχές του πλανήτη. Σύμφωνα με εκτιμήσεις για τον πόρο προκύπτει ότι, η παρούσα ζήτηση ενέργειας παγκοσμίως ισοδυναμεί με το 1 % περίπου της συνολικής ενέργειας των παγκόσμιων ανέμων. Προκειμένου να αξιολογηθεί αυτός ο πόρος είναι απαραίτητο να παρέχεται κάποια εκτίμηση για την ποσότητά του που είναι προσιτή, λαμβάνοντας υπόψη την τεχνολογία και τους περιορισμούς στη χρήση των γαιών σε κάθε περιοχή.

Πολλές χώρες έχουν αναλύσει τον δικό τους αιολικό πόρο, όπως οι ΗΠΑ όπου έχουν διεξαχθεί μελέτες για ολόκληρη τη χώρα και για επιλεγμένες περιοχές. Ο ευρωπαϊκός αιολικός πόρος έχει εκτιμηθεί στον Ευρωπαϊκό Αιολικό Άτλαντα. Για το σύνολο της Ευρώπης έχουν παραχθεί χάρτες που παρουσιάζουν την ταχύτητα (σε m/s) και την ισχύ του ανέμου (σε Watts/m<sup>2</sup>) στα 50m επάνω από το έδαφος και για διάφορους τύπους ανάγλυφου. Επίσης, πολλές άλλες χώρες αξιολογούν τον αιολικό τους πόρο τελευταία, ειδικά η Ινδία και η Κίνα, οι οποίες έχουν ήδη αναλάβει δεσμεύσεις σχετικά με τη χρήση της αιολικής ενέργειας.

Από το 1993, η αγορά νέων αιολικών συστημάτων για παραγωγή καθαρής ισχύος από τον άνεμο στην Ευρώπη αναπτύσσεται με ρυθμό άνω του 40% ετησίως. Η δέσμευση για αύξηση της παραγόμενης από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας από 14% το 1997 σε 22% το 2010 ώθησε την Ευρωπαϊκή Εταιρεία Αιολικής Ενέργειας (EWEA) να αυξήσει το στόχο της σε 75 GW εγκατεστημένης ισχύος το 2010<sup>[2.2]</sup>, δηλαδή θα υπάρξει ετήσια μείωση των ρίπων CO<sup>2</sup> κατά 109 εκατομμύρια τόνους. Για το 2020, ο νέος στόχος που έχει τεθεί από την EWEA είναι για 180 GW, που θα παρέχουν ηλεκτρισμό σε 75 εκατομμύρια ανθρώπους<sup>[2.2]</sup>.

### 2.3 Υβριδικά Συστήματα Ενέργειας

Η συστηματική εκμετάλλευση του αιολικού δυναμικού αποτελεί ευρωπαϊκή πολιτική. Ωστόσο ένα σημαντικό μειονέκτημα αποτελεί η διακύμανση του ανέμου. Για την παραγωγή εγγυημένης ισχύος θα πρέπει να γίνει συνδυασμός των αιολικών συστημάτων με συστήματα αποθήκευσης ενέργειας.

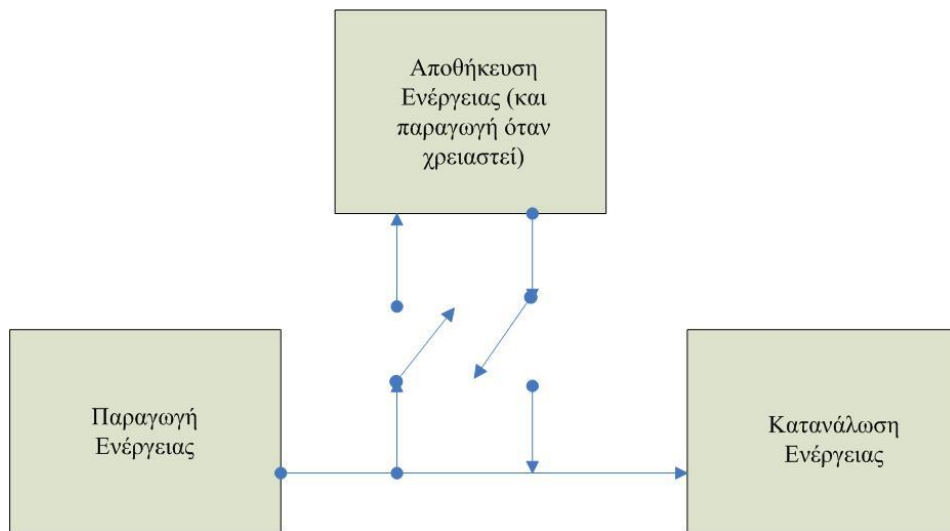
Η ενέργεια που δεν καταναλώνεται από το δίκτυο, αποθηκεύεται σε κάποια μορφή. Αυτό συνήθως συμβαίνει τις πολύ πρωινές ώρες όπου παρατηρούνται υψηλές ταχύτητες ανέμου και χαμηλή κατανάλωση. Επιπλέον σε ώρες υψηλής ζήτησης, την οποία δεν μπορεί να καλύψει το αιολικό σύστημα, η αποθηκευμένη ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ώστε να καλύψει το έλλειμμα.

Με αυτά τα συστήματα επιτυγχάνεται η εξομάλυνση των διακυμάνσεων που παρουσιάζονται κατά την παραγωγή ενέργειας από αιολικά συστήματα με άμεση συνέπεια να μειώνονται σημαντικά τα προβλήματα ευστάθειας που δημιουργούνται στην τάση και τη συχνότητα του δικτύου. Με τη χρήση συστημάτων αποθήκευσης της αιολικής ενέργειας οι ΑΠΕ αποκτούν ένα πιο αξιόπιστο χαρακτήρα, με αποτέλεσμα να αυξάνεται η διείσδυση στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

Η μακροχρόνια αποθήκευση ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες σε απομακρυσμένες περιοχές πάντα ήταν πρόβλημα. Οι μπαταρίες μπορούν να αποθηκεύσουν μία περιορισμένη ποσότητα για μερικές μέρες. Για μακροχρόνια αποθήκευση, η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να μετατραπεί σε υδρογόνο για αργότερη χρήση σε στοιχεία καυσίμου. Μετά από προόδους, η τεχνολογία των στοιχείων καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων είναι στο στάδιο δοκιμών και ανάπτυξης.<sup>[2,3]</sup> Η πρόσφατη εμπορική διαθεσιμότητα μικρών τέτοιων μονάδων δημιούργησε πολλές ευκαιρίες για τη σχεδίαση υβριδικών ενεργειακών συστημάτων για απομακρυσμένες περιοχές με ενεργειακή αποθήκευση στη μορφή του υδρογόνου.

Μία εναλλακτική μέθοδος αποθήκευσης είναι τα αναστρέψιμα υδροηλεκτρικά έργα αποταμίευσης (Pumped Storage Systems) ,δηλαδή εννοούνται τα υδροηλεκτρικά έργα που έχουν τόσο τη δυνατότητα λειτουργίας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (λειτουργία υδροστροβίλου) όσο και τη δυνατότητα άντλησης (ή αποταμίευσης) του νερού.<sup>[2,4-2.5]</sup> Η υδροηλεκτρική ενέργεια θεωρείται μία πολύ οικονομικά ανταγωνιστική μέθοδος γιατί το οριακό κόστος του είναι σχεδόν μηδενικό.





**Εικόνα 2-1 Διάγραμμα αποθήκευσης ενέργειας**

## 2.4 Οικονομία του υδρογόνου

Οικονομία του υδρογόνου είναι μία υποθετική οικονομία στην οποία η ενέργεια που χρειάζεται για τα οχήματα και για τον ηλεκτρισμό προέρχεται από την αντίδραση υδρογόνου και οξυγόνου. Ενώ ο κύριος στόχος είναι η εξάλειψη της χρήσης ορυκτών καυσίμων και η επακόλουθη μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub>, ένας δευτερεύων στόχος είναι να δημιουργήσει ένα ενεργειακό μέσο για να αντικαταστήσει την προμήθεια πετρελαίου δημιουργώντας ανεξαρτησία για χώρες που δε διαθέτουν αποθέματα πετρελαίου.

Στα πλαίσια της οικονομίας του υδρογόνου, το υδρογόνο είναι ένα ενεργειακό μέσο, και όχι μία ενεργειακή πηγή, προς χρήση σε διάφορους τομείς της οικονομίας. Η παραγωγή υδρογόνου από κύριες πηγές ενέργειας διαφορετικές από λιγνίτη, πετρέλαιο και φυσικό αέριο, θα αντικαταστήσει την καύση των ορυκτών καυσίμων και θα μειώσει την ατμοσφαιρική ρύπανση.

Επιτροπή της αμερικάνικης Βουλής των αντιπροσώπων ενέργειας οριοθετεί τις τεχνολογικές και οικονομικές προκλήσεις που πρέπει να αντιμετωπιστούν για την προώθηση της οικονομίας του υδρογόνου.<sup>[2.6]</sup>

- Η ανάπτυξη και εφαρμογή ανταποδοτικών, ανθεκτικών και ασφαλών συστημάτων στοιχείου καυσίμου και συστημάτων αποθήκευσης υδρογόνου.
- Η ανάπτυξη της υποδομής εφοδιασμού για τα ελαφρά οχήματα.
- Η μείωση του κόστους της παραγωγής υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

Το βασικό συμπέρασμα της επιτροπής ήταν:

*«Η μετάβαση στο υδρογόνο ως κύριο καύσιμο μέσα στα επόμενα 50 χρόνια θα μπορούσε να μεταμορφώσει εκ θεμελίων το ενεργειακό σύστημα των ΗΠΑ, δημιουργώντας ευκαιρίες για αύξηση της ενεργειακής ασφάλειας μέσω της χρήσης διαφορετικών εσωτερικών ενεργειακών πηγών για παραγωγή υδρογόνου και παράλληλα μειώνοντας περιβαλλοντικές επιπλοκές συμπεριλαμβανομένου εκπομπών CO<sub>2</sub>»*

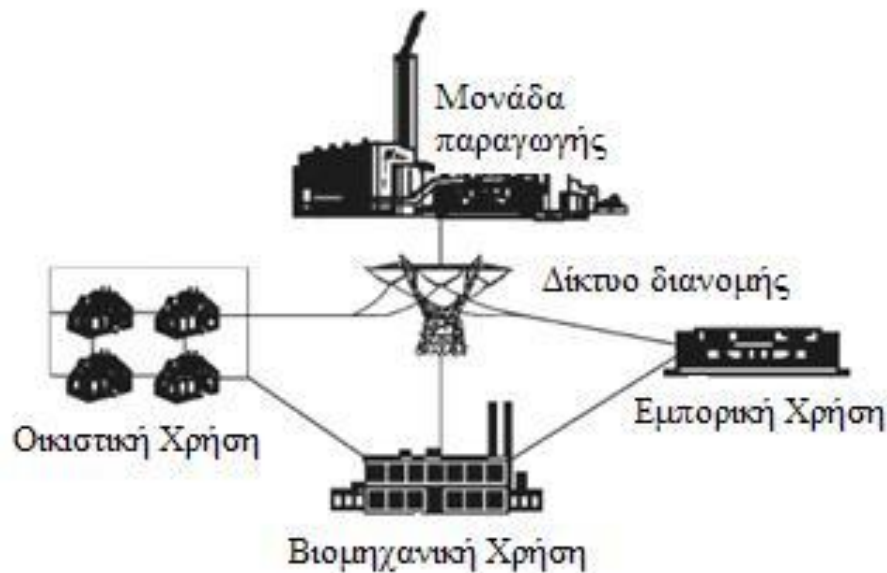
Σε αυτή την αναφορά, η επιτροπή συνέστησε στο υπουργείο ενέργειας έμφαση σε τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας χωρίς εκπομπή CO<sub>2</sub>. Η επιτροπή συνέστησε έμφαση στην ανάπτυξη της μετατροπής της αιολικής ενέργειας σε υδρογόνο ως μία σημαντική τεχνολογία για τη μετάβαση στην οικονομία του υδρογόνου. Επίσης συνέστησε την εντατική έρευνα στην παραγωγή υδρογόνου από φωτοηλεκτροχημικές, φωτοβιολογικές, thin-film solar και πυρηνικής τήξης διαδικασίες.

Ως συνέπεια του πορίσματος της επιτροπής, ο πρόεδρος των ΗΠΑ εξήγγειλε την Πρωτοβουλία για το Υδρογόνο<sup>[2.7]</sup> αξίας 1,2 δισεκατομμυρίων δολαρίων, για να αναστρέψει την αυξανόμενη εξάρτηση από το εισαγόμενο πετρέλαιο και για να βελτιωθεί το περιβάλλον. Η Πρωτοβουλία για το Υδρογόνο του υπουργείου ενέργειας στοχεύει να αναπτύξει τεχνολογίες

υδρογόνου, στοιχείων καυσίμου και υποδομών μέχρι το 2015 ώστε η επιλογή των καταναλωτών για οχήματα τεχνολογίας στοιχείων καυσίμων να έχει γίνει οικονομικά βιώσιμη.

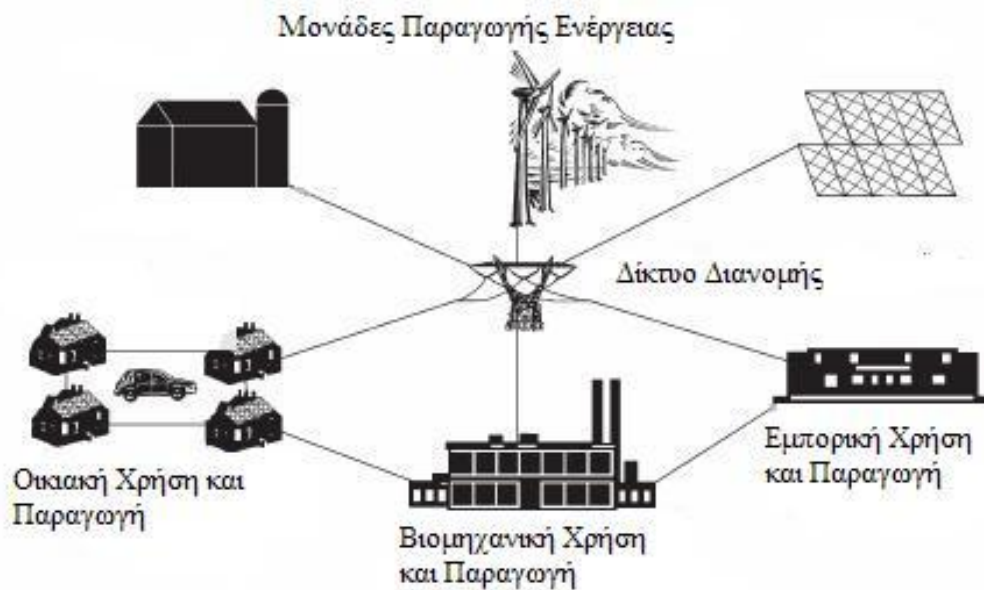
## 2.5 Κεντριοποιημένο, αποκεντριοποιημένο και καταναμημένο σύστημα ενέργειας

Τον προηγούμενο αιώνα, η ηλεκτρική ενέργεια παραγόταν σε μεγάλες μονάδες παραγωγής και μεταφερόταν στους καταναλωτές μέσω δικτύων διανομής.



Εικόνα 2-2 Σχεδιάγραμμα ενός κεντριοποιημένου συστήματος

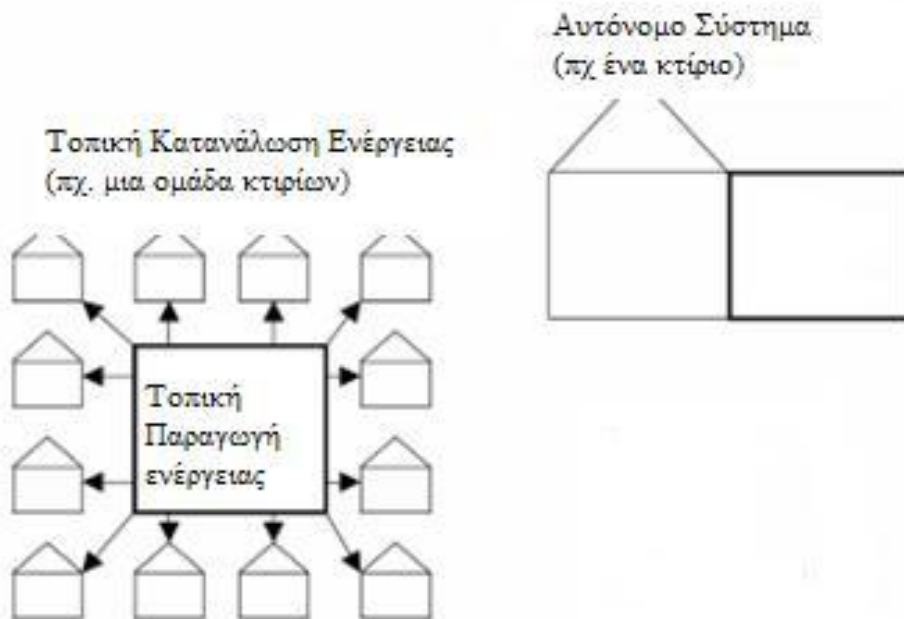
Ένα καταναμημένο σύστημα ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί το αντίθετο ενός κεντριοποιημένου συστήματος ενέργειας. Γενικά θεωρείται ότι αναφέρεται σε μικρής κλίμακας ( μικρότερα των 200 kW) ενεργειακές μονάδες που έχουν τοποθετηθεί στην ίδια τοποθεσία με ένα σημείο ενεργειακής κατανάλωσης και χρησιμοποιούνται από έναν μικρό αριθμό ανθρώπων.<sup>[2.8]</sup>



**Εικόνα 2-3 Σχεδιάγραμμα ενός κατανεμημένου συστήματος**

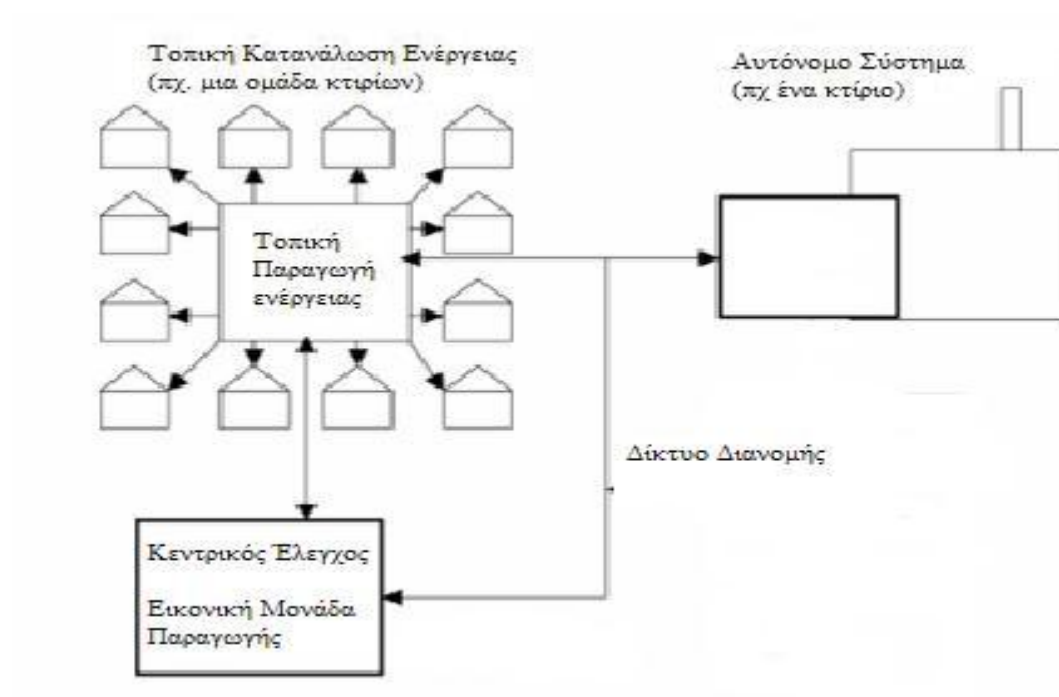
Οι όροι «αποκεντριοποιημένο» και «κατανεμημένο» εξηγούν πως οι μονάδες παραγωγής ενσωματώνονται στο ολικό σύστημα. Για την εξήγηση τη διαφορά των συστημάτων, θα χρησιμοποιηθεί η αναλογία των συστημάτων ενέργειας με τα πληροφοριακά συστήματα. Οι αποκεντριοποιημένες μονάδες ( στα πληροφοριακά συστήματα) είναι αυτόνομα και δεν έχουν καμία αλληλεπίδραση με τις άλλες μονάδες.<sup>[2.9]</sup> Γενικά ισχύει ότι όλα τα αποκεντριοποιημένα συστήματα είναι κατανεμημένα, αλλά ένα κατανεμημένο δεν είναι απαραίτητα κεντριοποιημένο. Έτσι είναι λογικό να χρησιμοποιείται ο πιο γενικός όρος «κατανεμημένα» στο πλαίσιο των ενεργειακών συστημάτων.

Η ενεργειακή κατανάλωση είναι αποκεντριοποιημένη εκ φύσεως. Έτσι το ερώτημα για το αν ένα ενεργειακό σύστημα είναι κεντριοποιημένο, αποκεντριοποιημένο ή κατανεμημένο έχει σχέση με την παραγωγή ενέργειας. Στο μέλλον ίσως ένα ολόκληρο ενεργειακό σύστημα μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα κτήριο.<sup>[2.10]</sup> Πρακτικά αυτό αναφέρεται σε ένα κτήριο που βρίσκεται σε αγροτική περιοχή και δεν υπάρχει τρόπος σύνδεσης στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι, αυτό το κτήριο, που είναι εξοπλισμένο με μονάδες παραγωγής ανανεώσιμης ενέργειας και μονάδες αποθήκευσης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, αποτελεί ένα από τα καλύτερα παραδείγματα αποκεντριοποιημένης παραγωγής ενέργειας.



**Εικόνα 2-4 Παράδειγμα αποκεντριοποιημένου συστήματος παραγωγής ενέργειας**

Στην περίπτωση των κατανεμημένων συστημάτων παραγωγής ενέργειας μία «εικονική μονάδα παραγωγής» παρουσιάζεται ως λύση για την παροχή ενέργειας μίας μεγάλης περιοχής. Αυτό σημαίνει ότι το ενεργειακό σύστημα αποτελείται από μία κεντριοποιημένη μονάδα ελέγχου και πολυάριθμες μονάδες παραγωγής και μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας.<sup>[2.11]</sup> Η μονάδα ελέγχου δέχεται πληροφορίες για τη λειτουργική κατάσταση του δικτύου και καθορίζει με ποιον τρόπο καλύπτονται οι ανάγκες του δικτύου κάθε στιγμή. Αφού κάθε μονάδα μετατροπής συνδέεται στο δημόσιο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας, η αμφίπλευρη εμπορική ανταλλαγή γίνεται δυνατή.



**Εικόνα 2-5 Παράδειγμα κατανεμημένου συστήματος παραγωγής ενέργειας**

## 2.6 Επιλογές για παραγωγή υδρογόνου από ηλιακή και αιολική ενέργεια.

Υπάρχουν αρκετές επιλογές για την παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Πίνακας 2-1)

Επιλογές	Κατανεμημένη Παραγωγή Υδρογόνου	Κεντριοποιημένη Παραγωγή Υδρογόνου
Ηλεκτρόλυση από ηλιακά φωτοβολταϊκά	✓	✓
Ηλεκτρόλυση από αιολική ενέργεια	✓	✓
Ηλιακή φωτοηλεκτρική διαδικασία	✓	✓
Ηλιακή φωτοβιολογική διαδικασία		✓
Ηλιακή θερμοχημική διαδικασία		✓

**Πίνακας 2- 1 Επιλογές παραγωγής υδρογόνου από ηλιακή και αιολική ενέργεια**

Η ηλιακή και αιολική ενέργεια είναι τεχνολογίες που είναι εμπορικά διαθέσιμες για παραγωγή ηλεκτρισμού. Το κόστος του ηλεκτρισμού είναι ένα σημαντικό μέρος του κόστους παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση. Η παραγωγή υδρογόνου με ηλεκτρόλυση από την ηλιακή και αιολική ενέργεια δεν είναι επί του παρόντος οικονομικά εκμεταλλεύσιμη λόγω του υψηλού κόστους παραγωγής ηλεκτρισμού και της ελλιπούς ανάπτυξης της τεχνολογίας των ηλεκτρολυτών. Τα ηλιακά φωτοβολταϊκά θα είναι ελκυστικά για την παραγωγή ηλεκτρισμού αν μπορέσει να επιτευχθεί η τιμή των 5-7 €/kWh .<sup>[2.20]</sup> Η αιολική ενέργεια γίνεται θελκτική λόγω του κόστους της τάξης, 3-5 €/kWh σε περιοχές με μεγάλες ταχύτητές ανέμου.<sup>[2.21]</sup>



### 3. Στοιχεία καυσίμου

#### 3.1 Ιστορία

Η αρχή λειτουργίας του στοιχείου καυσίμου ανακαλύφθηκε από το γερμανό επιστήμονα Christian Friedrich Schönbein το έτος 1838 και δημοσιεύθηκε τον Ιανουάριο του 1839 στο "Philosophical Magazine". Βασίζοντας σε αυτή την εργασία, το πρώτο στοιχείο καυσίμου αναπτύχθηκε από τον ουαλό επιστήμονα Sir William Grove το 1845. Το κατασκεύασε χρησιμοποιώντας παρόμοια υλικά με αυτά που χρησιμοποιούνται σήμερα στην κατασκευή των στοιχείων καυσίμου φωσφορικού οξέος (phosphoric-acid fuel cell –PAFC).

Το 1955, ο W. Thomas Grubb, ένας χημικός που εργαζόταν στη General Electric, τροποποίησε την αρχική σχεδίαση του στοιχείου καυσίμου χρησιμοποιώντας μεμβράνη ανταλλαγής ιόντων από σουλφονικό πολυστυρένιο ως ηλεκτρολύτη. Τρία χρόνια αργότερα ένας άλλος χημικός της General Electric, ο Leonard Niedrach, επινόησε έναν τρόπο απόθεσης λευκόχρυσου στη μεμβράνη, που χρησιμοποιήθηκε ως καταλύτης για τις απαραίτητες οξειδοαναγωγικές αντιδράσεις. Αυτό έγινε γνωστό ως το στοιχείο καυσίμου «Grubb-Niedrach». Η General Electric ανέπτυξε αυτή την τεχνολογία παράλληλα με την Εθνική Διεύθυνση Αεροναυτικής και Διαστήματος (National Aeronautics and Space Administration – NASA ) και τη βιομηχανία κατασκευής αεροσκαφών McDonnell Aircraft, με συνέπεια τη χρήση της στις διαστημικές αποστολές του Gemini και Apollo. Η χρήση του στην αποστολή Gemini ήταν η πρώτη εμπορική εφαρμογή του στοιχείου καυσίμου.

Παρόλα αυτά, ήταν το 1959 Francis T. Bacon, όπου ο βρετανός μηχανικός επέδειξε το πρώτο πλήρως λειτουργικό στοιχείο καυσίμου. Κατασκεύασε επιτυχώς μια μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας 5 kW. Το 1959, μια ομάδα υπό τον Harry Ihrig κατασκεύασε ένα αγροτικό μηχάνημα ( τρακτέρ), που λειτουργούσε με στοιχεία καυσίμου ισχύος 15 kW, για την εταιρεία Allis-Chalmers, το οποίο επιδεικνυόταν σε εμπορικές εκθέσεις στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής. Αυτό το σύστημα χρησιμοποιούσε υδροξείδιο του ποτασίου ως ηλεκτρολύτη και συμπιεσμένο υδρογόνο και οξυγόνο ως αντιδρώντα.

Επίσης το 1959, ο Bacon και η ομάδα του επέδειξαν μια λειτουργική μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με στοιχεία καυσίμου ισχύος 5 kW. Στη δεκαετία του 1960, η εταιρεία Pratt and Whitney αγόρασε τα δικαιώματα των ευρεσιτεχνιών του Bacon για τη χρήση τους στα διαστημικά προγράμματα.

### 3.2 Πλεονεκτήματα των Στοιχείων Καυσίμου

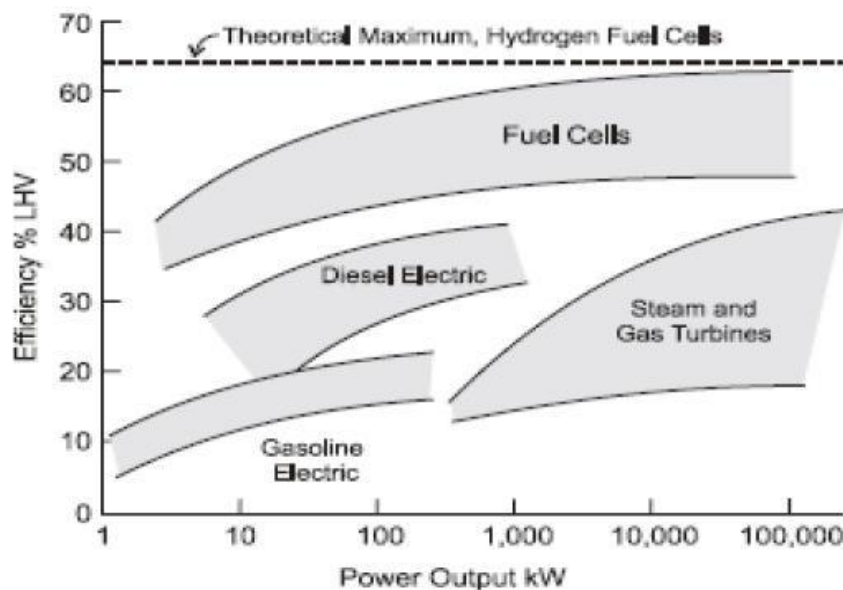
Τα στοιχεία καυσίμου συνήθως συγκρίνονται με μηχανές εσωτερικής καύσης και μπαταρίες και προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως αντίστοιχα και μειονεκτήματα. Τα στοιχεία καυσίμου λειτουργούν χωρίς απόβλητα. Το νερό και η θερμότητα είναι τα μόνα προϊόντα τους. Η λειτουργία τους με πλούσια σε υδρογόνο reformat αέρια μίγματα έχει κάποιες επιζήμιες εκπομπές αν και είναι σημαντικά λιγότερες από αυτές της μηχανής εσωτερικής καύσης. Για την ακρίβεια, οι μηχανές εσωτερικής καύσης οι οποίες χρησιμοποιούν υδρογόνο επίσης έχουν ως αποτέλεσμα χαμηλά επίπεδα εκπομπών, τα οποία προέρχονται από την παράπλευρη καύση του λιπαντικού.

Τα στοιχεία καυσίμου λειτουργούν με υψηλότερη θερμοδυναμική απόδοση από ότι οι θερμικές μηχανές. Οι θερμικές μηχανές, όπως οι μηχανές εσωτερικής, μετατρέπουν τη χημική ενέργεια σε θερμότητα και χρησιμοποιούν τη θερμότητα για χρήσιμο έργο. Η μέγιστη (“Carnot”) θερμοδυναμική απόδοση είναι μίας θερμικής μηχανής είναι

$$\text{Απόδοση max} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

όπου  $T_1$  είναι η απόλυτη θερμοκρασία του εισερχόμενου αερίου και  $T_2$  η απόλυτη θερμοκρασία του εξερχόμενου αερίου.

Αυτή η εξίσωση δηλώνει ότι όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία του εισερχόμενου στη μηχανή και όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία του εξερχόμενου αερίου, τόσο υψηλότερη η θερμοδυναμική απόδοση. Έτσι, ενώ στη θεωρία η υψηλότερη θερμοκρασία μπορεί να φτάσει σε υψηλά επίπεδα για να επιτευχθεί κάθε επιθυμητή απόδοση, αφού η θερμοκρασία του εξερχόμενου αερίου δεν μπορεί να μειωθεί από ένα σημείο και μετά. Παρόλα αυτά, σε μία πραγματική μηχανή εσωτερικής καύσης η υψηλότερη θερμοκρασία περιορίζεται από κατασκευαστικούς περιορισμούς. Επιπλέον, σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης, η εισερχόμενη θερμοκρασία είναι η θερμοκρασία λειτουργίας, η οποία είναι πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία ανάφλεξης. Αφού τα στοιχεία καυσίμου δεν κάνουν καύση, η απόδοσή τους δε συνδέεται με τη μέγιστη απόδοση λειτουργίας. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση της μετατροπής ( μία ηλεκτροχημική αντίδραση αντί για καύση ) μπορεί να είναι σημαντικά υψηλότερη. Η απόδοση της ηλεκτροχημικής αντίδρασης δεν είναι η συνολική απόδοση του συστήματος. Τα χαρακτηριστικά της απόδοσης των στοιχείων καυσίμων συγκρίνονται με αυτά άλλων συστημάτων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στην εικόνα 4-1.



