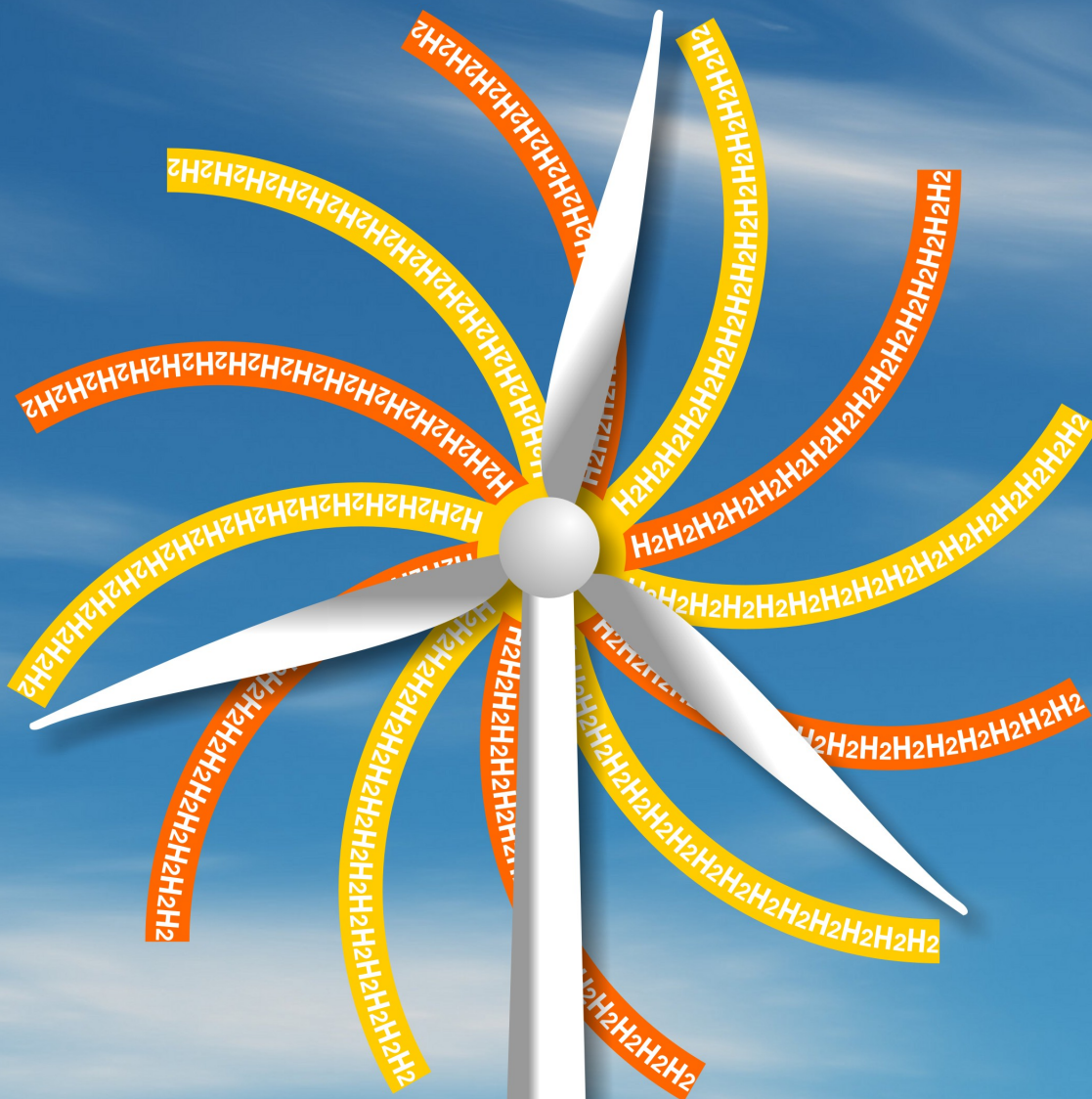


ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΡΘΟΥΡΟΣ ΖΕΡΒΟΣ



Μελέτη
Υβριδικού Συστήματος ΑΠΕ
με Υδρογόνο
στον Αη Στράτη

Γεώργιος Πλευράκης

Στους γονείς μου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Εισαγωγικό Σημείωμα	1
1. Το υδρογόνο	3
1.1 Η μονάδα παραγωγής υδρογόνου	3
1.1.1 Πρόσληψη υδρογόνου από υδρογονάνθρακες	3
1.1.2 Πρόσληψη Υδρογόνου από Νερό	5
1.1.3 Άλλες μέθοδοι	8
2. Οι Κυψέλες Καυσίμου	10
2.1.1 Ιστορικό	10
2.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα	11
2.1.3 Εφαρμογές	18
2.1.4 Αρχές λειτουργίας	23
2.1.5 Κατηγορίες Κυψελών Καυσίμου	30
2.2 Αποθήκευση του υδρογόνου	37
2.3 Ασφάλεια στα συστήματα υδρογόνου	39
2.3.1 Διαρροές Υδρογόνου	39
2.3.2 Ανίχνευση διαρροών υδρογόνου	41
2.3.3 Σταματώντας τις Διαρροές	42
2.3.4 Υδρογονικές Φωτιές	42
3. Το Σύστημα Μελέτης	43
3.1 Οι συνιστώσες του συστήματος	43
3.1.1 Το αιολικό σύστημα	43
3.1.2 Το ηλιακό (φωτοβολταϊκό) σύστημα	44
3.1.3 Η γεννήτρια Diesel	45
3.1.4 Το σύστημα του υδρογόνου	45
3.2 Η μελέτη του συστήματος	46
3.2.1 Το υπολογιστικό εργαλείο	46
3.2.2 Τα σενάρια μελέτης	57
α) Οι εξεταζόμενες λύσεις.....	58
β) Η «πράσινη» λύση	69
γ) Η οριακά βιώσιμη.....	71
Παράρτημα	77 – 117
Βιβλιογραφία	118

Αντί προλόγου

Η διπλωματική αυτή εργασία είναι μια μελέτη ενός υβριδικού συστήματος παραγωγής ενέργειας μέσω Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) και υδρογόνου. Έγινε διερεύνηση για την εφαρμογή αυτού του συστήματος στο νησί του Αγίου Ευστρατίου με γνώμονα οικονομικά αλλά και περιβαλλοντικά κριτήρια.

Τα μεγέθη των συνιστωσών του συστήματος έχουν αντιστοιχία σε πραγματικά στοιχεία τα οποία χρησιμοποιούνται στην βιομηχανία. Συνεπώς προσεγγίζεται έτσι στο μέγιστο δυνατό βαθμό, μια ρεαλιστικότερη πρόταση για το συγκεκριμένο νησί, ενώ παράλληλα δημιουργείται και ένα εύχρηστο εργαλείο για την μελέτη τέτοιου είδους συστημάτων σε άλλες περιοχές και εφαρμογές.

Η εργασία αυτή αποτελεί το επιστέγασμα των προσπαθειών μου για την απόκτηση του διπλώματος του Μηχανολόγου Μηχανικού από το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Δεν θα μπορούσε να γίνει δυνατή χωρίς την συνεισφορά ορισμένων ανθρώπων. Θα ήθελα λοιπόν στο σημείο αυτό να ευχαριστήσω:

Τον Καθηγητή κ. Αρθούρο Ζερβό ο οποίος δέχθηκε να μου ανατεθεί αυτή η μελέτη και παρέιχε τα μέσα για να πραγματοποιηθεί,

Τον κ. Εμμανουήλ Ζούλια Δρ Χημικό Μηχανικό και τον κ. Γεώργιο Τζάμαλη υποψήφιο διδάκτορα από το ΚΑΠΕ οι οποίοι μου παρέιχαν τις αναγκαίες πληροφορίες για την μελέτη,

Τον υποψήφιο διδάκτορα, κ. Αντώνιο Σαλιάγκα για την πολύτιμη συνεισφορά του στην ολοκλήρωση της μελέτης,

Τον Δρ. Μηχανολόγο Μηχανικό κ. Γεώργιο Κάραλη για την υποστήριξη και την υπομονή του καθ' όλη την διάρκεια της μελέτης

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω του γονείς μου, τον Στέργιο και την Βάσω για την αμέριστη υποστήριξη τους, την συμπαράστασή και την υπομονή τους.

Εισαγωγή

Η οικονομία του Υδρογόνου είναι ένας όρος που εισήγαγε ο John Bockris σε μια ομιλία του το 1970 στο τεχνικό κέντρο της General Motors. Αποτελεί μία πρόταση που στοχεύει στην διανομή ενέργειας μέσω του υδρογόνου. Η βάση γι' αυτή την πρόταση είναι το γεγονός ότι το υδρογόνο αποδίδει ενέργεια και νερό όταν συνδυάζεται με το οξυγόνο. Αυτό όμως προϋποθέτει την παραγωγή του υδρογόνου η οποία απαιτεί περισσότερη ενέργεια από όση αποδίδει το υδρογόνο ως καύσιμο.

Για να γίνει χρήση του υδρογόνου πρέπει, όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, να παραχθεί μέσω ηλεκτρόλυσης ή άλλων μεθόδων. Η μείωση των περιβαλλοντικά επιζήμιων εκπομπών μπορεί να επιτευχθεί μόνο όταν η ενέργεια για την ηλεκτρόλυση του νερού προέρχεται από μη ανθρακογενείς πηγές.

Υπάρχει η τάση να προωθείται το υδρογόνο ως πιθανό καύσιμο για τις μεταφορές (αυτοκίνητα, πλοία, αεροπλάνα) καθώς και για τις ενεργειακές απαιτήσεις κτηρίων και φορητών ηλεκτρονικών συσκευών. Σύμφωνα με τις προσδοκίες μιας οικονομίας υδρογόνου, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα θα μειώνονταν δραματικά και αυτό θα αποτελούσε αποφασιστικής σημασίας νίκη στη μάχη εναντίον της θέρμανσης του πλανήτη. Ένα ακόμα θετικό στοιχείο της οικονομίας του υδρογόνου είναι και το γεγονός ότι οι χώρες χωρίς πηγές υδρογονανθράκων αλλά με μεγάλο δυναμικό Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, θα μπορούν να χρησιμοποιούν ένα συνδυασμό αυτών των πηγών με μονάδες υδρογόνου για να επιτύχουν την ενεργειακή αυτάρκεια και ανεξαρτησία τους.

Το υδρογόνο είναι ένας ενεργειακός φορέας και όχι μια πρωταρχική ενεργειακή πηγή (θα μπορούσαμε να το χαρακτηρίσουμε πρωταρχική πηγή ενέργειας στην περίπτωση των αντιδραστήρων σύντηξης αλλά αυτό άπτεται της μελέτης ενός τελειώς διαφορετικού προτύπου από αυτό που εξετάζουμε στην παρούσα διπλωματική). Παρόλα αυτά η συζήτηση για την οικονομία υδρογόνου εμπλέκει και την εξεύρεση ενεργειακών πηγών, την υπερθέρμανση του πλανήτη (όπως έχει προαναφερθεί) και την αέναη παραγωγή ενέργειας.

Οι υποστηρικτές αυτού του προτύπου διατείνονται ότι στα πλαίσια μιας τέτοιας οικονομίας και σε παγκόσμια κλίμακα, το υδρογόνο είναι μια καθαρή ενεργειακή πηγή-φορέας, με πολύ λιγότερες τελικές εκπομπές ρύπων, όπως μικροσωματίδια ή αέρια του θερμοκηπίου στο σημείο του τελικού καταναλωτή. Μια μελέτη του 2004 έδειξε ότι ολόκληρη η αλυσίδα προμήθειας του υδρογόνου θα απελευθέρωνε σημαντικά λιγότερο CO₂ στην ατμόσφαιρα από ότι θα απελευθέρωνε η καύση της βενζίνης στα υβριδικά αυτοκίνητα και ότι αυτό θα μπορούσε να επιτευχθεί αν γινόταν δέσμευση του παραγόμενου άνθρακα με μεθόδους κατακράτησης στο σημείο παραγωγής του υδρογόνου.

Πάρα ταύτα, λύσεις όπως η απευθείας διανομή και χρήση ενέργειας σε μορφή ηλεκτρισμού, η αποθήκευση σε καινούργιου τύπου μπαταρίες, ή η παραγωγή υγρών συνθετικών καυσίμων από υδρογόνο (εντοπισμένης παραγωγής) και CO₂ (όπως είναι και το μοντέλο της οικονομίας μεθανόλης) θα μπορούσαν με κατάλληλους χειρισμούς να αποφέρουν τα ίδια οφέλη, ενώ παράλληλα θα

απαιτούσαν μικρότερες επενδύσεις σε υποδομές. Οι επικριτές αυτού του μοντέλου έχουν αποκαλέσει το υδρογόνο το λιγότερο αποδοτικό και το πιο ακριβό υποκατάστατο της βενζίνης στον αγώνα για την μείωση των αερίων του θερμοκηπίου. Το Εθνικό Συμβούλιο Ερευνών και η Εθνική Ακαδημία Μηχανικής (National Research Council and National Academy of Engineering) στη μελέτη “*The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers and R&D needs*” τονίζει: (μετάφραση) «υπάρχουν μεγάλα εμπόδια στην πορεία για την επίτευξη μιας οικονομίας υδρογόνου· η πορεία δεν θα είναι απλή ή ευθεία.»

Ακόμα και με αυτές της αρνητικές κριτικές που δέχεται η εν λόγω ιδέα, πολλές μελέτες έχουν δείξει (μάζι με αυτές και η ίδια που κρατάτε στα χέρια σας) ότι σε off-grid εφαρμογές σύζευξης των τεχνολογιών υδρογόνου με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας η ιδέα παραγωγής και χρήσης υδρογόνου έχει προοπτικές και δεν θα έπρεπε να εγκαταλείπεται αν όχι σαν επίκαιρη και αποδοτική λύση με βάση την παρούσα τεχνοοικονομική κατάσταση , τουλάχιστον σαν αντικείμενο περαιτέρω μελέτης.

1. Το υδρογόνο

1.1 Η μονάδα παραγωγής του υδρογόνου.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι να παραχθεί το υδρογόνο και η επιλογή του τρόπου με τον οποίο θα παραχθεί εξαρτάται από παράγοντες που αφορούν κυρίως το οικονομικό πρόγραμμα της εγκατάστασης καθώς και την μελέτη και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

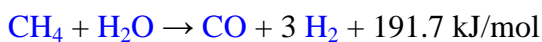
Οι κύριες και πιο διαδεδομένες μέθοδοι παραγωγής υδρογόνου είναι οι εξής:

1.1.1. Πρόσληψη Υδρογόνου από Υδρογονάνθρακες:

Το υδρογόνο μπορεί να δεσμευθεί από φυσικό αέριο με απόδοση περίπου 80%, αλλά και από άλλους υδρογονάνθρακες με αυξομειούμενη απόδοση ανάλογα τον υδρογονάνθρακα. Η μετατροπή αυτή των υδρογονανθράκων μπορεί να έχει σχετικά αυξημένη απόδοση αλλά όπως θα περίμενε κανείς επιτρέπει και την εκπομπή CO₂. Στην περίπτωση που η παραγωγή περιορίζεται σε εντοπισμένη εφαρμογή, οι εκπομπές μπορούν να περιοριστούν με τον διαχωρισμό του CO₂ και την απόρριψή του με ενδεδειγμένο τρόπο, όπως η εναπόθεσή του σε ταμειυτήρα αερίου ή πετρελαίου. Κάτι τέτοιο ακόμα δεν είναι συνηθισμένο σαν πρακτική και το γεγονός ότι είναι και αρκετά ενεργοβόρο έχει ως συνέπεια να μειώνει την συνολική απόδοση. Μια τέτοια εφαρμογή έχει ξεκινήσει στην Βόρεια Θάλασσα στο Σλάϊπνερ από την Νορβηγική εταιρία [StatoilHydro](#) και είναι διαπιστωμένο ότι ακόμα και αν δεν εφαρμοστεί ο ενταφιασμός του διοξειδίου του άνθρακα, η συνολική παραγωγή του υδρογόνου από φυσικό αέριο και η χρήση του ως καύσιμο σε αυτοκίνητα θα απελευθέρωνε τη μισή ποσότητα διοξειδίου από ότι τα βενζινοκίνητα αυτοκίνητα.* (Από το βιβλίο: [The Hype about Hydrogen: Fact and Fiction in the Race to Save the Climate](#), του [Joseph J. Romm](#), έκδοση του 2004 από Island Press and updated in 2005)

- Αναμόρφωση ατμών

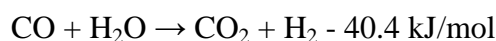
Το υδρογόνο προς εμπορική χρήση σε μεγάλες ποσότητες παράγεται συνήθως από την αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό. Σε υψηλές θερμοκρασίες (700 – 1100 °C) ο ατμός (H₂O) αντιδρά με το μεθάνιο (CH₄) για την παραγωγή σύνθετου αερίου (syngas), σύμφωνα με την παρακάτω αντίδραση:



Η απαιτούμενη θερμότητα για την αντίδραση παρέχεται από την καύση μέρους του μεθανίου, παράγοντας έτσι ρύπους σε δύο στάδια (στη καύση και στην αναμόρφωση).

- Μονοξείδιο του Άνθρακα

Σύμφωνα με την αντίδραση μετάπτωσης νερού- αερίου WGS/Dussan, μπορούμε να δεσμεύσουμε επιπλέον υδρογόνο προσθέτοντας νερό σε θερμοκρασία 130 °C περίπου στα παραγόμενο CO από την προηγούμενη διαδικασία.



Ουσιαστικά το άτομο του οξυγόνου αποδεσμεύεται από το νερό και οξειδώνει το μονοξείδιο για να παραχθεί διοξείδιο. Αυτή η οξείδωση παράγει αρκετή ενέργεια ώστε να συνεχιστεί η αντίδραση.