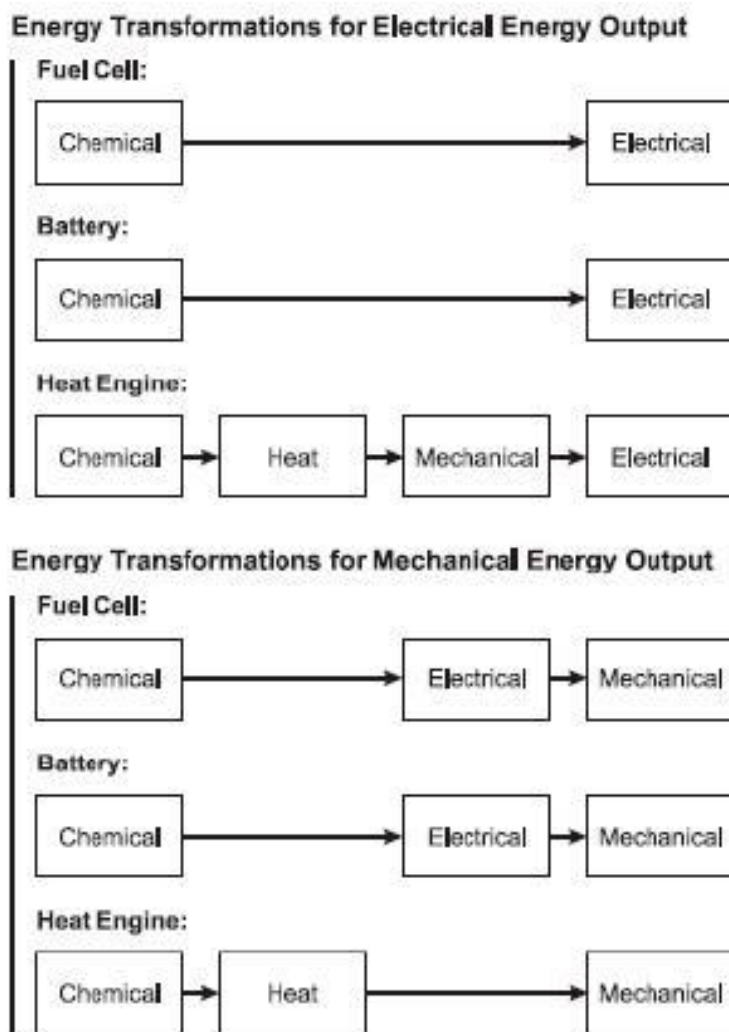
Εικόνα 3-1 Απόδοση Συστημάτων Παραγωγής Ενέργειας

Εκτός από το ότι έχουν υψηλότερη θερμική απόδοση από τις θερμικές μηχανές, επιπλέον τα στοιχεία καυσίμου επιδεικνύουν υψηλότερη απόδοση μερικού φορτίου και δεν παρουσιάζουν πτώση στην απόδοση όσο αυξάνεται η μονάδα παραγωγής ενέργειας. Οι θερμικές μηχανές λειτουργούν με τη μέγιστη απόδοση όταν λειτουργούν σύμφωνα με τη ταχύτητα σχεδίασης και παρουσιάζουν γρήγορη πτώση απόδοσης μερικού φορτίου. Τα στοιχεία καυσίμου όπως οι μπαταρίες, επιδεικνύουν μεγαλύτερη απόδοση σε μερικό φορτίο από ότι σε πλήρες φορτίο και με μικρότερη απόκλιση σε όλο το πεδίο λειτουργίας.

Τα στοιχεία καυσίμου είναι στοιχειοδομημένα στην κατασκευή με σταθερή απόδοση ανεξαρτήτως μεγέθους. Οι αναμορφωτές, παρόλα αυτά, αποδίδουν λιγότερο αποτελεσματικά σε μερικό φορτίο, έτσι η συνολική απόδοση του συστήματος μειώνεται όταν χρησιμοποιηθούν σε συνδυασμό με στοιχεία καυσίμου. Τα στοιχεία καυσίμου επιδεικνύουν καλά χαρακτηριστικά φορτίου λεπτό προς λεπτό (load-following). Τα στοιχεία καυσίμου, όπως και οι μπαταρίες, είναι συσκευές σταθερής κατάστασης που αντιδρούν χημικά και άμεσα στις αλλαγές του φορτίου. Τα συστήματα στοιχείων καυσίμων, παρόλα αυτά, αποτελούνται κυρίως από μηχανικές συσκευές κάθε μία από τις οποίες έχει το δικό της χρόνο αντίδρασης στις μεταβολές του φορτίου ζήτησης.

Παρόλα αυτά, τα συστήματα στοιχείων καυσίμου που λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο τείνουν να έχουν άριστη συνολική απόκριση. Συστήματα στοιχείων καυσίμου που λειτουργούν χρησιμοποιώντας ενσωματωμένους αναμορφωτές, μπορεί να είναι αργά, ειδικά αν χρησιμοποιούνται τεχνικές αναμόρφωσης ατμού. Όταν χρησιμοποιούνται ως γεννήτριες ηλεκτρικής ενέργειας, τα στοιχεία καυσίμου απαιτούν λιγότερους μετασχηματισμούς ενέργειας από ότι μία θερμική μηχανή. Όταν χρησιμοποιούνται ως συσκευές παραγωγής μηχανικής ενέργειας, τα στοιχεία καυσίμου απαιτούν ίσο αριθμό μετασχηματισμών, αν και οι συγκεκριμένοι μετασχηματισμοί είναι διαφορετικοί. Κάθε μετασχηματισμός ενέργειας παρουσιάζει μία σχετική

ενεργειακή απώλεια, έτσι όσο λιγότεροι οι μετασχηματισμοί τόσο μεγαλύτερη η απόδοση. Έτσι τα στοιχεία καυσίμου είναι πιο κατάλληλα για εφαρμογές που έχουν ως τελικό παράγωγο την ηλεκτρική ενέργεια από αυτές που έχουν τη μηχανική ενέργεια. Συγκριτικοί μετασχηματισμοί ενέργειας δείχνονται στην εικόνα 3-2.



**Εικόνα 3-2 Συγκριτικοί ενεργειακοί μετασχηματισμοί**

Τα συστήματα στοιχείων καυσίμου, που είναι κατάλληλα για εφαρμογές αυτοκινητοβιομηχανίας, λειτουργούν σε χαμηλές θερμοκρασίες ( συνήθως μικρότερες από 212 °F/100 °C). Αυτό είναι ένα πλεονέκτημα με την έννοια ότι τα στοιχεία καυσίμου απαιτούν λίγο χρόνο προθέρμανσης, οι κίνδυνοι υψηλής θερμοκρασίας μειώνονται, και η θερμοδυναμική απόδοση της ηλεκτροχημικής θερμοκρασίας είναι έμφυτα καλύτερη. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα με την έννοια ότι η μεσαίου βαθμού απορριπτόμενη θερμότητα είναι δυσκολότερο να αποβληθεί, έτσι τα συστήματα ψύξης πρέπει να είναι μεγαλύτερα και κατά συνέπεια η ηλεκτροχημική αντίδραση εξελίσσεται με μικρότερη ταχύτητα από ότι σε υψηλότερη θερμοκρασία. Οι αναμορφωτές (reformers), που χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα στοιχεία καυσίμου,

λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες και για αυτό απαιτούν παρατεταμένη προθέρμανση.

Τα συστήματα στοιχείων καυσίμου μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές συμπαραγωγής ενέργειας. Επιπρόσθετα της ηλεκτρικής ισχύος, τα στοιχεία καυσίμου παράγουν ζεστό αποσταγμένο νερό και θερμότητα μεσαίου βαθμού, τα οποία θα μπορούσαν ενδεχομένως να χρησιμοποιηθούν σε οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές. Όταν συμβαίνει αυτό, η συνολική απόδοση του συνδυασμένου συστήματος αυξάνεται.

Τα στοιχεία καυσίμου δεν απαιτούν ρύθμιση (tuning).

Τα στοιχεία καυσίμου δεν απαιτούν επαναφόρτιση. Αντίθετα, τα συστήματα στοιχείων καυσίμου πρέπει να ανεφοδιαστούν με υδρογόνο, το οποίο είναι ταχύτερο από τη φόρτιση της μπαταρίας και μπορεί να καλύψει μεγαλύτερη έκταση απαιτήσεων σε συσχέτιση με το μέγεθος της δεξαμενής αποθήκευσης καυσίμου.

### 3.3 Μειονεκτήματα των Στοιχείων Καυσίμου

Παραδόξως, το υδρογόνο, που είναι ωφέλιμο από περιβαλλοντικής άποψης όταν χρησιμοποιείται σε ένα στοιχείο καυσίμου, είναι επίσης και το μεγαλύτερο πρόβλημα με την έννοια ότι είναι δύσκολο να παραχθεί και να αποθηκευτεί. Οι σύγχρονες διαδικασίες παρασκευής είναι ακριβές και απαιτητικές σε ενέργεια, και συχνά αντλούνται τελικά από τα ορυκτά καύσιμα. Μία αποτελεσματική υποδομή παραγωγής υδρογόνου δεν έχει ακόμα εδραιωθεί.

Τα συστήματα αποθήκευσης αέριου υδρογόνου είναι μεγάλα και βαριά για να αντεπεξέλθει στις απαιτήσεις της χαμηλής ογκομετρικής ενεργειακής πυκνότητας του υδρογόνου. Τα συστήματα αποθήκευσης υγρού υδρογόνου είναι μικρότερα και ελαφρύτερα, αλλά πρέπει να λειτουργούν σε κρυογονικές θερμοκρασίες. Εναλλακτικά, αν το υδρογόνο αποθηκεύεται ως υδρογονάνθρακας ή αλκοόλη και αποδεσμεύεται στη ζήτηση μέσω ενός ενσωματωμένου αναμορφωτή, τα ζητήματα αποθήκευσης και επεξεργασίας απλοποιούνται, αλλά χάνονται κάποια περιβαλλοντικά οφέλη.

Τα στοιχεία καυσίμου απαιτούν σχετικά καθαρά καύσιμα, χωρίς κάποια συγκεκριμένα συστατικά. Αυτά τα συστατικά περιλαμβάνουν θείο, υδρογονάνθρακες και κατάλοιπα υγρά καύσιμα (εξαρτώμενα από το είδος του στοιχείου καυσίμου) τα οποία μπορούν να απενεργοποιήσουν τον καταλύτη του στοιχείου καυσίμου καταστρέφοντας την ικανότητά του να λειτουργήσει. Κανένα από αυτά τα συστατικά δεν αναστέλλουν την καύση σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης.

Τα στοιχεία καυσίμου που είναι κατάλληλα για εφαρμογές αυτοκινητοβιομηχανίας απαιτούν τη χρήση ενός καταλύτη από λευκόχρυσο για να προάγουν τη την αντίδραση παραγωγής ενέργειας. Ο λευκόχρυσος είναι σπάνιο μέταλλο και πολύ ακριβό.

Τα στοιχεία καυσίμου δεν πρέπει να παγώνουν με νερό μέσα τους. Τα στοιχεία καυσίμου παράγουν καθαρό νερό κατά την αντίδραση παραγωγής ενέργειας και τα περισσότερα κατάλληλα για εφαρμογές αυτοκινητοβιομηχανίας στοιχεία καυσίμου χρησιμοποιούν υγρά αντιδρώντα αέρια. Οσοδήποτε εναπομένον νερό μέσα στο στοιχείο καυσίμου μπορεί να προκαλέσει μη αναστρέψιμη βλάβη διαστολής, αν του επιτραπεί να παγώσει. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας, τα στοιχεία καυσίμου παράγουν θερμότητα επαρκή να αποτρέψει το πάγωμα σε κανονικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος, αλλά όταν είναι εκτός λειτουργίας σε κρύο περιβάλλον, το στοιχείο καυσίμου πρέπει να διατηρηθεί ζεστό ή το εναπομένον νερό να αφαιρεθεί πριν παγώσει. Αυτό συνεπάγεται τη μεταφορά του οχήματος σε μία θερμαινόμενη εγκατάσταση ή τη χρήση μίας ενσωματωμένης συσκευής θερμού αέρα.

Τα στοιχεία καυσίμου που χρησιμοποιούν μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membranes – PEM) δεν πρέπει να ξηραθούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας και πρέπει να παραμείνουν υγρά κατά την αποθήκευση. Προσπάθειες για εκκίνηση ή λειτουργία αυτών των στοιχείων καυσίμου υπό ξηρές συνθήκες μπορεί να οδηγήσουν σε βλάβες της μεμβράνης.

Τα στοιχεία καυσίμου απαιτούν πολύπλοκα συστήματα υποστήριξης και ελέγχου. Τα στοιχεία καυσίμου είναι συσκευές σταθερής κατάστασης, τα συστήματα που απαιτούνται για την υποστήριξη της λειτουργίας τους δεν είναι. Ιδιαίτερης μνείας είναι η απαίτηση για συμπιεσμένο αέρα, αυτό απαιτεί ένα συμπιεστή υψηλής ταχύτητας που επιβαρύνει με ένα μεγάλο παρασιτικό φορτίο το σύστημα. Η πολυπλοκότητα του συστήματος αυξάνεται σημαντικά όταν τα στοιχεία καυσίμου λειτουργούν σε συνδυασμό με έναν ενσωματωμένο αναμορφωτή.

Τα στοιχεία καυσίμου είναι βαριά. Τα στοιχεία καυσίμου από μόνα τους δεν είναι υπερβολικά βαριά, αλλά το συνδυασμένο βάρος των στοιχείων καυσίμου, των συστημάτων υποστήριξης και των συστημάτων αποθήκευσης καυσίμων είναι επί του παρόντος μεγαλύτερο από μία συγκρίσιμη μηχανή εσωτερικής καύσης. Τα συστήματα που ενσωματώνουν έναν αναμορφωτή είναι ακόμη βαρύτερα. Τα συστήματα στοιχείων καυσίμου είναι γενικότερα ελαφρύτερα από τα συστήματα μπαταριών, παρόλο που τα τελευταία απαιτούν λιγότερο εξοπλισμό υποστήριξης. Το βάρος των συστημάτων πιθανότατα θα συνεχίζει να μειώνεται όσο αναπτύσσεται η τεχνολογία. Παρά το βάρος τους, τα υπάρχοντα πρωτότυπα οχήματα με στοιχεία καυσίμου έχουν δείξει ότι τα συστήματα μπορούν να κατασκευαστούν επαρκώς συμπαγή για εφαρμογές αυτοκινητοβιομηχανίας.

Τα στοιχεία καυσίμου είναι μία ανερχόμενη τεχνολογία. Και όπως με κάθε νέα τεχνολογία, η μείωση του κόστους, βάρους και μεγέθους ταυτόχρονα με την αύξηση της αξιοπιστίας και του κύκλου ζωής παραμένουν πρωταρχικοί στόχοι.

### **3.4 Εφαρμογές**

Τα στοιχεία καυσίμου είναι στοιχειοδομημένα (modular) και για αυτό βρίσκουν εφαρμογή σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών, από εργοστάσια παραγωγής ενέργειας μέχρι φορητές συσκευασίες ισχύος.

#### **3.4.1 Μονάδες Παραγωγής Ενέργειας (Stationary Powerplants)**

Εφαρμογές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αναπτυχθεί σε διάφορα πιλοτικά προγράμματα χρησιμοποιώντας ένα μεγάλο πεδίο διαφορετικών τεχνολογιών τις τελευταίες δεκαετίες. Η μεγαλύτερη μονάδα μέχρι σήμερα είναι η μονάδα της Ballard Generation Systems των 250 kW με τεχνολογία μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (proton exchange membrane) και φυσικό αέριο ως καύσιμο) που λειτουργεί σε διάφορα σημεία παγκοσμίως. Αν και τα 250 kW θεωρούνται μικρή ποσότητα ενέργειας συγκριτικά με συμβατικούς σταθμούς παραγωγής, είναι αρκετά για να εξυπηρετήσουν απομονωμένες περιοχές ή να παρέχουν εφεδρική τροφοδοσία σε έκτακτη ανάγκη, όπως για παράδειγμα κατά τη διάρκεια μίας διακοπής ρεύματος σε ένα νοσοκομείο.

Οι μονάδες παραγωγής είναι προφανείς υποψήφιοι για λειτουργία χρησιμοποιώντας συμβατικά καύσιμα, όπως φυσικό αέριο, το οποίο μπορεί να διοχετευθεί μέσω αγωγού στη μονάδα και να αναμορφωθεί στη μονάδα. Το συνολικό μέγεθος και ο χρόνος προθέρμανσης είναι λιγότερο κρίσιμα από ότι σε μικρότερες φορητές συσκευές. Εκτός από υψηλή λειτουργική απόδοση, χαμηλές εκπομπές και καλά χαρακτηριστικά μεταβατικής απόκρισης των συστημάτων στοιχείου καυσίμου, παράγουν πλούσιες ποσότητες θερμού νερού και θερμότητας που μπορεί να χρησιμοποιηθεί άμεσα στην περιβάλλουσα κοινότητα, αυξάνοντας επιπλέον τη συνολική απόδοση.

#### **3.4.2 Υποβρύχια**

Τα συστήματα στοιχείων καυσίμου είναι ιδανικά για εφαρμογές στρατιωτικών υποβρυχίων εξαιτίας του χαμηλού τους θορύβου και των υπέρυθρων υπογραφών (infrared signatures). Για πολλούς λόγους, τα στοιχεία καυσίμου θα μπορούσαν να αντικαταστήσουν τις συστοιχίες μπαταριών, οι οποίες προς το παρόν χρησιμοποιούνται για να ηλεκτροδοτήσουν πολλά υποβρύχια. Όπως με τις σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας, το παραγόμενο θερμό νερό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τις ανάγκες του πληρώματος. Πρωτότυπα συστήματα χρησιμοποιούν εδώ και χρόνια αντιδραστήρες καθαρού υδρογόνου και ενσωματωμένους αναμορφωτές.

#### **3.4.3 Λεωφορεία και αυτοκίνητα**

Οι εφαρμογές σε λεωφορεία είναι οι πιο πετυχημένες εμπορικά μέχρι τώρα. Επιτυχημένα προγράμματα έχουν έρθει σε πέρας από την XCELLSiS Fuel Cell Engines,<sup>[3.1]</sup> με την εισαγωγή τριών λεωφορείων στο Βανκούβερ και τριών στο Σικάγο σε κυβερνητικά προγράμματα για μία διετή περίοδο και την εφαρμογή και στο Παλμ Σπρινγκς για ένα αντίστοιχο μονοετές. Στο άμεσο μέλλον αντίστοιχες υπηρεσίες λεωφορείων θα λειτουργούν στην Ευρώπη και



σε άλλες περιοχές του πλανήτη. Όλα αυτά τα λεωφορεία χρησιμοποιούν καθαρό υδρογόνο αποθηκευμένο σε μορφή αερίου υψηλής πίεσης. Αν και κάποια πειραματικά μοντέλα χρησιμοποιηθούν υγρά καύσιμα και ενσωματώνουν συστήματα αναμόρφωσης.



**Εικόνα 3-2** Πρωτότυπα οχήματα στοιχείων καυσίμου στο σταθμό πρόσβασης της SunLine Transit Agency στην Καλιφόρνια.

Τα λεωφορεία είναι μία λογική αφετηρία για την εισαγωγή της τεχνολογίας των στοιχείων καυσίμου για διάφορους λόγους. Προσφέρουν μία εύλογα μεγάλη πλατφόρμα για τα εξαρτήματα του συστήματος και την αποθήκευση του καυσίμου, ανεφοδιάζονται σε έναν κεντρικό σταθμό και συντηρούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα από εξειδικευμένο προσωπικό.

Τα αυτοκίνητα αντιπροσωπεύουν την απόλυτη αγορά για τους κατασκευαστές στοιχείων καυσίμου λόγω του πλήθους τους παγκοσμίως. Η χρήση τους στα αυτοκίνητα αποτελεί το μεγαλύτερο ερέθισμα, καθώς θα συμβάλει σημαντικά στη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Όμως επίσης θέτουν κάποιες από τις υψηλότερες προκλήσεις στην εμπορική εκμετάλλευσή τους. Απαιτείται να ξεπεραστούν προβλήματα όπως η μείωση του μεγέθους τους, η έλλειψη εφοδιαστικού δικτύου και η ως συνήθως ελλιπής συντήρηση των οχημάτων από το καταναλωτικό κοινό. Επιπλέον, οι απαιτήσεις σε απόδοση και αξιοπιστία είναι υψηλές, ενώ η αναμενόμενη τιμή τους χαμηλή.

Οι μεγαλύτερες αυτοκινητοβιομηχανίες ασχολούνται με προγράμματα στοιχείων καυσίμου. Στον Πίνακα 5-2 αναφέρονται ενδεικτικά τα χρονοδιαγράμματα ορισμένων αυτοκινητοβιομηχανιών. Τα δεδομένα αυτά γενικά αναπαριστούν άμεσες ή έμμεσες δημόσιες δηλώσεις. Σε πολλές περιπτώσεις, στελέχη της ίδιας εταιρείας έχουν εκφράσει αντικρουόμενες απόψεις και εκτιμήσεις.

<b>Εταιρεία</b>	<b>Χρονοδιάγραμμα</b>
BMW	Άμεσα εμπορικές πωλήσεις ( υβριδικά βενζίνης υγρού υδρογόνου σειράς 7, με μονάδα στοιχείου καυσίμου πιθανά σε αργότερα μοντέλα. Διείσδυση στην αγορά της τάξης 25% μετά το 2020 ( αν έχει αναπτυχθεί η τεχνολογία)
DaimlerChrysler	“Κατάλληλο για καθημερινή χρήση ” ως το 2007; “εντατικοποίηση ” και πλήρης εμπορική αξιοποίηση από το 2010.
Fiat	Δηλώνει ότι είναι μακριά από την εμπορική αξιοποίηση. Διεξάγει δοκιμές στο Μιλάνο.
Ford	Χρονοδιάγραμμα εμπορικής αξιοποίησης σύμφωνο με το αντίστοιχο του υπουργείου ενέργειας των ΗΠΑ (2012-2015).
GM	Σχεδιάζει να εδραιωθεί στην αγορά των στοιχείων καυσίμου και στα οχήματα στοιχείων καυσίμου μέχρι το 2010, προσδοκά να έχει πουλήσει εκατοντάδες χιλιάδες στοιχείων καύσιμου και οχημάτων στοιχείων καυσίμου έως το 2020.
Honda	Έχει εξαγγείλει σχέδια για παραγωγή 300 οχημάτων στοιχείου καυσίμου το χρόνο για πώληση σε ΗΠΑ και Ιαπωνία. Αναπτύσσει τα δικά της συστήματα και συνεχίζει την έρευνα σε τεχνολογία οχημάτων και υποδομής.
Hyundai	Σχεδιάζει να πουλήσει 10,000 οχήματα στοιχείων καυσίμου στην Κορέα ως το 2010.
Nissan	Η μακροπρόθεσμη στρατηγική για παραγωγή στοιχείων καυσίμου δεν ανακοινώνεται.
Renault	Παρουσίασε το πρώτο λειτουργικό αυτοκίνητο στοιχείων καυσίμου το 1997, αναμένεται να παρουσιάσει πρωτότυπα με στοιχεία καυσίμου στερεών οξειδίων (solid oxide) μέσα στο 2008 και εμπορικά προϊόντα έως το 2015. Σχεδιάζει να παράγει αυτοκίνητα στοιχείων καυσίμου έως το 2010. Επίσης έχει ανακοινώσει ένα σχέδιο συνεργασίας με τη Nissan σε αναμόρφωση πετρελαιοειδών.
Toyota	Δηλώνει ότι τα στοιχεία καυσίμου δε θα είναι εμπορικά αξιοποιήσιμα πριν το 2010 και γενικά υποστηρίζει το χρονοδιάγραμμα του υπουργείου ενέργειας για εμπορική αξιοποίηση έως το 2015.
Volkswagen AG	Δεν έχει ανακοινώσει χρονοδιάγραμμα. Η Audi, εταιρεία του ομίλου Volkswagen, έχει επιδείξει ένα μοντέλο (Audi A2) με κινητήρα στοιχείο καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEM) της Ballard.

**Πίνακας 3-1 Ενδεικτικά χρονοδιαγράμματα Αυτοκινητοβιομηχανιών<sup>[3,2]</sup>**

### 3.4.4 Φορητά συστήματα τροφοδοσίας

Οι φορητές εφαρμογές περιλαμβάνουν φορητούς υπολογιστές, κινητά τηλέφωνα, βιντεοκάμερες κ.α. Ακόμη δεν είναι έτοιμες αυτές οι εφαρμογές για εμπορική εκμετάλλευση. Διάφορες εταιρείες και ιδρύματα ερευνούν στοιχεία καυσίμου μικρού μεγέθους ώστε να γίνουν τα συστήματα αυτά ανταγωνιστικά σε σχέση με τις μπαταρίες.

Οι φορητές εφαρμογές συνήθως χρησιμοποιούν μεταλλικά υβρίδια για την αποθήκευση του υδρογόνου, αφού δεν αντιμετωπίζουν κίνδυνο ανάφλεξης και έχουν μεγάλη ενεργειακή πυκνότητα.<sup>[3.3]</sup>

Επίσης μικρά συστήματα στοιχείων καυσίμου αναπτύσσονται για στρατιωτικούς σκοπούς. Για παράδειγμα, ο στρατός των Ηνωμένων Πολιτειών αναπτύσσει ένα τέτοιο σύστημα που αναμένεται να ενσωματωθεί στο βασικό εξοπλισμό μάχης. Ο στόχος είναι να μπορούν οι στρατιώτες να ηλεκτροδοτήσουν τα συστήματα επικοινωνιών, πλοήγησης και νυχτερινής όρασης για τουλάχιστον 72 ώρες χωρίς ανεφοδιασμό.<sup>[3.4]</sup>

Τα φορητά συστήματα στοιχείων καυσίμου μπορούν να αντικαταστήσουν τις μπαταρίες σε πολλές εφαρμογές. Εμπορικές μονάδες μέχρι της τάξης του 1.2 kW είναι διαθέσιμες.



Εικόνα 3-3 Το VE100RM της Voller Energy Group

### 3.5 Αρχές λειτουργίας

Ένα στοιχείο καυσίμου είναι μία συσκευή μετατροπής της χημικής ενέργειας του καυσίμου απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς καμία ενδιάμεση θερμική ή μηχανική διαδικασία.

Η ενέργεια εκλύεται όταν το καύσιμο αντιδρά με το οξυγόνο στη ατμόσφαιρα. Σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης, η αντίδραση είναι η καύση και η παραγόμενη ενέργεια είναι θερμότητα, που χρησιμοποιείται για να ενεργοποιήσει ένα πιστόνι. Στο στοιχείο καυσίμου, η αντίδραση είναι μία ηλεκτροχημική διαδικασία και η παραγόμενη ενέργεια αποτελείται από ηλεκτρική ενέργεια χαμηλού δυναμικού DC και θερμότητα. Η ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται απευθείας, ενώ η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για άλλους σκοπούς ή να σπαταληθεί.

Στα γαλβανικά ( ή βολταϊκά) στοιχεία, ηλεκτροχημικές αντιδράσεις σχηματίζουν τη βάση στην οποία η χημική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Τα στοιχεία καυσίμου είναι γαλβανικά στοιχεία, όπως είναι και οι μπαταρίες. Σε αντίθεση, στα ηλεκτρολυτικά στοιχεία, όπως οι ηλεκτρολύτες, η ηλεκτρική ενέργεια μετατρέπεται σε χημική ενέργεια.

Ένα βασικό χαρακτηριστικό των στοιχείων καυσίμου είναι ότι το ηλεκτρικό φορτίο καθορίζει το ρυθμό κατανάλωσης του υδρογόνου και του οξυγόνου. Σε μία πραγματική εφαρμογή, διάφορα ηλεκτρικά φορτία μπορούν να εφαρμοστούν στο στοιχείο καυσίμου.

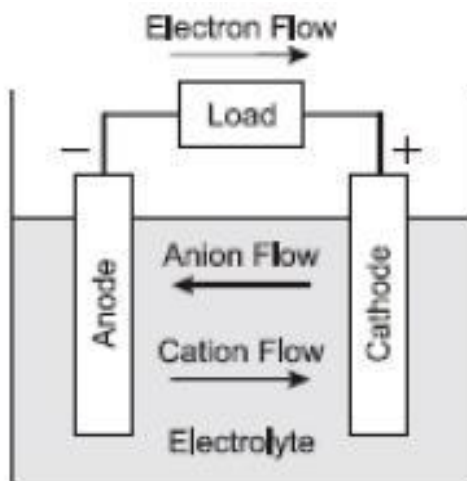
### 3.5.1 Γαλβανικά στοιχεία

Καταρχήν, όλα τα γαλβανικά στοιχεία αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια ( την άνοδο και τη κάθοδο ) και έναν ηλεκτρολύτη. Η άνοδος, ή αρνητικό ηλεκτρόδιο, κατασκευάζεται από χημικές ουσίες που οξειδώνονται εύκολα (απελευθερώνουν ηλεκτρόνια). Η κάθοδος, ή θετικό ηλεκτρόδιο, κατασκευάζεται από χημικές ουσίες που εύκολα ανάγονται ( δέχονται ηλεκτρόνια). Όταν χρησιμοποιούνται μαζί, η άνοδος και η κάθοδος είναι τα συστατικά μίας αντίδρασης οξειδοαναγωγής.

Για να συμβεί μία χημική αντίδραση, τα αντιδρώντα συστατικά πρέπει να έρθουν σε επαφή ώστε να ανταλλαχθούν τα ηλεκτρόνια και να σχηματισθούν δεσμοί. Αν η άνοδος και η κάθοδος είναι σε άμεση επαφή, η αντίδραση συμβαίνει εκεί που ενώνονται οι δύο επαφές. Τα ηλεκτρόνια περνούν μέσα από τα ηλεκτρόδια απευθείας και η ενέργεια που απελευθερώνεται χάνεται ως θερμότητα.

Για να γίνει αυτή η ενέργεια εκμεταλλεύσιμη, τα ηλεκτρόδια πρέπει να διαχωριστούν με τέτοιο τρόπο που η ροή των ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο μέσω ενός εξωτερικού φορτίου ενώ πάλι να είναι σε επαφή κάποιας μορφής για να μπορέσει η αντίδραση να προχωρήσει. Αυτό για να επιτευχθεί, η άνοδος και η κάθοδος διαχωρίζονται από έναν ηλεκτρολύτη.

Αν και ο ηλεκτρολύτης άγει ιόντα, δεν άγει ηλεκτρισμό. Ο ηλεκτρισμός είναι η ροή των ελεύθερων ηλεκτρονίων όπως μέσα από ένα μέταλλο, αν ο ηλεκτρολύτης ήγε ηλεκτρισμό επιπρόσθετα των ιόντων, η άνοδος και η κάθοδος θα βραχυκύκλωναν αφού θα ήταν το ίδιο όπως να ήταν σε άμεση επαφή. Ο συνδυασμός της ιοντικής αγωγιμότητας και της ηλεκτρικής μόνωσης που επιτρέπει στους ηλεκτρολύτες να είναι η βάση των γαλβανικών στοιχείων.



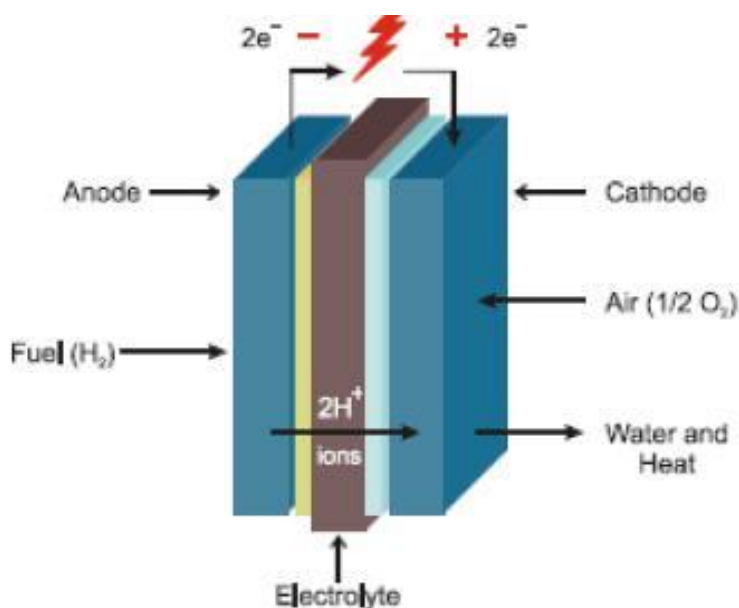
Εικόνα 3-4 Λειτουργία γαλβανικού στοιχείου

### 3.5.2 Στοιχεία καυσίμου

Στα στοιχεία καυσίμου, το καύσιμο και το οξειδωτικό αέριο ουσιαστικά αποτελούν την άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα. Έτσι η φυσική δομή ενός στοιχείου καυσίμου είναι η οδήγηση των αερίων μέσω ροϊκών καναλιών στα ηλεκτρόδια. Ο ηλεκτρολύτης είναι το διακριτικό στοιχείο μεταξύ διαφορετικών ειδών στοιχείων καυσίμου.

Οι ηλεκτρολύτες είναι είτε στερεοί ή υγροί, να λειτουργούν είτε σε υψηλές θερμοκρασίες ή σε χαμηλές θερμοκρασίες. Τα χαμηλής θερμοκρασίας στοιχεία καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας απαιτούν ευγενή μέταλλα ως καταλύτη, συνήθως λευκόχρυσο, για να ενθαρρύνει τις αντιδράσεις των ηλεκτρονίων, ενώ στην περίπτωση λειτουργίας σε υψηλής θερμοκρασίας δεν είναι απαραίτητο. Τα στοιχεία καυσίμου των αυτοκινούμενων εφαρμογών χρησιμοποιούν στερεό ηλεκτρολύτη χαμηλής θερμοκρασίας.