- Η διαδικασία Kvaerner

Η διαδικασία αυτή (αλλιώς ονομαζόμενη και ως διαδικασία “μαύρου άνθρακα και υδρογόνου CB&H”) αναπτύχθηκε την δεκαετία του '80 από την ομώνυμη Νορβηγική εταιρία για την παραγωγή μαύρου άνθρακα και υδρογόνου από υδρογονάνθρακες (C_nH_m) όπως μεθάνιο, φυσικό αέριο και βιοαέριο. Από την αρχική ενέργεια για την αντίδραση το 48% καταλήγει στο υδρογόνο, το 40% περιέχεται στον παραγόμενο ενεργό άνθρακα και το 10% στον υπέρθερμο ατμό. Διοξείδιο του άνθρακα δεν παράγεται.

- Γαιάνθρακας

Ο γαιάνθρακας μπορεί να μετατραπεί σε σύνθετο αέριο και μεθάνιο, το γνωστό αέριο πόλης, δια μέσου της διαδικασίας αεριοποίησης. Στη συνέχεια γίνεται χρήση των παραπάνω μεθόδων.

- Παραγωγή Υδρογόνου από Ζύμωση

Η παραγωγή υδρογόνου από ζύμωση αφορά την μετατροπή οργανικού υποστρώματος μέσω ζύμωσης σε βιοΥδρογόνο. Η μετατροπή αυτή συντελείται μέσω της δράσης μιας ποικίλης ομάδας βακτηριδίων, τα οποία χρησιμοποιούν πολυενζυμικά συστήματα, σε τρία στάδια όπως και η αναερόβια μετατροπή. Διακρίνεται σε δύο ειδών ζυμώσεις. Στην σκοτεινή ζύμωση, στη οποία δεν απαιτείται όπως μαρτύρα και το όνομα της η παρουσία φωτός, με αποτέλεσμα η διαδικασία και κατ' επέκταση η παραγωγή του υδρογόνου να συντελείται καθόλη την διάρκεια της ημέρας και της νύκτας. Στην φωτοζύμωση η οποία αντίθετα έχει ανάγκη την παρουσία φωτός, γι' αυτό συντελείται μόνο κατά την διάρκεια της ημέρας. Αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχουν τα λεγόμενα μικροβιακά Fuel Cell στα οποία γίνεται χρήση της ηλεκτροϋδρογονογένεσης.

1.1.2. Πρόσληψη Υδρογόνου από Νερό

- Βιολογική Παραγωγή

Το «βιολογικό» υδρογόνο μπορεί να παραχθεί σε βιοαντιδραστήρα άλγης. Η αρχή λειτουργίας βασίζεται σε μια παρατήρηση που έκαναν επιστήμονες κατά τα τέλη της δεκαετίας του '90 σύμφωνα με την οποία όταν η άλγη στερείται θείου αλλάζει την δραστηριότητα της από την παραγωγή οξυγόνου σε παραγωγή υδρογόνου.

Σήμερα αυτού του είδους η παραγωγή είναι οικονομικά βιώσιμη αφού μπορεί να ξεπεραστεί η οριακή απόδοση της τάξεως του 7 – 10% που αντιστοιχεί στην μετατροπή της ηλιακής ενέργειας σε υδρογόνο. Ενώ μέχρι σήμερα η διαδικασία της φωτοσύνθεσης απέδιδε υδρογόνο κάνοντας χρήση της ηλιακής ακτινοβολίας με απόδοση το πολύ 7 – 10%.

Μία άλλη μέθοδος βασιζόμενη σε βιολογικές διεργασίες αφορά στην χρήση αποβλήτων αντί για άλγη. Η διαδικασία αυτή εμπλέκει την κατανάλωση των υδρογονανθράκων από τα βακτήρια και την εκπνοή από αυτά υδρογόνου και διοξειδίου. Το διοξείδιο μπορεί να απομονωθεί και να απορριφθεί με διάφορες μεθόδους (βλ. παραπάνω) και το υδρογόνο να ληφθεί προς εκμετάλλευση. Ένα πρωτότυπο τέτοιου βιοαντιδραστήρα λειτουργεί στο εργοστάσιο παραγωγής χυμού σταφυλιού Welch's στην βορειοανατολική Πενσυλβάνια.

- Ηλεκτρόλυση

Η παραγωγή του υδρογόνου είναι επίσης δυνατή από καθαρά χημική οδό διαμέσου της ηλεκτρόλυσης. Βασιζόμενη σε ανανεώσιμες ενέργειες όπως η υδροηλεκτρική, αιολική ή φωτοβολταϊκή, η ηλεκτρόλυση παράγει υδρογόνο από νερό χωρίς καμία επιβάρυνση στο περιβάλλον. Συνήθως η ηλεκτρική ενέργεια που καταναλώνεται κοστίζει περισσότερο από τα κέρδη που αποφέρει το υδρογόνο που παράγεται, γι' αυτό δεν είχε βρει ευρεία εφαρμογή στο παρελθόν αυτή η μέθοδος. Το γεγονός όμως ότι η ηλεκτρόλυση υψηλής πίεσης είναι μία από τις πιο «καθαρές» και παραγωγικές μεθόδους παραγωγής υδρογόνου προσδίδει σε αυτή μεγαλύτερη σημασία, όσο αυξάνεται ο πληθυσμός των ανθρώπων και παράλληλα η ρύπανση του περιβάλλοντος. Επιπλέον η ηλεκτρόλυση θα γίνει ακόμα πιο ανταγωνιστική οικονομικά καθώς οι μη ανανεώσιμες πηγές (με βάση τον άνθρακα) φθίνουν και οι κυβερνήσεις αρχίζουν να αποσύρουν τις επιδοτήσεις για έρευνα και εκμετάλλευση καυσίμων με βάση τον άνθρακα.

Ηλεκτρόλυση υψηλής πίεσης:

Η ηλεκτρόλυση υψηλής πίεση είναι η διάσπαση του νερού σε οξυγόνο και υδρογόνο με παροχή συμπιεσμένου υδρογόνου πίεσης 120 – 200 Bar. Η μέση κατανάλωση ενέργειας για την εσωτερική συμπίεση κυμαίνεται γύρω στο 3%.

Ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας:

Όταν η ενέργεια παρέχεται υπό την μορφή θερμότητας (ηλιακή, πυρηνική), τότε η καλύτερη μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση υψηλής θερμοκρασίας (ΗΥΘ). Οι θερμοκρασίες λειτουργίας αυτής της μεθόδου κυμαίνονται από 100 °C έως 850 °C. Αντίθετα με την χαμηλής θερμοκρασίας, μετατρέπει περισσότερη από την αρχική θερμότητα σε χημική ενέργεια διπλασιάζοντας έτσι την απόδοση σε 50%. Αυτή η μέθοδος μελετάται συνήθως μόνο για εφαρμογές στις οποίες έχουμε παροχή θερμότητας από πυρηνικές διεργασίες κι αυτό γιατί η άλλη πηγή (ηλιακοί συλλέκτες) υψηλών θερμοτήτων δεν είναι αρκετά αξιόπιστη ώστε να μπορεί να κατεβάσει το αρχικό κόστος του εξοπλισμού. Η έρευνα πάνω στην ΗΥΘ και στους πυρηνικούς αντιδραστήρες μπορεί εν τέλει να οδηγήσει σε μια παροχή υδρογόνου αρκετά ανταγωνιστική οικονομικά. Μέχρι τώρα η ΗΥΘ έχει εφαρμοστεί εργαστηριακά αλλά όχι σε εμπορική κλίμακα.

- Πυρηνική

Τα πρωτότυπα των πυρηνικών αντιδραστήρων τέταρτης γενιάς λειτουργούν σε θερμοκρασίες 850 – 1000 βαθμών κελσίου, αρκετά υψηλότερα από τους υπάρχοντες αντιδραστήρες. Η εταιρία General Atomics προβλέπει ότι το υδρογόνο που θα μπορούσε να παραχθεί από ένα αερόψυκτο αντιδραστήρα υψηλής θερμοκρασίας θα κόστιζε 1,53\$/kg. Το 2003 η αναμόρφωση του φυσικού αερίου με ατμό απέδωσε υδρογόνο στα 1,40\$/kg, ακόμα το 2005 το υδρογόνο κόστιζε 2,70\$/kg. Επομένως μόνο στις Ηνωμένες Πολιτείες μπορούν να εξοικονομηθούν δεκάδες δισ. δολαρίων το χρόνο μόνο με την παροχή πυρηνικής ενέργειας.

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα ενός πυρηνικού αντιδραστήρα που παράγει και ηλεκτρισμό και υδρογόνο, είναι το ότι μπορεί να μεταπηδήσει από το ένα στο άλλο. Για παράδειγμα θα μπορούσε να παράγει ηλεκτρική ενέργεια το πρωί και υδρογόνο το βράδυ ακολουθώντας δηλαδή το προφίλ της καθημερινής αυξομείωσης της ζήτησης. Αν επιτευχθεί η οικονομική παραγωγή του υδρογόνου το παραπάνω σχέδιο θα μπορούσε να ανταγωνιστεί επάξια τα υπάρχοντα συστήματα αποθήκευσης δικτυακής ενέργειας. Οι αντιδραστήρες 4^{ης} γενιάς όμως δεν θα είναι διαθέσιμοι μέχρι το 2030 και δεν είναι σίγουρο αν μέχρι τότε θα μπορέσουν να ανταγωνιστούν το σχέδιο της διάσπαρτης και αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας.

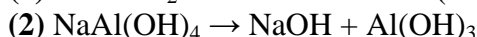
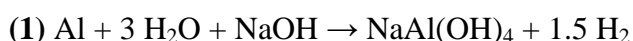
- Με ηλιακούς συλλέκτες

Η υψηλές θερμοκρασίες που είναι απαραίτητες για την διάσπαση του νερού μπορούν να επιτευχθούν μέσω συγκεντρωμένης ηλιακής ενέργειας. Το

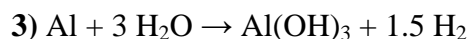
Hydrosol-2 είναι ένα πιλοτικό σύστημα 100 κιλοβάτ στο ηλιακό πάρκο της Αλμερίας στην Ισπανία, το οποίο χρησιμοποιεί την ηλιακή ενέργεια για να πετύχει τη θερμοκρασία των 800 – 1200 βαθμών κελσίου που χρειάζεται η διάσπαση του νερού. Η εγκατάσταση αυτή λειτουργεί από το 2008 και είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να έχει μεταβλητό χαρακτήρα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να μπορεί η εγκατάσταση να αυξήσει την επίδοση της σε επίπεδα μεγαβατ με τον πολλαπλασιασμό των αντιδραστήρων και με την σύζευξή τους με επιπλέον ηλιοστάτες (κάτοπτρα που ακολουθούν την κίνηση του ήλιου)

-Χημική παραγωγή

Χρησιμοποιώντας υδροξείδιο του νατρίου για καταλύτη, το αλουμίνιο και τα κράματά του αντιδρούν με το νερό και απελευθερώνεται υδρογόνο. Η αρχική αντίδραση καταναλώνει υδροξείδιο του νατρίου και παράγει υδρογόνο και ως παραπροϊόν αλουμινάτη. Στο σημείο κορεσμού η αλουμινάτη αποσυντίθεται σε υδροξείδιο του νατρίου και σε κρυσταλλικό υδροξείδιο του αλουμινίου. Η διαδικασία ομοιάζει με την διαδικασία σε μία μπαταρία αλουμινίου.



Η ολική αντίδραση περιγράφεται από την αντίδραση (3)



Σε αυτή την διαδικασία το αλουμίνιο λειτουργεί ως μία συσκευή αποθήκευσης υδρογόνου αφού 1 kg αλουμινίου μπορεί θεωρητικά να παράγει μέχρι και 0,111 kg υδρογόνου.

- Θερμοχημική παραγωγή

Υπάρχουν πάνω από 352 θερμοχημικοί κύκλοι οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την διάσπαση του νερού ή την υδρόλυση. Περίπου δώδεκα από αυτούς βρίσκονται ύπο έρευνα και σε στάδιο δοκιμών για την παραγωγή υδρογόνου, οξυγόνου και θερμότητας χωρίς την χρήση ηλεκτρισμού. Αφού όλη η εισαγόμενη ενέργεια για αυτές τις διεργασίες είναι θερμότητα, μπορούν να αποδειχθούν πιο αποδοτικές από την ΗΥΘ. Αυτό γιατί η αποδοτικότητα της παραγωγής ηλεκτρισμού έχει εγγενείς περιορισμούς. Η θερμοχημική παραγωγή υδρογόνου χρησιμοποιώντας χημική ενέργεια από γαιάνθρακα ή φυσικό αέριο δεν εξετάζεται γιατί η απευθείας χημική οδός είναι πιο αποδοτική. Οι πιο αποδοτικές χημικές μέθοδοι από αυτές που έχουν εξεταστεί είναι οι παρακάτω:

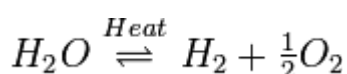
- Κύκλος $\text{CeO}_2/\text{Ce}_2\text{O}_3$
- Κύκλος οξειδίων του σιδήρου
- Κύκλος Θείου Ιωδίου

- Κύκλος Δημητρίου Χλωρίου
- Κύκλος Σιδήρου Χλωρίου
- Κύκλος Μαγνησίου Ιωδίου
- Κύκλος Βαναδίου Χλωρίου
- Κύκλος Χαλκού Θειώδους
- Κύκλος Ψευδάργυρου οξειδίου του Ψευδαργύρου

Υπάρχουν ακόμη υβριδικές μέθοδοι οι οποίες είναι θερμοχημικές διεργασίες με ηλεκτροχημικά βήματα όπως:

- Υβριδικός Κύκλος Θείου
- Κύκλος Χαλκού Χλωρίου

Όλες οι διεργασίες συνοψίζονται στην παρακάτω αντίδραση η οποία είναι η διάσπαση του νερού:



Όλα τα υπόλοιπα χημικά που χρησιμοποιούνται ανακυκλώνονται. Κανένας από τους παραπάνω κύκλους δεν έχει εφαρμοστεί σε επίπεδα παραγωγής αν και αρκετοί έχουν επιδειχθεί σε εργαστήρια

-Φωτοηλεκτροχημική διάσπαση

Η χρήση ηλεκτρισμού από φωτοβολταϊκά είναι ένας από τους καθαρότερους τρόπος για την παραγωγή υδρογόνου. Η διάσπαση γίνεται ουσιαστικά με ηλεκτρόλυση σε κυψέλες PEC (photoelectrochemical cell) και ονομάζεται τεχνητή φωτοσύνθεση.

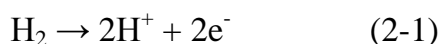
1.1.3 Άλλες μέθοδοι

- Η τεχνητή φωτοσύνθεση εξελίσσεται μέσω νανοτεχνολογίας
- Η ριζοσπαστική θεωρία της Υδριδικής γης σύμφωνα με την οποία τεράστιες ποσότητες υδρογόνου ενυπάρχουν στον μανδύα της γης
- Εκτεταμένη έρευνα γίνεται σε νανοσωματίδια τα οποία μπορούν να χαμηλώσουν την θερμοκρασία στην οποία διασπάται το νερό.

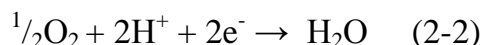
1.1.4 Η ενέργεια του υδρογόνου

Οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις σε ένα fuel cell λαμβάνουν χώρα ταυτόχρονα και στις δύο πλευρές της μεμβράνης – στην άνοδο και στην κάθοδο. Σύμφωνα με τα προαναφερθέντα οι αντιδράσεις είναι

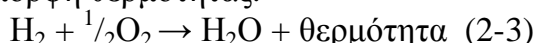
Στην άνοδο:



Στην κάθοδο:=



Η συνολική αντίδραση είναι ίδια με αυτή της καύσης του υδρογόνου. Η καύση ως γνωστόν είναι εξώθερμη αντίδραση που σημαίνει ότι έχουμε απελευθέρωση ενέργειας με την μορφή θερμότητας.



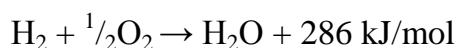
Η θερμότητα (ή ενθαλπία) μιας χημικής αντίδρασης είναι η διαφορά μεταξύ των θερμοτήτων σχηματισμού των αντιδρώντων και των προϊόντων. Συνεπώς από τα προηγούμενα λαμβάνουμε:

$$\Delta H = (h_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (h_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(h_f)_{\text{O}_2} \quad (2-4)$$

Η θερμότητα σχηματισμού του νερού είναι -286 kJ/mol (στους 25°C) και αφού η θερμότητα σχηματισμού των στοιχείων είναι εξ' ορισμού μηδενική τότε:

$$\Delta H = (h_f)_{\text{H}_2\text{O}} - (h_f)_{\text{H}_2} - \frac{1}{2}(h_f)_{\text{O}_2} = -286 \text{ kJ/mol} - 0 - 0 = -286 \text{ kJ/mol} \quad (2-5)$$

Ως γνωστόν το αρνητικό πρόσημο στην ενθαλπία μιας χημικής αντίδρασης σημαίνει κατά σύμβαση ότι απελευθερώνεται θερμότητα κατά την αντίδραση, που σημαίνει ότι είναι εξώθερμη. Εν κατακλείδι η αντίδραση (2-3) γίνεται



Στην παραπάνω αντίδραση το πρόσημο στην αποδιδόμενη θερμότητα είναι θετικό που σημαίνει ότι η θερμότητα αυτή είναι προϊόν της αντίδρασης (ισχύει στους 25°C και σε πίεση 1 ατμόσφαιρας). Συνεπώς η ενέργεια αυτή είναι αυτή που απελευθερώνεται με την καύση 1 mol μορίου του υδρογόνου. Άρα θεωρητικά αποτελεί και την ενέργεια που αποδίδεται κατά την καύση 1 mol υδρογόνου στα fuel cell. Δυστυχώς όμως όπως θα δούμε παρακάτω δεν μπορεί όλη αυτή η ενέργεια να μετατραπεί σε έργο από την κυψέλη.

Η ενθαλπία της αντίδρασης της καύσης του υδρογόνου ονομάζεται και θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου και αντιστοιχεί στο ποσό θερμότητας που μπορεί να παραχθεί από την πλήρη καύση 1 mol του υδρογόνου. Σε μία θερμοδομετρική βόμβα αν το υδρογόνο καεί στοιχειομετρικά με οξυγόνο και αφεθεί να ψυχθεί στους 25°C και στη 1 ατμόσφαιρα τότε θα παραμείνει μόνο νερό σε υγρή μορφή. Η ένδειξη τότε θα είναι 286 kJ θερμότητας. Αυτή η θερμότητα είναι γνωστή ως η άνω θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου. Αντίθετα αν η καύση γίνει με περίσσεια οξυγόνου τότε στους 25°C δεν θα παραμένει μόνο νερό σε υγρή μορφή αλλά και υδρατμοί αναμεμειγμένοι με οξυγόνο και άζωτο στην περίπτωση που γίνει χρήση ατμοσφαιρικού αέρα. Τότε η ένδειξη θα είναι μικρότερη και ίση προς 241 kJ . Αυτή είναι γνωστή ως η κάτω θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου. Σημειωτέον ότι η διαφορά ανάμεσα στις θερμογόνες δυνάμεις είναι η θερμότητα εξαέρωσης του νερού. Η θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου χρησιμοποιείται ως μονάδα μέτρησης της ενεργειακής τροφοδότησης του fuel cell. Σε κάθε χημική αντίδραση παράγεται εντροπία και έτσι μέρος της θερμογόνου δύναμης του υδρογόνου δεν μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμο έργο (δηλ. ηλεκτρισμό). Το μέρος της θερμογόνου δύναμης που μπορεί να μετατραπεί σε χρήσιμο έργο σε ένα fuel cell δίδεται από την εξίσωση ελεύθερης ενέργειας Gibbs:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

Με άλλα λόγια υπάρχουν κάποιες μη αναστρέψιμες απώλειες λόγω της αύξησης της εντροπίας. Όπως η ΔH είναι η διαφορά ενθαλπίας μεταξύ αντιδρώντων και προϊόντων, έτσι και η ΔS είναι η διαφορά εντροπίας μεταξύ των αντιδρώντων και των προϊόντων.

Έτσι στους 25 °C από τα 286.02 kJ/mol διαθέσιμης ενέργειας μόνο τα 237,34 kJ/mol μπορούν να μετατραπούν σε ωφέλιμο έργο ενώ τα υπόλοιπα μετατρέπονται σε θερμότητα.

Για να υπολογίσουμε τις τιμές της ενέργειας Gibbs για τις πιέσεις και θερμοκρασίες λειτουργίας στο fuel cell και στον ηλεκτρολύτη καταλήγουμε στον παρακάτω τύπο:

$$\Delta G = \Delta G_o + RT \ln\left(\frac{P_{H_2O}}{P_{H_2}P_{O_2}^{0.5}}\right)$$

Όπου P οι πιέσεις και μερικές πιέσεις των αερίων, T η θερμοκρασία στην οποία συντελείται η αντίδραση και G_o η ενέργεια Gibbs σε κανονικές (25 °C, 1 atm). Έτσι στο σύστημα το οποίο αποτελεί αντικείμενο μελέτης της παρούσης διπλωματικής οι τιμές στο fuel cell και στον ηλεκτρολύτη θα είναι:

228 kJ/mol στο fuel cell

231 kJ/mol στην ηλ/ση.

Για λόγους όμως που αφορούν το βαθμό απόδοσης των δύο μηχανισμών αλλά και των συστημάτων υποστήριξης καθώς και των απωλειών που παρατηρούνται κατά την διανομή και την λειτουργία των μηχανισμών, η τιμή που χρησιμοποιούν οι κατασκευαστές για τον υπολογισμό των ενεργειακών ισολογισμών σε αντίστοιχα συστήματα είναι 4,5 kWh/mol υδρογόνου.

2.1 Οι Κυψέλες Καυσίμου

2.1.1 Ιστορικό

Η χρονολόγηση των εξελίξεων που οδήγησαν σε ένα λειτουργικό fuel cell μπορεί να φτάσει μέχρι τις αρχές του 19^{ου} αιώνα και τον Sir William Grove, ο οποίος αναγνωρίζεται ως ο εφευρέτης το 1839. Όλο το υπόλοιπο του αιώνα οι επιστήμονες επιχείρησαν να εξελίξουν τα fuel cells με την χρήση ποικίλων καυσίμων και ηλεκτρολυτών. Επιπλέον εργασία στο πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα οδήγησε στην θεμελίωση συστημάτων τα οποία αργότερα χρησιμοποιήθηκαν στις διαστημικές πτήσεις του Gemini και του Apollo. Παρ' όλ' αυτά, μόλις το 1959 ο Francis T. Bacon κατάφερε να επιδείξει με επιτυχία το πρώτο πλήρως λειτουργικό fuel cell.

Τα fuel cells με μεμβράνη πρωτονιακής συναλλαγής (PEM) χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά από τη NASA τη δεκαετία του 1960 ως μέρος του διαστημικού προγράμματος Gemini και πήραν μέρος σε 7 αποστολές. Αυτά τα fuel cell χρησιμοποιούσαν καθαρό οξυγόνο και υδρογόνο και ήταν μικρής κλίμακας, ακριβά και μη βιώσιμα εμπορικά. Το ενδιαφέρον της NASA καθώς και η ενεργειακή κρίση του '73 ώθησε περαιτέρω την εξέλιξη. Από

τότε η έρευνα πάνω στα fuel cells συνεχίζεται απρόσκοπτα και τα fuel cells έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε ένα μεγάλο εύρος εφαρμογών.



2.1.2 Πλεονεκτήματα και Μειονεκτήματα

Τα fuel cells συνήθως συγκρίνονται με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και τις μπαταρίες και προσφέρουν μοναδικά προτερήματα αλλά και μειονεκτήματα αναφορικά με αυτές.

Πλεονεκτήματα:

- 1) Τα συστήματα αυτά λειτουργούν χωρίς να επιβαρύνουν το περιβάλλον όταν δουλεύουν με καθαρό υδρογόνο. Τα μόνα παράγωγα της λειτουργίας τους είναι νερό και θερμότητα. Όταν δουλεύουν με μείγματα αναμορφωμένων αερίων υψηλής περιεκτικότητας σε υδρογόνο, προκύπτουν κάποιες βλαβερές εκπομπές, λιγότερες όμως από αυτές που προκύπτουν από την λειτουργία μιας μηχανής εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιεί συμβατικά ορυκτά καύσιμα. Πάντως οι μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν με ισχνά μείγματα υδρογόνου και αέρα εκλύουν –και αυτές- προϊόντα χαμηλού μολυσματικού επιπέδου που προκύπτουν κυρίως από την τυχαία καύση του λιπαντικού μέσου (λάδι).
- 2) Τα συστήματα fuel cell λειτουργούν με μεγαλύτερη θερμοδυναμική απόδοση από ότι οι θερμικές μηχανές. Οι θερμικές μηχανές όπως οι Μ.Ε.Κ. και οι στρόβιλοι, μετατρέπουν την χημική ενέργεια σε θερμότητα μέσω καύσης/συμπύεσης και χρησιμοποιούν αυτή τη θερμότητα στη παραγωγή έργου. Ο βέλτιστος (ή κατά Carnott) βαθμός θερμοδυναμικής απόδοσης είναι γνωστός, ίσος προς :_

Απόδοση_{max}=

Όπου :

T_1 = απόλυτη θερμοκρασία

$$1 - \frac{T_2}{T_1}$$

του εισερχόμενου αερίου

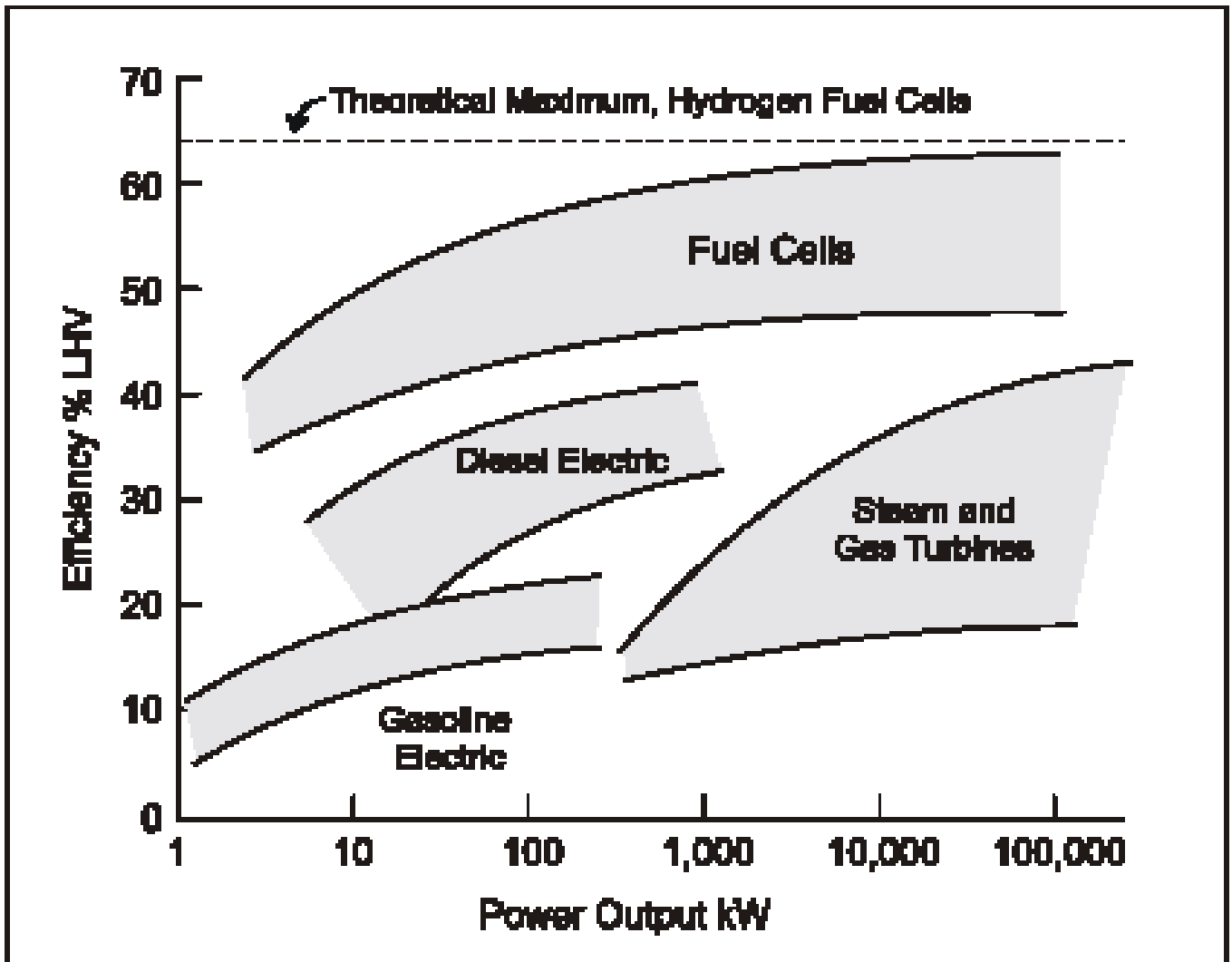
(θερμό, σε K)

$T_2 =$ απόλυτη θερμοκρασία εξερχόμενου αερίου (ψυχρό, σε K)

Παρατηρούμε ότι όσο πιο μεγάλη είναι η θερμοκρασία του εισερχομένου αέρα και όσο μικρότερη η θερμοκρασία του εξερχόμενου, τόσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσης. Συνεπώς, θεωρητικά μπορούμε να ανεβάσουμε την θερμοκρασία εισόδου σε πολύ μεγάλο βαθμό ώστε να επιτύχουμε την επιθυμητή απόδοση, αφού η θερμοκρασία του εξερχόμενου δεν μπορεί να είναι χαμηλότερη από την περιβαλλοντική.

Παρόλα αυτά, σε μία πραγματική μηχανή εσωτερικής καύσης το άνω όριο θερμοκρασίας υπάρχει και προφανώς περιορίζεται κυρίως από τα υλικά που χρησιμοποιούμε (πχ υλικά κατασκευής της μηχανής). . Επιπλέον, σε μία Μ.Ε.Κ. η θερμοκρασία εισόδου είναι η θερμοκρασία λειτουργίας της μηχανής και είναι πολύ χαμηλότερη από τη θερμοκρασία ανάφλεξης.

Αφού λοιπόν τα fuel cells δεν χρησιμοποιούν καύση/συμπύεση, η αποδοτικότητά τους δεν σχετίζεται με την μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας. Σαν αποτέλεσμα, η απόδοση του βήματος μετατροπής ισχύος (η πραγματική ηλεκτροχημική αντίδραση σε αντίθεση με τη πραγματική θερμική) μπορεί να είναι πολύ υψηλότερη. Η απόδοση της ηλεκτροχημικής αντίδρασης δεν είναι ίδια με την ολική απόδοση του συστήματος. Τα χαρακτηριστικά απόδοσης των fuel cells σε σύγκριση με τα υπόλοιπα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζονται στο σχήμα 2.



Σχ.2 Σύγκριση απόδοσης συστημάτων παραγωγής ενέργειας

- 3) Τα fuel cells έχουν υψηλότερη ειδική θερμική απόδοση από τις θερμικές μηχανές, επιπλέον παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση μερικού φορτίου και δεν παρουσιάζουν απότομη πτώση απόδοσης με την μείωση της ενεργειακής μονάδας. Οι θερμικές μηχανές λειτουργούν με μεγαλύτερη απόδοση όταν δρουν με την ταχύτητα σχεδιασμού των και παρουσιάζουν ραγδαία πτώση απόδοσης σε μερικό φορτίο.

Τα fuel cells, όπως και οι μπαταρίες, παρουσιάζουν υψηλότερη απόδοση σε μερικό φορτίο από ότι στο ολικό και με λιγότερες διακυμάνσεις καθ' όλο το φάσμα λειτουργίας. Η κατασκευή των fuel cells έχει ποικίλες μορφές και τα ίδια έχουν σταθερές αποδόσεις ανεξάρτητα από το μέγεθος. Οι αναμορφωτές, πάντως, έχουν μικρότερη αποδοτικότητα στο μερικό φορτίο τοιουτοτρόπως επηρεάζουν την ολική απόδοση ενός συστήματος που περιέχει και fuel cells.

- 4) Τα fuel cells παρουσιάζουν καλά χαρακτηριστικά απόκρισης στα φορτία. Αυτά, όπως και οι μπαταρίες (συσσωρευτές), είναι στερεές κατασκευές που αντιδρούν χημικώς και αμέσως σε αλλαγές του φορτίου. Τα συστήματα fuel cell, πάντως, αποτελούνται και από άλλες συσκευές εκτός από τα fuel cell (όπως είναι τα ηλεκτρονικά ελέγχου), η καθεμία από τις οποίες έχει το δικό της χρόνο απόκρισης στις αλλαγές της απαίτησης του φορτίου.

Παρόλα αυτά, τα συστήματα fuel cell που λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο τείνουν να έχουν άριστη ολική αντίδραση. Ενώ τα συστήματα fuel cell που λειτουργούν με αναμορφωμένο καύσιμο, χρησιμοποιώντας ενσωματωμένο αναμορφωτή, έχουν βραδεία συμπεριφορά, συγκεκριμένα αν χρησιμοποιούνται τεχνικές αναμορφώσεως με ατμό.

- 5) Όταν χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρικές συσκευές τα fuel cell απαιτούν λιγότερες ενεργειακές μετατροπές από αυτές που σχετίζονται με μία θερμική μηχανή. Όταν χρησιμοποιούνται ως μία συσκευή παραγωγής μηχανικής ενέργειας, τα fuel cells, απαιτούν τον ίδιο αριθμό μετατροπών ενέργειας, αν και οι στοιχειώδεις μετατροπές είναι διαφορετικές..

Κάθε ενεργειακή μετατροπή έχει και μία συγκεκριμένα ενεργειακή απώλεια τοιουτοτρόπως, μικρός αριθμός ενεργειακών μετατροπών σημαίνει μεγαλύτερη απόδοση. Συνεπώς η ιδανική χρήση των fuel cells σχετίζεται με εφαρμογές που χρειάζονται ηλεκτρική ενέργεια ως το τελικό προϊόν και σε κανένα στάδιο μηχανική. Δυνατότητα σύγκρισης για αυτές τις ενεργειακές μετατροπές στα συστήματα που αναφέρουμε μας παρέχει ο πίνακας των οδών ενεργειακών μετατροπών 3. Ο παρακάτω πίνακας θα βοηθήσει τον αναγνώστη να κατανοήσει καλύτερα τα περί ενεργειακών μετατροπών

Energy Transformations for Electrical Energy Output

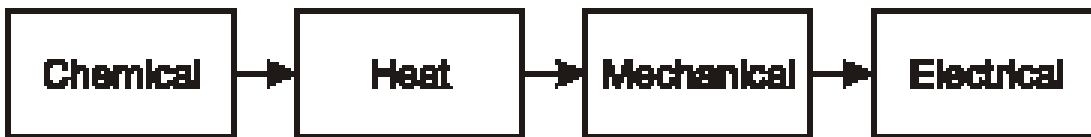
Fuel Cell:



Battery:

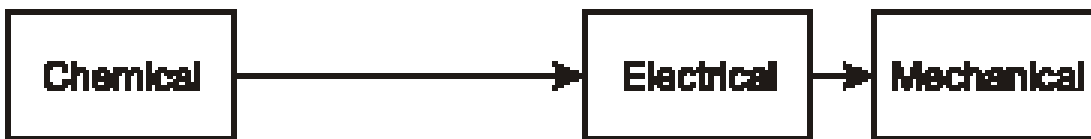


Heat Engine:

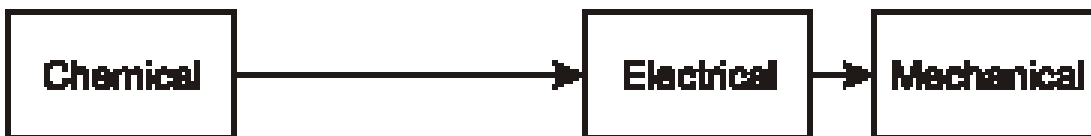


Energy Transformations for Mechanical Energy Output

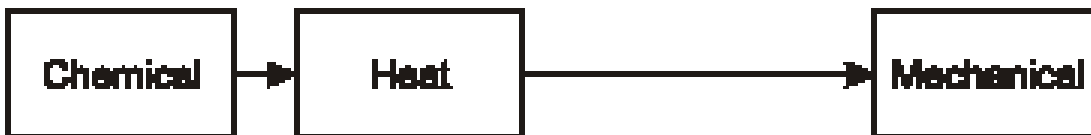
Fuel Cell:



Battery:



Heat Engine:



Σχ. 3 Συγκριτικό για ενεργειακές μετατροπές

- 6) Ο ρόλος των fuel cells ως γεννήτριες μπορεί να είναι πολλαπλός. Μαζί με την ηλεκτρική ισχύ, τα fuel cells παράγουν ζεστό νερό και μετρίου βαθμού θερμότητα που μπορούν να συνδυαστούν και να χρησιμοποιηθούν σε οικιακές και βιομηχανικές εφαρμογές. Όταν γίνεται αυτό η ολική απόδοση των συνδυασμένων συστημάτων αυξάνεται
- 7) Τα συστήματα fuel cell δεν χρειάζονται tuning (χρονισμό).
- 8) Τα συστήματα fuel cell δεν χρειάζονται αναφόρτιση. Χρειάζονται όμως αναπλήρωση καυσίμου, που είναι όμως γρηγορότερη από την αναφόρτιση μιας μπαταρίας και μπορεί να δώσει μεγαλύτερη αυτονομία ανάλογη με το μέγεθος της αποθηκευτικής δεξαμενής.