Καταρχήν, ένα στοιχείο καυσίμου μπορεί να λειτουργήσει με διαφορετικά είδη καυσίμου και οξειδωτικών. Το υδρογόνο θεωρείται το πιο αποτελεσματικό για πρακτική χρήση στοιχείων καυσίμων, γιατί έχει μεγαλύτερη ηλεκτροχημική αντιδραστικότητα από τα υπόλοιπα καύσιμα. Ακόμα και τα στοιχεία καυσίμου που λειτουργούν με άλλα καύσιμα συνήθως το αποσυνθέτουν σε υδρογόνο και άλλα στοιχεία. Το οξυγόνο είναι η προφανής επιλογή ως οξειδωτικό εξαιτίας της υψηλής αντιδραστικότητας του και της αφθονίας του στην ατμόσφαιρα.



Εικόνα 3-5 Λειτουργία Στοιχείου Καυσίμου Υδρογόνου

### 3.5.3 Σύγκριση Στοιχείων Καυσίμου με Μπαταρίες.

Τα στοιχεία καυσίμου και οι μπαταρίες είναι και τα δύο γαλβανικά στοιχεία και κατά συνεπεία έχουν πολλές ομοιότητες. Διαφέρουν όμως στη φύση των ηλεκτροδίων. Στις μπαταρίες τα ηλεκτρόδια είναι μέταλλα, ψευδάργυρος ή λίθιο συνήθως χρησιμοποιούνται στην άνοδο και μεταλλικά οξείδια στην κάθοδο. Σε ένα στοιχείο καυσίμου τα ηλεκτρόδια αποτελούνται από αέρια που συνήθως είναι σε επαφή με λευκόχρυσο για να επιταχύνει την αντίδραση. Υδρογόνο ή ένα αέριο μείγμα συνήθως χρησιμοποιείται στην άνοδο και οξυγόνο στην κάθοδο.

Επίσης τα στοιχεία καυσίμου διαφέρουν από τις μπαταρίες στη μέθοδο με την οποία τα χημικά συστατικά αποθηκεύονται. Σε μία μπαταρία η άνοδος και η κάθοδος σχηματίζουν ένα αναπόσπαστο κομμάτι της δομής της μπαταρίας και καταναλώνονται κατά τη χρήση. Έτσι οι μπαταρίες μπορεί να λειτουργήσει μέχρι αυτά τα υλικά να καταναλωθούν τελείως και μετά πρέπει είτε να αντικατασταθούν ή να επαναφορτιστούν. Τα στοιχεία καυσίμου συνεχίζουν να λειτουργούν όσο προμηθεύονται τα αντιδρώντα συστατικά και τα προϊόντα της αντίδρασης αφαιρούνται.

### **3.5.4 Σύγκριση των Στοιχείων Καυσίμου με τις μηχανές εσωτερικής καύσης.**

Τα στοιχεία καυσίμου και οι μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν δομικές ιδιότητες. Χρησιμοποιούν καύσιμα πλούσια σε υδρογόνο. Τα στοιχεία καυσίμου χρησιμοποιούν καθαρό υδρογόνο ή αναμορφωμένο αέριο μίγμα και οι μηχανές εσωτερικής καύσης συνήθως πλούσια σε υδρογόνο ορυκτά καύσιμα, αν και θα μπορούσαν να ρυθμιστούν να λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο. Χρησιμοποιούν τον αέρα ως οξειδωτικό και απαιτούν συστήματα ψύξης.

Σε άλλους τομείς είναι τελείως διαφορετικά. Το καύσιμο και το οξειδωτικό αντιδρούν ηλεκτροχημικά στα στοιχεία καυσίμου ενώ στις μηχανές εσωτερικής καύσης γίνεται καύση. Οι μηχανές εσωτερικής καύσης είναι μηχανικές συσκευές που παράγουν μηχανική ενέργεια ενώ τα στοιχεία καυσίμου είναι συσκευές σταθερής κατάστασης που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.

Η μόλυνση σχετίζεται με τη σύσταση του καυσίμου και τη θερμοκρασία της αντίδρασης. Τα στοιχεία καυσίμου που λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο δεν παράγουν καθόλου επιζήμιους ρίπους. Αυτά που λειτουργούν με αναμορφωμένο υδρογόνο παράγουν μερικούς επιζήμιους ρίπους. Μηχανές εσωτερικής καύσης, με καθαρό υδρογόνο ως καύσιμο θα μπορούσαν να σχεδιαστούν να παράγουν μηδενικούς ρίπους, αυτές με συμβατικά καύσιμα παράγουν σημαντικά περισσότερους ρίπους.



### 3.6 Είδη στοιχείων καυσίμου

Τα είδη στοιχείων καυσίμου διαφέρουν κυρίως από το είδος του ηλεκτρολύτη, γιατί καθορίζει τη θερμοκρασία λειτουργίας. Τα στοιχεία καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας λειτουργούν σε περισσότερες από 600 °C. Αυτές οι υψηλές θερμοκρασίες επιτρέπουν την πηγαία αναμόρφωση ελαφριών υδρογονανθράκων, όπως το μεθάνιο, σε υδρογόνο και άνθρακα με την παρουσία νερού. Αυτή η αντίδραση συμβαίνει στην άνοδο με τις προϋποθέσεις ενός καταλύτη από νικέλιο και της απαιτούμενης θερμότητας.

Η εσωτερική αναμόρφωση εξαλείφει την ανάγκη ενός ξεχωριστού επεξεργαστή καυσίμου. Αυτά τα σημαντικά πλεονεκτήματα οδηγούν σε αύξηση της συνολικής απόδοσης της τάξης του 15%.

Επίσης τα στοιχεία καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας παράγουν θερμότητα, την οποία μέθοδοι συμπαραγωγής ενέργειας μπορούν να εκμεταλλευτούν με κατάλληλες διαδικασίες. Αντιδρούν αποτελεσματικά και χωρίς ακριβούς καταλύτες ευγενών μετάλλων. Από την άλλη, η ενέργεια που παράγεται από την ηλεκτροχημική αντίδραση φθίνει όσο η θερμοκρασία αυξάνει. Επίσης λίγα υλικά δε φθείρονται σε ένα έντονα χημικό περιβάλλον σε υψηλή θερμοκρασία.

Επιπλέον, η λειτουργία σε υψηλές θερμοκρασίες δεν είναι κατάλληλη, όπου η γρήγορη εκκίνηση είναι απαραίτητη. Έτσι αυτές οι εφαρμογές έχουν επικεντρωθεί σε σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας τα πλεονεκτήματα της εσωτερικής αναμόρφωσης και της συμπαραγωγής ενέργειας υπερτερούν των μειονεκτημάτων της αργής εκκίνησης και διάσπασης των υλικών.

Στοιχεία καυσίμου υψηλής θερμοκρασίας είναι με ηλεκτρολύτη τετηγμένου ανθρακικού άλατος (molten carbonate) και με στερεό οξείδιο.

Τα στοιχεία καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας συνήθως λειτουργούν κάτω από 250 °C. Αυτές οι χαμηλές θερμοκρασίες δεν επιτρέπουν την εσωτερική αναμόρφωση, για αυτό και απαιτούν ως εξωτερική πηγή το υδρογόνο. Από την άλλη, έχουν γρήγορη εκκίνηση, δεν αντιμετωπίζουν προβλήματα αντοχής υλικών και η εφαρμογή τους είναι ευκολότερη σε εφαρμογές οχημάτων.

Στοιχεία καυσίμου χαμηλής θερμοκρασίας είναι με ηλεκτρολύτη αλκαλικό διάλυμα (alkaline), φωσφορικό οξύ (phosphoric acid) και μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων ή στερεών πολυμερών (proton exchange membrane or solid polymer).

Στοιχείο Καυσίμου	Ηλεκτρολύτης	Καταλύτης	Θερμοκρασία λειτουργίας	Καύσιμο χρήσης για άνοδο / κάθοδο
Μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων PEM	Μεμβράνη Στερεού Πολυμερούς	Λευκόχρυσος	80 °C	Υδρογόνο / Καθαρό ή ατμοσφαιρικό οξυγόνο
Φωσφορικού οξέος	Υγρό φωσφορικό οξύ	Λευκόχρυσος	200 °C	Υδρογόνο / Ατμοσφαιρικό οξυγόνο
Άμεσης Μεθανόλης DMFC	Μεμβράνη Στερεού Πολυμερούς	Λευκόχρυσος	50 – 100 °C	Υδατοδιάλυμα Μεθανόλης / Ατμοσφαιρικό οξυγόνο
Alkaline AFC	Υδατοδιάλυμα υδροξειδίου του ποτασίου	Μη πολύτιμο μέταλλο	100 – 250 °C	Υδρογόνο / Καθαρό οξυγόνο
Molten Carbonate MCFC	Τετηγμένο Ανθρακικό άλας	Μη πολύτιμο μέταλλο	650 °C	Υδρογόνο, Μεθάνιο / Ατμοσφαιρικό οξυγόνο
Στερεού οξειδίου SOFC	Κεραμικό οξείδιο	Μη πολύτιμο μέταλλο	800 – 1000 °C	Υδρογόνο, Μεθάνιο / Ατμοσφαιρικό οξυγόνο

**Πίνακας 3-2 Είδη στοιχείων καυσίμου<sup>[3.5]</sup>**

### 3.7 Απόδοση

Τα στοιχεία καυσίμου δεν περιορίζονται από τη μέγιστη απόδοση του κύκλου Carnot και κατά συνέπεια έχουν πολύ υψηλές αποδόσεις στη μετατροπή της χημικής ενέργειας σε ηλεκτρική.

#### 3.7.1 Ορισμοί της απόδοσης

Στις επιστήμες υπάρχουν πολλοί ορισμοί της απόδοσης. Και αφού η ανάπτυξη των στοιχείων καυσίμων εμπεριέχει πολλά πεδία τους, είναι σύνηθες να παρεξηγείται το πραγματικό νόημα του όρου «απόδοση».

Οι μηχανολόγοι μηχανικοί συχνά χρησιμοποιούν τον πρώτο νόμο της απόδοσης που ορίζεται ως ο λόγος της χρήσιμης ενέργειας προς τη μέγιστη ανάπτυξη της θερμότητας όταν δεν παράγεται έργο δηλαδή την ενθαλπία. Όμως στη θερμοδυναμική το μέγιστο έργο που εξάγεται από μία διαδικασία είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs (Gibbs free energy). Δεδομένων της πρότυπης ελεύθερης ενέργειας Gibbs και της ενθαλπίας της αντίδρασης, η απόδοση περιορίζεται από

$$n_i = \frac{\Delta G_r^o}{\Delta H_r^o} \approx 87\%$$

Παρόλα αυτά αφού  $\Delta G_r^o$  είναι μεγαλύτερος από το έργο που παράγεται από κάθε πραγματική διεργασία, αυτός ο λόγος θα είναι μικρότερος από 87%. Και αφού η ολότητα του  $\Delta H_r^o$  είναι φυσικά ανέφικτη, κάποιοι μηχανικοί, όπως οι χημικοί μηχανικοί, και ερευνητές προτιμούν το δεύτερο νόμο της απόδοσης, που ορίζεται ως :

$$n_{II} = \frac{W}{\Delta G_r^*}$$

όπου  $\Delta G_r^*$  είναι η ελεύθερη ενέργεια Gibbs των αντιδρώντων στη μορφή που είναι διαθέσιμα, πχ το αέριο σε υψηλή πίεση περιέχει πιο πολλή ενέργεια από ότι σε ατμοσφαιρική πίεση. Ο δεύτερος νόμος της απόδοσης έχει το πλεονέκτημα ότι δίνει ένα πιο λογικό μέγιστο, αφού μία ιδανική διεργασία θα είχε απόδοση  $n_{II}=100\%$  , παρόλα αυτά, ακόμα και στην επιστημονική βιβλιογραφία, χρησιμοποιείται συχνά ο πρώτος νόμος της απόδοσης.

### **3.7.2 Χαρακτηριστικές τιμές**

Ένα στοιχείο καυσίμου μετατρέπει τη χημική ενέργεια του καυσίμου του σε ηλεκτρισμό με απόδοση περίπου 50%. Παρόλα αυτά, η απόδοση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το ρεύμα του. Ως γενικός κανόνας, όσο πιο πολύ ρεύμα άγεται τόσο χαμηλότερη η απόδοση

### **3.7.3 Απόδοση πλήρους διαδρομής (Round-trip efficiency)**

Τα στοιχεία καυσίμου δεν αποθηκεύουν την ενέργεια όπως μία μπαταρία, αλλά σε μερικές εφαρμογές, όπως αυτόνομοι σταθμοί παραγωγής που βασίζονται σε ασυνεχείς πηγές, πχ ηλιακή ή αιολική ενέργεια, συνδυάζονται με ηλεκτρολύτες και συστήματα αποθήκευσης για να σχηματίσουν ένα ενεργειακό σύστημα αποθήκευσης. Η συνολική απόδοση (ηλεκτρική ενέργεια σε χημική και ξανά πάλι σε ηλεκτρική ονομάζεται απόδοση μετά επιστροφής και είναι ανάμεσα 30% και 50%.

Ενώ μία πιο φτηνή μπαταρία μπορεί να επιστρέψει το 90%, το σύστημα ηλεκτρολύτη / στοιχείου καυσίμου μπορεί να αποθηκεύσει απεριόριστες ποσότητες υδρογόνου, και συνεπώς είναι πιο κατάλληλο για μακροχρόνια αποθήκευση.

## 4. State of the Art

### 4.1 Σύγκριση των υπαρχόντων μοντέλων και μεθόδων ανάλυσης.

Αρκετά μοντέλα είναι διαθέσιμα με κάποια δυνατότητα για ανάλυση της αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με ανανεώσιμες πηγές που παρουσιάζουν διακύμανση στην απόδοση ισχύος. Αυτά τα μοντέλα διαφέρουν στις δυνατότητές, δομή, κλίμακα εφαρμογής και προγραμματιστικού κώδικα. Επίσης υπάρχουν και επιπρόσθετες αναλυτικές μέθοδοι που δεν απαιτούν λεπτομερή μοντέλα, αλλά τείνουν να έχουν σημαντικούς περιορισμούς για την ανάλυση συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με αιολικά συστήματα.

Η απλούστερη αναλυτική μέθοδος χρησιμοποιεί την ανάλυση της καμπύλης διάρκειας ισχύος. Μία καμπύλη διάρκειας ισχύος δείχνει τη διάρκεια του χρόνου μία συγκεκριμένης απαίτησης ηλεκτρισμού. Η καμπύλη αναπαριστά γραφικά την ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται προς το συνολικό αριθμό των ωρών ενός έτους (8760 ώρες). Η ανάλυση της καμπύλης διάρκειας ισχύος παράγει γενικευμένες εκτιμήσεις για την ποσότητα της ενεργειακής αποθήκευσης που απαιτείται για να έχει το σύστημα αξιοπιστία στην παροχή ισχύος. Παρόλα αυτά, αυτό το είδος της ανάλυσης δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την εκτίμηση της χρήσης των συστημάτων αποθήκευσης ενέργειας σε συνδυασμό με αιολικά συστήματα, καθώς αποκρύπτει τις λεπτομέρειες της ωριαίας διακύμανσης της αιολικής ισχύος.

#### 4.1.1 WinDS-H2

Η ανάλυση της δυναμικής της αγοράς για παραγωγή υδρογόνου από αιολικά συστήματα είναι πολύπλοκη. Εξαρτάται από ζητήματα των αιολικών δεδομένων, όπως ενεργειακές πηγές, πρόσβαση μετάδοσης και ενσωμάτωση της διακυμαινόμενης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο, όπως επίσης και από ζητήματα της παραγωγής, αποθήκευσης και μεταφοράς του υδρογόνου.

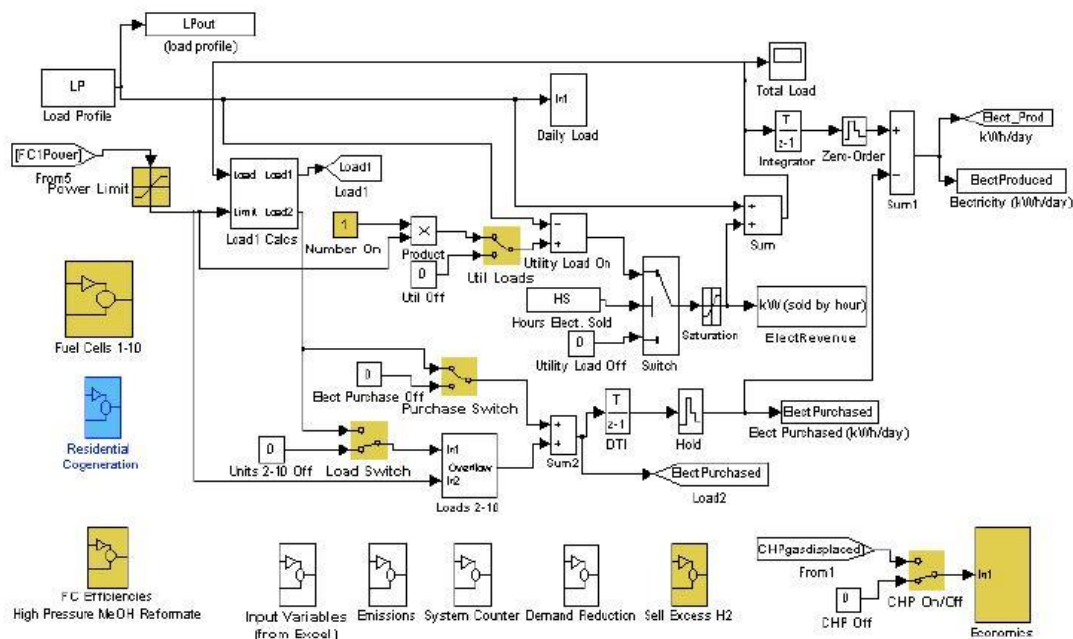
Το μοντέλο WinDS-H2 (Wind Deployment Systems with Hydrogen) είναι ένα εργαλείο ανάλυσης αγοράς που αναπτύχθηκε από το αμερικάνικο εθνικό εργαστήριο για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory - NREL). Το βασικό μοντέλο WinDS είναι ένα πολυχωρικό, πολυχρονικό γεωγραφικό πληροφοριακό σύστημα (GIS) και ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού, το οποίο αναπτύχθηκε για να προσομοιώσει και να εκτιμήσει το δυναμικό της αμερικάνικης αγοράς των αιολικών πηγών ενέργειας <sup>[4.1]</sup> και να βελτιστοποιήσει την τοπική ανάπτυξη παραγωγής και μετάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας στις Ηνωμένες Πολιτείες τα επόμενα 50 χρόνια.

Το μοντέλο WinDS-H2 προσθέτει την παραγωγή, αποθήκευση και μεταφορά υδρογόνου στο μοντέλο WinDS. Το μοντέλο WinDS-H2 χρησιμοποιείται από το αμερικάνικο εθνικό εργαστήριο για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας για την προσπάθεια πρόβλεψης των δυνατοτήτων οικονομικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου από αιολικές πηγές.

Το νέο μοντέλο WinDS-H2 περιλαμβάνει όλα τα χαρακτηριστικά του WinDS, όπως και επίσης τις δυνατότητες παράγωγης, αποθήκευσης και μεταφοράς υδρογόνου. Τρεις ανταγωνιστικές τεχνολογίες μπορούν να παράγουν υδρογόνο. Ηλεκτρολύτες στην αιολική μονάδα, αναμορφωτές μεθανίου από φυσικό αέριο και καταναεμημένοι ηλεκτρολύτες που προμηθεύονται ηλεκτρική ενέργεια από το ηλεκτρικό δίκτυο (όχι απαραίτητα ηλεκτρική ενέργεια παραγόμενη από τα αιολικά συστήματα) περιλαμβάνονται στο μοντέλο WinDS-H2.

#### 4.1.2 CETEEM

Το μοντέλο οικονομικών δεδομένων και εκπομπών καθαρής ενέργειας (Clean Energy Technology Economics and Emissions Model - CETEEM) αναπτύχθηκε από το πανεπιστήμιο του Berkeley για να εκτιμήσει τα οικονομικά δεδομένα και τις εκπομπές από διαφορετικές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας. Το μοντέλο συνδυάζει MATLAB, Simulink και εργαλεία Excel για να δημιουργήσει ένα ολοκληρωμένο εργαλείο ανάλυσης. Το CETEEM έχει υλοποιηθεί για να αναλύει συστήματα στοιχείων καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων PEM που χρησιμοποιούν υδρογόνο από αναμορφωτές ατμού μεθανίου και υβριδικά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και υδρογόνου.<sup>[4.2]</sup>

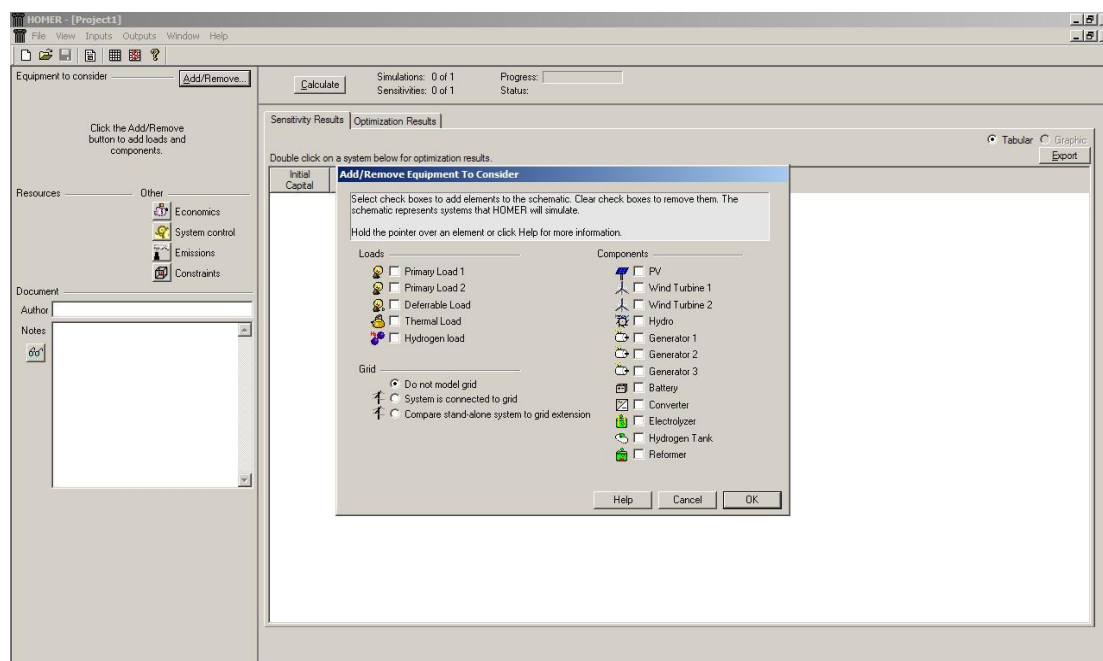


Εικόνα 4-2 Υλοποίηση του Ceteem στο Simulink

### 4.1.3 HOMER

Το υβριδικό μοντέλο βελτιστοποίησης για ανανεώσιμες ηλεκτρικές πηγές (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables - HOMER) αναπτύχθηκε από το αμερικάνικο εθνικό εργαστήριο για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (National Renewable Energy Laboratory - NREL) για να βελτιστοποιήσει τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, συνδεδεμένα στο ηλεκτρικό δίκτυο ή αυτόνομα.

Το μοντέλο HOMER επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει μία αρχιτεκτονική συστήματος που αποτελείται από συγκεκριμένα υποσυστήματα και συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένου πηγών ενέργειας, αποθήκευσης και φορτίου. Συμπεριλαμβάνει συμβατικά και ανανεώσιμα ενεργειακά συστήματα, όπως επίσης και συστήματα υδρογόνου. Αξιολογεί την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος, που είναι ορισμένο από το χρήστη, επιτρέποντας διαφοροποιήσεις στα τεχνικά κόστη και στη διαθεσιμότητα των πηγών. [4.3]



Εικόνα 4-3 HOMER Οθόνη εισαγωγής στοιχείων και φορτίων

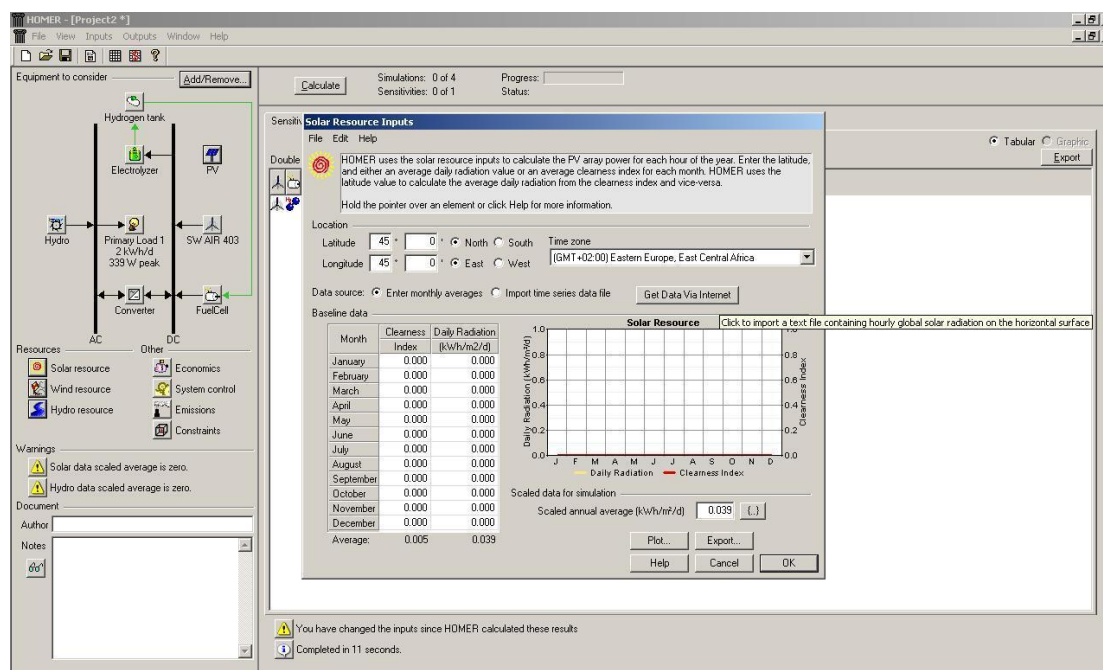
Το μοντέλο HOMER επιλέχθηκε για την αξιολόγηση της ενεργειακής αποθήκευσης στην Καλιφόρνια. Είναι το πληρέστερα αναπτυγμένο από τα διαθέσιμα μοντέλα και εργαλεία ανάλυσης υβριδικών συστημάτων και το πιο κατάλληλο για τους σκοπούς αυτής της ανάλυσης. [4.4] Η ευέλικτη αρχιτεκτονική συστήματος και το φιλικό προς το χρήστη περιβάλλον επιτρέπει στους ερευνητές να μοντελοποιήσουν τα διάφορα υβριδικά συστήματα. Το μοντέλο HOMER αρχικά αναπτύχθηκε για την ανάλυση μικρών αυτόνομων αιολικών συστημάτων και παρουσιάζει ορισμένους περιορισμούς όταν χρησιμοποιούνται για την ανάλυση μεγαλύτερων συνδεδεμένων στο δίκτυο αιολικά πάρκα .



Στο μοντέλο εισάγονται τα υποσυστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας, τα χαρακτηριστικά του συστήματος( όπως το ζητούμενο φορτίο) , τα στοιχεία του συστήματος (όπως ανεμογεννήτριες, στοιχεία καυσίμου και φωτοβολταϊκά στοιχεία) και παράμετροι απόδοσης και κόστους για κάθε στοιχείο.

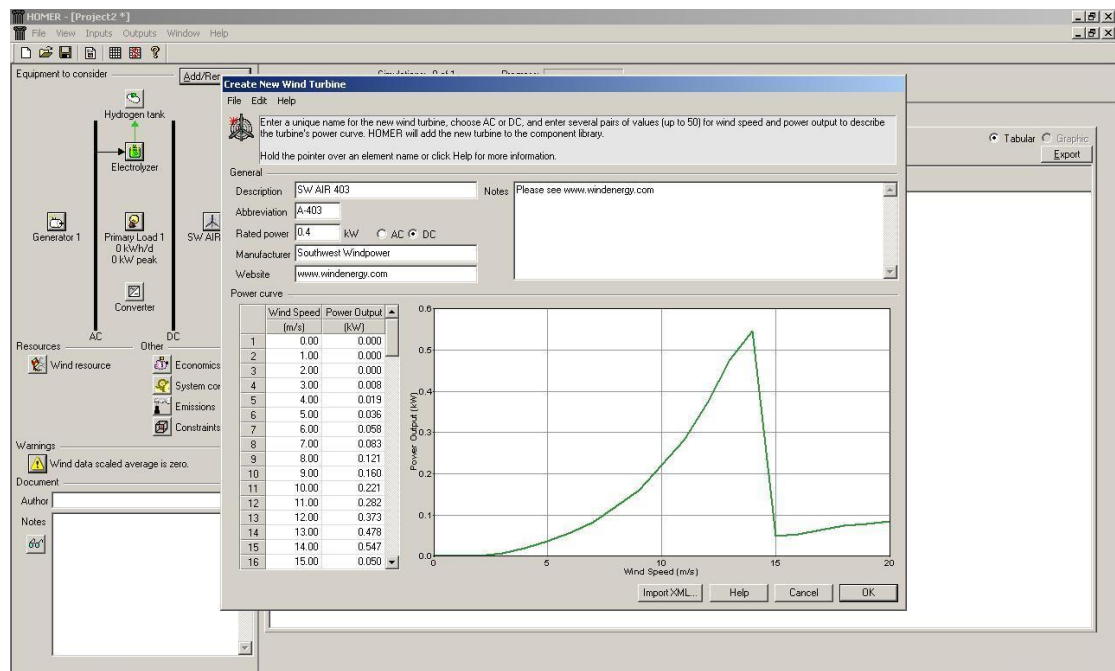
Επιπλέον εισάγονται και οι ωριαίες χρονοσειρές των δεδομένων των ενεργειακών πηγών, που χρησιμοποιούνται από το σύστημα. Δηλαδή η χρονοσειρές της ωριαίας ταχύτητας του ανέμου, της ηλιακής ακτινοβολίας και υδρολογικών δεδομένων. Σε περίπτωση έλλειψης ωριαίων δεδομένων το Homer χρησιμοποιεί τις μέσες μηνιαίες τιμές των δεδομένων και τις τιμές διάφορων παραμέτρων για την παραγωγή της ωριαίας χρονοσειράς.

Ειδικά για την περίπτωση των ηλιακών δεδομένων δίνεται η δυνατότητα απόκτησης των ωριαίων τιμών ηλιακής ακτινοβολίας για συγκεκριμένες γεωγραφικές συντεταγμένες μέσω του διαδικτύου από έναν εξυπηρετητή της NASA.



**Εικόνα 4-4 HOMER Οθόνη εισαγωγής ηλιακών δεδομένων.**

Βάσει των χαρακτηριστικών του συστήματος, το HOMER εκτελεί την προσομοίωση του συστήματος και υπολογίζει τις παραμέτρους (όπως συνολικό ηλεκτρικό φορτίο, ηλεκτρικό φορτίο του κάθε στοιχείου, παραγόμενο ηλεκτρισμό, παραγόμενο υδρογόνο και το ετήσιο κόστος του κάθε στοιχείου ). Έτσι επιτυγχάνεται μία ποσοτική σύγκριση διαφορετικών συστημάτων αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας για συστήματα αιολικής ενέργειας.



**Εικόνα 4-5 HOMER Οθόνη εισαγωγής χαρακτηριστικών ανεμογεννήτριας**

## 4.2 Πρόσφατες επιστημονικές δημοσιεύσεις

Εκτός από το αμερικάνικο υπουργείο ενέργειας που έχει αναπτύξει μοντέλα προσομοίωσης των υβριδικών συστημάτων, πολλοί επιστήμονες σε όλο τον κόσμο μελετούν και αναπτύσσουν μοντέλα προσομοίωσης των υβριδικών συστημάτων αιολικών συστημάτων και στοιχείων καυσίμων.