Τα συστήματα fuel cell παρουσιάζουν τα παρακάτω μειονεκτήματα:

- 1) Το υδρογόνο, ενώ όταν χρησιμοποιείται σε fuel cells είναι ευεργετικό περιβαλλοντικά, η φύση του προβάλλει τα μεγαλύτερα εμπόδια στην παρασκευή και αποθήκευσή του. Οι σύγχρονες παρασκευαστικές μέθοδοι είναι ακριβές και ενεργειακά δαπανηρές και συχνά έχουν ως πρώτη ύλη ορυκτά καύσιμα. Τα συστήματα αποθήκευσης αέριου υδρογόνου είναι ογκώδη και βαριά ώστε να ξεπερνιούνται οι περιορισμοί που προκύπτουν από την χαμηλή ογκομετρική πυκνότητα ενέργειας του υδρογόνου. Τα συστήματα αποθήκευσης υγρού υδρογόνου είναι πολύ μικρότερα και ελαφρύτερα, αλλά πρέπει να λειτουργούν σε θερμοκρασίες κρυογεννητικής. Εναλλακτικά, αν το υδρογόνο αποθηκεύεται σε μορφή υδρογονανθράκων ή αλκοολών και απελευθερώνεται με αναμόρφωση αυτών των ουσιών, τα προβλήματα αποθήκευσης και χειρισμού απλοποιούνται, αλλά κάποια από τα περιβαλλοντικά οφέλη χάνονται.
- 2) Κάποια fuel cells απαιτούν καύσιμα σχετικά αγνά. Καύσιμα απελευθερωμένα από συγκεκριμένες ουσίες όπως θείο, ανθρακικά παράγωγα και ιζηματικά ρευστά καύσιμα (όλα αυτά εξαρτώνται από τον τύπο του καυσίμου). Αυτές οι ουσίες μπορούν να απενεργοποιήσουν τον καταλύτη του fuel cell καταστρέφοντας την λειτουργία του. Σε αντίθεση οι μηχανές εσωτερικής καύσης δεν διατρέχουν τέτοιους κινδύνους.
- 3) Τα fuel cells που ενδείκνυνται για εφαρμογές στο τομέα των οχημάτων, απαιτούν συνήθως τη χρήση καταλύτη από πλατίνα για να προωθηθεί η αντίδραση παραγωγής ενέργειας. Ως γνωστόν η πλατίνα είναι ένα πολύ σπάνιο και πολύ ακριβό μέταλλο.
- 4) Δεν πρέπει να αφήνεται νερό μέσα στα fuel cells να παγώνει. Τα fuel cells κατά την αντίδραση παραγωγής ενέργειας, παράγουν καθαρό νερό και τα περισσότερα από αυτά που χρησιμοποιούνται σε οχήματα λειτουργούν με αέρια σε μορφή ατμού. Αν τυχόν παραμένον νερό αφηθεί να παγώσει μέσα στη κυψέλη, μπορεί να προκαλέσει

ανεπανόρθωτη ζημιά κατά την διαστολή του. Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας του ένα σύστημα κυψελών μπορεί να παράγει αρκετή ενέργεια ώστε να εμποδίσει το πάγωμα σε κανονικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Όταν όμως απενεργοποιηθεί, το fuel cell πρέπει να διατηρηθεί ζεστό, ή τουλάχιστον να απομακρυνθεί το εναπομένον νερό πριν αυτό παγώσει. Αυτό επιβάλλει την τοποθέτηση του οχήματος που διαθέτει τις κυψέλες, σε θερμαινόμενη εγκατάσταση, ή την χρήση επιμέρους θερμαντικής συσκευής με θερμό αέρα.

- 5) Τα fuel cells που χρησιμοποιούν μεμβράνες ανταλλαγής πρωτονίων δεν πρέπει να χάνουν την υγρασία τους κατά την λειτουργία τους και πρέπει να παραμείνουν υγρά και κατά την αποθήκευσή τους. Κάθε προσπάθεια να εκκινήσει ένα fuel cell τέτοιου τύπου ή εν γένει να λειτουργήσει σε ξηρές συνθήκες μπορεί να οδηγήσει σε βλάβη της μεμβράνης του.
- 6) Τα fuel cells απαιτούν πολύπλοκα συστήματα υποστήριξης και ελέγχου. Από μόνα τους είναι στέρεες συσκευές, όμως τα συστήματα υποστήριξής τους όχι. Άξιο σημείωσης είναι η αυξημένη ανάγκη για πεπιεσμένο αέρα. Η ανάγκη αυτή επιτάσσει την παρουσία πολύστροφου συμπιεστή ο οποίος επιβάλλει ένα μεγάλο παρασιτικό φορτίο σ' όλο το σύστημα. Η πολυπλοκότητα του συστήματος αυξάνει όταν το εν λόγω fuel cell λειτουργεί συνδεδεμένο με ενσωματωμένο αναμορφωτή.
- 7) Τα συστήματα fuel cell είναι βαριά. Τα ίδια τα fuel cell δεν είναι υπερβολικά βαριά, αλλά το συνδυασμένο βάρος των fuel cell με τα συστήματα υποστήριξης και των αποθηκών καυσίμου είναι, προς το παρόν, μεγαλύτερο από μία συμβατική μηχανή εσωτερικής καύσης. Επίσης, συστήματα που περιλαμβάνουν ενσωματωμένο αναμορφωτή, είναι ακόμα βαριά. Τα συστήματα fuel cell είναι ελαφρύτερα από συστήματα μπαταριών (συσσωρευτών) παρότι τα δεύτερα χρειάζονται λιγότερο εξοπλισμό υποστήριξης. Το βάρος των συστημάτων θα συνεχίσει να μειώνεται καθώς αναπτύσσεται η τεχνολογία. Ήδη υπάρχοντα πρωτότυπα οχήματα με fuel cell έχουν δείξει ότι αυτά τα συστήματα μπορούν να γίνουν αρκετά συμπαγή και συνεπτυγμένα ώστε να βρουν εφαρμογή στην αυτοκίνηση.

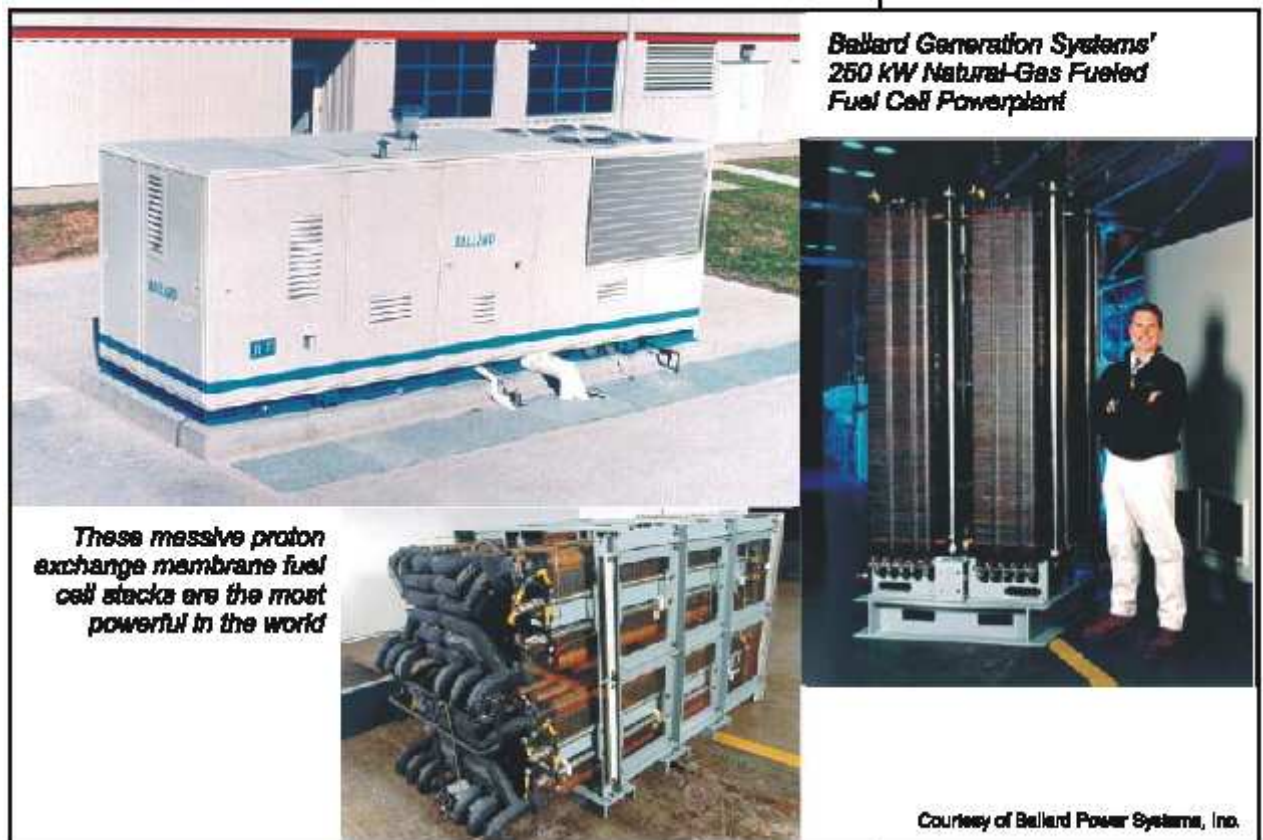
2.1.3 Εφαρμογές

Τα fuel cells ή αλλιώς κυψέλες καυσίμου έχουν ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών, από βιομηχανικές εγκαταστάσεις μέχρι μικρές φορητές μονάδες.

Σταθμοί Παραγωγής ενέργειας (stationary power plants)

Οι εφαρμογές στο τομέα αυτό έχουν παρουσιαστεί σε ένα μεγάλο αριθμό πιλοτικών προγραμμάτων με την χρήση μεγάλης ποικιλίας τεχνολογιών fuel cell. Μια από τις μεγαλύτερες μονάδες PEM που κατασκευάστηκε έως σήμερα είναι η Ballard Generation Systems 250 kW. Μία μονάδα με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων η οποία δουλεύει με φυσικό αέριο και χρησιμοποιείται σε πολλά μέρη σ' όλο τον κόσμο. Αν και η ισχύς των 250 kW είναι σχετικά μικρή, είναι επαρκής για να καλύψει τις ανάγκες μίας απομονωμένης κοινότητας ή για να δρα ως εναλλακτική πηγή για την υποστήριξη ευπαθών- ευαίσθητων εγκαταστάσεων όπως τα νοσοκομεία.

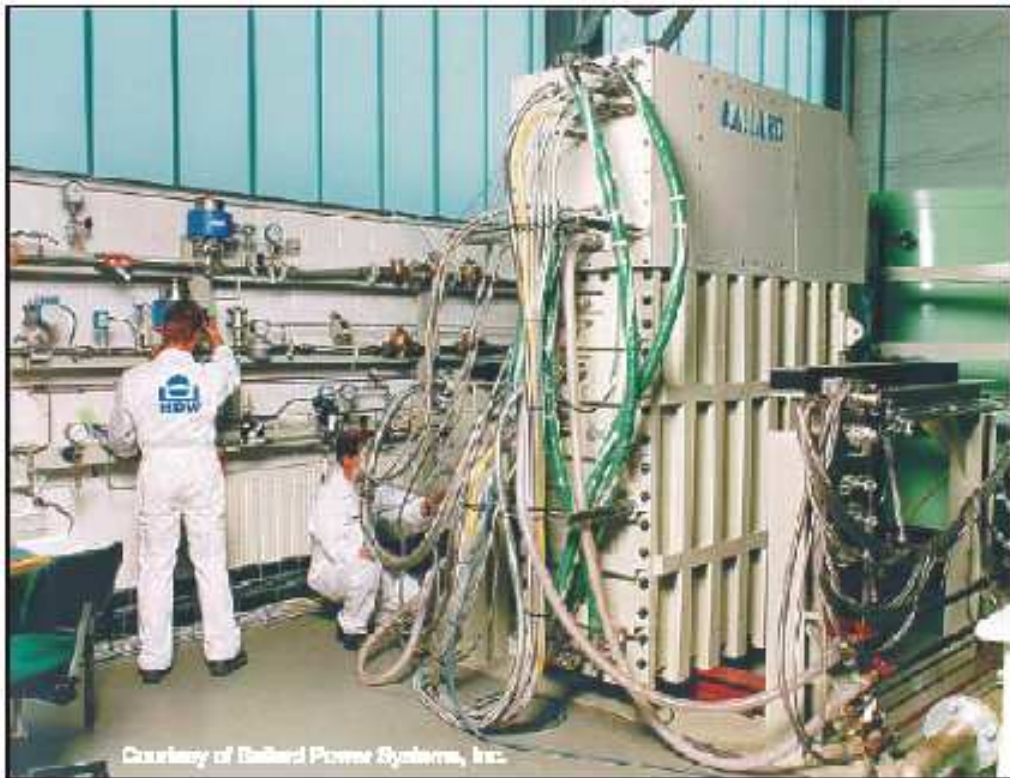
Οι σταθμοί παραγωγής ενέργειας είναι οι πιο κατάλληλοι για λειτουργία με συμβατικά καύσιμα, όπως το φυσικό αέριο, το οποίο μπορεί να οδηγηθεί με αγωγούς στη μονάδα και να αναμορφωθεί επί τόπου. Σ' αυτές τις εφαρμογές το μέγεθος της εγκατάστασης όπως και ο χρόνος προθέρμανσης δεν αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την απόδοση του συστήματος. Μαζί με την υψηλή απόδοση λειτουργίας, τις χαμηλές εκπομπές ρύπων, και την καλή απόκριση (χαρακτηριστικό των συστημάτων κυψελών), τα συστήματα fuel cell ως ακίνητες μονάδες παραγωγής ενέργειας ,παράγουν και μεγάλα ποσά θερμού νερού και θερμότητας τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν κατευθείαν από την τοπική κοινότητα, αυξάνοντας έτσι το βαθμό απόδοσης του συστήματος.



Σχ.4 Η μονάδα παραγωγής ενέργειας της Ballard generation systems

Υποβρύχια

Τα συστήματα που μελετούμε είναι ιδανικά για εφαρμογές που σχετίζονται με τα στρατιωτικά υποβρύχια, για τα πολύ χαμηλά επίπεδα θορύβου και τα στίγματα τους σε υπέρυθρη ακτινοβολία. Είναι σε πολλά επίπεδα, καλοί αντικαταστάτες, των μπαταριών που προς το παρόν χρησιμοποιούνται για να παρέχουν ισχύ σε πολλά υποβρύχια. Όπως και με τις σταθερές μονάδες παραγωγής ενέργειας που αναφέραμε παραπάνω, το θερμό νερό που παράγουν μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για άλλους σκοπούς μέσα στο σκάφος. Τα τελευταία χρόνια έχουν κατασκευαστεί αρκετά πρωτότυπα συστήματα με καθαρά αντιδρώντα και ενσωματωμένους αναμορφωτές.



Σχ.5 Μονάδα παραγωγής ενέργεια υποβρυχίου με fuel cells
Λειτουργεί με καθαρό υδρογόνο και οξυγόνο
(Από την Ballard Generation Systems)

Λεωφορεία

Η μεγαλύτερη εμπορική εξέλιξη σε εφαρμογές των fuel cells έχει παρατηρηθεί στα λεωφορεία. Συγκεκριμένα η εταιρία XCELLSIS fuel cell engines Inc, έφερε σε πέρας με μεγάλη επιτυχία προγράμματα παρουσίασης της καινούργιας τεχνολογίας, με την εισαγωγή στην κυκλοφορία τριών λεωφορείων στο Vancouver, το Chicago και το Palm Springs των Η.Π.Α. Στο εγγύς μέλλον υπάρχει η πεποίθηση ότι θα αναλάβουν υπηρεσία και άλλα λεωφορεία σε ένα μεγάλο μέρος της Ευρώπης και σε άλλες περιοχές του κόσμου. Όλα αυτά θα λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο το οποίο θα βρίσκεται αποθηκευμένο σε μορφή αερίου υψηλής συμπίεσης, ενώ κάποια άλλα οχήματα επίδειξης χρησιμοποιούν υγρά καύσιμα τα οποία και αναμορφώνονται σε ενσωματωμένους στο όχημα αναμορφωτές.

Τα λεωφορεία είναι ένα λογικό σημείο εκκίνησης για την εισαγωγή των fuel cells στον τομέα των μεταφορών και αυτό γιατί συνδυάζουν τα εξής πλεονεκτήματα :

Παρέχουν μία αρκετά ευρύχωρη πλατφόρμα ώστε να χωρούν τα εξαρτήματα του συστήματος και τις αποθήκες καυσίμου. Μπορούν να ανεφοδιάζονται σε

ένα κεντρικό σταθμό ανεφοδιασμού. Τέλος συντηρούνται τακτικά από εκπαιδευμένο προσωπικό.