Στις επόμενες σελίδες θα παρουσιαστούν συνοπτικά οι ακόλουθες επιστημονικές δημοσιεύσεις:

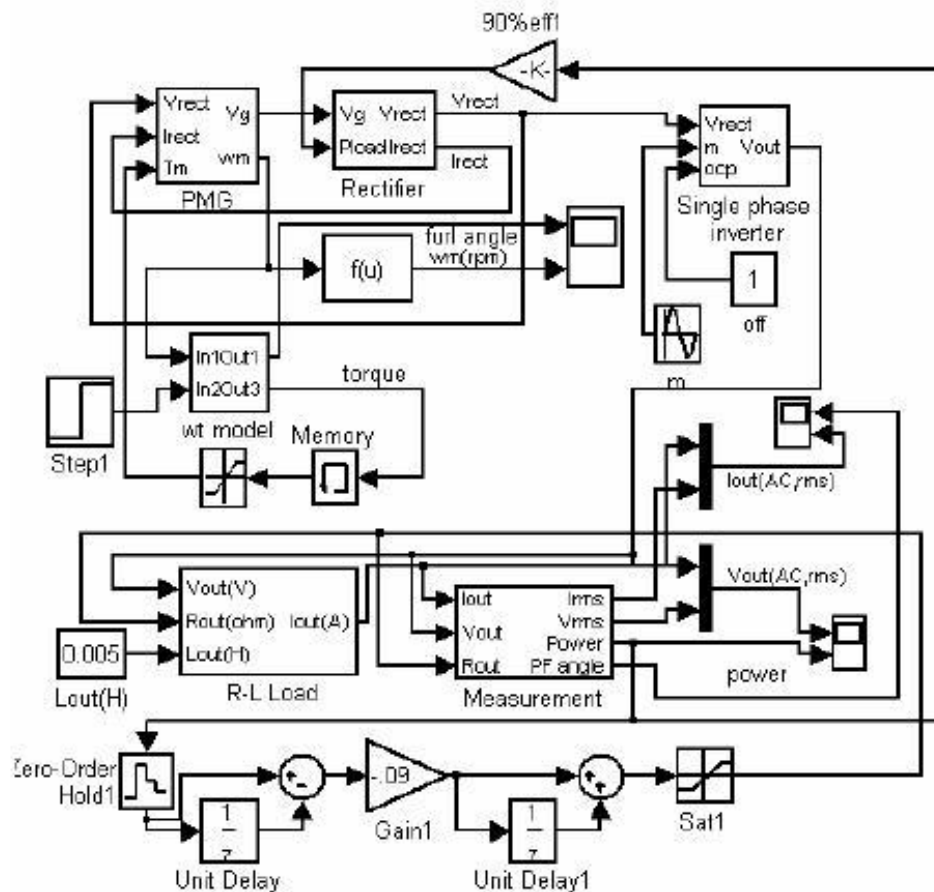
- «Μοντελοποίηση και έλεγχος μίας μικρής ανεμογεννήτριας» <sup>[4.5]</sup> των Md. Arifujjaman, M. T. Iqbal, John E. Quaicoe, M. J. Khan
- «Μελέτη βιωσιμότητας ενός ανεξάρτητου υβριδικού συστήματος ενέργειας για εφαρμογές στο Newfoundland» <sup>[4.6]</sup> των M.J. Khan και M.T. Iqbal
- «Μοντελοποίηση και έλεγχος ενός υβριδικού συστήματος ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου» <sup>[4.7]</sup> του M.T. Iqbal
- «Προσομοίωση ενός μικρού υβριδικού συστήματος ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου» <sup>[4.8]</sup> του M.T. Iqbal
- «Δυναμική μοντελοποίηση ενός ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων» <sup>[4.9]</sup> του H. Görgün
- «Μοντελοποίηση και ανάλυση των ηλεκτροχημικών, θερμικών και δυναμικών συμπεριφορών αντιδρώντων ροών για ένα σύστημα στοιχείου καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων» <sup>[4.10]</sup> των M. T. Iqbal και M. J. Khan
- «Παράλληλη λειτουργία ανεμογεννήτριας, στοιχείου καυσίμου και πετρελαιογεννήτριας» <sup>[4.11]</sup> των E. Muljadi, C. Wang και M.H. Nehrir
- «Ένα απλοποιημένο μοντέλο ηλεκτρικού κυκλώματος για την ανάλυση υβριδικών συστημάτων ανεμογεννήτριας – στοιχείων καυσίμου» <sup>[4.12]</sup> των R. Chedid, F. B. Chaaban και R. Shihab
- «Μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός βασισμένου στο υδρογόνο συστήματος φωτοβολταϊκού – ανεμογεννήτριας» <sup>[4.13]</sup> των M. L. Doumbia, K. Agbossou και É. Granger
- «Δυναμική μοντελοποίηση, σχεδίαση και προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου – υπερπυκνωτή» <sup>[4.14]</sup> των O.C. Onar, M. Uzunoglu και M.S. Alam

#### 4.2.1 Μοντελοποίηση και έλεγχος μίας μικρής ανεμογεννήτριας

Στην εργασία «Μοντελοποίηση και έλεγχος μίας μικρής ανεμογεννήτριας»<sup>[4,5]</sup> των Md. Arifujjaman, M. T. Iqbal, John E. Quaicoe, M. J. Khan δίνεται μία λεπτομερής επισκόπηση των μεθόδων ελέγχου που συνήθως εφαρμόζονται σε μικρές και εμπορικά διαθέσιμες ανεμογεννήτριες. Αυτή η εμπορική επισκόπηση υποδεικνύει ότι η πιο συχνά χρησιμοποιούμενη μέθοδος ελέγχου μικρών ανεμογεννητριών είναι η μέθοδος οριζόντιας στρέβλωσης (horizontal furling method). Τέτοιοι μηχανισμοί στρέβλωσης και οι συνεπακόλουθες δυναμικές συμπεριφορές περιγράφονται στην εργασία. Η στρέβλωση χρησιμοποιείται για τον έλεγχο της αεροδυναμικής εξαγωγής ισχύος από τον άνεμο. Ένα δυναμικό μοντέλο μικρής ανεμογεννήτριας με δυναμικές συμπεριφορές στρέβλωσης παρουσιάζεται. Οι μικρές ανεμογεννήτριες λειτουργούν με μόνιμες μαγνητικές γεννήτριες και η ταχύτητά τους μπορεί να ρυθμιστεί με τη χρήση φορτίου ελέγχου. Η εξαγωγή της μέγιστης εξόδου ισχύος από τέτοιες ανεμογεννήτριες ερευνάται με τη χρήση μεθόδων ελέγχου του λόγου tip speed και μεθόδους ελέγχου hill-climbing. Το σύστημα προσομοιώνεται στο Simulink για να προσδιορισθεί μία κατάλληλη στρατηγική ελέγχου.

Δύο δυναμικοί ελεγκτές σχεδιάζονται και προσομοιώνονται. Στην πρώτη μέθοδο, ένας ελεγκτής χρησιμοποιεί την ταχύτητα του ανέμου και την ταχύτητα του δρομέα και ελέγχει το φορτίο ώστε η ανεμογεννήτρια να λειτουργεί στη μέγιστο λόγο tip speed. Η έξοδος της γεννήτριας παρακολουθείται σε μεταβαλλόμενες συνθήκες ανέμου καθώς η γωνία στρέβλωσης αυξάνεται και μειώνεται.





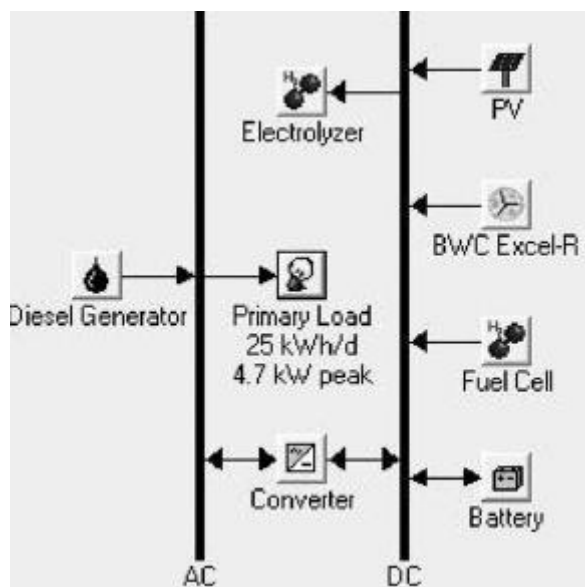
Εικόνα 4-7 Hill-climbing έλεγχος της ανεμογεννήτριας

Τελικά οι έξοδοι των δύο ελεγκτών συγκρίνονται και διερευνώνται για να καθοριστεί ο ελεγκτής του οποίου η χρήση οδηγεί σε καλύτερα αποτελέσματα.

#### 4.2.2 Μελέτη βιωσιμότητας ενός ανεξάρτητου υβριδικού συστήματος ενέργειας για εφαρμογές στο Newfoundland.

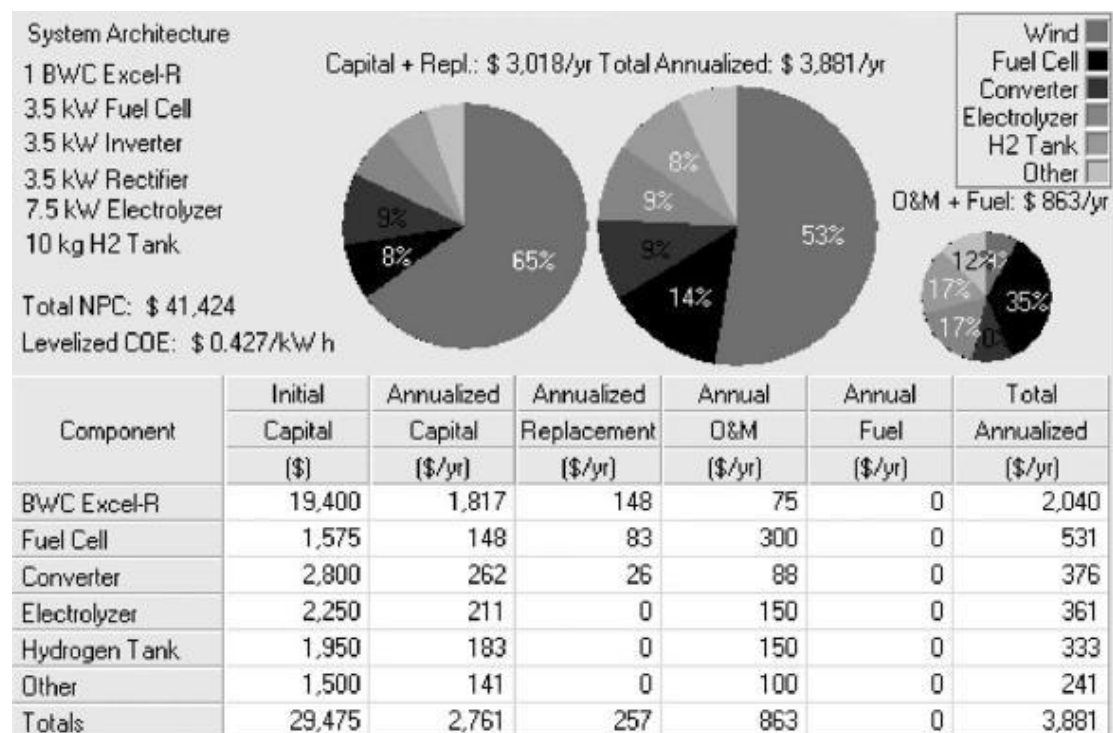
Στην εργασία «Μελέτη βιωσιμότητας ενός ανεξάρτητου υβριδικού συστήματος ενέργειας για εφαρμογές στο Newfoundland»<sup>[4,6]</sup> οι M.J. Khan και M.T. Iqbal μελετούν τη βιωσιμότητα ενός υβριδικού συστήματος ενέργειας σε χρήση παράλληλα με κάποια μορφή ενεργειακής αποθήκευσης υδρογόνου για εφαρμογές στο Newfoundland του Καναδά.

Διάφορες ανανεώσιμες και μη-ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μέθοδοι αποθήκευσης ενέργειας και η εφαρμοσιμότητα τους με όρους κόστους και απόδοσης μελετώνται. Χρησιμοποιείται το HOMER ως εργαλείο μεγεθοποίησης και βελτιστοποίησης. Γίνεται ανάλυση ευαισθησίας με την ταχύτητα του ανέμου, την ηλιακή ακτινοβολία, την τιμή του πετρελαίου και το κόστος των στοιχείων καυσίμου. Οι απαιτήσεις μίας απομακρυσμένης κατοικίας με ενεργειακή κατανάλωση της τάξης των 25 kWh ανά μέρα και αιχμή ισχύος 4.73 kW χρησιμοποιήθηκαν ως το ανεξάρτητο φορτίο ζήτησης. Υπολογίστηκε ότι ένα υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας – πετρελαιογεννήτριας – μπαταρίας είναι η καταλληλότερη λύση επί του παρόντος.



Εικόνα 4-8 Υλοποίηση σε HOMER του υβριδικού συστήματος ενέργειας.

Παρόλα αυτά, με μία μείωση του κόστους των στοιχείων καυσίμου της τάξης του 15%, ένα υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου θα αποτελούσε μία ανώτερη ποιοτικά λύση. Η εγκυρότητα του συστήματος και τα οικονομικά μεγέθη του σε σχέση με συμβατικές πηγές ενέργειας τεκμηριώνεται. Επίσης σε αυτή την εργασία αναλύονται δείκτες μεγεθοποίησης, απόδοσης και διαφόρων κοστών.



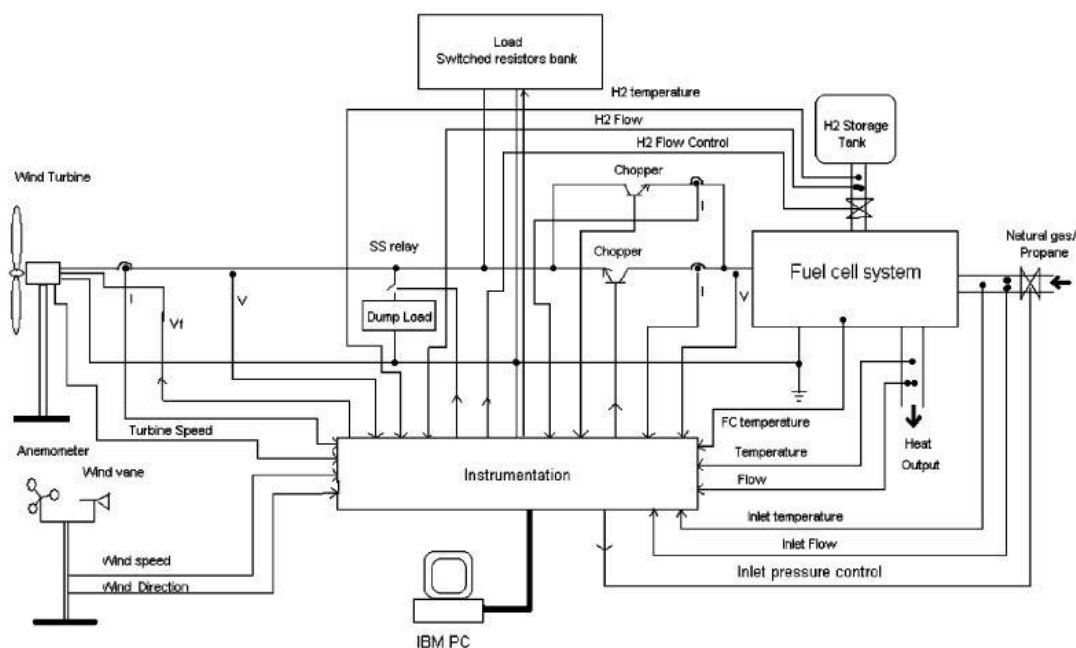
Εικόνα 4-9 Ανάλυση κόστους του συστήματος ανεμογεννήτριας - στοιχείου καυσίμου.



### 4.2.3 Μοντελοποίηση και έλεγχος ενός υβριδικού συστήματος ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου.

Στην εργασία «Μοντελοποίηση και έλεγχος ενός υβριδικού συστήματος ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου»<sup>[4.7]</sup> ο M.T. Iqbal περιγράφει ένα υβριδικό σύστημα ενέργειας που αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια 5KW και ένα σύστημα στοιχείου καυσίμου. Αυτό το σύστημα αναμένεται να είναι μία πιο αποδοτική και χωρίς ρίπους εναλλακτική σε ένα σύστημα ανεμογεννήτριας – πετρελαιογεννήτριας.

Η δυναμική μοντελοποίηση των διάφορων στοιχείων αυτού του απομονωμένου συστήματος παρουσιάζεται. Περιγράφεται η επιλογή στρατηγικών ελέγχου και σχεδίασης των ελεγκτών του συστήματος και παρουσιάζονται οι βηματικές αποκρίσεις του συστήματος για βηματικές αλλαγές στο ηλεκτρικό φορτίο και την ταχύτητα του ανέμου. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του συστήματος για καταγεγραμμένα δεδομένα της ταχύτητας του ανέμου υποδεικνύουν τα transients που αναμένονται στο σύστημα. Επίσης αναφέρονται η σχεδίαση, η μοντελοποίηση, ο έλεγχος και οι περιορισμοί ενός υβριδικού στοιχείου καυσίμου ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου.

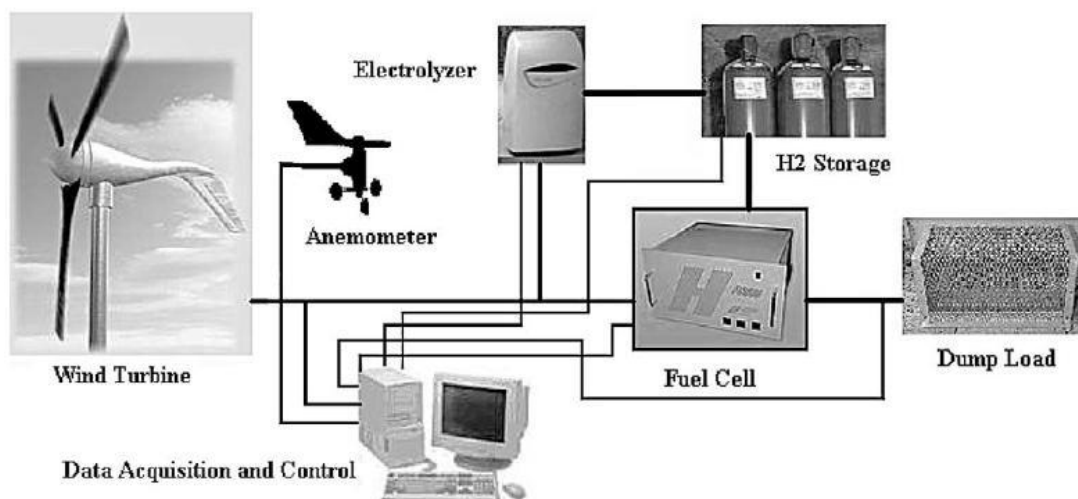


Εικόνα 4-10 Προτεινόμενο υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας - στοιχείου καυσίμου

#### 4.2.4 Προσομοίωση ενός μικρού υβριδικού συστήματος ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου

Στην εργασία «Προσομοίωση ενός μικρού υβριδικού συστήματος ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου»<sup>[4.8]</sup> ο M.T. Iqbal περιγράφει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης ενός υβριδικού συστήματος μικρής ανεμογεννήτριας 500 W και συστήματος στοιχείου καυσίμου. Το σύστημα αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια AIR 403 της Southwest Wind Power Inc., ένα στοιχείο καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (PEMFC) και έναν ηλεκτρολύτη.

Παρουσιάζεται η δυναμική μοντελοποίηση των διάφορων στοιχείων του μικρού απομονωμένου συστήματος. Το Simulink χρησιμοποιείται για τη δυναμική προσομοίωση του μη γραμμικού υβριδικού συστήματος ενέργειας των 48 V. Οι μεταβατικές αποκρίσεις του συστήματος στη βηματική αλλαγή του φορτίου και της ταχύτητας του ανέμου σε διάφορες πιθανές καταστάσεις παρουσιάζονται. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης και των περιορισμών των υβριδικών συστημάτων ενέργειας αναλύονται.

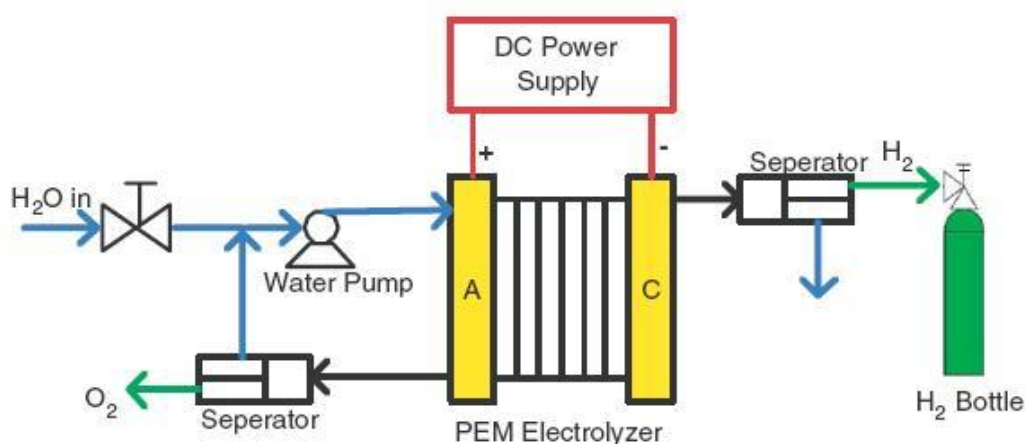


Εικόνα 4-11 Προτεινόμενο υβριδικό σύστημα μικρής ανεμογεννήτριας - στοιχείου καυσίμου

#### 4.2.5 Δυναμική μοντελοποίηση ενός ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Στην εργασία «Δυναμική μοντελοποίηση ενός ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων»<sup>[4,9]</sup> ο H. Görgün περιγράφει ένα δυναμικό μοντέλο για ένα ηλεκτρολύτη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων που βασίζεται στη διατήρηση των γραμμομοριακής ισορροπίας στην άνοδο και στην κάθοδο. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό του μοντέλου είναι ότι περιλαμβάνει φαινόμενα ύδατος, ηλεκτροστατική drag και διήθηση (diffusion), διαμέσου της μεμβράνης. Το μοντέλο θεωρείται ότι ο ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων αποτελείται από τέσσερες συνιστώσες : την άνοδο, την κάθοδο, τη μεμβράνη και τη συνιστώσα της τάσης.

Επιπλέον παρουσιάζονται οι δυναμικές συμπεριφορές της αποθήκευσης του υδρογόνου. Το αναπτυχθέν μοντέλο είναι κατάλληλο για τον καθορισμό της στρατηγικής ελέγχου που θα εξασφαλίσει αποδοτική και αξιόπιστη λειτουργία του ηλεκτρολύτη. Το δυναμικό μοντέλο μπορεί να ενσωματωθεί με μοντέλα συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για να σχεδιασθούν, αναλυθούν και βελτιστοποιηθούν βιώσιμα ενεργειακά συστήματα.

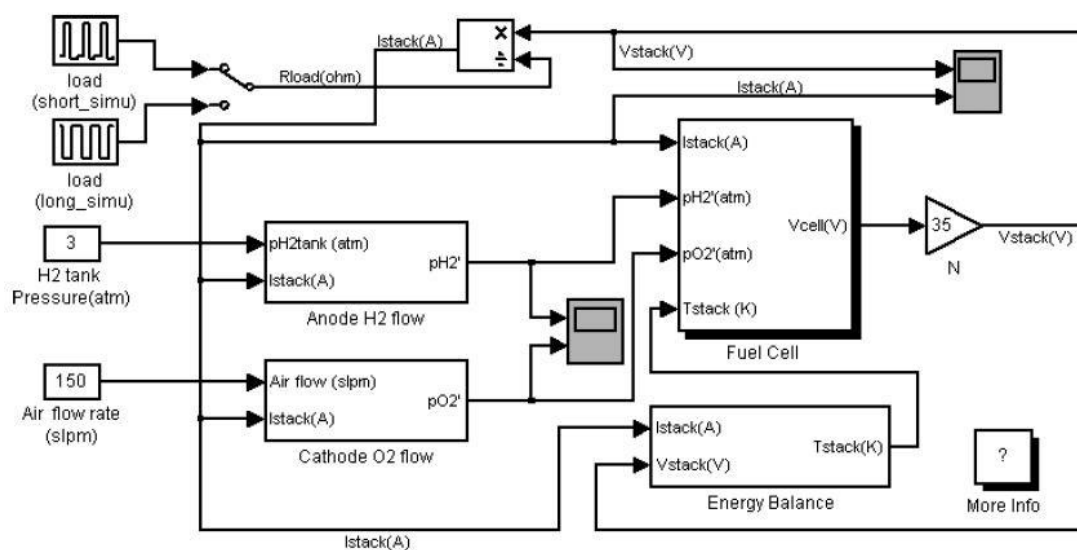


Εικόνα 4-12 Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

#### 4.2.6 Μοντελοποίηση και ανάλυση των ηλεκτροχημικών, θερμικών και δυναμικών συμπεριφορών αντιδρώντων ροών για ένα σύστημα στοιχείου καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων

Στην εργασία «Μοντελοποίηση και ανάλυση των ηλεκτροχημικών, θερμικών και δυναμικών συμπεριφορών αντιδρώντων ροών για ένα σύστημα στοιχείου καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων»<sup>[4.10]</sup> οι M. T. Iqbal και M. J. Khan παρουσιάζουν μία προσέγγιση για τη δυναμική μοντελοποίηση ενός στοιχείου καυσίμου μεμβράνης πολυμερή ηλεκτρολύτη. Ένα μαθηματικό μοντέλο, που βασίζεται σε εμπειρικές εξισώσεις, παρουσιάζεται και αρκετά χαρακτηριστικά, που εμφανίζουν δυναμική συμπεριφορά, εξετάζονται. Ένα γενικοποιημένο μοντέλο στοιχείου καυσίμου σταθερής κατάστασης επεκτείνεται για την ανάπτυξη μίας μεθόδου για τη δυναμική ηλεκτροχημική ανάλυση.

Τα ενεργειακά ισοζύγια και οι δυναμικές συμπεριφορές των αντιδρώντων ροών εξηγούνται μέσω φυσικών και εμπειρικών εξισώσεων. Το σύστημα που εξετάζεται είναι η συστοιχία στοιχείων καυσίμου της Ballard (Ballard MK5-E stack based PGS-105B) ώστε να κατανοηθεί καλύτερα η λειτουργία μίας διαθέσιμης μονάδας στοιχείου καυσίμου. Για την προσομοίωση του μοντέλου χρησιμοποιείται το Simulink. Η προτεινόμενη μέθοδος φαίνεται να είναι σχετικά απλή και κατά συνέπεια απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης συγκρίνονται με τα διαθέσιμα πειραματικά ευρήματα.



Εικόνα 4-1 Μοντέλο Simulink συστήματος στοιχείου καυσίμου

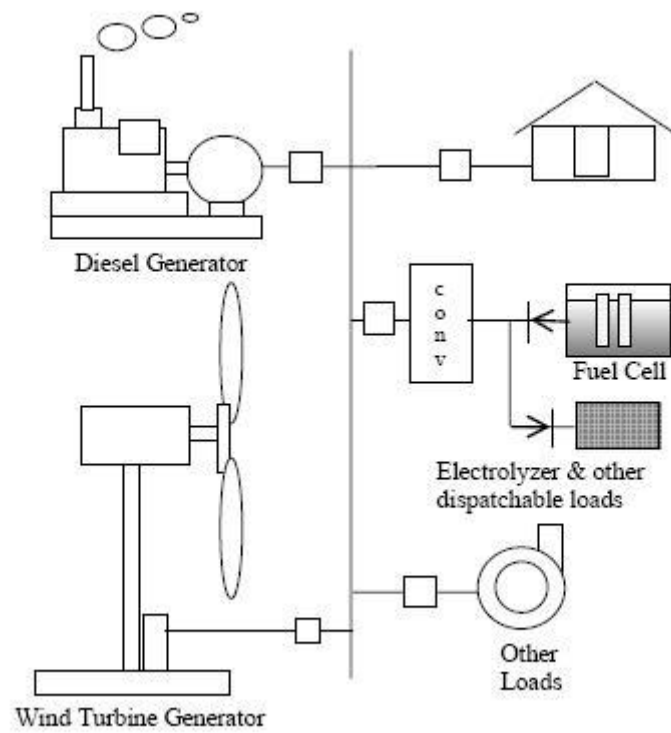
#### **4.2.7 Παράλληλη λειτουργία ανεμογεννήτριας, στοιχείου καυσίμου και πετρελαιογεννήτριας**

Στην εργασία «Παράλληλη λειτουργία ανεμογεννήτριας, στοιχείου καυσίμου και πετρελαιογεννήτριας» <sup>[4.11]</sup> οι E. Muljadi, C. Wang και M.H. Nehrir διερευνούν ένα μικρό απομονωμένο υβριδικό σύστημα ενέργειας που χρησιμοποιεί διακυμαινόμενα και μη-διακυμαινόμενα συστήματα παραγωγής ενέργειας. Η διακυμαινόμενη παραγωγή προέρχεται από την ανεμογεννήτρια που εξαρτάται από την ταχύτητα του ανέμου και οι μη-διακυμαινόμενες γεννήτριες είναι ένα στοιχείο καυσίμου και μία πετρελαιογεννήτριας.

Από την πλευρά του φορτίου, το διακυμαινόμενο κομμάτι είναι το φορτίο του χωριού και το μη- διακυμαινόμενο κομμάτι είναι η αποθήκευση ενέργειας, που μπορεί να γίνει με διαφορετικές τρόπους ( όπως θέρμανση χώρου ή νερού, ηλεκτρόλυση, φόρτιση μπαταριών, κλπ. ). Η αλληλεπίδραση μεταξύ διαφορετικών πηγών και φορτίων εξετάζεται. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης δείχνουν την αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου στοιχείου στις διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας.

Η εργασία διερευνά την παράλληλη λειτουργία μίας ανεμογεννήτριας, μίας πετρελαιογεννήτριας και μίας συστοιχίας στοιχείων καυσίμου. Η ανεμογεννήτρια συμβάλει σημαντικά στο φορτίο, μειώνοντας κατά συνέπεια την κατανάλωση καυσίμου της πετρελαιογεννήτριας όταν η αιολική ισχύς είναι διαθέσιμη.

Σε αυτή τη μελέτη, όταν το στοιχείο καυσίμου δε συμπεριλαμβάνεται, οι διακυμάνσεις τάσης και συχνότητας του συστήματος μπορεί να είναι σημαντικές, επηρεάζοντας έτσι την ποιότητα του στοιχείου καυσίμου. Η πετρελαιογεννήτρια πρέπει να λειτουργεί κοντά στην περιοχή της ονομαστικής της ισχύος, περιορίζοντας έτσι την ικανότητα να προσαρμόζεται η συχνότητα εξόδου. Με το στοιχείο καυσίμου εγκατεστημένο, οι διακυμάνσεις της τάσης και της συχνότητας εξόδου ελαχιστοποιούνται και το σύστημα αποκτά καλή ρύθμιση τάσης και συχνότητας.

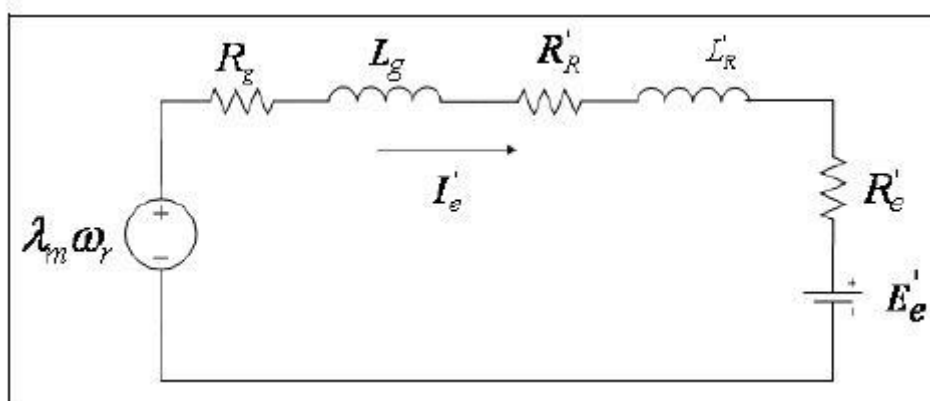


Εικόνα 4-2 Φυσικό σχεδιάγραμμα του υπό ανάλυση συστήματος ενέργειας

#### 4.2.8 Ένα απλοποιημένο μοντέλο ηλεκτρικού κυκλώματος για την ανάλυση υβριδικών συστημάτων ανεμογεννήτριας – στοιχείων καυσίμου

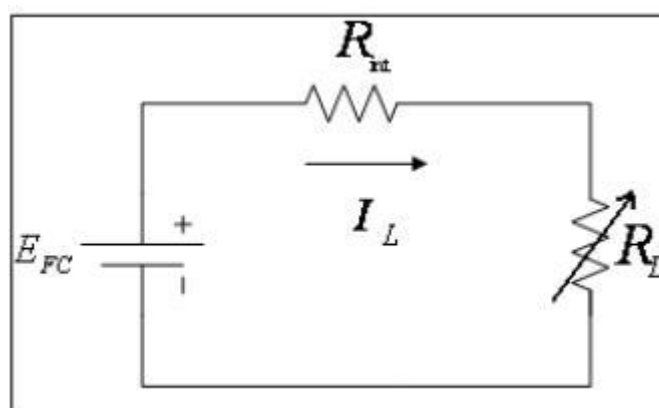
Στην εργασία «Ένα απλοποιημένο μοντέλο ηλεκτρικού κυκλώματος για την ανάλυση υβριδικών συστημάτων ανεμογεννήτριας – στοιχείων καυσίμου»<sup>[4.12]</sup> οι R. Chedid, F. B. Chaaban και R. Shihab προτείνουν μία μεθοδολογία για ένα σύστημα μετατροπής αιολικής ενέργειας ( Wind Energy Conversion System – WECS ) που ενσωματώνει ένα σύστημα στοιχείων καυσίμου ως γεννήτρια εφεδρείας. Ένα πλήρες μαθηματικό μοντέλο για κάθε ένα από τα στοιχεία του υβριδικού συστήματος ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου και ένα απλοποιημένο ισοδύναμο ηλεκτρικού κυκλώματος αναπτύσσεται.

Το ολοκληρωμένο ηλεκτρικό κύκλωμα αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος μοντελοποιεί την ανεμογεννήτρια που οδηγείται από ένα τριφασικό εναλλάκτη μόνιμων μαγνητών που συνδέεται με ένα ανορθωτή και έναν ηλεκτρολύτη.



Εικόνα 4-3 Ισοδύναμο κύκλωμα ανεμογεννήτριας ηλεκτρολύτη

Το δεύτερο μέρος μοντελοποιεί το στοιχείο καυσίμου και το φορτίο.



Εικόνα 4-4 Ισοδύναμο κύκλωμα στοιχείου καυσίμου - φορτίου

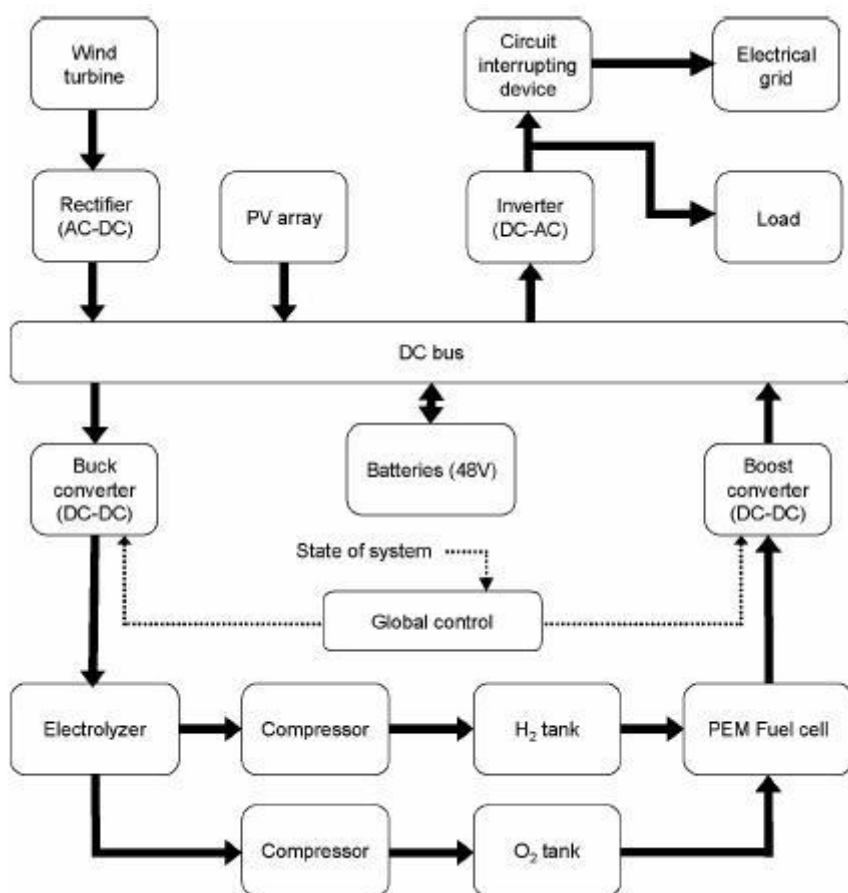
Προσομοιώσεις εκτελούνται στο Simulink για να καθοριστούν η ένταση του ρεύματος του ηλεκτρολύτη, η ποσότητα του υδρογόνου που

παράγεται από τον ηλεκτρολύτη, η ποσότητα του υδρογόνου που καταναλώνεται στο στοιχείο καυσίμου και η ένταση του ρεύματος που άγεται από το φορτίο. Αν και η εργασία εστιάζει μόνο στην ανάλυση σταθερής κατάστασης του συστήματος, το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη διεξαγωγή δυναμικών μελετών.



#### 4.2.9 Μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός βασισμένου στο υδρογόνο συστήματος φωτοβολταϊκού - ανεμογεννήτριας

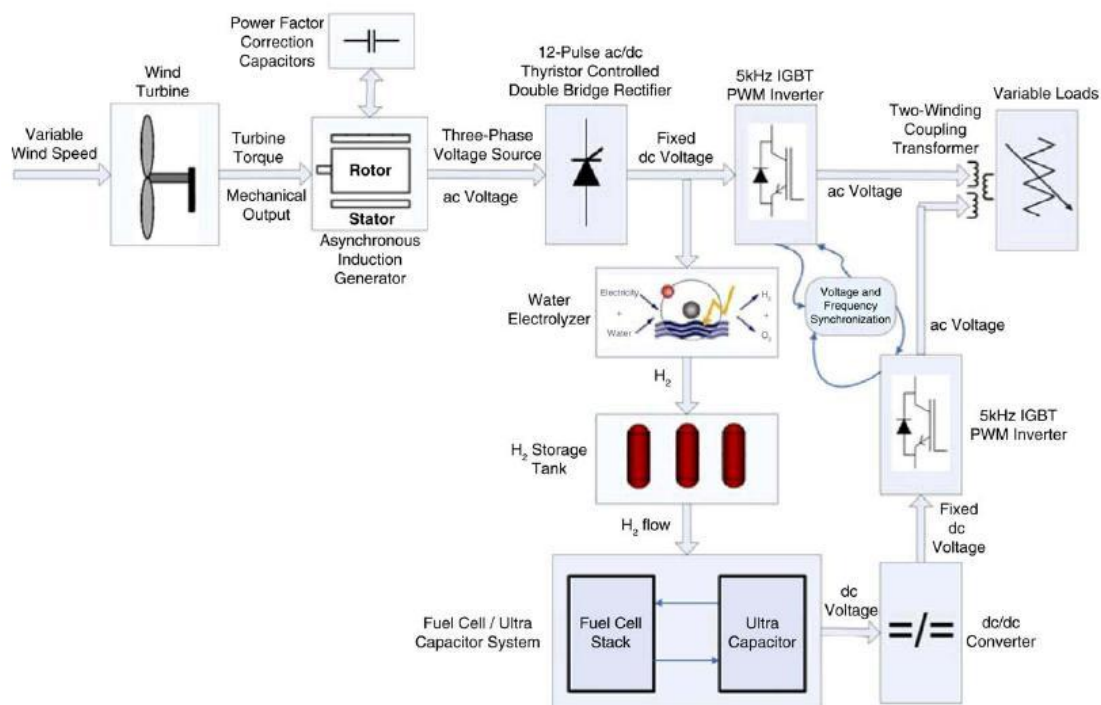
Στην εργασία «Μοντελοποίηση και προσομοίωση ενός βασισμένου στο υδρογόνο συστήματος φωτοβολταϊκού – ανεμογεννήτριας»<sup>[4.13]</sup> οι M. L. Doumbia, K. Agbossou και É. Granger παρουσιάζουν ένα δυναμικό μοντέλο προσομοίωσης. Με τη χρήση του Simulink μελετούν τη συμπεριφορά των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αποθήκευση υδρογόνου (renewable energy systems with hydrogen storage – RESHS ). Το πλήρες μοντέλο του συστήματος αναπτύσσεται ενσωματώνοντας τις ατομικές μονάδες των φωτοβολταϊκών συστοιχιών, της ανεμογεννήτριας των μπαταριών, του ηλεκτρολύτη, του στοιχείου καυσίμου και των μονάδων μετασχηματιστή. Τα υπομοντέλα είναι έγκυρα για μεταβατική ανάλυση και ανάλυση σταθερής κατάστασης ως συνάρτηση της τάσης του ρεύματος, της έντασης και της θερμοκρασίας. Ένα τέτοιο μοντέλο χρήσιμο για την εύρεση των βέλτιστων διαστάσεων και για τον αποτελεσματική σχεδίαση του ελέγχου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με αποθήκευση υδρογόνου.



Εικόνα 4-5 Δομικό σχεδιάγραμμα του συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

#### 4.2.10 Δυναμική μοντελοποίηση, σχεδίαση και προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου – υπερπυκνωτή

Η εργασία «Δυναμική μοντελοποίηση, σχεδίαση και προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου – υπερπυκνωτή»<sup>[4.14]</sup> των O.C. Onar, M. Uzunoglu και M.S. Alam εστιάζει στη συνδυασμένη χρήση ανεμογεννήτριας, στοιχείου καυσίμου και συστημάτων υπερπυκνωτή για βιώσιμη παραγωγή ενέργειας. Για την εξομάλυνση της διακύμανσης της παραγόμενης ισχύος από την ανεμογεννήτρια, μπορεί να ενσωματωθεί ένα σύστημα στοιχείων καυσίμου, παράλληλα με μία συστοιχία υπερπυκνωτή. Για αυτό προτείνεται ένα δυναμικό μοντέλο, σχεδίαση και προσομοίωση ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας ανεμογεννήτριας – στοιχείου καυσίμου – υπερπυκνωτή με ελεγκτές της ροής της ισχύος. Στο προτεινόμενο μοντέλο, όταν η ταχύτητα του ανέμου είναι επαρκής, η ανεμογεννήτρια μπορεί να καλύψει το φορτίο ζήτησης και να ηλεκτροδοτεί τον ηλεκτρολύτη. Στην περίπτωση που η διάθεση αιολική ισχύς δεν μπορεί να καλύψει το φορτίο ζήτησης, το σύστημα στοιχείου καυσίμου ενεργοποιείται για να καλύψει το έλλειμμα ισχύος και το σύστημα υπερπυκνωτή μπορεί να ικανοποιήσει για μικρή διάρκεια το φορτίο ζήτησης που είναι μεγαλύτερο από τη μέγιστη διαθέσιμη ισχύ του στοιχείου καυσίμου. Επιπλέον, το σύστημα ανέχεται απότομες αλλαγές στην ταχύτητα του ανέμου και εξομαλύνει τις επιδράσεις αυτών των διακυμάνσεων χρησιμοποιώντας μία καινοτόμο τοπολογία.



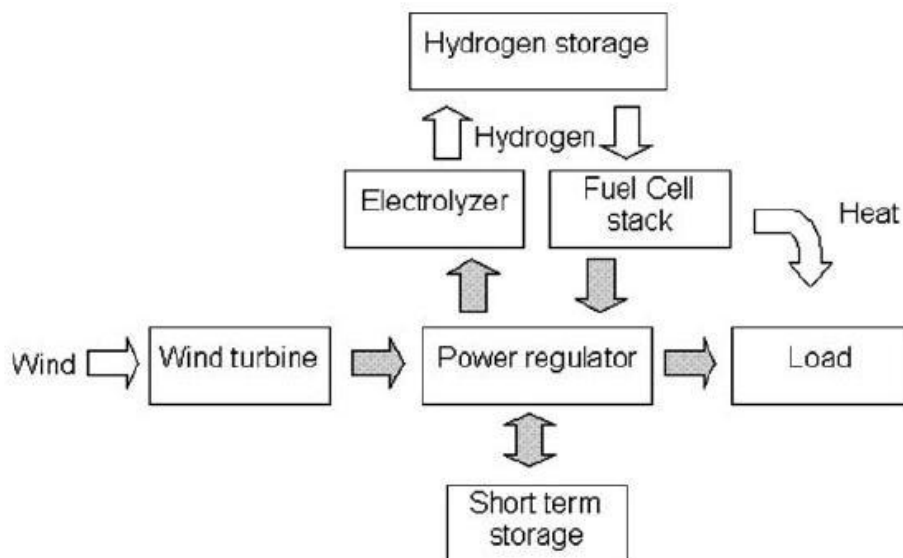
Εικόνα 4-6 Δομικό σχεδιάγραμμα του προτεινόμενου συστήματος

## 5. Μοντελοποίηση σε SIMULINK

### 5.1 Εισαγωγή

Το μοντέλο που επιλέχθηκε για αναπαραγωγή περιγράφεται από τους M.J. Khan και M.T. Iqbal.<sup>[5.1]</sup> Το μοντέλο είναι δυναμικό και προσομοιώνει ένα υβριδικό σύστημα μικρής ανεμογεννήτριας και στοιχείου καυσίμου. Το σύστημα αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια 400 W, ένα στοιχείο καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, υπερπυκνωτές (ultracapacitor), έναν ηλεκτρολύτη και έναν μετασχηματιστή ενέργειας. Η διακύμανση της εξόδου της ανεμογεννήτριας, που οφείλεται στις αλλαγές της ταχύτητας του ανέμου, μειώνεται με τη χρήση ενός συστήματος στοιχείων καυσίμου. Η ανεμογεννήτρια, συνδεδεμένη παράλληλα με το στοιχείο καυσίμου, προμηθεύει το ηλεκτρικό φορτίο. Το πλεόνασμα της αιολικής ενέργειας, όταν υπάρχει, μετατρέπεται σε υδρογόνο μέσω ενός ηλεκτρολύτη για αργότερη χρήση στο στοιχείο καυσίμου. Οι υπερπυκνωτές και η μονάδα μετασχηματιστή προτείνονται για την ελαχιστοποίηση των διακυμάνσεων της τάσης του ρεύματος και την παραγωγή τάσης AC.

Το σχηματικό διάγραμμα του συστήματος φαίνεται στην Εικ.5-1.



Εικόνα 5-1 Υβριδικό Ενεργειακό Σύστημα Ανεμογεννήτριας - Στοιχείου Καυσίμου

Το φορτίο μπορεί να προμηθευτεί από την ανεμογεννήτρια και/ή το στοιχείο καυσίμου. Αν η ανεμογεννήτρια παράγει επαρκή ισχύ, το φορτίο θα τροφοδοτείται εξολοκλήρου από αιολική ενέργεια. Στην περίπτωση χαμηλής έντασης του ανέμου, ένα ποσοστό ισχύος μπορεί να προμηθεύεται από το στοιχείο καυσίμου. Αν η παραγόμενη ενέργεια από τον άνεμο υπερβαίνει τη ζήτηση, χρησιμοποιείται για την παραγωγή υδρογόνου.

## 5.2 Περιγραφή συστήματος

Το προτεινόμενο σύστημα των 48 V αποτελείται από μία ανεμογεννήτρια Southwest Windpower AIR 403, έναν ηλεκτρολύτη ([www.stuartenergy.com](http://www.stuartenergy.com)), ένα στοιχείο καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων, έναν υπερπυκνωτή, έναν μετασχηματιστή, φορτίο εκκένωσης, έναν υπολογιστή που λειτουργεί ως ελεγκτής, και ένα σύστημα απόκτησης δεδομένων.

Ένας ενσωματωμένος ελεγκτής λειτουργεί στην ανεμογεννήτρια ώστε η μεταβλητή της ταχύτητα να εξάγει τη μέγιστη ισχύ. Η συστοιχία στοιχείων καυσίμου αποτελείται από 65 ατομικά στοιχεία καυσίμου συνδεδεμένα σε σειρά. Το ρεύμα εξόδου του στοιχείου καυσίμου μεταβάλλεται από 0 έως 25 A. Το στοιχείο καυσίμου αποδίδει τη διαφορά ρεύματος μεταξύ του ρεύματος του φορτίου και του ρεύματος εξόδου της ανεμογεννήτριας.

Οι ελεγκτές εφοδιασμού  $H_2$  και  $O_2$  του στοιχείου καυσίμου αναλαμβάνουν δράση όταν η τάση εξόδου της συστοιχίας γίνει μικρότερη από 48 V. Η δράση των ελεγκτών αντισταθμίζει την πτώση τάσης της συστοιχίας στοιχείων καυσίμου που προκαλείται από τις εναλλαγές στο ρεύμα του φορτίου.

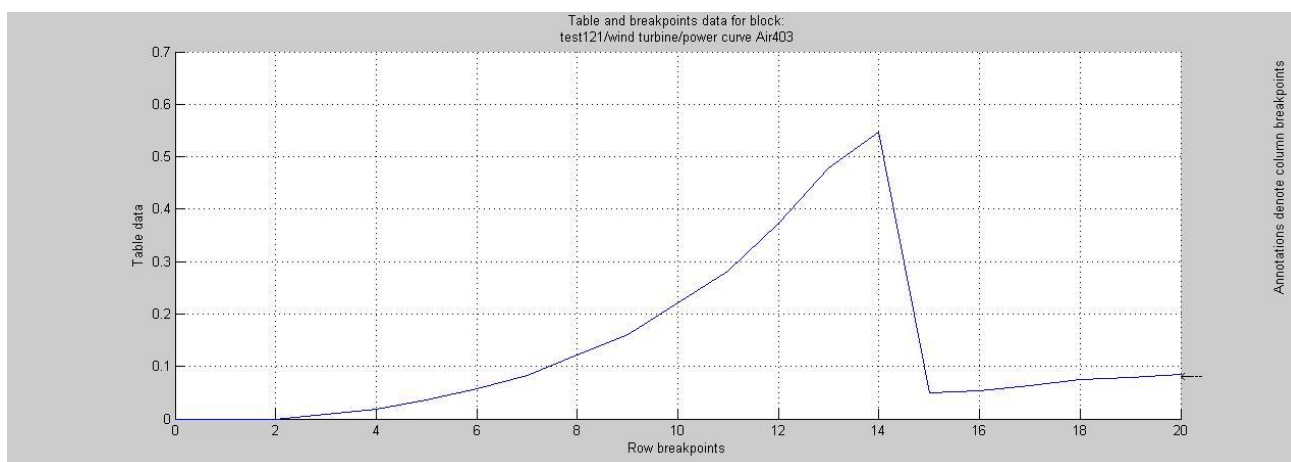
Αν η ανεμογεννήτρια παράγει περισσότερο ρεύμα από όσο απαιτείται από το φορτίο, τότε το πλεόνασμα του ρεύματος οδηγείται στον ηλεκτρολύτη. Το υδρογόνο που παράγεται αποθηκεύεται σε μία δεξαμενή για αργότερη χρήση στη συστοιχία στοιχείων καυσίμου. Το σύστημα υπερπυκνωτών χρησιμοποιείται παράλληλα με τη συστοιχία στοιχείων καυσίμου για να μειωθούν οι διακυμάνσεις της τάσης DC.

### 5.3 Μοντέλα δυναμικών συστημάτων

Τα υποσυστήματα είναι η ανεμογεννήτρια, η συστοιχία στοιχείων καυσίμου, ο ηλεκτρολύτης, το σύστημα υπερπυκνωτών, μετασχηματιστή, και ελεγκτές. Μία κλασσική μέθοδος αναπαράστασης του συστήματος με διαφορικές εξισώσεις και ελεγκτές PID με συναρτήσεις μεταφοράς χρησιμοποιείται. <sup>[5.3]</sup>

### 5.4 Μοντέλο ανεμογεννήτριας

Η διάμετρος της πτερωτής της ανεμογεννήτριας είναι 1,14 μέτρα. Αυτή η αυτορυθμιζόμενη μαγνητική γεννήτρια παράγει 400 W με ταχύτητα ανέμου 12,5 m/s. Η καμπύλη ισχύος της φαίνεται στην Εικ.5-2.



Εικόνα 5-2 Καμπύλη ισχύος AIR 403

Αυτή η μικρή ανεμογεννήτρια είναι ικανή να εξάγει μέγιστη ισχύ στην ταχύτητα των 14m/s. Πάνω από αυτή την ταχύτητα η ανεμογεννήτρια εισέρχεται σε κατάσταση αποσύνδεσης. Η δυναμική της ανεμογεννήτριας λόγω της αδράνειας της πτερωτής και της δράσης των ελεγκτών υπολογίζεται και μοντελοποιείται όπως

$$y(s)/x(s) = 0.25(s^2 + 0.7s + 0.25) \quad (1)$$

όπου η είσοδος  $x(t)$  είναι η αποκτώμενη από την καμπύλη ισχύς για μία γνωστή ταχύτητα και η έξοδος  $y(t)$  είναι η πραγματική ισχύς της ανεμογεννήτριας.

## 5.5 Μοντέλο Στοιχείου Καυσίμου

Ένα πλήθος προσεγγίσεων έχουν χρησιμοποιηθεί για τη μοντελοποίηση των στοιχείων καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων. <sup>[5.4]</sup> Ένα παραμετρικό μοντέλο στοιχείου καυσίμου μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων αναπτύχθηκε από τον Amphlett <sup>[5.5,5.6]</sup> χρησιμοποιώντας μηχανιστική προσέγγιση και μία ομάδα παραμέτρων. Το ιδανικό πρότυπο δυναμικό (Nernst potential) ενός στοιχείου καυσίμου ( $E_0$ ) είναι 1,229 V. Το πραγματικό δυναμικό  $E$  ορίζεται όπως <sup>[5.6]</sup>

$$E = 1.229 - 0.85 \times 10^{-3}(T - 298.15) + 4.3085 \times 10^{-5} \cdot T \cdot (\ln P_{H_2} + 0.5 \ln P_{O_2}) \quad (2)$$

όπου  $P$  είναι η πίεση σε atm και  $T$  είναι η θερμοκρασία σε Kelvin. Η συγκέντρωση του διαλυμένου οξυγόνου ορίζεται από το νόμο του Henry <sup>[5.5,5.6]</sup>

$$c_{O_2} = P_{O_2} / (5.08 \times 10^6 \exp(-498/T)) \quad (3)$$

Η παραμετρική ισότητα για την υπέρταση (over-voltage) δίνεται εμπειρικά <sup>[5.6]</sup>

$$n_{act} = -0.9514 + 0.00312T - 0.000187T \ln(i) + 7.4 \times 10^{-5}T \ln(c_{O_2}) \quad (4)$$

$$R_{int} = 0.01605 - 3.5 \times 10^{-5}T + 8 \times 10^{-5}i \quad (5)$$

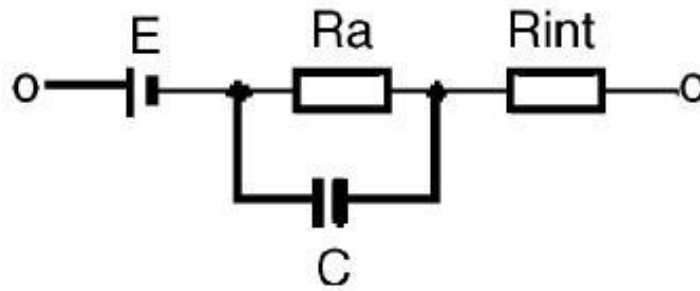
όπου  $i$  είναι το ρεύμα του στοιχείου καυσίμου και η αντίδραση ενεργοποίησης ορίζεται (το αρνητικό πρόσημο χρησιμοποιείται για να πάρουμε θετική τιμή  $R_a$ )

$$R_a = -n_{act} / i \quad (6)$$

Η τάση εξόδου ορίζεται <sup>[5.5,5.6]</sup>

$$V = E - v_{act} + n_{ohmic} \quad (7)$$

Το μοντέλο σταθερής κατάστασης που περιγράφεται από τις εξισώσεις (2)–(7) δηλώνει ότι το ρεύμα που άγεται, η θερμοκρασία του στοιχείου, η πίεση του υδρογόνου, η πίεση του οξυγόνου επηρεάζουν την τάση εξόδου του στοιχείου καυσίμου. Μία πτώση τάσης του στοιχείου καυσίμου μπορεί να εξισορροπηθεί με μία αύξηση στην πίεση του καυσίμου. Το στοιχείο καυσίμου μπορεί να μοντελοποιηθεί με την προσθήκη ενός πυκνωτή στο μοντέλο σταθερής κατάστασης <sup>[5.7]</sup>



Εικόνα 5-3 Ηλεκτρικό ισοδύναμο του στοιχείου καυσίμου

Η διαφορική εξίσωση που περιγράφει την τάση του στοιχείου καυσίμου είναι

$$dv_{act}/dt = i/C - v_{act}/R_a/C \quad (8)$$

Η ωμική απώλεια τάσης δίνεται από

$$n_{ohmic} = -iR_{int} \quad (9)$$

Το στοιχείο καυσίμου αποτελείται από 65 όμοια στοιχεία συνδεδεμένα σε σειρά

Για αυτό η ολική τάση της συστοιχίας δίνεται από

$$V_{stack} = 65V_{cell} \quad (10)$$

Η ποσότητα του υδρογόνου και του οξυγόνου που καταναλώνονται στο στοιχείο καυσίμου εξαρτάται από τους ρυθμούς ροής εισόδου και εξόδου και το ρεύμα που άγεται από το στοιχείο καυσίμου. Επίσης εξαρτάται από τον όγκο των ηλεκτροδίων. Αν ο εισερχόμενος και ο εξερχόμενος ρυθμός ροής (mol/s) είναι γνωστοί, τότε η αέρια πίεση μπορεί να καθοριστεί από την αρχή διατήρησης της ύλης.<sup>[5,8]</sup>

Για την άνοδο, ισχύει

$$\frac{V_a}{RT} \frac{dP_{H_2}}{dt} = m_{H_2 in} - (\rho_{H_2} UA)_{out} - \frac{i}{2F} \quad (11)$$

όπου  $m$  είναι ο γραμμομοριακός ρυθμός εισερχόμενης ροής,  $V_a$  είναι ο όγκος της ανόδου σε λίτρα και  $R$  είναι η παγκόσμια σταθερά των αερίων (0.0821 l atm/mol K),  $T$  η θερμοκρασία του στοιχείου καυσίμου,  $\rho$  η γραμμομοριακή πυκνότητα,  $U$  η ταχύτητα του καυσίμου,  $A$  η επιφάνεια ροής και  $F$  η σταθερά Faraday (96 500 C).

Όμοια για την κάθοδο η εξίσωση είναι

$$\frac{V_c}{RT} \frac{dP_{O_2}}{dt} = m_{O_2 in} - (\rho_{O_2} UA)_{out} - \frac{i}{4F} \quad (12)$$

όπου  $V_c$  είναι ο όγκος της καθόδου σε λίτρα. Οι όγκοι της ανόδου και της καθόδου έχουν υποτεθεί να είναι 2 λίτρα.

Το ολικό θερμικό ισοζύγιο σε μία αερόψυκτη συστοιχία στοιχείων καυσίμου μπορεί να εκφραστεί<sup>[5,9]</sup>

$$\text{Εσωτερική Παραγωγή θερμότητας} = \text{Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια} + \text{θερμικές απώλειες στο περιβάλλον} \quad (13)$$

Το ρεύμα του στοιχείου καυσίμου και η εσωτερική αντίσταση χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των απωλειών ως εξής :

$$\text{Εσωτερική Παραγωγή θερμότητας} = i^2 (R_a + R_{int}) \cdot 65 \quad (14)$$

όπου ο πολλαπλασιαστής 65 είναι ο αριθμός των στοιχείων καυσίμου εν σειρά. Η θερμική ενέργεια που αποθηκεύεται σε ένα στοιχείο καυσίμου δίνεται ως

$$\text{Αποθηκευμένη θερμική ενέργεια} = C_i \cdot dT / dt \quad (15)$$

όπου  $C_i$  είναι η θερμική χωρητικότητα του στοιχείου καυσίμου (περίπου 10000 J/ °C και  $T$  η θερμοκρασία του.

$$\text{θερμικές απώλειες στο περιβάλλον} = (T - T_a) / R_t \quad (16)$$

Αντικαθιστώντας τις εξισώσεις (14)–(16) στην εξίσωση (13) και κάνοντας πράξεις καταλήγουμε

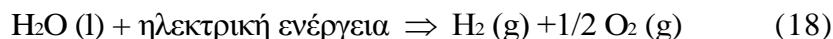
$$dT / dt = i^2 (R_a + R_{int}) \cdot 65 / C_i - (T - T_a) / R_t / C_i \quad (17)$$

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος έχει υποτεθεί στους 25 °C και  $R_t$  0,04 °C/ W. Οι εξισώσεις (2)–(17) περιγράφουν τη δυναμική συμπεριφορά . Αγνοήθηκε η δυναμική συμπεριφοράς των βοηθητικών συστημάτων, συμπεριλαμβανομένου του συμπιεστή, της δεξαμενής αποθήκευσης, των βαλβίδων κτλ.



## 5.6 Μοντέλο ηλεκτρολύτη

Η αποσύνθεση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο μπορεί να επιτευχθεί με τη δίοδο ηλεκτρικού ρεύματος μεταξύ δύο ηλεκτροδίων που διαχωρίζονται από υδατικό ηλεκτρολύτη<sup>[5.10]</sup> Η αντίδραση είναι



Ένας ηλεκτρολύτης ύδατος αποτελείται από αρκετά στοιχεία ηλεκτρολύτη συνδεδεμένα σε σειρά. Η συνάρτηση έντασης προς τάση είναι μη γραμμική εξαρτάται από τη θερμοκρασία λειτουργίας.<sup>[5.11]</sup> Σύμφωνα με το νόμο του Faraday ο ρυθμός παραγωγής του υδρογόνου σε ένα ηλεκτρολυτικό στοιχείο είναι άμεσα ανάλογο με το ρυθμό μεταφοράς ηλεκτρονίων στα ηλεκτρόδια, που με τη σειρά του είναι ισοδύναμο του ρεύματος στο κύκλωμα.

$$n_{\text{H}_2} = n_F n_c i_e / 2 / F \text{ (mol/s)} \quad (19)$$

όπου  $i_e$  είναι το ρεύμα του ηλεκτρολύτη,  $n_c$  ο αριθμός των ηλεκτρολυτικών στοιχείων σε σειρά, και  $n_F$  είναι η απόδοση Faraday. Η απόδοση Faraday είναι ο λόγος του πραγματικού προς το θεωρητικό μέγιστο του παραγόμενου υδρογόνου.

Υποθέτοντας ότι η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 40 °C<sup>[5.11]</sup>, η απόδοση Faraday δίνεται

$$n_F = 96.5 \exp(0.09/i_e - 75.5/i_e^2) \quad (20)$$

Οι δύο παραπάνω εξισώσεις περιγράφουν ένα απλό μοντέλο ηλεκτρολύτη με την υπόθεση ότι ο ηλεκτρολύτης έχει ένα ανεξάρτητο σύστημα ψύξης για να διατηρεί τη θερμοκρασία του στους 40 °C.

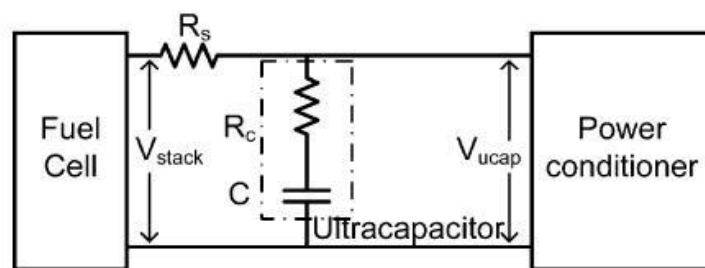
## 5.7 Μοντέλο Ελεγκτή ισχύος

Το πλεόνασμα της αιολικής ενέργειας, όταν υπάρχει, μετατρέπεται σε υδρογόνο μέσω ενός ηλεκτρολύτη για αργότερη χρήση στο στοιχείο καυσίμου.

## 5.8 Μοντέλο Υπερπυκνωτή

Ένας υπερπυκνωτής είναι μία συσκευή αποθήκευσης ενέργειας με μία κατασκευή παρόμοια με μίας μπαταρίας. Έχει δύο ηλεκτρόδια μέσα σε ένα ηλεκτρολύτη. Η επιφάνεια των ηλεκτροδίων είναι πολύ μεγαλύτερη από την επιφάνεια των ηλεκτροδίων των μπαταριών. Οι υπερπυκνωτές χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές ισχύος που απαιτούν μικρής διάρκειας αιχμή ισχύος.<sup>[5.12]</sup> Επίσης έχει προταθεί η χρήση υπερπυκνωτών σε αυτοκίνητα στοιχείου καυσίμου.<sup>[5.13]</sup> Οι υπερπυκνωτές είναι συσκευές χαμηλής τάσης. Η συνηθισμένη τάση τους είναι 2,5 V. Η χωρητικότητα των υπερπυκνωτών ποικίλει από 10 ως 2700 F. Συστοιχίες υπερπυκνωτών με τάση των 42 V είναι διαθέσιμες.

Για το υβριδικό σύστημα, επιλέχθηκε το στοιχείο υπερπυκνωτή Maxwell 435 F, 14 V. Τέσσερα τέτοια στοιχεία χρειάστηκαν να συνδεθούν σε σειρά για να επιτευχθεί η λειτουργική τάση της εξόδου του στοιχείου καυσίμου. Το επιλεγμένο στοιχείο υπερπυκνωτή έχει αντίσταση 4 mΩ και ρεύμα διαφυγής 10 mA. Για λόγους απλούστευσης, το ρεύμα διαφυγής θεωρήθηκε σταθερό. Το ρεύμα που άγεται από το σύστημα ψύξης του υπερπυκνωτή αγνοήθηκε. Ο υπερπυκνωτής μπορεί να μοντελοποιηθεί με ένα πυκνωτή σε σειρά με μία αντίσταση. Τέσσερα στοιχεία υπερπυκνωτών σε σειρά έχουν συνολική χωρητικότητα 108,75 F και αντίσταση 16 mΩ. Συνδέονται παράλληλα με το στοιχείο καυσίμου για να μειώσουν τη διακύμανση στην τάση λόγω των ξαφνικών αλλαγών φορτίου (Εικ. 5-8).



Εικόνα 5-4 Υπερπυκνωτής συνδεδεμένος παράλληλα με στοιχείο καυσίμου.