Σχ 6 Τα πρωτότυπα λεωφορεία από την εταιρία XCELLSIS

Αυτοκίνητα

Η πιο ελκυστική αγορά για τους κατασκευαστές των fuel cells είναι η αγορά αυτοκινήτων κυρίως για τις ποσότητες που απαιτούνται. Ενώ τα αυτοκίνητα αποτελούν το κυριότερο κίνητρο για την εξέλιξη των fuel cells, καθότι είναι μέγιστοι συνεισφορείς στην ατμοσφαιρική ρύπανση, προβάλλουν μερικές από τις πιο μεγάλες προκλήσεις στην εμπορευματοποίηση. Μερικές από αυτές τις προκλήσεις είναι το μικρό τους μέγεθος, οι εκτεταμένες εγκαταστάσεις ανεφοδιασμού που απαιτούνται καθώς και η συνήθειες ασυνεπούς συντήρησης από το ευρύ κοινό. Επιπλέον, οι απαιτήσεις για επιδόσεις και αξιοπιστία είναι μεγάλες, αλλά το αναμενόμενο κόστος μικρό.

Μέσα σε αυτό το σκηνικό των προκλήσεων πολλές αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν ξεκινήσει προγράμματα μελέτης και εξέλιξης οχημάτων με fuel cells. Ανάμεσα σε αυτές είναι οι BMW, DAIMLER-CHRYSLER-BENZ, FORD, GENERAL MOTORS, NISSAN, MAZDA, SUBARU, TOYOTA, HONDA και η HYUNDAI. Κάποιες από αυτές τις εταιρίες έχουν κατασκευάσει αυτοκίνητα πρωτότυπα με ή χωρίς βοηθητικές μπαταρίες και με καύσιμο καθαρό υδρογόνο (σε αέρια ή υγρή μορφή) ή αναμορφωμένα καύσιμα.

Η έλλειψη υποδομής για την αποθήκευση - διακίνηση του υδρογόνου είναι ένα μεγάλο εμπόδιο για την χρήση των fuel cells στην αυτοκίνηση. Για να ξεπεράσουν αυτό το εμπόδιο πολλά πρωτότυπα χρησιμοποιούν ενσωματωμένο αναμορφωτή με μεθανόλη ως καύσιμο. Αξίζει να σημειωθεί ότι ερευνώνται και συστήματα με καύσιμο τη βενζίνη. Αυτό, απαλείφει κάποια από τα



προβλήματα διάθεσης και αποθήκευσης, αυξάνουν όμως το πλήθος των εξαρτημάτων που χρειάζεται να εγκατασταθούν στο αυτοκίνητο (συνεπώς αυξάνουν και το κόστος και την πολυπλοκότητα) και εισάγουν προβλήματα ελέγχου και επιδόσεων που σχετίζονται με τη λειτουργία των αναμορφωτών. Ακόμα, η χρήση του αναμορφωτή δεν εξαλείφει πλήρως τις επιβλαβείς εκπομπές ούτε και καταργεί την ανάγκη για ορυκτά καύσιμα. Κάποιες από τις αυτοκινητοβιομηχανίες έχουν δεσμευτεί να εισάγουν μοντέλα με fuel cell στη αγορά στις αρχές της πρώτης δεκαετίας αυτού του αιώνα. Αρχικά το πιο πιθανό είναι αυτά τα οχήματα να αποτελέσουν μέρη του στόλου αυτοκινήτων

των εταιριών, έτσι ώστε τα προβλήματα ανεφοδιασμού και συντήρησης να ελαχιστοποιηθούν.

Φορητές μονάδες



Σχ 8 Φορητά συστήματα fuel cell

Φορητές μονάδες fuel cell μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιαδήποτε εφαρμογή λειτουργούσε μέχρι τώρα με μπαταρίες. Ήδη είναι διαθέσιμες εμπορικές μονάδες που παρέχουν 1,2 kW ηλεκτρικής ισχύος.

2.1.4. Γενικότερες αρχές λειτουργίας των fuel cell

Τα fuel cells είναι συσκευές μετατροπής ενέργεια που μετατρέπουν απευθείας την χημική ενέργεια του καυσίμου σε ηλεκτρική χωρίς ενδιάμεσα μηχανικά ή θερμικά στάδια.

Ενέργεια εκλύεται οποτεδήποτε κάποιο καύσιμο αντιδρά –χημικά- με το οξυγόνο του αέρα. Σε μία μηχανή εσωτερικής καύσης η αντίδραση γίνεται με ανάφλεξη-καύση και η ενέργεια εκλύεται υπό τη μορφή θερμότητας, μέρος της οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή ωφέλιμου έργου όπως είναι η εξώθηση ενός πιστονιού. Στα fuel cells η ενέργεια εκλύεται υπό τη μορφή ενός συνδυασμού ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω ενός συνεχούς ρεύματος χαμηλής τάσης που παράγεται και θερμότητας. Η ηλεκτρική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή χρήσιμου έργου, ενώ η θερμότητα είτε χάνεται, είτε χρησιμοποιείται για άλλους σκοπούς.

Βασικό χαρακτηριστικό των fuel cells είναι ότι ο βαθμός κατανάλωσης του υδρογόνου και του οξυγόνου καθορίζεται από την ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος που καλείται να αποδώσει. Στην πράξη, μπορεί από ένα σύστημα fuel cell να ζητηθεί να καλύψει τις ανάγκες περισσότερου του ενός φορτίου, συνεπώς το μέγεθος της έντασης αυξάνεται.

Γαλβανικές κυψέλες

Τυπικά, όλες οι γαλβανικές κυψέλες αποτελούνται από δύο ηλεκτρόδια –την άνοδο και την κάθοδο- και ενός ηλεκτρολύτη. Το ανοδικό ή αρνητικό (καύσιμο-fuel) ηλεκτρόδιο είναι κατασκευασμένο από υλικό που οξειδώνεται εύκολα (αποβάλλει ηλεκτρόνια). Το καθοδικό ή θετικό (οξειδωτής) είναι κατασκευασμένο από υλικό το οποίο ανάγεται εύκολα (προσλαμβάνει ηλεκτρόνια). Όταν η άνοδος και η κάθοδος χρησιμοποιηθούν μαζί λαμβάνει χώρα μία αυτογενής αντίδραση οξειδαναγωγής. Με άλλα λόγια η άνοδος και η κάθοδος βρίσκονται σε υψηλή ενεργειακή στάθμη και επιθυμούν να αντιδράσουν για να πέσουν σε χαμηλότερη.

Για να γίνει μία χημική αντίδραση πρέπει τα στοιχεία να έρθουν σε επαφή, ώστε να μπορέσει να γίνει η ανταλλαγή ηλεκτρονίων και να δημιουργηθούν δεσμοί. Όταν η άνοδος έρθει σε άμεση επαφή με την κάθοδο τότε λαμβάνει χώρα αντίδραση στο σημείο επαφής. Κανένα ωφέλιμο έργο όμως δεν μπορεί να παραχθεί καθώς τα ηλεκτρόνια περνούν από την άνοδο στην κάθοδο και η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη διαδικασία χάνεται όλη υπό τη μορφή θερμότητας.

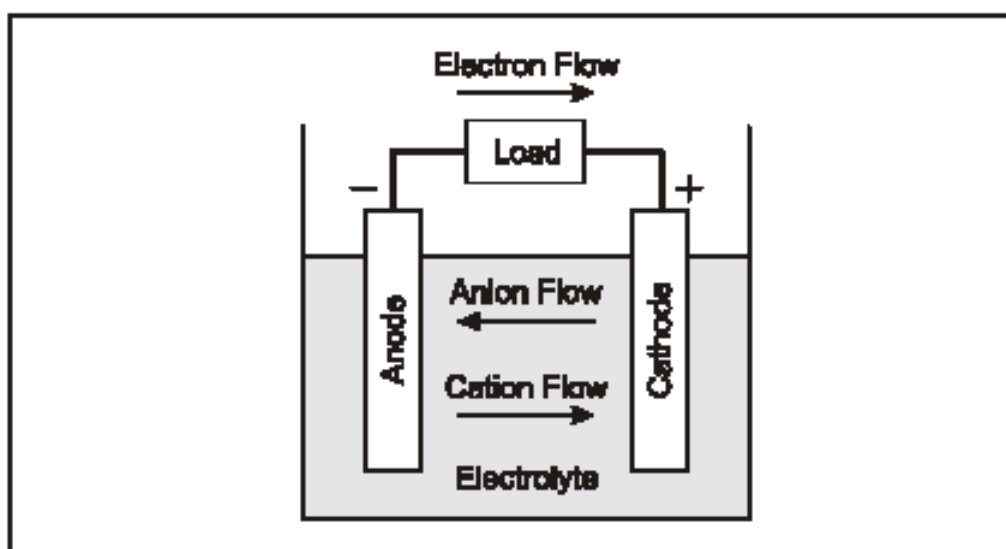
Για να μπορέσουμε να εκμεταλλευτούμε την παρεχόμενη χημική ενέργεια τα ηλεκτρόδια πρέπει να χωριστούν με τέτοιο τρόπο ώστε να επιτρέπεται η ροή των ηλεκτρονίων μέσω αγωγού από την άνοδο στην κάθοδο χωρίς όμως η απόσταση να είναι τέτοια ώστε να εμποδίζεται η αντίδραση. Για να μπορέσουμε να το πετύχουμε αυτό, παρεμβάλουμε μεταξύ ανόδου και καθόδου ένα **ηλεκτρολύτη**.

Ο ηλεκτρολύτης είναι μία ουσία που παράγει ιόντα. **Ιόν** είναι ένα άτομο ή μία ομάδα ατόμων που έχουν αποκτήσει ηλεκτρικό φορτίο κερδίζοντας ή χάνοντας ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια. Τα ιόντα τα οποία έχουν θετικό φορτίο έχοντας χάσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια λέγονται **κατιόντα**, ενώ ιόντα τα οποία έχουν αρνητικό φορτίο έχοντας κερδίσει ένα ή περισσότερα ηλεκτρόνια λέγονται **ανιόντα**.

Για παράδειγμα όταν το κοινό μαγειρικό αλάτι (NaCl) διαλύεται στο νερό δίνει ένα κατιόν νατρίου (Na⁺) και ένα ανιόν χλωρίου (Cl⁻). Όταν ένα ιόν κινείται μέσα στον ηλεκτρολύτη το φορτίο του κινείται και αυτό. Έτσι η

ιοντική κίνηση προσδίδει στον ηλεκτρολύτη αγωγιμότητα. Συνεπώς το αλμυρό νερό είναι πιο αγωγίμο από το γλυκό.

Παρότι ο ηλεκτρολύτης άγει ιόντα, δεν άγει ηλεκτρισμό. Ο ηλεκτρισμός είναι η ροή των ελεύθερων ηλεκτρονίων όπως γίνεται μέσα σε ένα μεταλλικό αγωγό. Αν ο ηλεκτρολύτης δρούσε όπως ο μεταλλικός αγωγός τότε η άνοδος και η κάθοδος θα βραχυκυκλώνονταν και θα είχαμε το ίδιο αποτέλεσμα με το αν τις φέρναμε σε άμεση επαφή. Είναι αυτός ο δυϊσμός ηλεκτρικής αγωγιμότητας και μόνωσης που επιτρέπει στο ηλεκτρολύτη να θέτει τις βάσεις λειτουργίας όλων των γαλβανικών κυψέλων.



Σχ.9 Λειτουργία γαλβανικών κυψέλων

Στην πράξη το υλικό της ανόδου διαλύεται μέσα στον ηλεκτρολύτη, δημιουργώντας κατιόντα και αφήνοντας ελεύθερα ηλεκτρόνια μέσα στην ίδια την άνοδο. Αυτά τα ηλεκτρόνια αποτελούν ένα επιπλέον αρνητικό φορτίο. Αντίστροφα και με τον ίδιο τρόπο η κάθοδος μαζεύει τα θετικά κατιόντα τα οποία προέρχονται είτε από την άνοδο είτε από την ουσία του ηλεκτρολύτη.

Η συσσώρευση των κατιόντων στη κάθοδο αποτελεί θετικό φορτίο. Συνεπώς υπάρχει διαφορά δυναμικού μεταξύ της ανόδου και της καθόδου αφού η μία είναι θετικά φορτισμένη σε σχέση με την άλλη και το αντίστροφο. Η κατάσταση αυτή όμως εξελίσσεται ωσότου επέλθει στο διάλυμα κορεσμός. Το φορτίο σ' αυτό το χρονικό σημείο μπορεί να μετρηθεί και ονομάζεται τάση ανοικτού κυκλώματος η οποία εξαρτάται από τα υλικά του συστήματος και σε κάποιο βαθμό και από τη θερμοκρασία της κυψέλης.

Η χημική αντίδραση μεταξύ ανόδου και καθόδου δεν μπορεί να ολοκληρωθεί όσο τα ηλεκτρόνια μένουν προσκολλημένα στην άνοδο. Αυτά τα ηλεκτρόνια

είναι απαραίτητα για το τελικό προϊόν της αντίδρασης και για την απόδοση της ενέργειας της αντίδρασης. Για να μπορέσουμε να ελευθερώσουμε τα ηλεκτρόνια, το ηλεκτρικό κύκλωμα πρέπει να ολοκληρωθεί με την τοποθέτηση ενός εξωτερικού αγωγού. Αν ο αγωγός έχει κάποια αντίσταση ή κάποιο καταναλωτή ηλεκτρικής ενέργειας, τότε η ροή των ηλεκτρονίων από την άνοδο στην κάθοδο παράγει ωφέλιμο έργο.

Μόλις η άνοδος και η κάθοδος συνδεθούν, το περίσσειμα των ηλεκτρονίων ρέει από την άνοδο στην κάθοδο ολοκληρώνοντας την αντίδραση. Καθώς η άνοδος χάνει τα επιπλέον ηλεκτρόνια και τοιουτοτρόπως και το αρνητικό της φορτίο, διαλύεται και απελευθερώνονται κι άλλα ιόντα ώστε να παραχθεί νέο περίσσειμα ηλεκτρονίων στην άνοδο. Αντίστοιχα καθώς η κάθοδος κερδίζει ηλεκτρόνια (από την άνοδο, μέσω του εξωτερικού αγωγού) χάνει το θετικό της φορτίο και έτσι προσελκύει νέα θετικά κατιόντα από το διάλυμα .

Εν ολίγοις, τα ηλεκτρόνια ρέουν από την άνοδο στην κάθοδο μέσω του εξωτερικού αγωγού και ενώνονται με τα θετικά κατιόντα της καθόδου που μεταναστεύουν από την άνοδο μέσω του ηλεκτρολύτη. Η ροή αυτή συνεχίζεται έως ότου η άνοδος διαλυθεί πλήρως, ο ηλεκτρολύτης καταστεί ανήμπορος να προσδώσει επιπλέον κατιόντα., ή ο εξωτερικός αγωγός απομακρυνθεί. Ο ρυθμός της αντίδρασης καθορίζεται από το μέγεθος της αντίστασης του αγωγού ή του καταναλωτή.

Συνολικά ο χημικός μετασχηματισμός που συμβαίνει σε μία γαλβανική κυψέλη είναι το αποτέλεσμα επιμέρους αντιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο διατηρώντας μία ισορροπία κατά την οποία όσα ηλεκτρόνια χάνονται τόσα ηλεκτρόνια κερδίζονται. Κατά την διάρκεια της αντίδρασης ένας σωρός από το προϊόν της αντίδρασης στοιβάζεται πάνω στην κάθοδο. Αυτός ο σωρός πρέπει να απομακρύνεται γιατί εμποδίζει την αντίδραση.

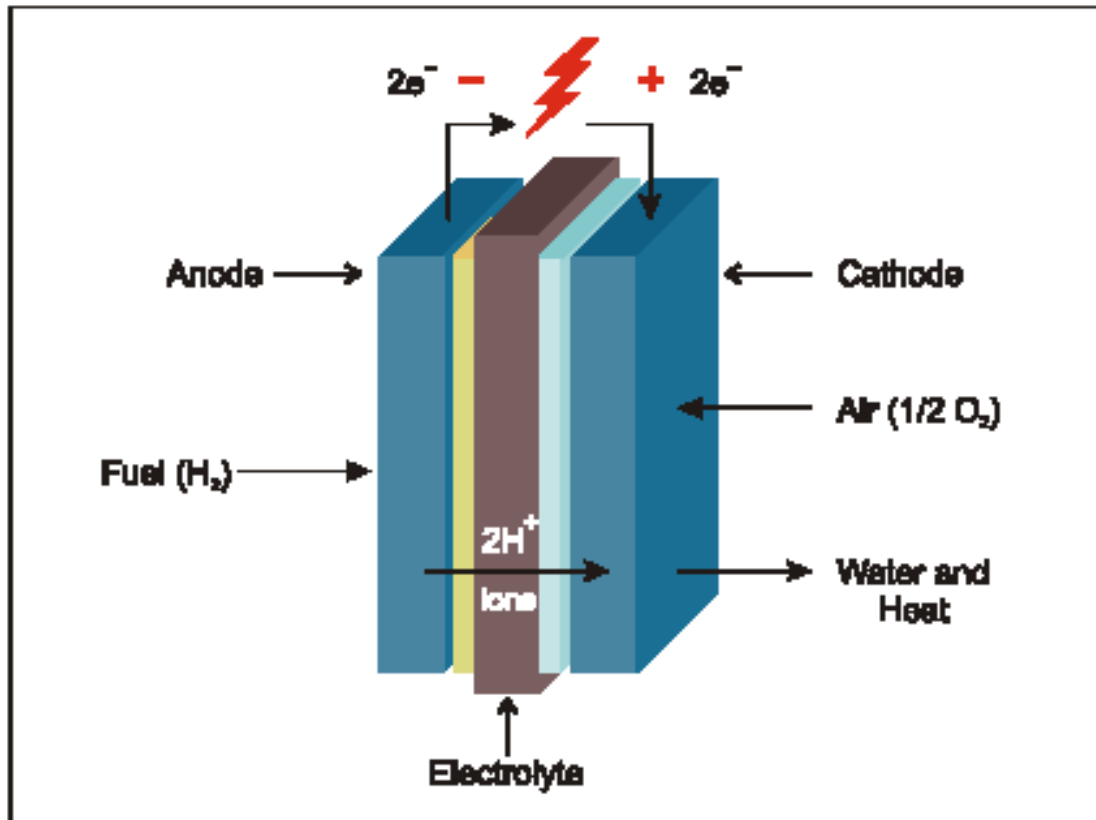
Οι κυψέλες που χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές σχεδιάζονται με ένα πορώδες διάφραγμα ανάμεσα στην άνοδο και στην κάθοδο. Αυτό το διάφραγμα είναι περατό από τον ηλεκτρολύτη αλλά επιβραδύνει την ροή των ιόντων παρέχοντας ταυτόχρονα μηχανικό διαχωρισμό ανάμεσα στα ηλεκτρόδια.