Ο υπερπυκνωτής μοντελοποιείται ως ένα χαμηλοπερατό φίλτρο με συνάρτηση μεταφοράς

$$\frac{V_{ucap}}{V_{stack}} = \frac{s + 1/R_c C}{s(1 + R_s/R_c) + 1/R_c C} \quad (21)$$

με χωρητικότητα  $C = 108,75 \text{ } \mu\text{F}$ , αντίσταση  $R_c = 4 \text{ m}\Omega$  και αντίσταση σκέδασης ( stray resistance )  $R_s = 0,01 \text{ } \Omega$ .

## 5.9 Μοντέλο μετασχηματιστή

Το υβριδικό σύστημα ενέργειας θεωρείται να έχει ανεξάρτητη λειτουργία και ένα στοιχείο μετασχηματιστή να ρυθμίζει την τάση εξόδου σε σταθερό πλάτος και συχνότητα. Το πρώτο στάδιο αποτελείται από έναν επωθητικό μετατροπέα (boost converter) , το οποίο μετατρέπει τη μεταβλητή έξοδο DC του στοιχείου καυσίμου (παράλληλα με τη συστοιχία των υπερπυκνωτών) σε σταθερή υψηλή τάση DC. Ο επωθητικός μετατροπέας ελέγχεται από ένα ελεγκτή PID να ρυθμίζει την τάση στα 200 V. Αυτό επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση του λόγου φορτίου D, σύμφωνα με την εξίσωση

$$\frac{V_{boost}}{V_{ucap}} = \frac{1}{1-D} \quad (22)$$

Αφού το προτεινόμενο σχήμα είναι ένα αυτόνομο σύστημα, ένας εναλλάκτης σε κατάσταση ελέγχου τάσης , αντίθετα με τις σύγχρονες μεθόδους ελέγχου. Ένας εναλλάκτης μονής φάσης τάσης πηγής διαμορφωμένου παλμού πλάτους (PWM single-phase Voltage Inverter) λειτουργεί μέσω ενός ελεγκτή PID που προσαρμόζει το λόγο φορτίου D ώστε να πετυχαίνει έξοδο 120 V, 60 Hz. Η συχνότητα του τριγωνικού φέροντος κύματος θεωρείται 8 kHz.

## 5.10 Ελεγκτές

Ελεγκτές PID χρησιμοποιούνται στο στοιχείο καυσίμου, τον επωθητικό μετατροπέα και τον εναλλάκτη. Η γενική συνάρτηση μεταφοράς ενός ελεγκτή PID γράφεται<sup>[5.3]</sup>

$$G_r(s) = K_p(s + T_d s^2 + 1/T_i)/s \quad (23)$$

Ο ελεγκτής ροής στοιχείου καυσίμου ελέγχει την τάση του στοιχείου καυσίμου μεταβάλλοντας τους ρυθμούς ροής του υδρογόνου και του οξυγόνου. Κάθε ελεγκτής ενεργοποιείται όταν η τάση του στοιχείου καυσίμου πέσει κάτω από 48 V. Περιοριστές χρησιμοποιούνται στην έξοδο κάθε ελεγκτή για να περιορίσουν την πίεση του αερίου στο στοιχείο καυσίμου.

Η μέθοδος ανοικτού βρόχου Ziegler–Nichols χρησιμοποιείται για να καθοριστούν οι παράμετροι ενός ελεγκτή PID.<sup>[5.3]</sup>

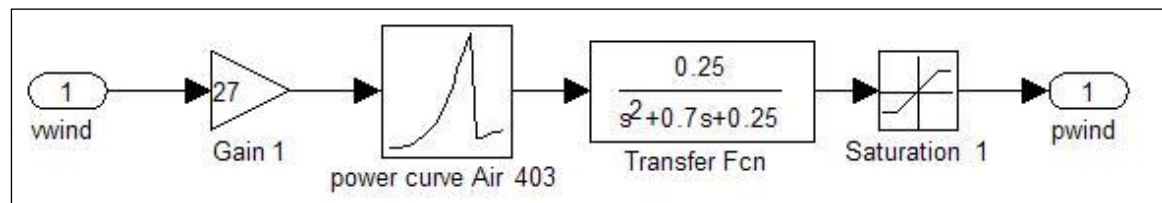
	Fuel cell flow controller		Boost converter	Inverter
	O <sub>2</sub> flow	H <sub>2</sub> flow		
$K_p$	2.17	5.00	5.00	0.05
$T_i$	0.50	0.50	2.00	0.015
$T_d$	0	0	0	0

Πίνακας 5-5 Παράμετροι ελεγκτών

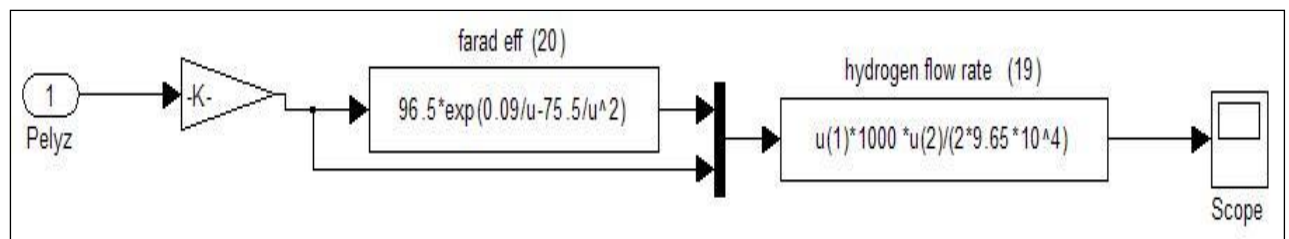
## 5.11 Προσομοίωση

Το μαθηματικό μοντέλο του συστήματος προσομοιώνεται στο SIMULINK του MATLAB. Αποτελείται από επτά κύρια υποσυστήματα: την ανεμογεννήτρια, το στοιχείο καυσίμου, τον ελεγκτή ροής, τον ελεγκτή ισχύος, τον ηλεκτρολύτη, τη συστοιχία υπερπυκνωτών και τη μονάδα μετασχηματιστή. Κάθε υποσύστημα περιέχει διαφορετικά στοιχεία ώστε να αναπαρασταθούν τα αντίστοιχα μαθηματικά μοντέλα

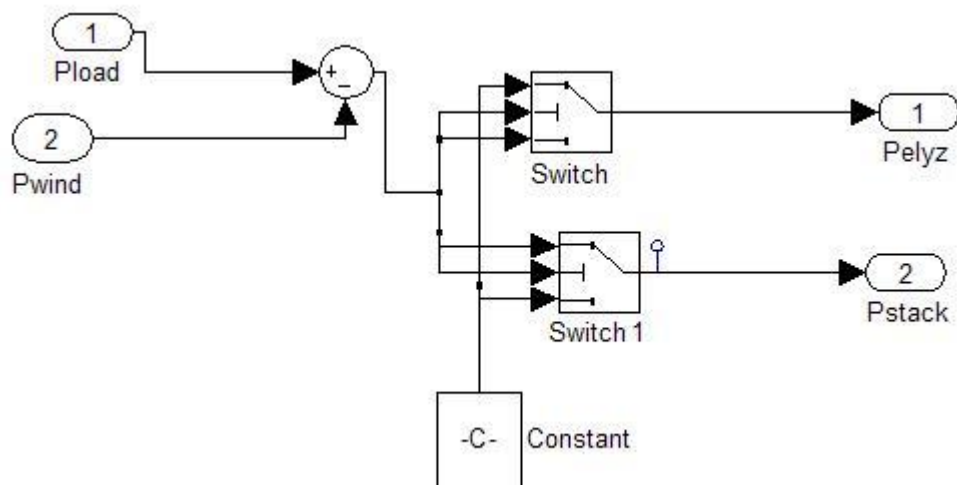
Ακολούθως παρουσιάζεται η υλοποίηση του υβριδικού συστήματος και των υποσυστημάτων στο SIMULINK.



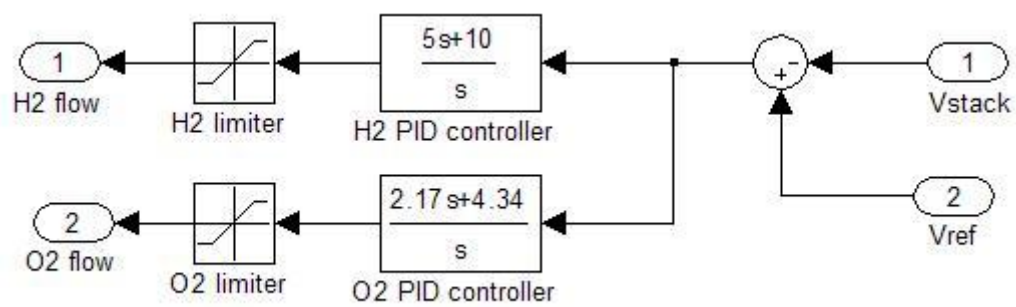
Εικόνα 5-6 Υποσύστημα Ανεμογεννήτριας



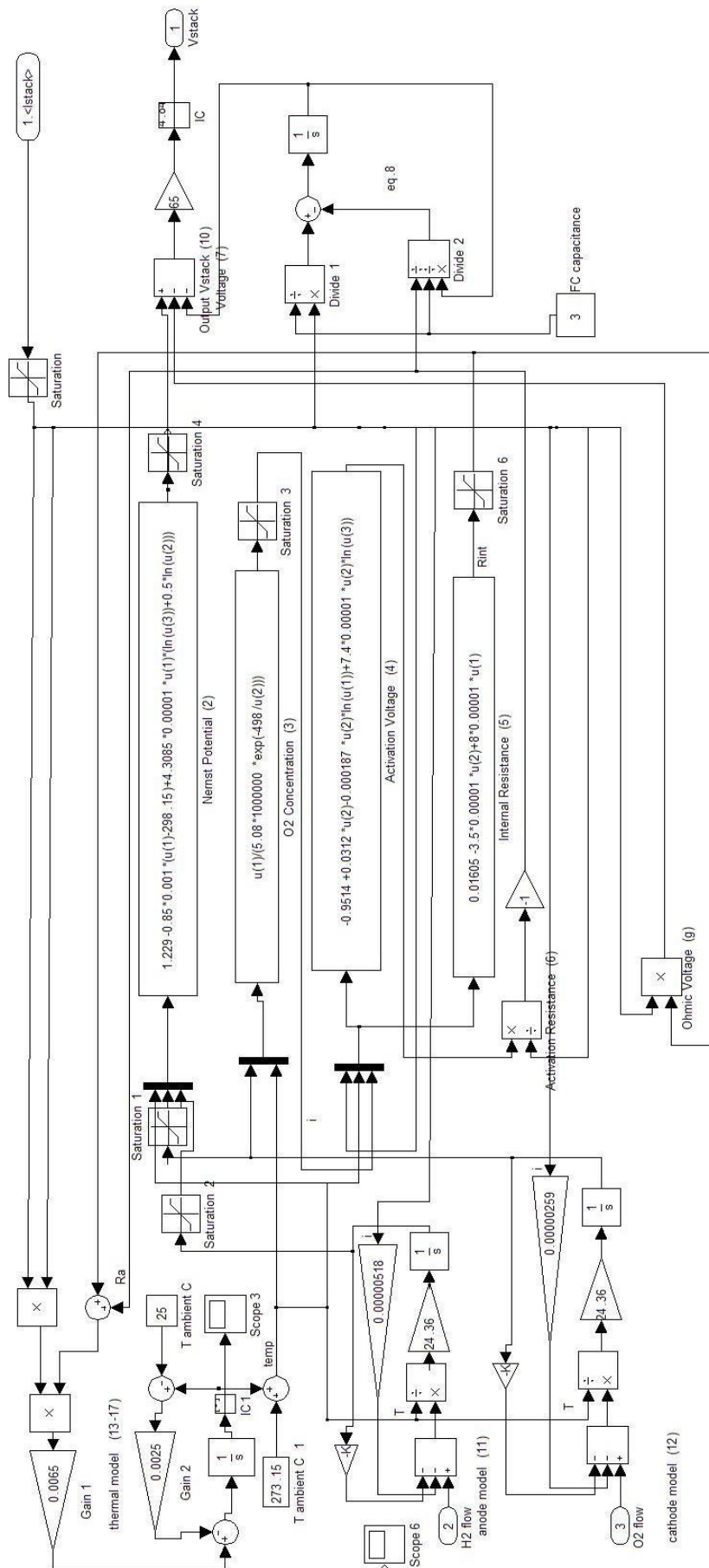
Εικόνα 5-7 Υποσύστημα Ηλεκτρολύτη



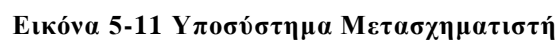
Εικόνα 5-8 Υποσύστημα Ελεγκτή ισχύος



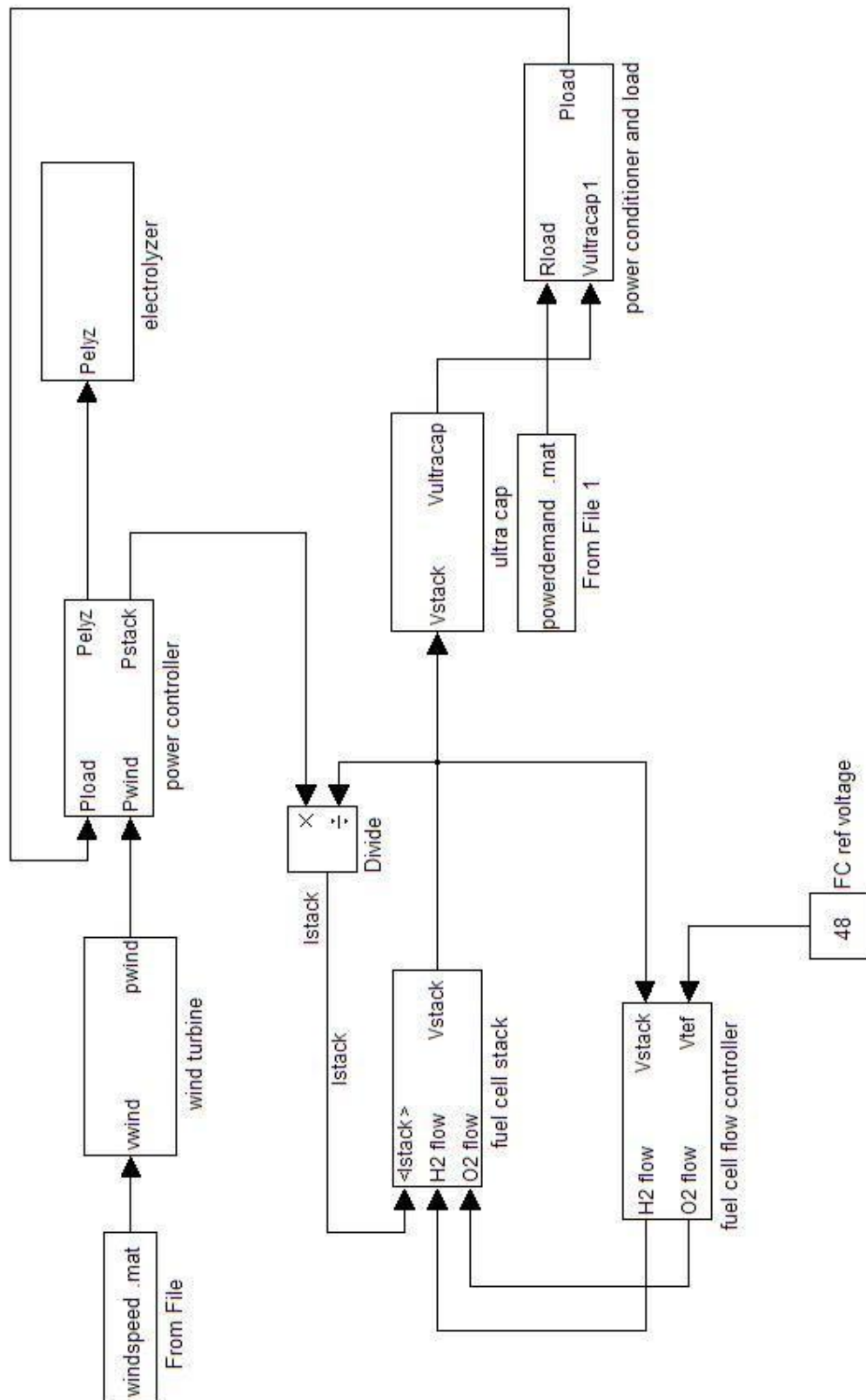
**Εικόνα 5-9 Ελεγκτής ροής Στοιχείου Καυσίμου**



Εικόνα 5-10 Υποσύστημα Στοιχείου Καυσίμου







Εικόνα 5-12 Σύστημα ανεμογεννήτριας - Στοιχείου Καυσίμου στο SIMULINK

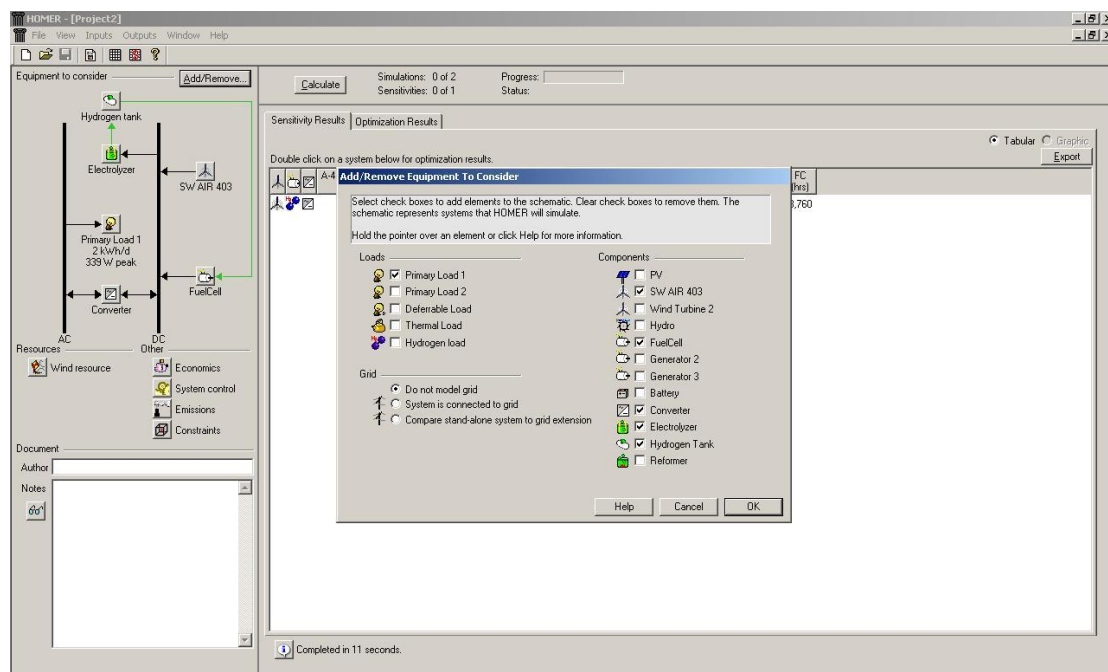
## 6. Μοντελοποίηση σε HOMER

### 6.1 Περιγραφή συστήματος

Το μοντέλο HOMER επιτρέπει στο χρήστη να επιλέξει μία αρχιτεκτονική συστήματος που αποτελείται από συγκεκριμένα υποσυστήματα και συνθήκες λειτουργίας, συμπεριλαμβανομένου πηγών ενέργειας, αποθήκευσης και φορτίου. Συμπεριλαμβάνει συμβατικά και ανανεώσιμα ενεργειακά συστήματα, όπως επίσης και συστήματα υδρογόνου. Αξιολογεί την τεχνική και οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος, που είναι ορισμένο από το χρήστη, επιτρέποντας διαφοροποιήσεις στα τεχνικά κόστη και στη διαθεσιμότητα των πηγών.

Ένα απλοποιημένο μοντέλο ( σε σχέση με το μοντέλο των Iqbal και Khan) εισάγεται στο Homer. Εισάγονται το ζητούμενο φορτίο και οι μονάδες της ανεμογεννήτριας, του στοιχείου καυσίμου, του ηλεκτρολύτη, η αποθηκευτική μονάδα και το σύστημα μετασχηματιστή. Το υποσύστημα του μετασχηματιστή είναι απλοποιημένο σε σχέση με το αντίστοιχο υποσύστημα των Iqbal και Khan που αποτελείται από έναν επωθητικό μετατροπέα (boost converter) και έναν εναλλάκτη μονής φάσης τάσης πηγής διαμορφωμένου παλμού πλάτους (PWM single-phase Voltage Inverter).

Το υπό μελέτη σύστημα βρίσκεται εφαρμογή σε απομονωμένη τοποθεσία, είναι αυτόνομο και κατά συνέπεια δε συνδέεται στο δίκτυο.

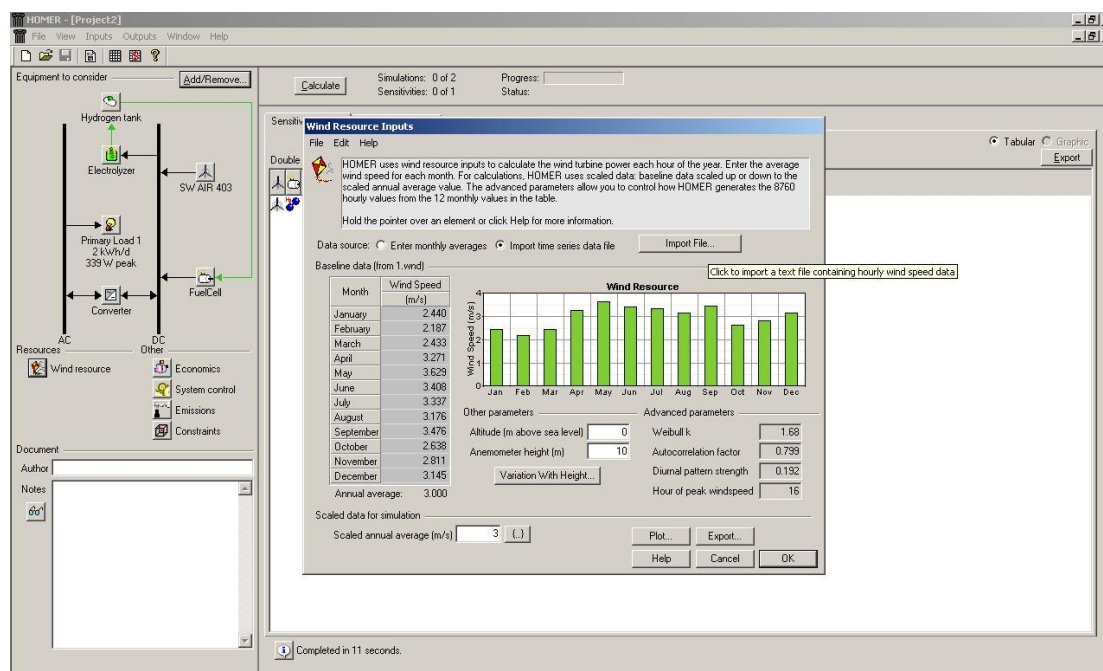


Εικόνα 6-1 Οθόνη εισαγωγής στοιχείων και φορτίων

## 6.2 Αιολικά δεδομένα

Στο μοντέλο Homer εισάγεται η χρονοσειρά των μετρήσεων της ταχύτητας του ανέμου κατά τη διάρκεια ενός έτους (8760 μετρήσεις).

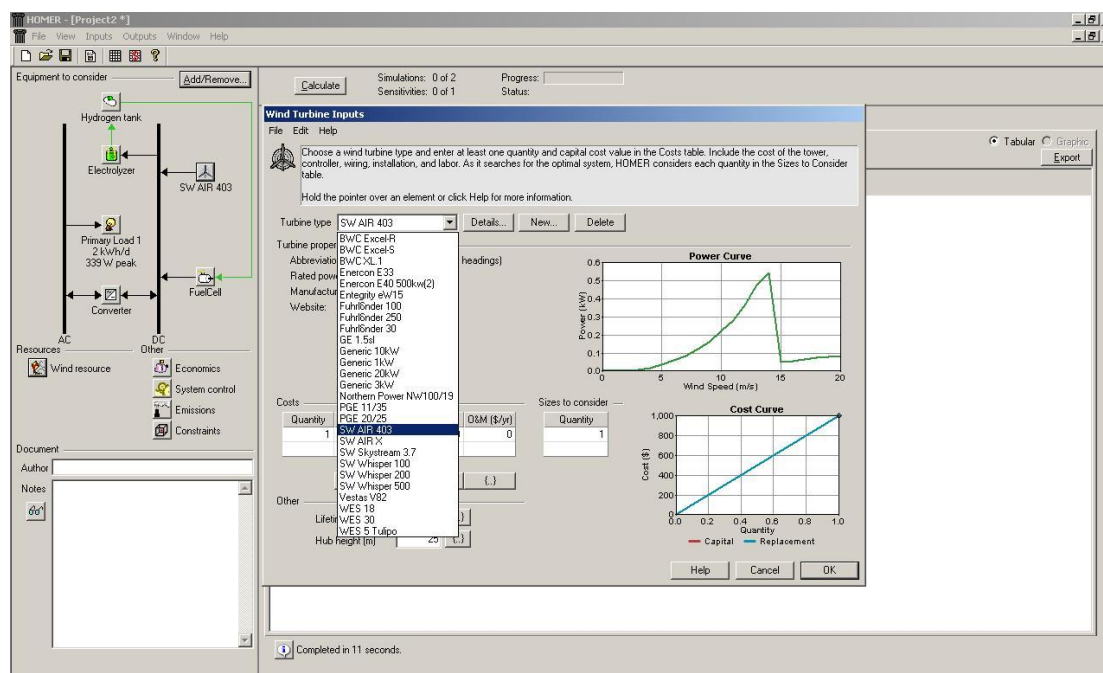
Εναλλακτικά σε περίπτωση έλλειψης ακριβών δεδομένων, θα μπορούσαν να εισηχθούν οι μέσες μηνιαίες τιμές της ταχύτητας του ανέμου και παράμετροι, όπως η μεταβλητή Weibull και ο παράγοντας αυτοσυσχέτισης. Αυτή η παραμετροποίηση επιτρέπει έναν ακριβέστερο έλεγχο της γεννήτριας παραγωγής ωριαίων δεδομένων του Homer



Εικόνα 6-2 Οθόνη εισαγωγής της χρονοσειράς των αιολικών δεδομένων

### 6.3 Μονάδα ανεμογεννήτριας

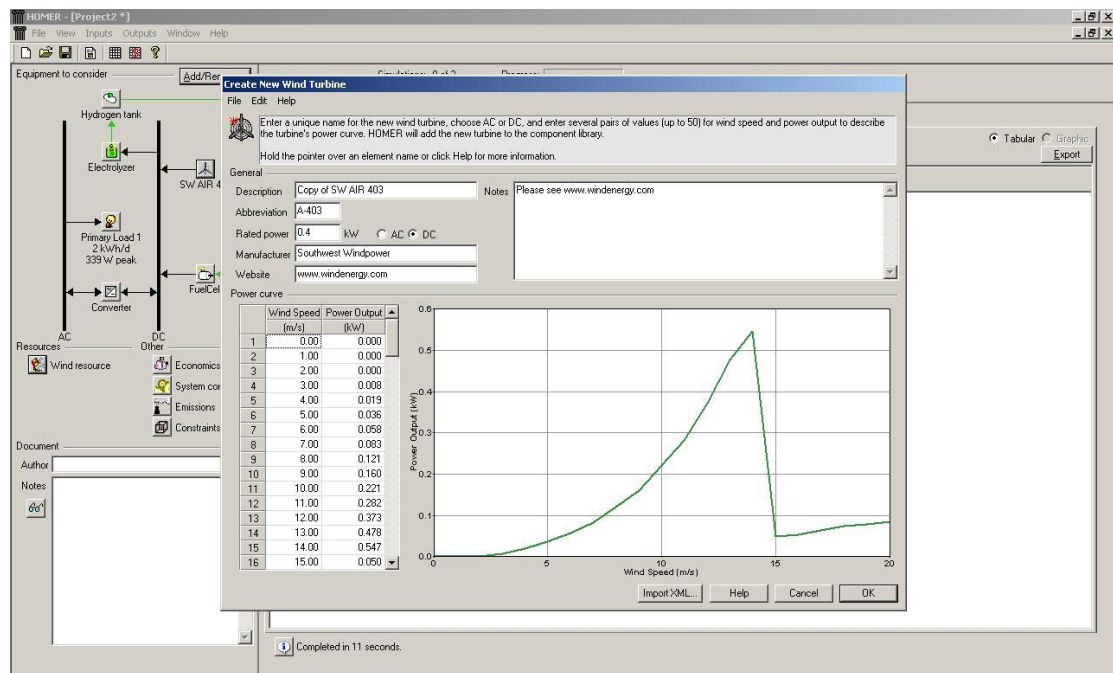
Οι διαθέσιμες ανεμογεννήτριες είναι οι BWC Excel-R, BWC Excel-S, BWC XL 1, Enercon E33, Enercon E40 500kw, Entegriety eW15, Fuhrlander 100, Fuhrlander 250, Fuhrlander 30, GE 1.5sl, Generic 1KW, Generic 3KW, Generic 10KW, Generic 20KW, Northern Power NW100/19, PGE 11/35, PGE 20/25, SW Air X, SW Skystream 3.7, SW Whisper 100, SW Whisper 200, SW Whisper 500, Vestas V82, WES 18, WES 30 και WES 5 Tulipo.



Εικόνα 6-3 Διαθέσιμες Ανεμογεννήτριες στο Homer

Η ανεμογεννήτρια SW Air 403 δε συμπεριλαμβάνεται στις διαθέσιμες ανεμογεννήτριες. Έτσι εισάγεται στο Homer η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας, η ονομαστική της ισχύ, ο τύπος της ( AC/DC ) και άλλα χαρακτηριστικά της.

Επιπλέον το κόστος αγοράς της προσεγγίζεται στα χίλια δολάρια.<sup>[6.1]</sup>

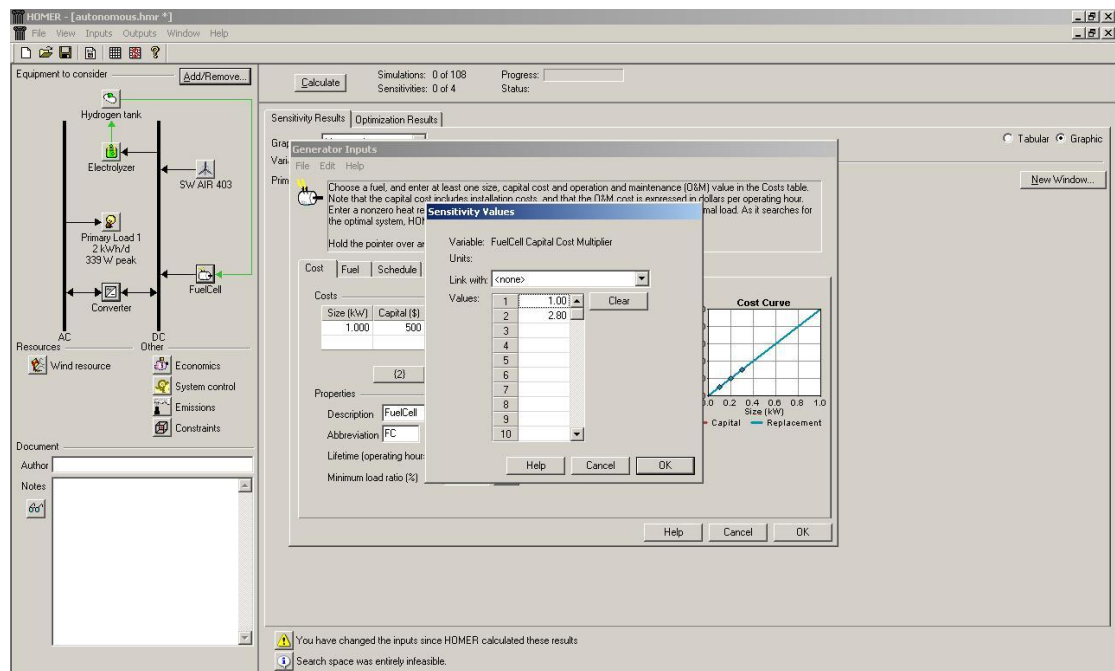


Εικόνα 6-4 Εισαγωγή χαρακτηριστικών ανεμογεννήτριας

## 6.4 Μονάδα στοιχείου καυσίμου

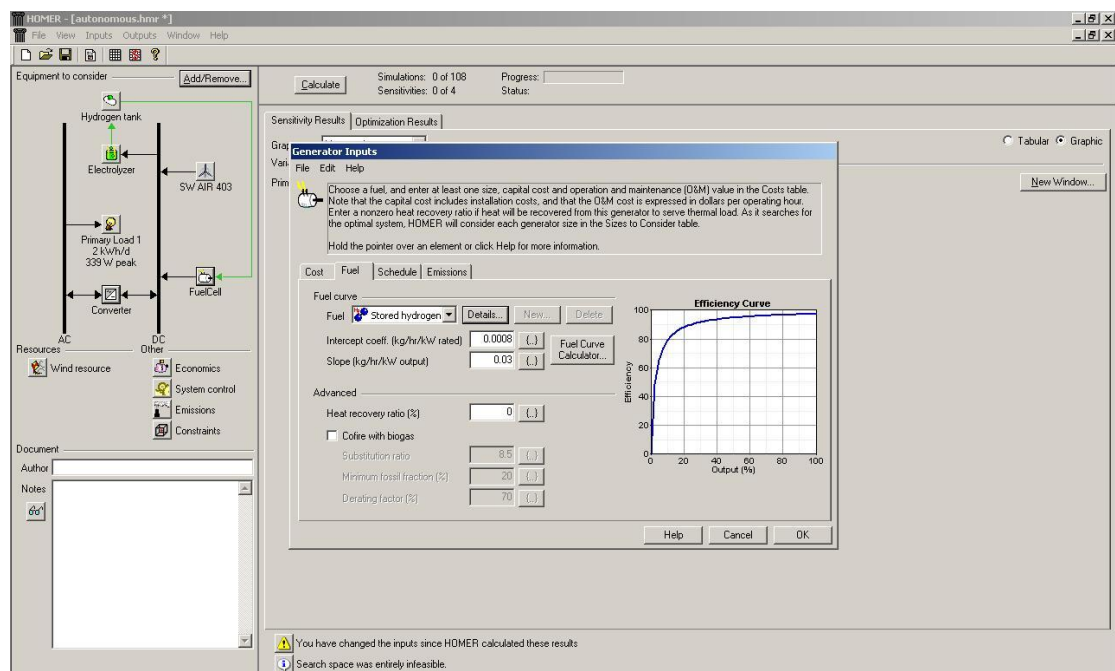
Τα συστήματα στοιχείων καυσίμου πιστεύεται ότι θα φτάσουν την τιμή αρχικού κόστους της τάξης των \$1,400/kW βραχυπρόθεσμα, τουλάχιστον για μικρές οικιακές μονάδες, των οποίων το κόστος προσδοκάται να φτάσει το επίπεδο των \$500/kW μέσα στα επόμενα πέντε χρόνια. Παρόμοια το κόστος παραγωγής αναμένεται να υποχωρήσει στο επίπεδο του \$0.1/kWh.<sup>[6.2]</sup>

Στη μονάδα στοιχείου καυσίμου εισάγονται τιμές του κόστους. Οι διαφορετικές τιμές ( των \$500/kW και \$1,400/kW ) εισάγονται ως διαφορετικά βάρη στη λίστα ευαισθησίας της μονάδας του στοιχείου καυσίμου.



Εικόνα 6-5 Οθόνη εισαγωγής των δεδομένων κόστους του στοιχείου καυσίμου

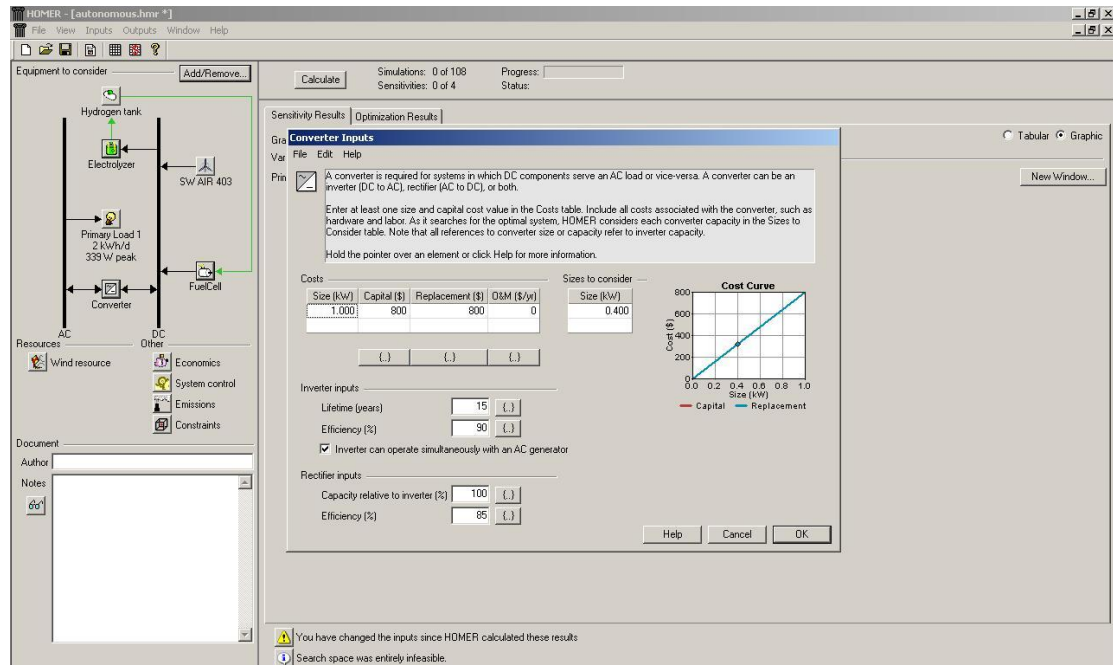
Για τον υπολογισμό των παραμέτρων (slope και intercept coefficient) της καμπύλης απόδοσης χρησιμοποιείται η ενεργειακή πυκνότητα του υδρογόνου (33,3 kwh/kg).



Εικόνα 6-6 Οθόνη εισαγωγής παραμέτρων της καμπύλης απόδοσης.

## 6.5 Μονάδα μετασχηματιστή

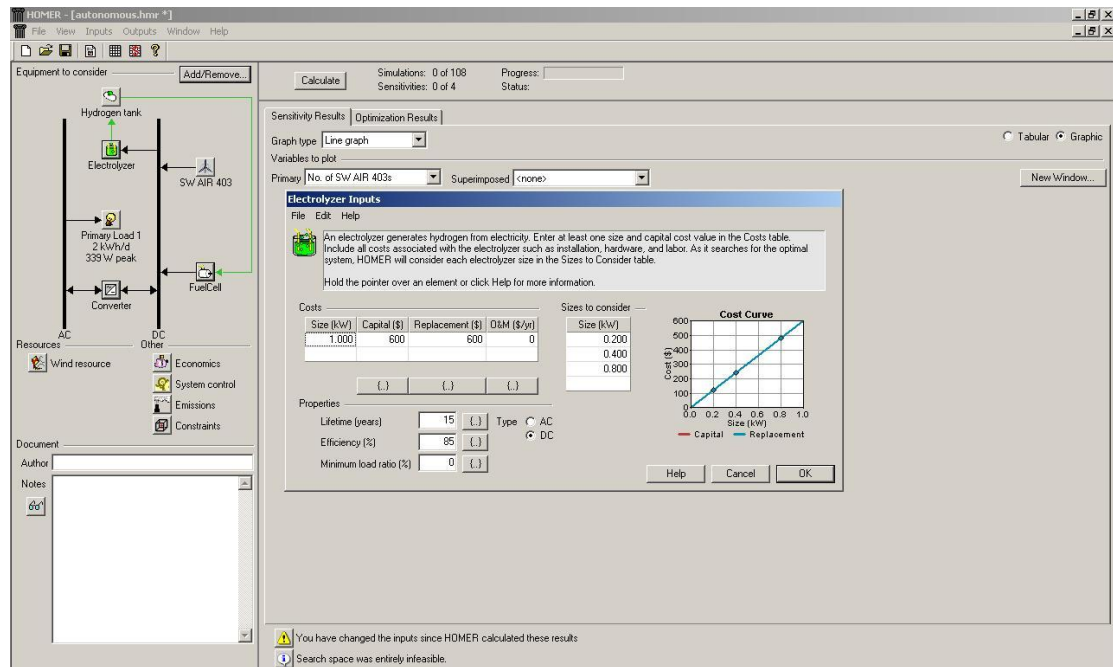
Για τη μονάδα του μετασχηματιστή χρησιμοποιείται η εκτίμηση των Khan και Iqbal των \$ 800 / KW <sup>[6.3]</sup>. Τα έξοδα λειτουργίας και διαχείρισης (O & M) αγνοούνται.



Εικόνα 6-7 Οθόνη εισαγωγής δεδομένων μετασχηματιστή

## 6.6 Μονάδα ηλεκτρολύτη

Η πρόβλεψη του εθνικού εργαστηρίου για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας ( National Renewable Energy Laboratory –NREL ) για το κόστος του ηλεκτρολύτη μέχρι το έτος 2010 είναι \$ 600 / KW. <sup>[6.4]</sup> Τα έξοδα λειτουργίας και διαχείρισης ( O & M) αγνοούνται.



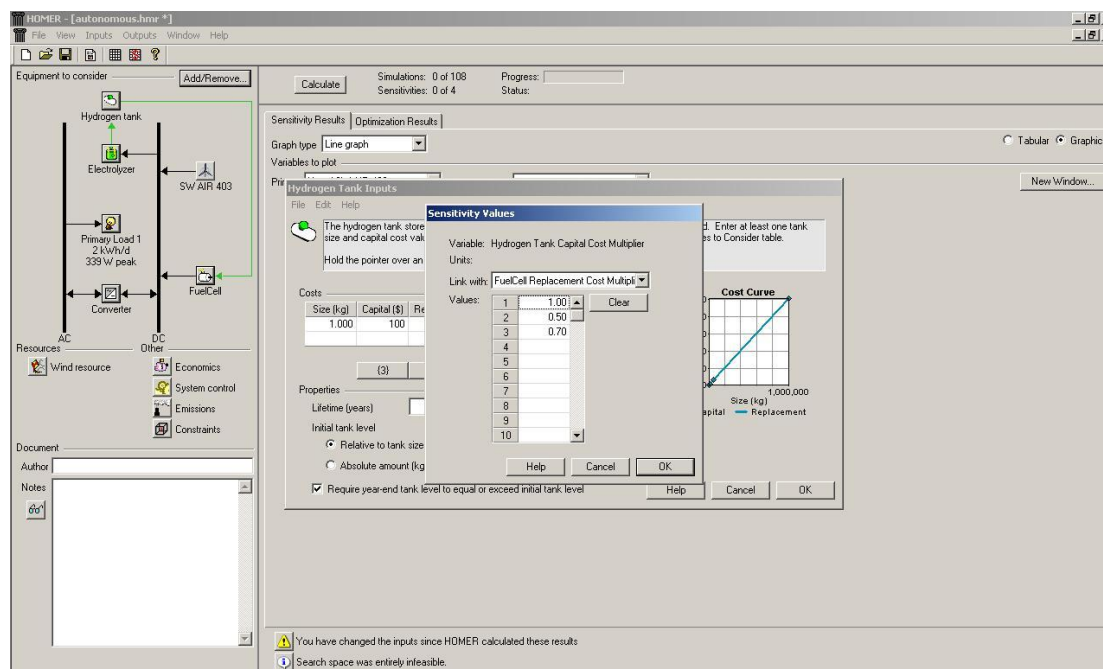
Εικόνα 6-8 Οθόνη εισαγωγής δεδομένων του ηλεκτρολύτη



## 6.7 Μονάδα αποθήκευσης υδρογόνου

Για την προσομοίωση του μοντέλου εκτιμάται το κόστος αποθήκευσης του υδρογόνου \$50 - \$100 ανά κιλό. <sup>[6.5]</sup>

Στη μονάδα στοιχείου καυσίμου εισάγονται τιμές του κόστους. Οι διαφορετικές τιμές (\$50/kg, \$70/kg και \$100/kg ) εισάγονται ως διαφορετικά βάρη στη λίστα ευαισθησίας της μονάδας του στοιχείου καυσίμου. Τα έξοδα λειτουργίας και διαχείρισης ( O & M) αγνοούνται.

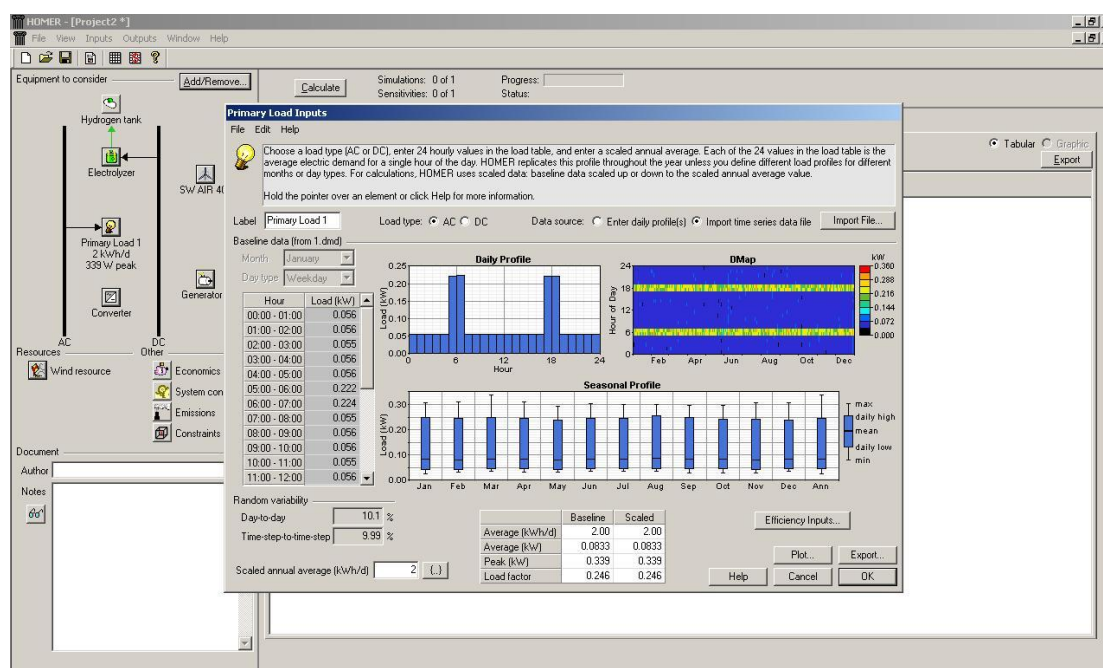


Εικόνα 6-9 Οθόνη εισαγωγής δεδομένων του αποθηκευτικού μέσου.

## 6.8 Φορτίο ζήτησης

Για την προσέγγιση του φορτίου ζήτησης μίας απομακρυσμένης περιοχής χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα φορτία της Κρήτης για το έτος 2004, τα οποία κλιμακοποιήθηκαν στις ανάγκες του προβλήματός μας.

Από την ωριαία χρονοσειρά της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος παρατηρείται αυξημένη ζήτηση για δύο πρωινές και δύο απογευματινές ώρες της τάξης του 0,25 έως 0,3 kW. Η χρονοσειρά της ωριαίας ζήτησης εισάγεται στο μοντέλο. Υπολογίζονται κάποιοι παράμετροι της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος από το μοντέλο HOMER.



Εικόνα 6-10 Οθόνη εισαγωγής δεδομένων της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος.

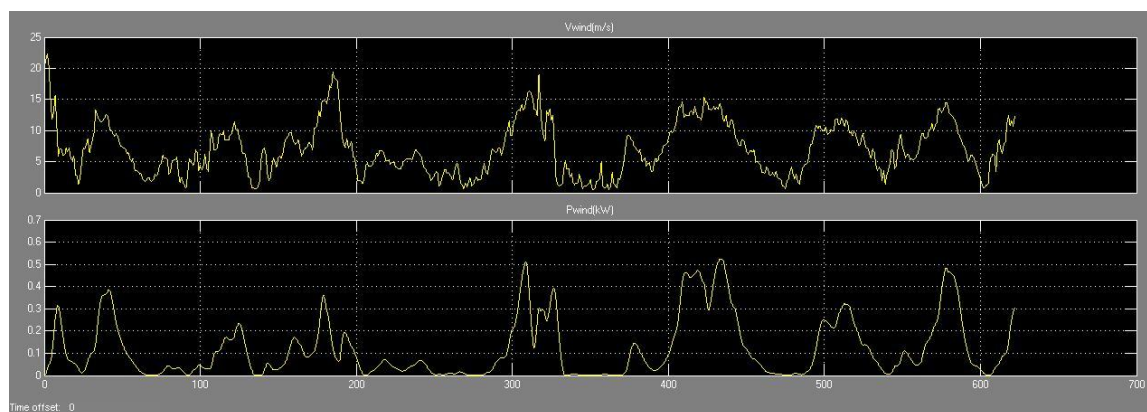
## 7. Αποτελέσματα

### 7.1 Προσομοίωση στο Simulink

Οι είσοδοι του συστήματος είναι οι χρονοσειρές της ωριαίας ταχύτητας του ανέμου και της ωριαίας ενεργειακής ζήτησης. Χρησιμοποιήθηκαν ωριαίες μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου από την περιοχή της Σητείας και η χρονοσειρά της ηλεκτρικής ζήτησης της Κρήτης κλιμακοποιήθηκε στη μονάδα και προσαρμόστηκε για τα δεδομένα του προβλήματος μας.

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται και αναλύονται. Οι ωριαίες αλλαγές της διαθέσιμης αιολικής ισχύος και της ζήτησης μεταβάλλουν και τις υπόλοιπες παραμέτρους του συστήματος.

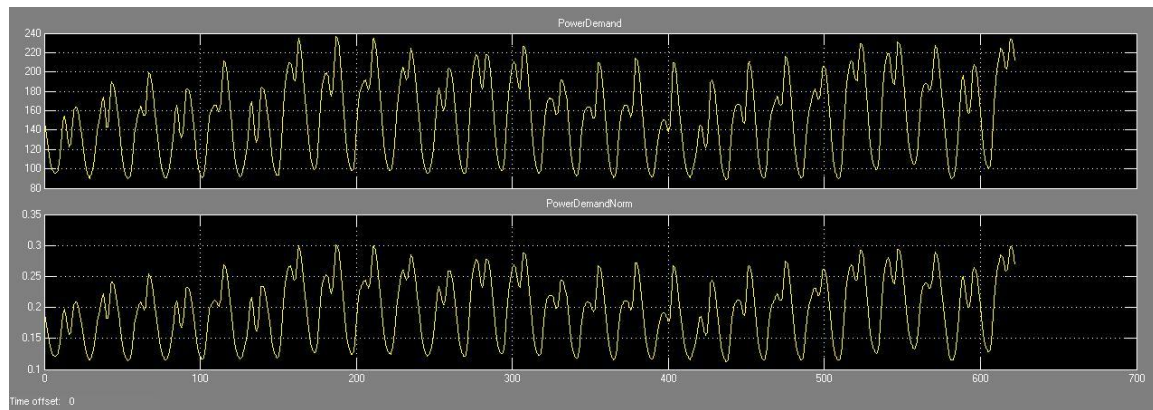
Η αιολική ισχύς παράγεται από το υποσύστημα της ανεμογεννήτριας. Παρατηρείται ότι για ταχύτητες του ανέμου μεγαλύτερες από 15 m/s η παραγόμενη αιολική ισχύς είναι της τάξης του 0.5 kW. Στην εικόνα 7-1 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα της ταχύτητας του ανέμου και της παραγόμενης αιολικής ισχύος.



Εικόνα 7-1 Σχεδιάγραμμα ωριαίας ταχύτητας ανέμου και παραγόμενης αιολικής ισχύος

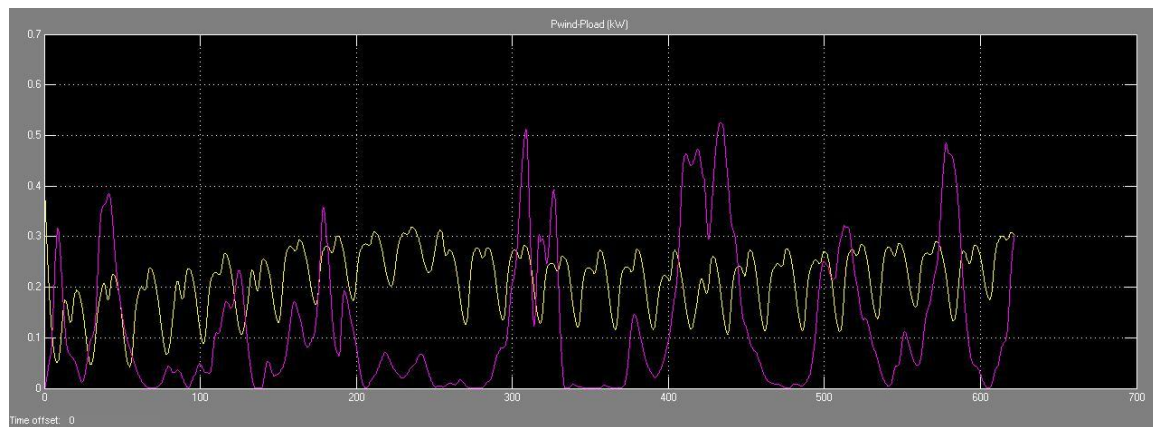
Για την προσέγγιση του φορτίου ζήτησης μίας απομακρυσμένης περιοχής χρησιμοποιήθηκαν ως δεδομένα τα φορτία της Κρήτης για το έτος 2004, τα οποία κλιμακοποιήθηκαν στις ανάγκες του προβλήματός μας.

Από την ωριαία χρονοσειρά της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος παρατηρείται αυξημένη ζήτηση για δύο πρωινές και δύο απογευματινές ώρες της τάξης του 0,25 έως 0,3 kW. Στην εικόνα 7-2 παρουσιάζεται η αρχική χρονοσειρά του φορτίου ζήτησης και η κανονικοποιημένη στα δεδομένα της εφαρμογής μας.



**Εικόνα 7-2 Ρύθμιση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος**

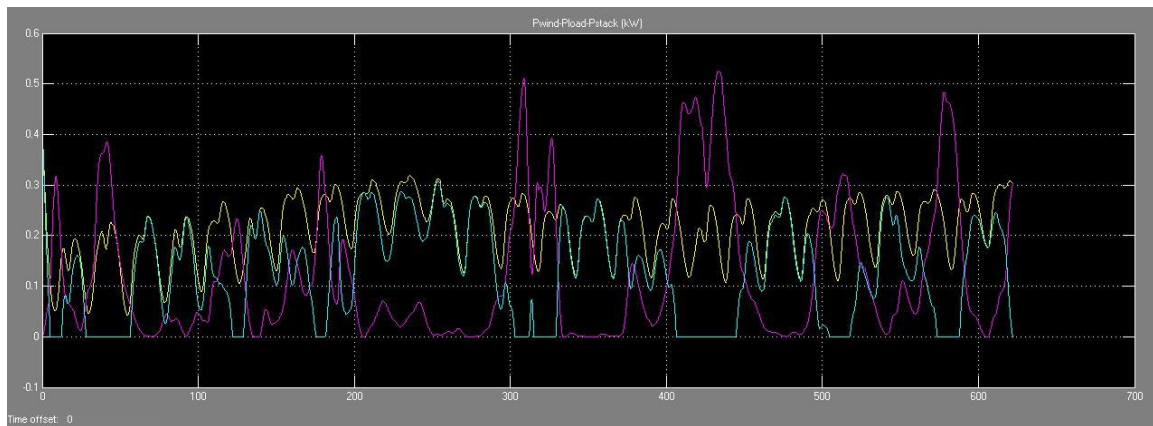
Στην εικόνα 7-3 παρουσιάζονται γραφικά η παραγόμενη αιολική ισχύς και το ζητούμενο φορτίο.



**Εικόνα 7-3 Σχεδιάγραμμα αιολικής και ζητούμενης ισχύος**

Στην περίπτωση που η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την παραγόμενη αιολική ισχύ ενεργοποιείται το στοιχείο καύσιμου και αποδίδει τη ζητούμενη ενέργεια.

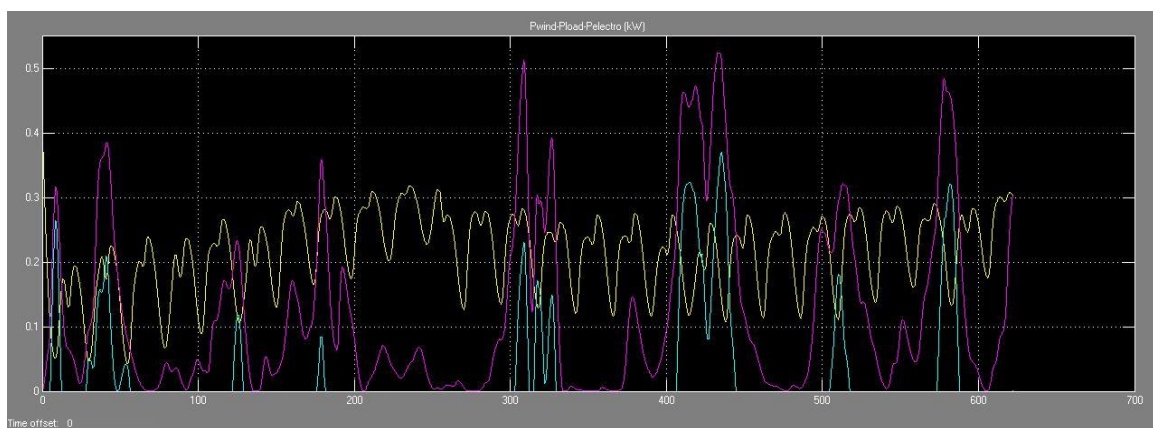
Στην εικόνα 7-4 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα της παραγόμενης αιολικής ισχύος, του φορτίου ζήτησης και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από τη μονάδα του στοιχείου καυσίμου.



**Εικόνα 7-4 Σχεδιάγραμμα αιολικής, στοιχείων καυσίμου και ζητούμενης ισχύος**

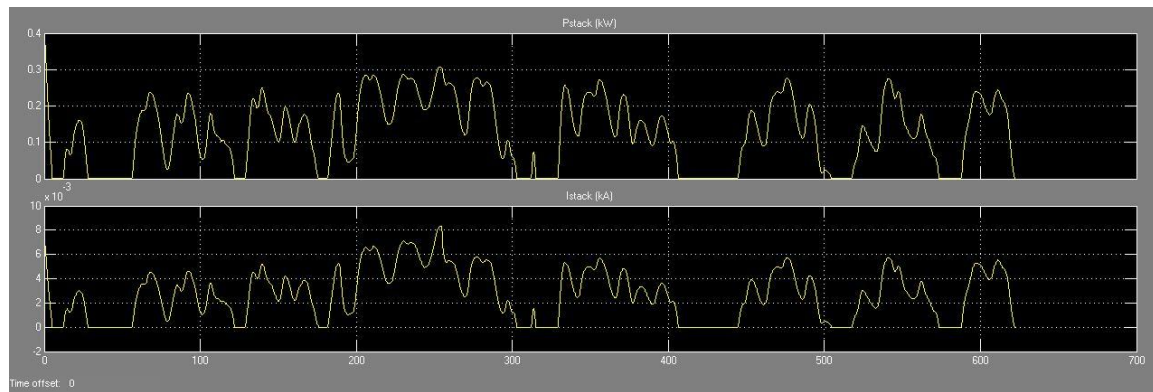
Αντίστοιχα στην περίπτωση που η παραγόμενη αιολική ισχύς είναι μεγαλύτερη από τη ζητούμενη, το πλεόνασμα της ισχύος διοχετεύεται στον ηλεκτρολύτη για παραγωγή υδρογόνου.

Στην εικόνα 7-5 παρουσιάζονται γραφικά η παραγόμενη αιολική ισχύς, το ηλεκτρικό φορτίο και η ενέργεια που καταναλώνεται από τον ηλεκτρολύτη για παραγωγή υδρογόνου.



**Εικόνα 7-5 Σχεδιάγραμμα αιολικής, ηλεκτρολύτη και ζητούμενης ισχύος**

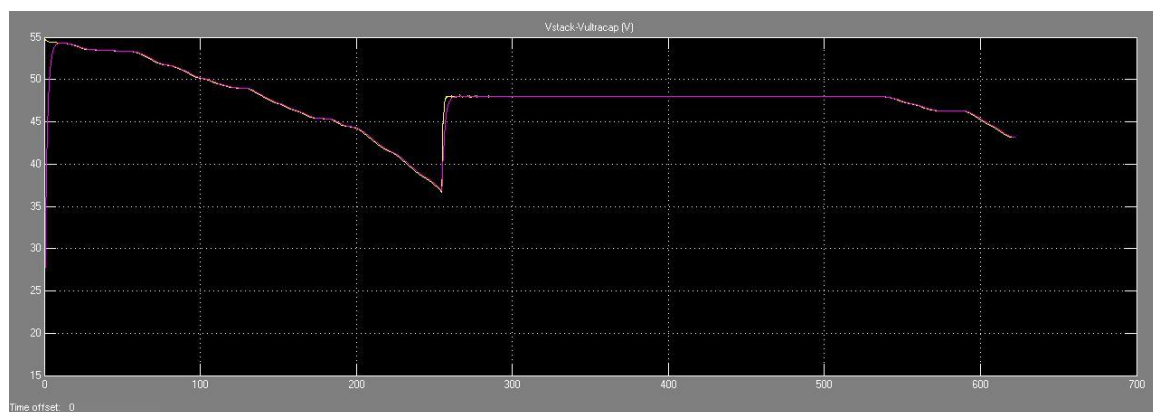
Με τις αλλαγές στο φορτίο, το ρεύμα του αντιστροφέα μεταβάλλεται και κατά συνέπεια επηρεάζεται η λειτουργία του στοιχείου καυσίμου. Οι αλλαγές της έντασης του ρεύματος του στοιχείου καυσίμου οφείλονται σε αλλαγές στη ζήτηση ισχύος από αυτό σε συνδυασμό με τη διαθεσιμότητα της αιολικής ενέργειας.



**Εικόνα 7-6 Σχεδιάγραμμα ισχύος και ρεύματος στοιχείου καυσίμου**

Αυτές οι αλλαγές προκαλούν και τη διακύμανση της τάσης του στοιχείου καυσίμου. Η χρήση ενός υπερπυκνωτή συνδεδεμένου παράλληλα με το στοιχείο καυσίμου περιορίζει τη διακύμανση της τάσης της στοίβας των στοιχείων καυσίμου.

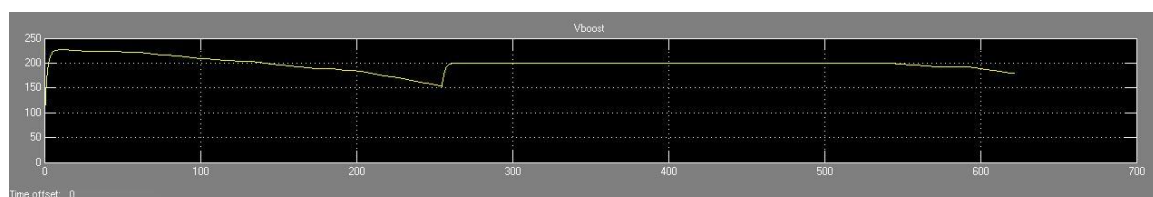
Στην εικόνα 7-7 παρουσιάζεται το σχεδιάγραμμα των τάσεων εξόδου της μονάδας στοιχείου καυσίμου και της μονάδας υπερπυκνωτή, η οποία την σταθεροποιεί στην περίπτωση απότομων διακυμάνσεων.



**Εικόνα 7-7 Σχεδιάγραμμα τάσης στοιχείου καυσίμου και υπερπυκνωτή**

Η μονάδα του μετασχηματιστή ρυθμίζει την τάση φορτίου. Ο ελεγκτής στον επωθητικό μετατροπέα ρυθμίζει το λόγο του φορτίου ώστε να διατηρείται σταθερή η τάση εξόδου στα 200V DC.

Στην εικόνα 7-8 παρουσιάζεται γραφικά η τάση εξόδου του απωθητικού μετατροπέα ( boost inverter ).