Ο ηλεκτρολύτης είναι η καρδιά κάθε γαλβανικής κυψέλης. Διαφορετικός τύπος ηλεκτρολύτη μας οδηγεί σε διαφορετικά - κατά βάσει- σχέδια μπαταριών και fuel cells. Οι ηλεκτρολύτης μπορεί να είναι σε υγρή ή στερεή μορφή και τυπικά εμπεριέχουν άλατα, ή όξινες, ή αλκαλικές ουσίες. Άσχετα με το ποια είναι η σύνθεση τους πρέπει να έχουν καλή ιονική αγωγιμότητα και παράλληλα να είναι ηλεκτρικά μη αγωγάιμοι. Ακόμα πρέπει να μην αντιδρούν με τα υλικά των ηλεκτροδίων και να μην παρουσιάζουν μεγάλες αλλαγές στις ιδιότητές τους σε διακυμάνσεις της θερμοκρασίας.

Σε ένα fuel cell το καύσιμο και το οξειδωτικό αέριο αποτελούν την άνοδο και την κάθοδο αντίστοιχα. Συνεπώς η δομική κατασκευή ενός fuel cell είναι τέτοια ώστε τα αντιδρώντα αέρια να οδηγούνται μέσω καναλιών ροής εκατέρωθεν του ηλεκτρολύτη. Το χαρακτηριστικό στοιχείο που ξεχωρίζει τα fuel cell μεταξύ τους είναι ο ηλεκτρολύτης. Διαφορετικοί ηλεκτρολύτες άγουν διαφορετικά ιόντα.

Οι ηλεκτρολύτες μπορεί να βρίσκονται σε στερεή μορφή η και σε υγρή. Μερικοί λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, άλλοι σε χαμηλές. Τα fuel cells που λειτουργούν σε χαμηλή θερμοκρασία τείνουν να λειτουργούν καλύτερα με ευγενές μέταλλο για καταλύτη (όπως είναι η πλατίνα) για την προώθηση της αντίδραση των ηλεκτροδίων. Από την άλλη όσα λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες δεν έχουν την ίδια ανάγκη. Όσα fuel cell κατασκευάζονται για αυτοκινητιστικές εφαρμογές λειτουργούν σε χαμηλή θερμοκρασία έχοντας στερεό ηλεκτρολύτη που άγει υδρογόνο όπως φαίνεται στο σχήμα 10.

Τυπικά ένα fuel cell μπορεί να λειτουργήσει με μία ποικιλία από καύσιμα και οξειδωτές. Αυτό όμως που έχει καθιερωθεί ως το πιο αποτελεσματικό καύσιμο για λειτουργικά fuel cells, είναι το υδρογόνο, γιατί έχει μεγάλη ηλεκτροχημική δραστηριότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα καύσιμα όπως οι υδρογονάνθρακες και οι αλκοόλες. Ακόμα και εκείνα που λειτουργούν με διαφορετικά καύσιμα από το υδρογόνο τείνουν να αποσυνθέτουν το καύσιμο σε υδρογόνο και άλλα παράγωγα πριν την τελική αντίδραση. Τέλος, προφανή επιλογή για οξειδωτικό αποτελεί το οξυγόνο το οποίο έχει μεγάλη δραστηριότητα και βρίσκεται άφθονο στον ατμοσφαιρικό αέρα.



Σχ10 Fuel cell

Όπως είδαμε, τα fuel cells και οι μπαταρίες είναι και τα δύο γαλβανικές κυψέλες και έτσι έχουν πολλές ομοιότητες. Αποτελούνται από κοινού από μία άνοδο και μία κάθοδο σε επαφή με ένα ηλεκτρολύτη. Οι συσκευές αυτές παράγουν ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνοντας χημική υποβιβάζοντάς την από υψηλής στάθμης ενέργεια σε χαμηλότερης.

Αυτές οι αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα στην άνοδο και στην κάθοδο με μεταφορά ηλεκτρονίων μέσω εξωτερικού αγωγού. Μεμονωμένα fuel cell και μπαταρίες, παράγουν μικρές συνεχείς τάσεις. Όταν συνδυαστούν σε σειρά επιτυγχάνουν επαρκή ποσά τάσεως και ισχύος.

Οι δύο συσκευές διαφέρουν, ωστόσο, στα υλικά ανόδου και καθόδου που χρησιμοποιούν. Οι μπαταρίες χρησιμοποιούν συνήθως μεταλλικά ηλεκτρόδια, όπως ψευδάργυρο και λίθιο για άνοδο και οξείδια μετάλλων για κάθοδο. Τα fuel cells έχουν αέρια ηλεκτρόδια που συχνά βρίσκονται σε επαφή με καταλύτη πλατίνας για την προώθηση της αντίδρασης. Υδρογόνο, ή μείγματα πλούσια σε υδρογόνο χρησιμοποιούνται για την άνοδο και οξυγόνο ή ατμοσφαιρικός αέρας για την κάθοδο.

Τα fuel cells διαφέρουν από τις μπαταρίες και από τον τρόπο με τον οποίο αποθηκεύονται τα αντιδρώντα χημικά. Στη μπαταρία η άνοδος με την κάθοδο αποτελούν αναπόσπαστα δομικά τμήματα και καταναλώνονται κατά τη λειτουργία. Συνεπώς η μπαταρία μπορεί να είναι λειτουργική μέχρι να

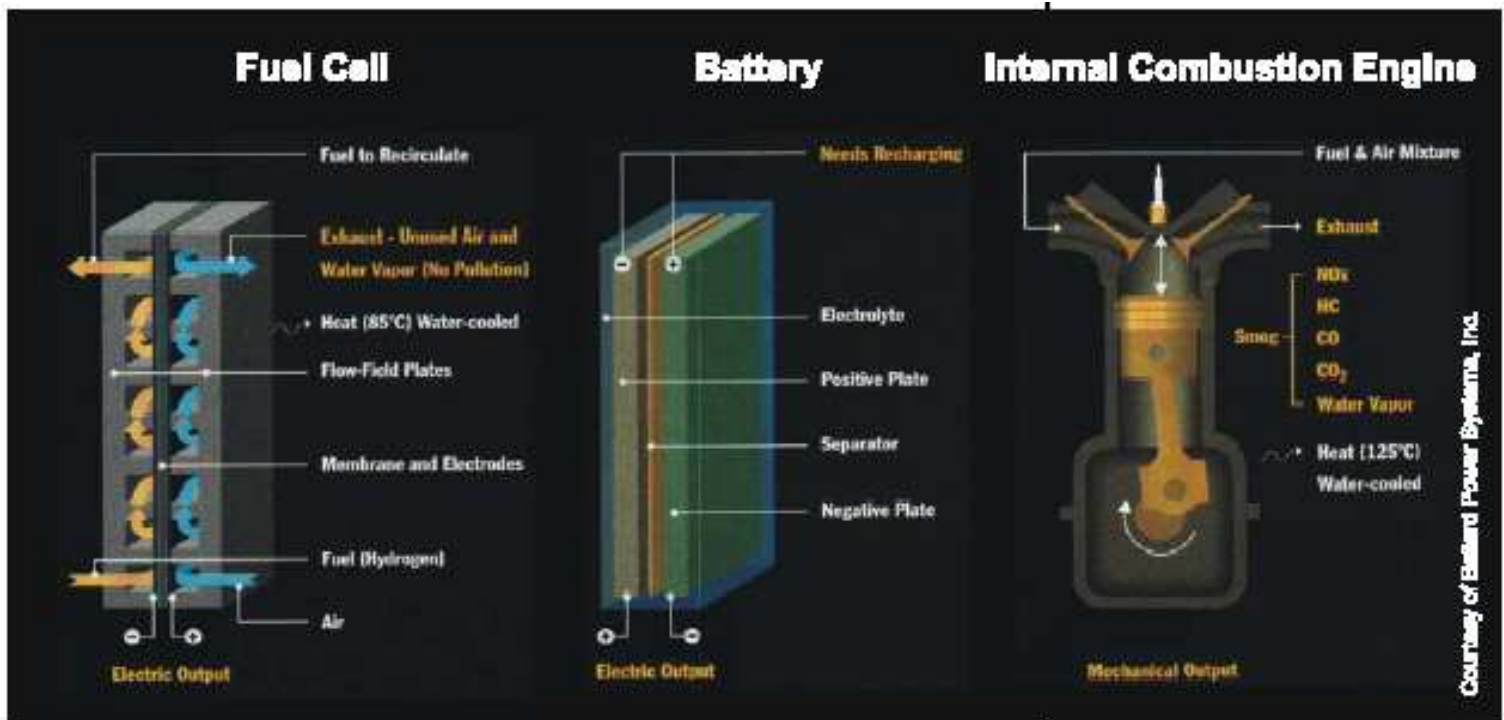
καταναλωθούν πλήρως τα υλικά των ηλεκτροδίων, οπότε και πρέπει να αντικατασταθεί ή να επαναφορτιστεί ανάλογα με την φύση των υλικών.

Στα fuel cells τα χημικά αντιδρώντα παρέχονται από εξωτερική πηγή έτσι ώστε να μην χρειάζονται αντικατάσταση τα δομικά συστατικά τους και να μην χρειάζονται και επαναφόρτιση. Η λειτουργία των fuel cell συνεχίζεται για όσο χρονικό διάστημα τα αντιδρώντα παρέχονται και τα προϊόντα απομακρύνονται.

Τα fuel cells και οι μηχανές εσωτερικής καύσης μοιράζονται ομοιότητες στη μορφή των. Λειτουργούν έκαστο με αέριο καύσιμο που προμηθεύονται από εξωτερικό θάλαμο αποθήκευσης. Το καύσιμο και στις δύο περιπτώσεις είναι πλούσιο σε υδρογόνο. Οι Μ.Ε.Κ. χρησιμοποιούν υδρογονούχα ορυκτά καύσιμα κατευθείαν, μπορούν όμως με κατάλληλες ρυθμίσεις να λειτουργήσουν και με καθαρό υδρογόνο.

Τα δύο συστήματα που εξετάζουμε χρησιμοποιούν πεπιεσμένο αέρα για οξειδωτικό όπου ειδικότερα σε μία μηχανή με fuel cells ο αέρας συμπιέζεται από εξωτερικό συμπιεστή. Στη Μ.Ε.Κ., ο αέρας συμπιέζεται εσωτερικά από την λειτουργία του πιστονιού. Μία άλλη ομοιότητα είναι το γεγονός ότι και τα δύο συστήματα χρειάζονται ψύξη παρότι οι Μ.Ε.Κ. λειτουργούν σε υψηλότερες θερμοκρασίες από τα fuel cells.

Σε κάποιους τομείς πάντως, τα fuel cells διαφέρουν εκ θεμελίων από τις Μ.Ε.Κ. Στα fuel cells λαμβάνει ηλεκτροχημική αντίδραση του καυσίμου με το οξειδωτικό ενώ στις Μ.Ε.Κ. θερμική. Οι Μ.Ε.Κ. είναι μηχανικές συσκευές που παράγουν μηχανικό έργο, ενώ τα fuel cells είναι στέρεες διατάξεις που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια.



Σχ11 Συγκριτικό fuel cells, μπαταριών, και Μ.Ε.Κ

Η μόλυνση είναι άμεση συνάρτηση της σύνθεσης του χρησιμοποιούμενου καυσίμου και της θερμοκρασίας της αντίδρασης. όπως έχουμε ήδη αναφέρει σε προηγούμενα κεφάλαια, οι κυψέλες καυσίμου που λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο δεν παράγουν απολύτως κανένα επιβλαβές προϊόν ενώ αυτές που λειτουργούν με αναμορφωμένα καύσιμα πλούσια σε υδρογόνο παράγουν κάποιες επιβλαβείς εκπομπές η ποσότητα των οποίων αναλογεί στη φύση της διαδικασίας που χρησιμοποιήθηκε. Ενώ οι Μ.Ε.Κ. όταν ρυθμιστούν αναλόγως και λειτουργούν με καθαρό υδρογόνο μπορούν να παράγουν μηδενικούς ρύπους, όταν λειτουργούν με συμβατικά καύσιμα παράγουν μεγάλα και πολύ επιβλαβή πόσα ρύπων.

2.1.5 Κατηγορίες Κυψελών Καυσίμου

Οι κυριότερες κατηγορίες των Fuel Cell είναι πέντε. Ο διαχωρισμός γίνεται με βάση των ηλεκτρολύτη που περιέχουν. Συνοπτικά οι κατηγορίες είναι:

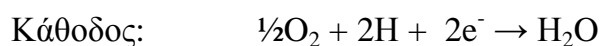
1. κυψέλες Φωσφορικού Οξέους
2. κυψέλες με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)
3. αλκαλικές κυψέλες (AFC)
4. κυψέλες τηγμένου άλατος (Molten Carbonate Fuel Cells)
5. κυψέλες στερεού οξειδίου (SOFC)

Στα πλαίσια αυτής της μελέτης εξετάστηκαν πιο διεξοδικά οι περιπτώσεις των PEM και των SOFC. Από όλες τις κατηγορίες αυτές οι δύο (PEM και SOFC) είναι οι πιο πολλά υποσχόμενες και με μεγαλύτερη πιθανότητα να αποδώσουν

τα προσδοκώμενα από αυτή την τεχνολογία. Εντούτοις και οι υπόλοιπες κατηγορίες έχουν τα πλεονεκτήματά τους, τις ξεχωριστές τους ιδιότητες αλλά και η καθεμία την δική της ιστορία, συνεπώς αξίζει να γίνει μια περιληπτική επισκόπηση σ' αυτές.

1. Φωσφορικού οξέως (PAFC)

Στα PAFC ο ηλεκτρολύτης είναι το φωσφορικό οξύ H_3PO_4 , όπως το υποδηλώνει και το όνομά τους. Αυτό περιέχεται σε ένα λεπτό πλαίσιο ανθρακούχου πυριτίου SiC το οποίο με την σειρά του βρίσκεται μεταξύ δύο πορωδών ηλεκτροδίων από γραφίτη επενδεδυμένα με πλατίνα για καταλύτη. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως καύσιμο και ατμοσφαιρικός αέρας ή καθαρό οξυγόνο ως οξειδωτικό. Οι ημιαντιδράσεις στην άνοδο και στην κάθοδο είναι οι εξής:



Το καθαρό φωσφορικό οξύ πήζει στους $42^\circ C$ συνεπώς θα πρέπει η κυψέλη να λειτουργεί πάνω από αυτή την θερμοκρασία.. Επιπλέον, οι κύκλοι ψύξης θέρμανσης δημιουργούν εντατικά προβλήματα, γι' αυτό τον λόγο όσα PAFC βρίσκονται σε χρήση διατηρούνται σε θερμοκρασία λειτουργίας. Η βέλτιστη λειτουργία λαμβάνει χώρα σε θερμοκρασίες $180 - 210^\circ C$, πάνω από τους 210 βαθμούς το H_3PO_4 υφίσταται μία μεταβατική φάση που το καθιστά ακατάλληλο για ηλεκτρολύτη. Από την μεριά του το πλαίσιο του SiC παρέχει μηχανική στήριξη στον ηλεκτρολύτη, κρατάει διαχωρισμένα τα ηλεκτρόδια και ελαχιστοποιεί την διασταύρωση των αντιδρώντων. Κατά την λειτουργία το φωσφορικό οξύ πρέπει συνεχώς να αναπληρώνεται καθότι εκτός από την κανονική, προγραμματισμένη κατανάλωση, αναλώνεται σταδιακά και μέσω εξάτμισης (ειδικά σε υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας). Η ηλεκτρική απόδοση των μονάδων PAFC είναι περίπου 40%, ενώ μονάδες σε συμπαραγωγή ισχύος – θερμότητας μπορούν να πετύχουν και 70%.

Ο καταλύτης από πλατίνα κάνει τα PAFC αρκετά ευαίσθητα σε δηλητηρίαση από μονοξείδιο του άνθρακα και θείου στην άνοδο. Αυτό δεν αποτελεί πρόβλημα όταν γίνεται χρήση καθαρού υδρογόνου αλλά μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εμπόδιο όταν γίνεται χρήση αναμορφωμένου ή ακάθαρτου καυσίμου. Επειδή όμως λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες επιδεικνύουν μεγαλύτερη ανεκτικότητα από ότι τα PEMFC. Συγκεκριμένα η ανεκτικότητα σε μονοξείδιο του άνθρακα στην άνοδο μπορεί να φτάσει το 0,5% με 1,5%, αναλόγως τις συνθήκες, ενώ η ανεκτικότητα σε θείο, όπου βρίσκεται συνήθως ως H_2S , είναι περίπου 50ppm.

Πλεονεκτήματα PAFC

- Ωριμη τεχνολογία

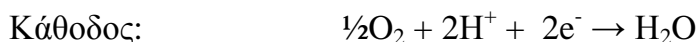
- Εξαιρετική αξιοπιστία / επιδόσεις σε μακρά διάρκεια
- Φθηνός ηλεκτρολύτης

Μειονεκτήματα PAFC

- Ακριβώς καταλύτης (πλατίνα)
- Ευαίσθητα σε δηλητηρίαση από CO και S
- Ο ηλεκτρολύτης είναι ιδιαίτερα διαβρωτικός και χρειάζεται συνεχώς αντικατάσταση
- Υψηλές θερμοκρασίες λειτουργίας (πρόβλημα σε on – off χρήση)

2. Κυψέλες με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων (PEM)

Οι κυψέλες αυτές λέγονται αλλιώς και κυψέλες με μεμβράνη ανταλλαγής πρωτονίων. Αυτή η μεμβράνη είναι από πολυμερές υλικό συνήθως φθοροανθρακικού θεικού οξέως (PSA). Η πολυμερής μεμβράνη είναι αγωγός πρωτονίων και έτσι οι ημιαντιδράσεις στην άνοδο και στην κάθοδο είναι οι εξής:



Η μεμβράνη σε ένα PEMFC είναι λεπτή (20 – 200 μm), ευλύγιστη και διαφανής. Είναι επενδεδυμένη και από τις δύο πλευρές, με ένα λεπτό στρώμα πλατίνας που επιτελεί τον ρόλο του καταλύτη και ένα πορώδες ανθρακικό υλικό για την συγκράτηση των ηλεκτροδίων. Αυτή η διάταξη ηλεκτρόδιο – καταλύτης – μεμβράνη – καταλύτης – ηλεκτρόδιο είναι γνωστή ως η μεμβρανιακή συναρμολόγηση ηλεκτροδίου (αγγ. Membrane Electrode Assembly) και είναι λιγότερο από 1mm σε πάχος. Επειδή η μεμβράνη χρειάζεται να διατηρείται υγρή από νερό σε υγρή κατάσταση, η θερμοκρασία λειτουργίας δεν ξεπερνά τους 90 °C. Σ' αυτή τη θερμοκρασία η πλατίνα είναι ο μόνος καταλύτης που μπορεί – μέχρι στιγμής – να λειτουργήσει. Αν και το H₂ είναι το καύσιμο πρώτης επιλογής, για φορητές εφαρμογές χαμηλής ισχύος (<1 kW) μπορεί να χρησιμοποιηθεί και υγρή μεθανόλη. Μια τέτοια εφαρμογή είναι η κυψέλη μεθανόλης η οποία αποτελεί και αυτή ένα PEMFC το οποίο οξειδώνει απευθείας την μεθανόλη και παράγει ηλεκτρισμό. Τέτοιες εφαρμογές είναι ακόμα υπό έρευνα και μερικοί ερευνητές την τοποθετούν σε τελείως δική τους κατηγορία.

Τα PEMFC για την ώρα έχουν την μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος από όλους τους τύπους των κυψελών καυσίμου (300 – 1000 mW/cm²). Ακόμα έχει την καλύτερη απόκριση σε εφαρμογές απότομης εκκίνησης και παύσης καθώς και σε αντίστοιχους κύκλους λειτουργίας. Για αυτούς τους λόγους είναι ιδανικές για εφαρμογές στην αυτοκίνηση αλλά και σε χρήση UPS.

Πλεονεκτήματα των PEMFC

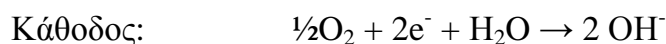
- Η υψηλότερη συγκέντρωση ισχύος από όλες τις υπόλοιπες κατηγορίες
- Ιδανική απόκριση σε απότομες εκκινήσεις και διακοπτόμενη λειτουργία
- Χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας (ιδανικό για φορητές εφαρμογές)

Μειονεκτήματα των PEMFC

- Ακριβός καταλύτης (πλατίνα)
- Ακριβή μεμβράνη και βοηθητικά συστήματα
- Πολύ χαμηλή ανεκτικότητα σε CO και S

3. Αλκαλικές Κυψέλες

Σ' αυτές της κυψέλες τον ρόλο του ηλεκτρολύτη τον έχει ένα υδατικό διάλυμα υδροξειδίου του Καλίου KOH. Συνεπώς αντίθετα με ό,τι συμβαίνει στις υπόλοιπες κατηγορίες κυψελών, στις Αλκαλικές έχουμε μεταφορά του υδροξυλίου OH⁻ από την κάθοδο στην άνοδο και όχι του H⁺ από την άνοδο στην κάθοδο. Οι αντίστοιχες ημιαντιδράσεις είναι οι εξής:

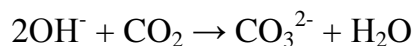


Παρατηρούμε ότι το νερό καταναλώνεται στη κάθοδο ενώ παράγεται σε διπλάσια ποσότητα στην άνοδο. Αν το επιπλέον νερό δεν απομακρυνθεί από το σύστημα, τότε μειώνεται η συγκέντρωση του διαλύματος του ηλεκτρολύτη με απώτερο αποτέλεσμα την παύση της λειτουργίας.

Για λόγους οι οποίοι ακόμα δεν είναι πλήρως κατανοητοί, η υπέρταση κατά την ενεργοποίηση της καθόδου σε μία AFC είναι σημαντικά χαμηλότερη από ότι στις υπόλοιπες (όξινες) κυψέλες για τις ίδιες θερμοκρασίες. Αξίζει να σημειωθεί, ότι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες μπορεί να γίνει χρήση νικελίου αντί για πλατίνας στη θέση του καταλύτη και αυτό συμβάλλει αρκετά στη μείωση του κόστους. Επειδή η χημική κινητική της οξειδωσης σε αλκαλικό μέσο είναι πολύ πιο γρήγορη από ότι σε ένα όξινο, τα AFCs μπορούν να πετύχουν την ανάπτυξη λειτουργικής τάσης μέχρι και 0,875 V. Η υψηλή λειτουργική τάση με την σειρά της οδηγεί και σε υψηλή απόδοση ένα θέμα αρκετά κρίσιμο ειδικότερα όταν το καύσιμο είναι δυσεύρετο.

Ανάλογα με την συγκέντρωση του KOH στον ηλεκτρολύτη, τα AFC μπορούν να λειτουργήσουν σε θερμοκρασίες από 60 έως 250 °C. Οι αλκαλικές κυψέλες

χρειάζονται καθαρά αντιδρώντα για να λειτουργήσουν καθότι δεν έχουν καμία ανεκτικότητα στο διοξείδιο του άνθρακα ακόμα και σε συγκεντρώσεις στα επίπεδα του ατμοσφαιρικού αέρα. Η παρουσία του υποβαθμίζει τον ηλεκτρολύτη ακολουθώντας την παρακάτω αντίδραση:



Όπως γίνεται αντιληπτό η συγκέντρωση του OH^- ελαττώνεται με το πέρασμα του χρόνου, το δημιουργούμενο K_2CO_3 καθιζάνει στον ηλεκτρολύτη (λόγω χαμηλής διαλυτότητας) και αυτό οδηγεί σε λειτουργικά προβλήματα. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να μετριασθούν με την χρήση καθαριστικών CO_2 και τη αδιάλειπτη και αυξανόμενη τροφοδότηση νέου KOH ηλεκτρολύτη. Εντούτοις, και οι δύο λύσεις συνεπάγονται επιπλέον κόστος και εξοπλισμό.

Για αυτούς τους περιορισμούς δεν αποτελούν οικονομικά βιώσιμη λύση για τις περισσότερες επίγειες εφαρμογές. Παρόλα αυτά, η υψηλή τους αποδοτικότητα και η μεγάλη συγκέντρωση ισχύος τις έχουν φέρει ήδη στη θέση της καθιερωμένης τεχνολογίας στην αεροδιαστημική τεχνολογία. Έχουν χρησιμοποιηθεί και στις αποστολές APOLLO και στο διαστημικό λεωφορείο.

Πλεονεκτήματα των AFC

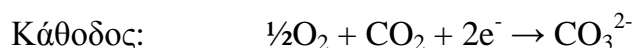
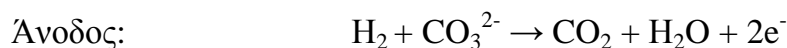
- Βελτιωμένη απόδοση καθόδου
- Δυνατότητα χρήσης μη πολύτιμων μετάλλων στον καταλύτη
- Φθηνά υλικά και ακόμα πιο φθηνός ηλεκτρολύτης

Μειονεκτήματα των AFC

- Απαραίτητη η χρήση καθαρών αντιδρώντων (υδρογόνο, οξυγόνο)
- Ο KOH ηλεκτρολύτης χρειάζεται συνεχόμενη αναπλήρωση
- Απαραίτητη η απομάκρυνση νερού από την άνοδο

4. Κυψέλες Τηγμένου Άλατος (MCFC)

Ο ηλεκτρολύτης σ' αυτές τις κυψέλες είναι ένα μείγμα από τηγμένους αλκαλικούς ανθρακίτες, όπως Li_2CO_3 και K_2CO_3 εγκλωβισμένο σε ένα πλαίσιο από LiOAlO_2 . Τα ιόντα ανθρακίτη, CO_3^{2-} επιτελούν το σκοπό του φορέα του φορτίου σε ένα MCFC. Οι σχετικές ημιαντιδράσεις είναι οι εξής:



Στης MCFC το CO_2 παράγεται στην άνοδο και καταναλώνεται στην κάθοδο, συνεπώς τα συστήματα των MCFC πρέπει να προβλέπουν την δέσμευση του διοξειδίου από την άνοδο και την τροφοδότηση του στην κάθοδο (αμέσως βλέπουμε μία διάσταση μεταξύ των AFC και τον MCFC σε σχέση με τον

διοξειδίου) Αντίθετα με ότι κάποιος θα περίμενε η διαδικασία ανακύκλωσης του διοξειδίου είναι σχετικά απλή. Κανονικά η ροή των προϊόντων από την άνοδο τροφοδοτεί ένα καυστήρα ο οποίος καίει το επιπλέον καύσιμο. Το παραγόμενο μείγμα ατμού και διοξειδίου, αναμειγνύεται με καθαρό αέρα και παρέχεται στην κάθοδο. Η θερμότητα που παράγεται στο καυστήρα προθερμαίνει και τον αντιδρώντα αέρα βελτιώνοντας την αποδοτικότητα και διατηρώντας τις συνθήκες λειτουργίας.

Τα ηλεκτρόδια είναι συνήθως βασισμένα στο νικέλιο, η άνοδος αποτελείται συνήθως από κράμα νικελίου χρωμίου ενώ η κάθοδος από οξείδιο του νικελίου εμπλουτισμένο με λίθιο. Το νικέλιο παρέχει και στα δύο ηλεκτρόδια καταλυτική δράση και αγωγιμότητα. Στην άνοδο, τα πρόσθετα χρωμίου παρέχουν την απαιτούμενη πώρωση και την επιφάνεια αντίδρασης και στην κάθοδο τα οξείδια νικελίου εμπλουτισμένα με λίθιο, ελαχιστοποιούν την διαλυτότητα του νικελίου η οποία θα επηρέαζε την απόδοση της κυψέλης.

Η σχετικά υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας των MCFC (650 °C) προσδίδει λειτουργική προσαρμοστικότητα. Οι MCFC μπορούν να λειτουργήσουν με υδρογόνο, απλούς υδρογονάνθρακες (όπως μεθάνιο), και απλές αλκοόλες, ενώ η ανεκτικότητα σε μονοξείδιο του άνθρακα δεν αποτελεί ζήτημα. Για τις MCFC το μονοξείδιο αντί για δηλητήριο αποτελεί καύσιμο.

Λόγω των έντονων εντατικών καταστάσεων που δημιουργούνται από την ψύξη και την θέρμανση σε διακοπόμενη λειτουργία, οι MCFC ενδείκνυνται περισσότερο για στατικές εφαρμογές συνεχούς παραγωγής ενέργειας. Η ηλεκτρική απόδοση μιας τυπικής μονάδας MCFC είναι κοντά στο 50%, ενώ σε εφαρμογές συμπαραγωγής, μπορεί να φτάσει αρκετά κοντά στο 90%.

Πλεονεκτήματα των MCFC

- Προσαρμοστικότητα καυσίμου
- Καταλύτης από μη πολύτιμα μέταλλα
- Υψηλής ποιότητας παραγόμενη θερμότητα χρήσιμη για συμπαραγωγή

Μειονεκτήματα των MCFC

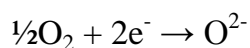
- Απαραίτητη η ανακύκλωση του CO₂
- Αρκετά διαβρωτικό τηγμένο ηλεκτρολύτης
- Ζητήματα αποικοδόμησης – διάρκεια ζωής
- Σχετικά ακριβά υλικά παραγωγής

5. Κυψέλες στερεού οξειδίου (SOFC)

Οι κυψέλες SO έχουν στερεό κεραμικό υλικό για ηλεκτρολύτη. Το πιο διαδεδομένο υλικό για τον ηλεκτρολύτη των SOFC είναι το σταθεροποιημένο Y₃ ζιρκόνιο (YSZ) το οποίο είναι αγωγός ιόντων οξυγόνου. Με δεδομένο ότι το O²⁻ είναι ο φορέας αγωγιμότητας οι ημιαντιδράσεις είναι οι εξής:

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

Κάθοδος:



Σε μία SOFC παράγεται νερό στην άνοδο αντί για την κάθοδο όπως συμβαίνει στις PEMFC. Τα υλικά της ανόδου και της καθόδου είναι διαφορετικά και αυτό συμβαίνει γιατί τα υλικά του ηλεκτροδίου του καυσίμου πρέπει να είναι τέτοια ώστε να αντέχουν στο εξαιρετικά αναγωγικό και υψηλών θερμοκρασιών περιβάλλον της ανόδου, ενώ αυτά του ηλεκτροδίου του αέρα θα πρέπει να αντέχουν στο εξαιρετικά οξειδωτικό και υψηλών θερμοκρασιών περιβάλλον της καθόδου. Το πιο κοινό υλικό για το ηλεκτρόδιο ανόδου είναι το κεραμομέταλλο νικελιούχου YSZ στο οποίο το νικέλιο παρέχει καταλυτική δράση και αγωγιμότητα, ενώ το YSZ προσθέτει αγωγιμότητα ιόντων, αντοχή στις θερμικές διαστολές, μηχανική στήριξη και διατηρεί την απαραίτητη πόρωση και επιφάνεια για την άνοδο. Η κάθοδος αποτελείται από ένα μείγμα ιοντικού και ηλεκτρονιακού κεραμικού αγωγού. Τα τυπικά υλικά που συναντούμε στη κάθοδο είναι μαγκανίτης λανθανίου εμποτισμένο σε στρόντιο (LSM), φερίτης λανθανίου – στροντίου (LSF), κοβαλτίτης λανθανίου – στροντίου (LSC) και κοβαλτίτης - φερίτης λανθανίου – στροντίου. Όλα τα παραπάνω υλικά επιδεικνύουν καλή αντίσταση στην οξείδωση και υψηλή καταλυτική συμπεριφορά στο περιβάλλον της καθόδου.

Η θερμοκρασία λειτουργίας μιας SOFC, είναι από 600 έως 1000 °C και αυτό έχει τα πλεονεκτήματά του, αλλά παρουσιάζει και αρκετές προκλήσεις. Οι προκλήσεις αφορούν θέματα τεχνομηχανικού εξοπλισμού, στεγανότητας και διασύνδεσης των κυψελών. Οι υψηλές θερμοκρασίες φέρουν και υψηλές απαιτήσεις στα υλικά, στα μηχανικά ζητήματα, εγείρουν θέματα αξιοπιστίας και κάνουν πιο δύσκολη τη μελέτη των θερμικών διαστολών και το ταίριασμα των συνιστάμενων εξαρτημάτων. Αντίθετα, τα πλεονεκτήματα των υψηλών θερμοκρασιών είναι η προσαρμοστικότητα στο καύσιμο, η υψηλή απόδοση και η δυνατότητα για ευρεία χρήση σε συμπαραγωγή με την χρήση της αποδιδόμενης θερμότητας. Η ηλεκτρική απόδοση μιας SOFC είναι της τάξεως του 50 – 60% ενώ σε συμπαραγωγή φτάνει το 90%.

Ένα μελλοντικό σχέδιο SOFC η οποία θα λειτουργεί σε θερμοκρασίες 400 – 700 °C, θα μπορούσε να εξαλείψει τα αρνητικά των πολύ υψηλών θερμοκρασιών. Θα μπορούσε δηλαδή να απαλλαγεί από την χρήση ακριβών στεγανωτικών και των στιβαρών κατασκευών για μηχανική στήριξη. Την ίδια στιγμή δεν θα έχανε καθόλου από την ικανότητά της για συμπαραγωγή και θα διατηρούσε την υψηλή αποδοτικότητα και την προσαρμοστικότητα σε καύσιμο. Επί του παρόντος, τέτοια τεχνολογία ερευνάται.

Πλεονεκτήματα SOFC

- Προσαρμοστικότητα σε καύσιμο
- Καταλύτες από μη πολύτιμα μέταλλα
- Υψηλής ποιότητας θερμότητα για συμπαραγωγή
- Στερεός ηλεκτρολύτης
- Σχετικά υψηλή συγκέντρωση ισχύος

Μειονεκτήματα SOFC

- Σημαντικά ζητήματα σε υλικά από υψηλές θερμοκρασίες
- Ζητήματα σφραγίσεων – στεγανότητας
- Σχετικά ακριβά μέρη όπως επίσης και η κατασκευή

Θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμο να γνωρίζει ο αναγνώστης ότι μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας fuel cell, κτίζεται ανάλογα με τις απαιτήσεις τοποθετώντας την μία κυψέλη μετά την άλλη μέχρι να μας αποδώσουν την απαιτούμενη τάση όπως γίνεται περίπου με τις μπαταρίες. Στην περίπτωση αυτή όταν λέμε κυψέλη αναφερόμαστε στην στοιχειώδη κατασκευή (καταλύτης – ηλεκτρόδιο – ηλεκτρολύτης – ηλεκτρόδιο – καταλύτης) η οποία παράγει θεωρητικά 1,29 V στις συνθήκες του συστήματος μας. Έτσι ένα σύνολο από στοιχεία fuel cell κάνει ένα συγκρότημα (stack) το οποίο μπορεί από μόνο του να αποτελέσει μία μονάδα. Τα συστήματα ελέγχου των βιομηχανικών ηλεκτρονικών των PEMFC, τα οποία χρησιμοποιούμε στην συγκεκριμένη μελέτη, επιβάλλουν μια συγκεκριμένη ομαδοποίηση των συγκροτημάτων fc όταν χρειάζονται παραπάνω από ένα. Σύμφωνα λοιπόν με την υπάρχουσα τεχνολογία, τα συγκροτήματα (στα οποία από εδώ και στο εξής θα αναφερόμαστε ως stack) μπορούν να ομαδοποιηθούν ανά ένα ή ανά τετράδες για την σωστή διαχείριση τους.