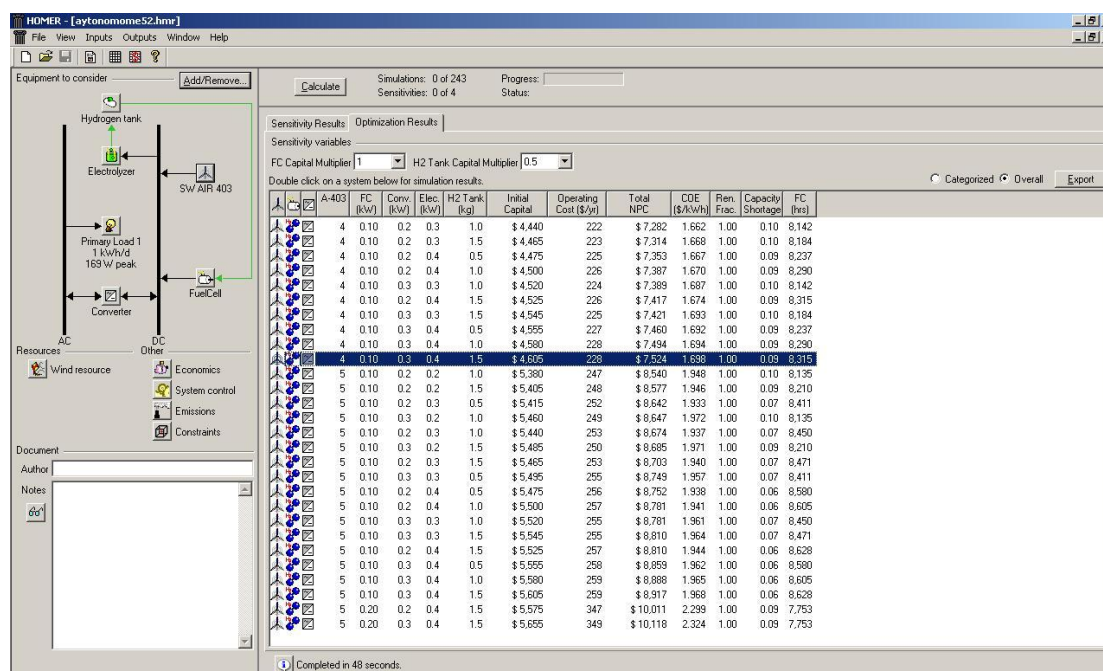
**Εικόνα 7-8 Σχεδιάγραμμα τάσης επωθητικού μετατροπέα**



## 7.2 Προσομοίωση στο Homer

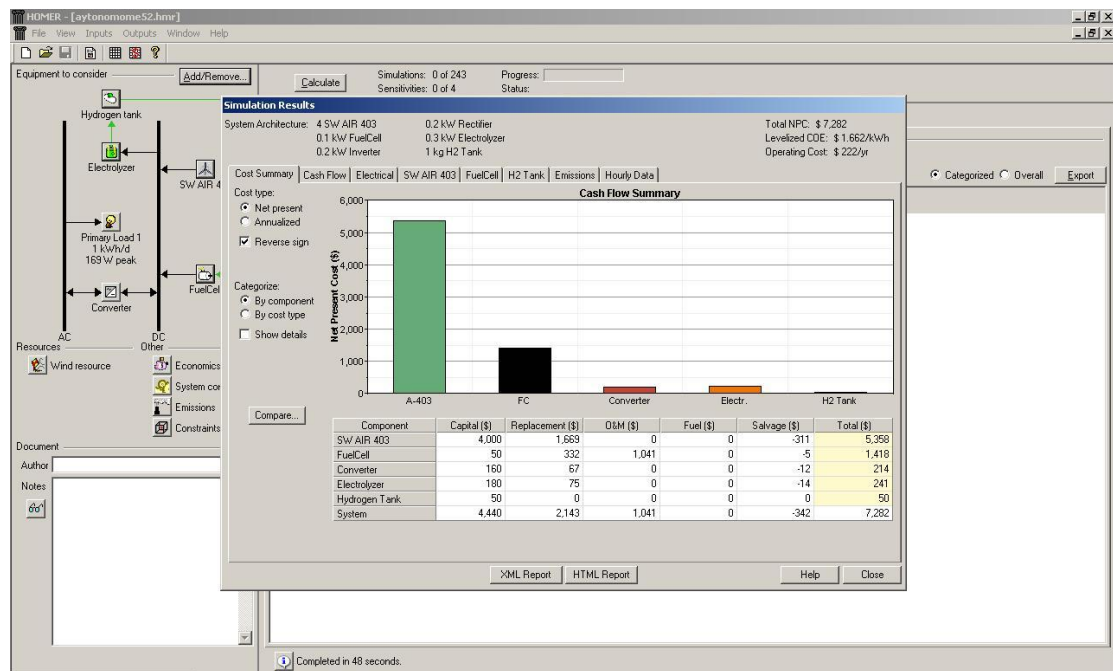
Το μοντέλο Homer είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο για τη σχεδίαση ενεργειακών συστημάτων για απομονωμένες εφαρμογές. Μια πλήρη ωριαία προσομοίωση της απόδοσης των επιλεγμένων συστημάτων. Χρησιμοποιεί τα κόστη κύκλου ζωής. Αναλύσεις ευαισθησίας εκτελούνται για να εκτιμηθεί η ευαισθησία του συστήματος σε βασικές παραμέτρους, όπως η ποιότητα της πηγής και τα κόστη.

Ύστερα από μια σειρά προσομοιώσεων και παραμετροποίησης των μεταβλητών υπολογίστηκε το οικονομικότερο βιώσιμο ανεξάρτητο σύστημα, ώστε να έχει τα εξής χαρακτηριστικά: 4 ανεμογεννήτριες Air 403, ένα στοιχείο καυσίμου 0,1 kW, έναν ηλεκτρολύτη 0,3 kW, έναν μετασχηματιστή 0,2 kW και μια δεξαμενή υδρογόνου 1 κιλού. Αφού η πυκνότητα του υδρογόνου σε κανονική ατμοσφαιρική πίεση και θερμοκρασία είναι 0,0000898 kg/L τότε η δεξαμενή υπό κανονικές συνθήκες υδρογόνου ενός κιλού αντιστοιχεί σε 111136 lt όγκου. ( Το μοντέλο προσομοίωσης HOMER προϋποθέτει αποθήκευση του υδρογόνου σε κανονικές συνθήκες πίεσης και θερμοκρασίας. )



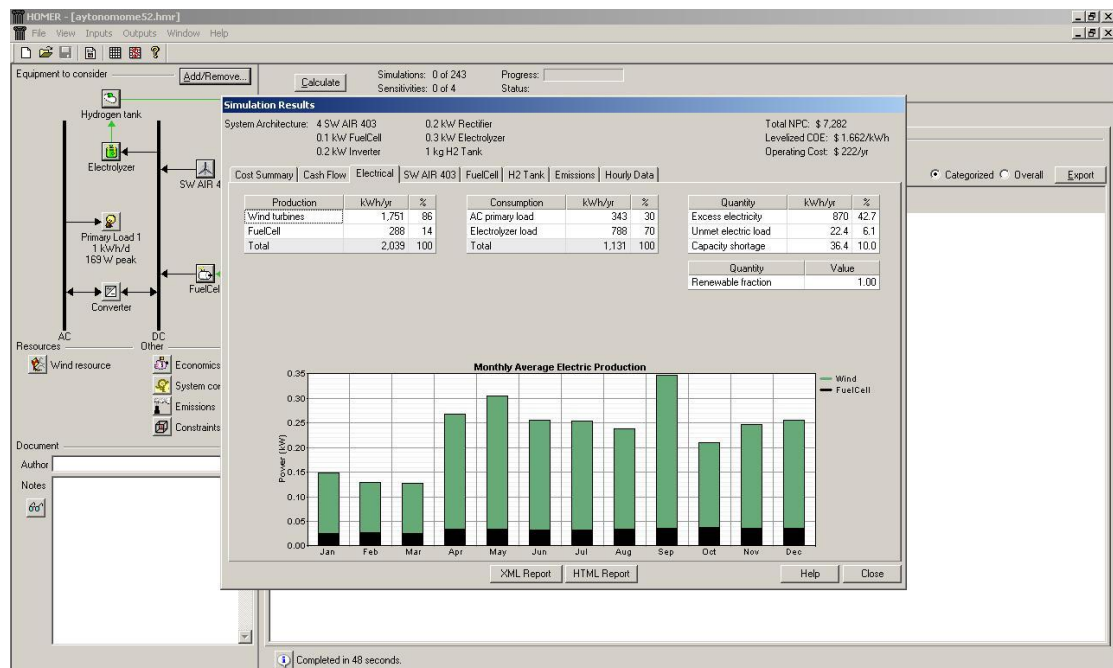
Εικόνα 7-9 Οθόνη αποτελεσμάτων προσομοίωσης στο μοντέλο HOMER

Το κόστος του μοντέλου υπολογίζεται στα \$7282 για την περίπτωση της εκτίμησης του κόστους του στοιχείου καυσίμου \$500 / kW και του κόστους αποθήκευσης υδρογόνου \$50 / kg. Κατά συνέπεια το ενεργειακό κόστος υπολογίζεται ως \$1,662 /kWh.



Εικόνα 7-10 Οθόνη περίληψης cash flow

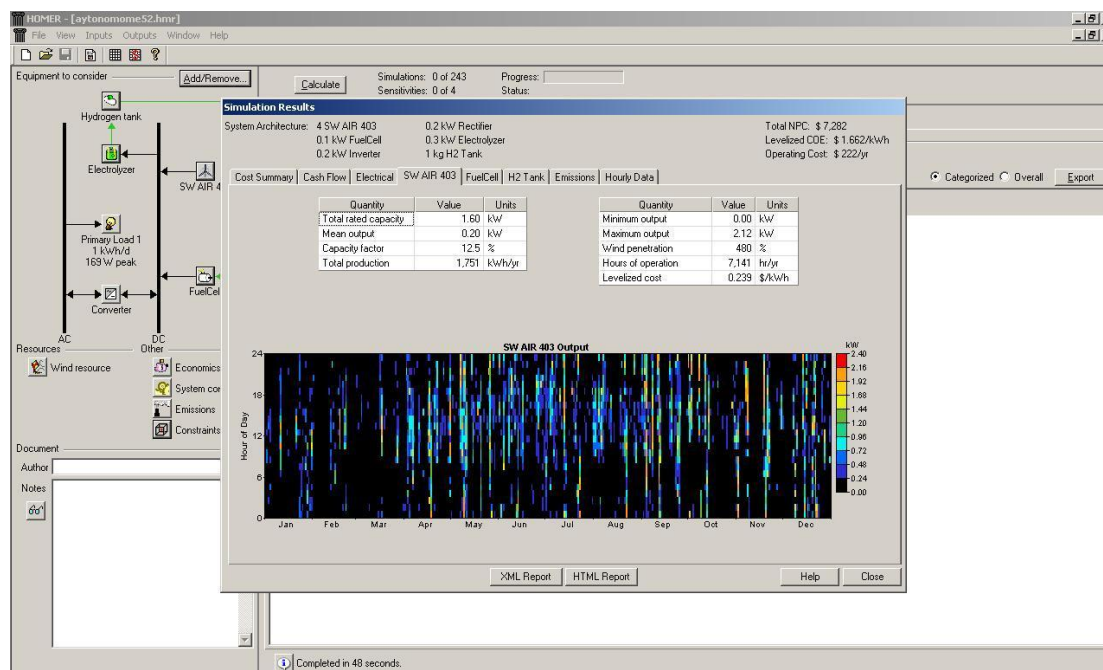
Η παραγόμενη αιολική ενέργεια ισούται με 1751 kWh το έτος ( 86% της συνολικής ηλεκτρικής παραγωγής ) και η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από το στοιχείο καυσίμου ισούται με 288 kWh το έτος ( 86% της συνολικής ηλεκτρικής παραγωγής ).



Εικόνα 7-11 Οθόνη ενεργειακών δεδομένων

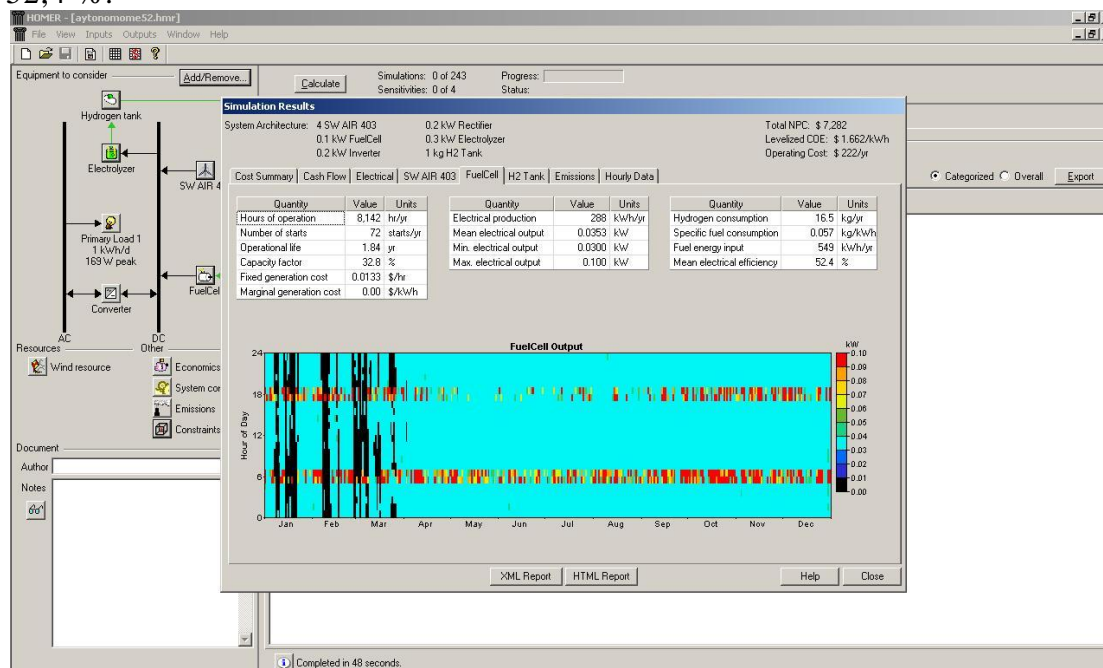


Η συνολική ονομαστική ισχύς είναι 1,6 kW, η μέση έξοδος υπολογίζεται σε 0,2 kW και η μέγιστη σε 2,12 kW, οι συνολικές ώρες λειτουργίας των αιολικών συστημάτων είναι 7141 ώρες το χρόνο και το κόστος παραγωγής ενέργειας υπολογίζεται σε \$0,239 /kWh.



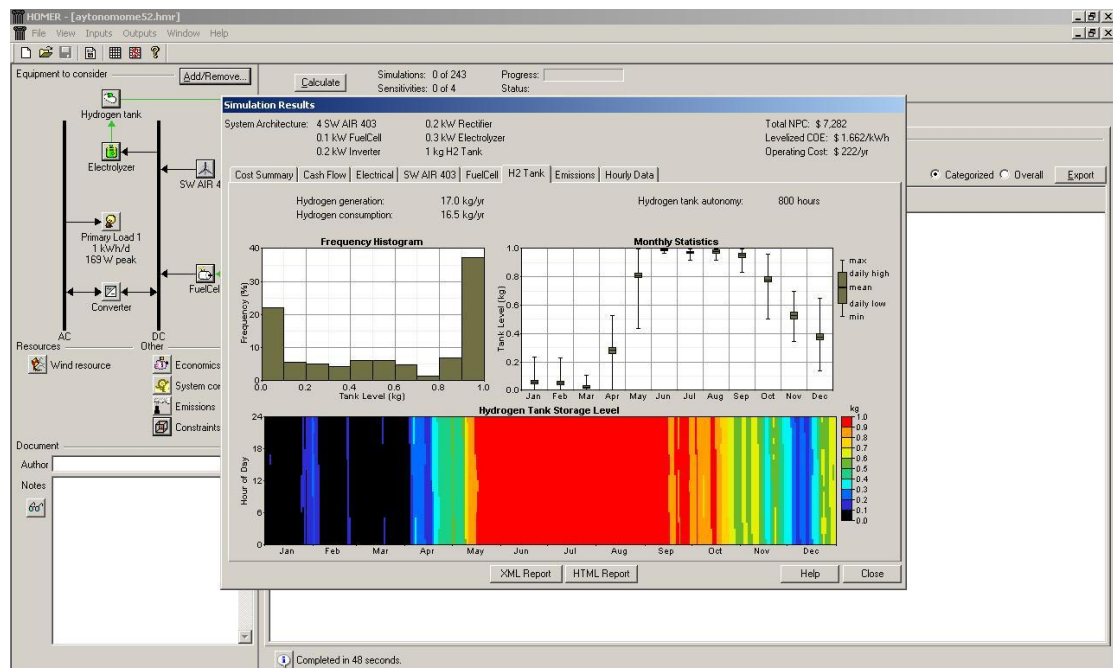
Εικόνα 7-12 Οθόνη αποτελεσμάτων για την ανεμογεννήτρια

Το στοιχείο καυσίμου ξεκινάει τη λειτουργία του 72 φορές το χρόνο και λειτουργεί για 8142 ώρες το χρόνο. Η μέση ηλεκτρική ισχύς που αποδίδει είναι 0.0353 kW και η μέγιστη είναι 1 kW. Συνολικά καταναλώνει 16,5 kg υδρογόνου το χρόνο και παράγει 549 kWh. Άρα η ειδική κατανάλωση του υδρογόνου υπολογίζεται στα 0,057 kg/kWh και η μέση ηλεκτρική απόδοση 52,4 %.



Εικόνα 7-13 Οθόνη αποτελεσμάτων στοιχείων καυσίμου

Η ετήσια παραγωγή υδρογόνου υπολογίζεται 17 kg και η ετήσια κατανάλωση 16 kg. Η αυτονομία του αποθηκευτικού μέσου είναι 800 ώρες. Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται σχηματικά η πρόβλεψη για αποθηκευμένο υδρογόνο και το διάγραμμα συχνότητων.



Εικόνα 7-14 Οθόνη αποτελεσμάτων για το αποθηκευτικό μέσο

## 8. Συμπεράσματα

Τα υβριδικά ενεργειακά συστήματα είναι περισσότερο κατάλληλα για απομονωμένες τοποθεσίες, ώστε να επιλύεται το πρόβλημα της παροχής ηλεκτρικής ισχύος ανεξάρτητης της διακύμανσης των πηγών. Σε αυτή την εργασία προτείνεται ένα υβριδικό σύστημα μικρής ανεμογεννήτριας 400 W – στοιχείου καυσίμου για αυτόνομη λειτουργία και παρουσιάζονται η σχεδίαση και η ανάλυσή του. Το σύστημα προσομοιώθηκε στο SIMULINK. Επιπλέον ανάλυση απαιτείται για τη διερεύνηση της καταλληλότητας της χρήσης υπερπυκνωτών ή άλλων συσκευών βραχυχρόνιας ενεργειακής αποθήκευσης.

Επιπλέον γίνεται μια αρχική μελέτη βιωσιμότητας στο μοντέλο Homer. Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κρίνονται ικανοποιητικά. Με ένα μικρό σχετικά κόστος η σχεδίαση και ανάπτυξη τέτοιων ενεργειακών εφαρμογών είναι ήδη εφικτή, και η πρόβλεψη κόστους για τα επόμενα χρόνια είναι αρκετά αισιόδοξη. Αναλυτές της αγοράς εκτιμούν ότι η άνθιση των εταιρειών που ασχολούνται με στοιχεία καυσίμου θα είναι ανάλογη με την άνθιση των εταιρειών υπολογιστών τις δεκαετίες 1960-1970 και κατά συνέπεια θεωρείται από τους ταχύτητα αναπτυσσόμενους βιομηχανικούς τομείς.

Οι πολιτικές πρωτοβουλίες για διαρκή και εντατική έρευνα της τεχνολογίας των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και πιο συγκεκριμένα της τεχνολογίας των στοιχείων καυσίμου δημιουργούν το κατάλληλο περιβάλλον για το μετασχηματισμό της οικονομίας του πετρελαίου σε οικονομία του υδρογόνου, με τις θετικές συνέπειες της ανεξαρτητοποίησης των εθνικών οικονομιών από τα ορυκτά καύσιμα και της βελτίωσης του περιβάλλοντος με τη μείωση των εκπομπών από την καύση των ορυκτών καυσίμων.

## Βιβλιογραφία

- [2.1] Kyoto Protocol to the United Nations framework convention on climate change. United Nations, 1998
- [2.2] Wind power targets for Europe 75000 MW by 2010. The European Wind Energy Association, 2003
- [2.3] Costamagna P, Srinivasan S. Quantum jumps in the PEMFC science and technology from the 1960s to the year 2000. Part II. Engineering, technology development and application aspects. Journal of Power Sources 2001; 102:253–69.
- [2.4] Παπαντώνης Δ. Μικρά Υδροηλεκτρικά Έργα, 2001
- [2.5] Νικολάου Τρ. Βελτιστοποίηση υδραυλικής εγκατάστασης αποταμίευσης απορριπτόμενης ισχύος από αιολικά πάρκα, 2003
- [2.6] Ramage M. The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers and R&D Needs. Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use, National Research Council and National Academy of Engineering, 2004
- [2.7] Office of the President, Press Release (January 30, 2003), Hydrogen Fuel: A Clean and Secure Energy Future
- [2.8] Connection of Distributed Energy Generation Units in the Distribution Network and Grid. GODGUNet Final Report 2003.
- [2.9] Palensky P. Dissertation: Distributed Reactive Energy Management. Austria: Technische Universität Wien, Fakultät für Elektrotechnik, 2001.
- [2.10] Dunn S. Hydrogen futures: toward a sustainable energy system. International Journal of Hydrogen Energy 2002.
- [2.11] From Fuel Cell to Virtual Power Plant, Hexis News Issue 4/2003.
- [2.20] Solar Energy Technologies Program Multi-Year Technical Plan 2003-2007 and beyond, DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, January 2004.
- [2.21] Wind Energy Multi-Year Program Plan for 2005-2010, DOE Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, November 2004.

- [3.1] Fuel Cell Transit Buses, ThunderPower Bus Evaluation at SunLine Transit Agency, U.S. Department of Energy
- [3.2] Fuel Cell Vehicle, World Survey 2003, U.S. Department of Energy 2004
- [3.3] Hebling C., Fuel Cells with Micro Structured Flow Field for Portable Electronic Devices. In: Advances in R&D for the Commercialization of Small Fuel Cells and Battery Technologies for Use in Portable Applications, the Knowledge Foundation, Inc., USA 2001
- [3.4] Atwater T., Cygan P., Leung F., Man Portable Power Needs of the 21st Century, J. Power Sources, Vol. 91, pp. 27-36, 2000
- [3.5] Federal Transit Administration, Cooperative Agreement, Project No. CA-26-7022, Final Report September, 2001
- [4.1] Blair N. WinDS-H2 Assessment of the Role of Wind Energy in the Production of Hydrogen, ITS-Davis Hydrogen Systems Modeling Workshop, September 20–21, Davis, California 2004
- [4.2] Lipman T., D. M. Kammen, J. Ogden, and D. Sperling (plus additional co-authors) An Integrated Hydrogen Vision for California, prepared for the Kirsch Foundation, Renewable and Appropriate Energy Laboratory, UC Berkeley 2004.
- [4.3] National Renewable Energy Laboratory “HOMER: The Micropower Optimization Model,” NREL/FS-710-35406, March 2004.
- [4.4] Lipman T., Ramos R. and Kammen D. M. An assessment of battery and hydrogen energy storage systems integrated with wind energy resources in California Prepared for: California Energy Commission Public Interest Energy Research Program Prepared By: University of California, Berkeley CEC-500-2005-136 September 2005
- [4.5] Iqbal M.T. Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system, Renewable Energy 28 (2003) 223–237
- [4.6] Khan M.J., Iqbal M.T. Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland, Renewable Energy 30 (2005) 835–854
- [4.7] Iqbal M.T. Modeling and control of a wind fuel cell hybrid energy system, Renewable Energy 28 (2003) 223–237
- [4.8] Iqbal M.T. Simulation of a small wind fuel cell hybrid energy system, Renewable Energy 28 (2003) 511–522
- [4.9] Haluk Görgün Dynamic modelling of a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer, International Journal of Hydrogen Energy 31 (2006) 29 – 38

- [4.10] Khan M.J., Iqbal M.T. Modelling and Analysis of Electro-chemical, Thermal, and Reactant Flow Dynamics for a PEM Fuel Cell System, Fuel Cells 05, 2005, No. 4, 463-475, Wiley InterScience
- [4.11] E. Muljadi, C. Wang, M.H. Nehrir Parallel Operation of Wind Turbine, Fuel Cell, and Diesel Generation Sources, NREL/CP-500-35353, 2004
- [4.12] R. Chedid, F. B. Chaaban, R. Shihab A Simplified Electric Circuit Model for the Analysis of Hybrid Wind-Fuel Cell Systems, 1-4244-1298-6/07 IEEE
- [4.13] Mamadou Lamine Doumbia, Kodjo Agbossou, Évelyne Granger Simulink Modelling and Simulation of a Hydrogen Based Photovoltaic/Wind Energy System, EUROCON 2007
- [4.14] O.C. Onar, M. Uzunoglu, M.S. Alam Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system, Journal of Power Sources 161 (2006) 707–722
- [5.1] Khan M.J., Iqbal M.T. Dynamic modeling and simulation of a small wind–fuel cell hybrid energy system, Renewable Energy Journal 30 (2005), 421–439.
- [5.3] Kuo BC. Automatic control systems, 7th ed. Prentice Hall Inc; 1995.
- [5.4] Rowe A, Li X. Mathematical modeling of proton exchange membrane fuel cells. Journal of Power Sources 2001; 102:82–96.
- [5.5] Mann RF, Amphlett JC, Hooper M, Jensen HM, Peppley BA, Roberge PR. Development and application of a generalized steady state electrochemical model of a PEM fuel cell. Journal of Power Sources 2000; 86:173–80.
- [5.6] Amphlett JC, Baumert RM, Mann RF, Peppley BA, Roberge PR, Harries TJ. Performance modelling of the Ballard mark-IV solid polymer electrolyte fuel cell. Journal of the Electrochemical Society 1995; 142(1):9–15.
- [5.7] Larminie J, Dicks A. Fuel cell systems explained. England: John Wiley and Sons; 2001.
- [5.8] Gemmen RS. Analysis for the effect of inverter ripple current on fuel cell operating conditions. 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Expositions, New York, November 11–16. 2001.
- [5.9] Amphlett JC, Mann RF, Peppley BA, Roberge PR, Rodrigues A, Salvador JP. A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells. Journal of Power Sources 1996; 61 (1–2):183–8.
- [5.10] Sapru K, Stetson NT, Ovshinsky SR. Development of a small scale hydrogen production storage system for hydrogen applications. Proceedings

of the Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, vols. 3–4. 1997.

[5.11] Ulleberg O. Stand-alone power systems for the future: optimal design, operation and control of solar–hydrogen energy systems. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, December 1998.

[5.12] Bruke A. Ultracapacitors: why, how and where is the technology? *Journal of Power Sources* 2000; 91(1):37–51.

[5.13] Kotz R, Muller S, Bartschi M. Super capacitors for peak power demand in fuel cell driven cars. *ECS Proceedings*, vol. PV 2001-21. Pennington (NJ): The Electrochemical Society, Inc; 2002.

[6.1] [http://www.air403windgenerators.com/AIR\\_403.html](http://www.air403windgenerators.com/AIR_403.html)

[6.2] Cihat Polat, Nurcan Kılınc Trends in the Market Growth for Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC): A Review of the Market Dynamics *European Journal of Economics, Finance and Administrative Sciences* ISSN 1450-2887 Issue 8 (2007)

[6.3] Khan M.J., Iqbal M.T. Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland, *Renewable Energy* 30 (2005) 835–854

[6.4] Tero Hottinen Technical Review and Economic Aspects of Hydrogen Storage Technologies, Master's thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology, Department of Engineering Physics, Helsinki University of Technology

[6.5] Tero Hottinen Technical Review and Economic Aspects of Hydrogen Storage Technologies, Master's thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology, Department of Engineering Physics, Helsinki University of Technology

## Παράρτημα Α : Ευρετήριο εικόνων

Εικόνα 2-1 Διάγραμμα αποθήκευσης ενέργειας .....	9
Εικόνα 2-2 Σχεδιάγραμμα ενός κεντρικοποιημένου συστήματος .....	12
Εικόνα 2-3 Σχεδιάγραμμα ενός κατανεμημένου συστήματος .....	13
Εικόνα 2-4 Παράδειγμα αποκεντριοποιημένου συστήματος παραγωγής ενέργειας .....	14
Εικόνα 2-5 Παράδειγμα κατανεμημένου συστήματος παραγωγής ενέργειας .	15
Πίνακας 2- 1 Επιλογές παραγωγής υδρογόνου από ηλιακή και αιολική ενέργεια .....	16
Εικόνα 3-1 Απόδοση Συστημάτων Παραγωγής Ενέργειας .....	19
Εικόνα 3-2 Συγκριτικοί ενεργειακοί μετασχηματισμοί.....	20
Εικόνα 3-2 Πρωτότυπα οχήματα στοιχείων καυσίμου στο σταθμό πρόσβασης της SunLine Transit Agency στην Καλιφόρνια. ....	25
Πίνακας 3-1 Ενδεικτικά χρονοδιαγράμματα Αυτοκινητοβιομηχανιών <sup>[3.2]</sup> .....	26
Εικόνα 3-3 Το VE100RM της Voller Energy Group.....	27
Εικόνα 3-4 Λειτουργία γαλβανικού στοιχείου.....	29
Εικόνα 3-5 Λειτουργία Στοιχείου Καυσίμου Υδρογόνου .....	30
Πίνακας 3-2 Είδη στοιχείων καυσίμου <sup>[3.5]</sup> .....	34
Εικόνα 4-1 HOMER Οθόνη εισαγωγής στοιχείων και φορτίων.....	40
Εικόνα 4-2 HOMER Οθόνη εισαγωγής ηλιακών δεδομένων. ....	41
Εικόνα 4-3 HOMER Οθόνη εισαγωγής χαρακτηριστικών ανεμογεννήτριας ..	42
Εικόνα 4-4 Βέλτιστος tip speed λόγος της ανεμογεννήτριας .....	45
Εικόνα 4-5 Hill-climbing έλεγχος της ανεμογεννήτριας .....	46
Εικόνα 4-6 Υλοποίηση σε HOMER του υβριδικού συστήματος ενέργειας. ...	47
Εικόνα 4-7 Ανάλυση κόστους του συστήματος ανεμογεννήτριας - στοιχείου καυσίμου. ....	48
Εικόνα 4-8 Προτεινόμενο υβριδικό σύστημα ανεμογεννήτριας - στοιχείου καυσίμου.....	49
Εικόνα 4-9 Προτεινόμενο υβριδικό σύστημα μικρής ανεμογεννήτριας - στοιχείου καυσίμου .....	50
Εικόνα 4-10 Ηλεκτρολύτης μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων .....	51
Εικόνα 4-11 Μοντέλο Simulink συστήματος στοιχείου καυσίμου .....	52
Εικόνα 4-12 Φυσικό σχεδιάγραμμα του υπό ανάλυση συστήματος ενέργειας	54
Εικόνα 4-13 Ισοδύναμο κύκλωμα ανεμογεννήτριας ηλεκτρολύτη .....	55
Εικόνα 4-14 Ισοδύναμο κύκλωμα στοιχείου καυσίμου - φορτίου .....	55
Εικόνα 4-15 Δομικό σχεδιάγραμμα του συστήματος ανανεώσιμων πηγών ενέργειας .....	57
Εικόνα 4-16 Δομικό σχεδιάγραμμα του προτεινόμενου συστήματος .....	58
Εικόνα 5-1 Υβριδικό Ενεργειακό Σύστημα Ανεμογεννήτριας - Στοιχείου Καυσίμου.....	59
Εικόνα 5-2 Καμπύλη ισχύος AIR 403 .....	61
Εικόνα 5-3 Ηλεκτρικό ισοδύναμο του στοιχείου καυσίμου .....	63
Εικόνα 5-4 Υπερπυκνωτής συνδεδεμένος παράλληλα με στοιχείο καυσίμου.	66
Πίνακας 5-5 Παράμετροι ελεγκτών .....	68
Εικόνα 5-6 Υποσύστημα Ανεμογεννήτριας .....	69
Εικόνα 5-7 Υποσύστημα Ηλεκτρολύτη .....	69
Εικόνα 5-8 Υποσύστημα Ελεγκτή ισχύος .....	69
Εικόνα 5-9 Ελεγκτής ροής Στοιχείου Καυσίμου .....	70
Εικόνα 5-10 Υποσύστημα Στοιχείου Καυσίμου .....	71



Εικόνα 5-11 Υποσύστημα Μετασχηματιστή .....	72
Εικόνα 5-12 Σύστημα ανεμογεννήτριας - Στοιχείου Καυσίμου στο SIMULINK .....	73
Εικόνα 6-1 Οθόνη εισαγωγής στοιχείων και φορτίων .....	74
Εικόνα 6-2 Οθόνη εισαγωγής της χρονοσειράς των αιολικών δεδομένων.....	75
Εικόνα 6-3 Διαθέσιμες Ανεμογεννήτριες στο Homer .....	76
Εικόνα 6-4 Εισαγωγή χαρακτηριστικών ανεμογεννήτριας .....	77
Εικόνα 6-5 Οθόνη εισαγωγής των δεδομένων κόστους του στοιχείου καυσίμου.....	78
Εικόνα 6-6 Οθόνη εισαγωγής παραμέτρων της καμπύλης απόδοσης. ....	78
Εικόνα 6-7 Οθόνη εισαγωγής δεδομένων μετασχηματιστή .....	79
Εικόνα 6-8 Οθόνη εισαγωγής δεδομένων του ηλεκτρολύτη.....	80
Εικόνα 6-9 Οθόνη εισαγωγής δεδομένων του αποθηκευτικού μέσου. ....	81
Εικόνα 6-10 Οθόνη εισαγωγής δεδομένων της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος. .	82
Εικόνα 7-1 Σχεδιάγραμμα ωριαίας ταχύτητας ανέμου και παραγόμενης αιολικής ισχύος.....	83
Εικόνα 7-2 Ρύθμιση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος.....	84
Εικόνα 7-3 Σχεδιάγραμμα αιολικής και ζητούμενης ισχύος.....	84
Εικόνα 7-4 Σχεδιάγραμμα αιολικής, στοιχείων καυσίμου και ζητούμενης ισχύος.....	85
Εικόνα 7-5 Σχεδιάγραμμα αιολικής, ηλεκτρολύτη και ζητούμενης ισχύος ....	85
Εικόνα 7-6 Σχεδιάγραμμα ισχύος και ρεύματος στοιχείου καυσίμου .....	86
Εικόνα 7-7 Σχεδιάγραμμα τάσης στοιχείου καυσίμου και υπερπυκνωτή.....	86
Εικόνα 7-8 Σχεδιάγραμμα τάσης επωθητικού μετατροπέα .....	86
Εικόνα 7-9 Οθόνη αποτελεσμάτων προσομοίωσης στο μοντέλο HOMER .....	87
Εικόνα 7-10 Οθόνη περίληψης cash flow .....	88
Εικόνα 7-11 Οθόνη ενεργειακών δεδομένων .....	88
Εικόνα 7-12 Οθόνη αποτελεσμάτων για την ανεμογεννήτρια.....	89
Εικόνα 7-13 Οθόνη αποτελεσμάτων στοιχείων καυσίμου .....	89
Εικόνα 7-14 Οθόνη αποτελεσμάτων για το αποθηκευτικό μέσο.....	90