Συμπερασματικά

Από τις 5 κατηγορίες για τις οποίες κάναμε λόγο, οι PEMFC και οι SOFC είναι εκείνες που προσφέρουν τις καλύτερες προοπτικές για συνεχή βελτίωση και τελική εφαρμογή και ενώ οι PAFC και οι AFC είχαν ένα ιστορικό προβάδισμα, οι υπόλοιπες κατηγορίες τις έφτασαν και τις ξεπέρασαν και πλέον είναι πιο θελκτικές λύσεις μακροπρόθεσμα. Λόγω των υψηλών συγκεντρώσεων ισχύος οι PEMFC και οι DMFC αποτελούν ιδανική λύση για φορητές εφαρμογές. Από την άλλη και οι PEMFC και οι SOFC αποτελούν ενδεδειγμένες λύσεις για παραγωγή ενέργειας σε οικιακές εφαρμογές και μικρής κλίμακας σταθερές εφαρμογές. Εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων σε ισχύ ικανοποιούνται καλύτερα από SOFC και συνδυασμένο κύκλο SOFC – ατμοστροβίλου, λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας. Οι κυψέλες υψηλών θερμοκρασιών παρέχουν και την δυνατότητα συμπαραγωγής αλλά και προσαρμοστικότητα στο είδος του καυσίμου.

2.2 Αποθήκευση του υδρογόνου

Σε ένα σύστημα αποθήκευσης H₂ η κυψέλη καυσίμου τροφοδοτείται κατευθείαν με αέριο υδρογόνο και αυτό έχει αρκετά πλεονεκτήματα:

- Οι περισσότερες κατηγορίες κυψελών λειτουργούν καλύτερα με καθαρό υδρογόνο.

- Ζητήματα σχετικά με τις ακαθαρσίες και την μόλυνση της κυψέλης εξαλείφονται
- Η κυψέλη απλοποιείται (δεν υπάρχει ανάγκη αναμορφωτή και φίλτρων)
- Η αποθήκευση του αερίου υδρογόνου μπορεί να είναι μεγάλης χρονικής διάρκειας. (Για το υγρό δεν ισχύουν τα ίδια βλ υποσημείωση)

Δυστυχώς το υδρογόνο δεν είναι ένα ευρέως διαδεδομένο καύσιμο και ακόμα δεν είναι διαθέσιμη κάποια μέθοδος αποθήκευσης υδρογόνου σε μεγάλη πυκνότητα. Οι πιο κοινές μέθοδοι αποθήκευσης του υδρογόνου είναι οι επόμενες:

- 1) Ως συμπιεσμένο αέριο
- 2) Ως υγρό
- 3) Σε υδρίδια μετάλλου

- 1) *Συμπιεσμένο αέριο.* Αποτελεί τον πιο άμεσο τρόπο αποθήκευσης υδρογόνου. Το υδρογόνο συμπιέζεται με πολύ υψηλές πιέσεις σε ειδικά σχεδιασμένους κυλίνδρους. Η αποθηκευτική απόδοση είναι σχετικά μέτρια αλλά αυξάνεται με την αύξηση του όγκου αποθήκευσης και της πίεσης. Οι υπάρχουσες κατασκευές επιτρέπουν την αποθήκευση συμπιεσμένου υδρογόνου μέχρι πιέσεις 700 bar. Εντούτοις, οι πολύ υψηλές πιέσεις όπως είναι αναμενόμενο εγείρουν και ζητήματα ασφαλείας. Ακόμα η συμπίεση του υδρογόνου είναι ενεργοβόρα. Για παράδειγμα η συμπίεση του υδρογόνου στα 300 bar απαιτεί το ξόδεμα 10% του ενεργειακού του περιεχομένου. Ευτυχώς όμως αυτές οι απώλειες μειώνονται καθώς αυξάνει και η συμπίεση γιατί αντισταθμίζονται από το επιπλέον πόσο υδρογόνου που αποθηκεύεται.
- 2) *Υγρό υδρογόνο.* Αν το αέριο υδρογόνο ψυχθεί στους 22 K, θα συμπυκνωθεί σε υγρό. Αυτή η υγροποίηση επιτρέπει την αποθήκευση υδρογόνου σε χαμηλές πιέσεις. Το υγρό υδρογόνο έχει την μεγαλύτερη αποθηκευτική πυκνότητα από όλες τις μεθόδους που αναφέρουμε πιο πάνω περίπου $0,071 \text{ g/cm}^3$. Η αποθηκευτική δεξαμενή θα πρέπει να έχει διπλά ενισχυμένα τοιχώματα και μόνωση κενού για να μπορεί να διατηρεί τις συνθήκες κρυογονικής που είναι απαραίτητες για την διατήρηση του υγρού υδρογόνου. Συνεπώς ενώ η ογκομετρική αποθηκευτική απόδοση είναι μέτρια, η μαζική απόδοση είναι εντυπωσιακή. Αξίζει να αναφερθεί πως για αυτό το λόγο η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται στο διαστημικό λεωφορείο. Ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα για αυτή τη μέθοδο είναι το γεγονός ότι η υγροποίηση του υδρογόνου είναι πολύ ενεργοβόρα και καταναλώνει περίπου το 30% του ενεργειακού περιεχομένου του υδρογόνου που αποθηκεύεται. Μεγάλα προβλήματα προκαλεί επίσης και η ίδια η φύση του υδρογόνου το οποίο όταν είναι υγρό δεν συμπεριφέρεται ως νευτώνειο ρευστό αλλά ανήκει στην κατηγορία των υπερευστών. Αυτό

έχει ως αποτέλεσμα οι απώλειες υδρογόνου σε αυτή την κατάσταση να είναι μεγάλες όπως και η πιθανότητα διάτρησης του δοχείου αποθήκευσης.

- 3) Σε υδρίδια μετάλλων. Τα πιο κοινά υδρίδια μετάλλων που χρησιμοποιούνται είναι τα κράματα σιδήρου, τιτανίου, μαγνησίου, νικελίου και χρωμίου. Αυτά τα κράματα κονιορτοποιούνται σε πολύ λεπτή σκόνη και διαδραματίζουν το ρόλο σπόνγκου που απορροφά μεγάλες ποσότητες αερίου υδρογόνου, με το να σπάνε τα μόρια του H_2 σε H και να τα απορροφούν μέσα στο κράμα. Κατόπιν με θέρμανση αποδίδουν το υδρογόνο που απορρόφησαν. Τα υδρίδια μετάλλου απορροφούν τόσο μεγάλες ποσότητες υδρογόνου ώστε σε ορισμένες περιπτώσεις να ξεπερνούν την ογκομετρική ενεργειακή πυκνότητα ακόμα και του υγρού υδρογόνου! Δυστυχώς τα υδρίδια είναι βαριά με αποτέλεσμα η μαζική ενεργειακή πυκνότητα να είναι μέτρια. Επιπλέον αυτά τα υλικά είναι αρκετά ακριβά. Ως συνέπεια των παραπάνω η λύση αυτή είναι πιο ενδεδειγμένη για φορητές εφαρμογές.

Αξίζει να σημειωθεί πως μία λύση για την αποθήκευση υδρογόνου είναι και η χρήση φορέων υδρογόνου. Χημικές ουσίες δηλαδή τις οποίες μπορούμε να αποθηκεύσουμε και να χρησιμοποιήσουμε για να πάρουμε το υδρογόνο που περιέχουν (π.χ. μεθάνιο, μεθανόλη και βενζίνη) Η διαδικασία όμως αυτή απαιτεί την αναμόρφωση του φορέα για την εξαγωγή του υδρογόνου, πράξη η οποία δεν αποτελεί περιβαλλοντικά καθαρή λύση, γι' αυτό το λόγο και δεν εξετάζεται στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής.

2.3 Ασφάλεια στα συστήματα υδρογόνου

Ένα από τα κυριότερα προβλήματα στην εφαρμογή των κυψελών καυσίμου είναι η αποθήκευση και η διακίνηση του καυσίμου τόσο από το χώρο παραγωγής στο χώρο κατανάλωσης, αλλά και μέσα στη μηχανή από το χώρο αποθήκευσης στο ίδιο το fuel cell. Θα εξετάσουμε τις ιδιότητες του υδρογόνου αφού είναι το πιο κοινό καύσιμο στα fuel cells.

Όλα τα καύσιμα είναι επικίνδυνα γιατί παρουσιάζουν υψηλή δραστηριότητα. Είναι η δραστηριότητα τους αυτή που τα κάνει εξαιρετικές πηγές ενέργειας. Το υδρογόνο δεν είναι εγγενώς πιο επικίνδυνο από τα υπόλοιπα καύσιμα –όπως το φυσικό αέριο και η βενζίνη- έχει όμως ξεχωριστές ιδιότητες και έτσι απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή στη μεταχείριση του. Το υδρογόνο πάντως είναι από πολλές απόψεις ασφαλέστερο από άλλα καύσιμα.

Ο κίνδυνος της διαρροής είναι ο βασικότερος όλων των κινδύνων που σχετίζονται με το αέριο υδρογόνο, αφού χωρίς διαρροή δεν υπάρχει περίπτωση πρόσμιξης του υδρογόνου με τον ατμοσφαιρικό αέρα και έτσι αποκλείονται η κίνδυνοι πυρκαγιάς και ασφυξίας. Επιπρόσθετα στην αναφορά των διαρροών,

το υγρό υδρογόνο, λόγω χαμηλής θερμοκρασίας αποτελεί υψηλό κίνδυνο για κρουπαγήματα και συμπύκνωση-υγροποίηση του οξυγόνου.

Τέλος, τα f/c δεν μπορούν να κρατήσουν καύσιμο μέσα τους για δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος έχει να κάνει με την χημική κινητικότητα των αντιδρώντων και ο δεύτερος με παράγοντες ασφαλείας. Το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου καταναλώνεται ακόμα και όταν η παροχή από την δεξαμενή σταματήσει. Το υπόλοιπο υδρογόνο βρίσκεται σε μοριακό επίπεδο εγκλωβισμένο στο πορώδες υλικό του καταλύτη. Η δεύτερη κατάσταση ενέχει κινδύνους ασφαλείας. Το f/c πρέπει να αφηθεί να λειτουργήσει ακόμα και όταν η παροχή από την δεξαμενή είναι κλειστή γιατί το παραμένον υδρογόνο είναι προτιμότερο να καταναλωθεί ή να φυλάσσεται στην δεξαμενή από το να παραμένει στην κυψέλη. Γι' αυτό το λόγο υπάρχει μια καθυστέρηση μέχρι να αποδοθεί από στάση η ισχύς που απαιτείται. Ο χρόνος αυτός μειώνεται όσο μειώνεται και η απόσταση από την δεξαμενή.

2.3.1 Διαρροές Υδρογόνου

Οι ιδιότητες του υδρογόνου που συμβάλλουν στην επικινδυνότητά του σχετικά με τις διαρροές είναι :

- έχει το μικρότερο μοριακό βάρος και το μικρότερο μόριο από κάθε άλλο στοιχείο. (πυρήνας υδρογόνου = 1 πρωτόνιο)
- έχει την μικρότερη πυκνότητα και συνεπώς την υψηλότερη άνωση από κάθε άλλο στοιχείο
- είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο
- μπορεί να προκαλέσει φθορά ορισμένων υλικών
- μπορεί να προκαλέσει ασφυξία όταν βρίσκεται σε μεγάλη συγκέντρωση σε σχέση με την συγκέντρωση του οξυγόνου

Το μικρό μέγεθος των μορίων του υδρογόνου τα κάνει δυσκολότερο να περιοριστούν από τα μόρια άλλων αερίων. Σε ένα μεγάλο βαθμό οι διαρροές του υδρογόνου προλαμβάνονται από το σχεδιασμό των συστημάτων. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις κατασκευές είναι ανθεκτικά σε φθορές που μπορεί να προκαλέσει το υδρογόνο. Οι αγωγοί καυσίμου δεν περνούν ποτέ από την καμπίνα επιβατών (όταν μιλάμε για εφαρμογή στις μεταφορές) εξαλείφοντας έτσι τον κίνδυνο διαρροής μέσα στο όχημα.

Σε αστικά λεωφορεία το υδρογόνο φυλάσσεται σε κυλίνδρους υψηλής πίεσης στην οροφή του οχήματος. Μ' αυτό τον τρόπο εκμεταλλευόμαστε την μεγάλη άνωση του υδρογόνου έτσι ώστε σε περίπτωση διαρροής αυτό να διαφεύγει κάθετα και άμεσα στον ατμοσφαιρικό αέρα με πολύ μικρή αντίσταση.

Οι αποθηκευτικοί κύλινδροι περιέχουν το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου στο όχημα. Το ποσοστό του υδρογόνου που βρίσκεται μέσα στην κυψέλη ή την

Μ.Ε.Κ. είναι πολύ μικρό κατά την διάρκεια της λειτουργίας και μηδενικό κατά την παύση. Ακόμα το υδρογόνο στους κυλίνδρους είναι σε υψηλή πίεση ενώ στην κυψέλη / μηχανή σε χαμηλή. Όσο πιο υψηλή είναι η πίεση τόσο πιο πιθανό είναι να συμβεί διαρροή. Αγωγοί καυσίμου, άστοχες συνδέσεις, μη μεταλλικές σφραγίδες, δακτύλιοι είναι πιθανά σημεία διαρροής.

Όταν χρησιμοποιείται υδρογόνο, ο σχεδιασμός αποτρέπει την άμεση πρόσμιξη υδρογόνου και αέρα που διέρχονται από την διάταξη των fuel cell. Αυτό επιτυγχάνεται με την χρήση στεγανωτικών. Με τον καιρό, η διάταξη των fuel cell μπορεί να έχει εσωτερικές ή εξωτερικές διαρροές στον περιβάλλοντα χώρο. Για την αποφυγή αυτών των διαρροών οι διατάξεις των fuel cell είναι εγκλεισμένες σε πλαίσια και τα πλαίσια αερίζονται με ανεμιστήρες ώστε να εμποδιστεί η συσσώρευση υδρογόνου. Οι διαρροές στις διατάξεις υδρογόνου γίνονται έκδηλες μέσω της κακής ηλεκτρικής απόδοσης των fuel cell σε χρήση.

Από μόνες τους οι διαρροές υδρογόνου δεν είναι επικίνδυνες, προτάσσουν όμως τον κίνδυνο της πυρκαγιάς όταν το υδρογόνο αναμειχθεί σε κατάλληλη αναλογία με το οξυγόνο και τον κίνδυνο της ασφυξίας όταν το υδρογόνο αντικαταστήσει το οξυγόνο στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Συγκέντρωση υδρογόνου, τέτοια, ώστε να αποτελέσει κίνδυνο ασφυξίας μπορεί να εμφανιστεί μόνο σε κλειστούς χώρους. Σε εξωτερικούς χώρους το υδρογόνο διαχέεται τόσο απότομα ώστε καθιστά τον κίνδυνο ανύπαρκτο.

Παρόλα αυτά, επειδή το υδρογόνο είναι άχρωμο, άοσμο και άγευστο, η παρουσία του δεν μπορεί να ανιχνευθεί από ανθρώπους και δεν υπάρχουν προειδοποιητικά συμπτώματα πριν την αναισθησία.

2.3.2 Ανίχνευση διαρροών υδρογόνου

Οι διαρροές υδρογόνου συμβαίνουν. Μη ανιχνεύσιμες διαρροές είναι η αιτία για πολλά από τα ατυχήματα που σχετίζονται με το υδρογόνο. Μέχρι τώρα όλες οι εφαρμογές σε αστικά λεωφορεία περιλαμβάνουν και ένα σύστημα ανίχνευσης.

Το σύστημα ανίχνευσης διαρροής αποτελείται από μια σειρά ανιχνευτών που είναι συνδεδεμένοι στο σύστημα ελέγχου του οχήματος. Οι ανιχνευτές είναι τοποθετημένοι σε στρατηγικά σημεία γύρω από το αυτοκίνητο (όπως το πάτωμα, η οροφή, και ο χώρος της μηχανής) και είναι προγραμματισμένοι να ανάψουν προειδοποιητικά σήματα σε ποσοστά 5 και 15% και να χτυπήσουν συναγερμό στο 25% , όπου αντιστοιχεί στην ποσότητα του υδρογόνου στον αέρα (LFL). Τα επίπεδα αυτά είναι επίπεδα που μπορούν να δημιουργήσουν προβλήματα.

Όταν ο ανιχνευτής ανακαλύψει τα αντίστοιχα επίπεδα, το σύστημα ελέγχου εμφανίζει την προειδοποίηση πάνω στο ταμπλό. Όταν τα ανιχνεύσιμα επίπεδα ξεπεράσουν το επίπεδο συναγερμού τότε το σύστημα ελέγχου σβήνει την μηχανή. Η συγκέντρωση του υδρογόνου μπορεί να απεικονίζεται σε κατάλληλες ενδείξεις.

Οι διαρροές αυτές μπορεί να είναι μεγάλες ή μικρές. Μπορεί να γίνουν αντιληπτές από το χαρακτηριστικό σφύριγμα που παράγει ένα αέριο όταν διαρρέει, από μία αργή ή απότομη πτώση της πίεσης του καυσίμου, ή από υπόδειξη του αντίστοιχου ανιχνευτή. Πολύ μικρές διαρροές μπορεί να μην είναι ανιχνεύσιμες ούτε από τις παραπάνω μεθόδους και γίνονται ανιχνεύσιμες μόνο με κατάλληλα τεστ διαρροών.

Τα τεστ διαρροών είναι μία διαδικασία ρουτίνας, πολύ σημαντική όμως, μέρος της συντήρησης των μηχανών fuel cells. Τα τεστ αυτά έχουν τρεις μορφές : παρατήρηση για τυχούσα πτώση πίεσης, χρήση φορητών εγχειριδίων ανιχνευτών διαρροής και εφαρμογή ενός διαλύματος ανίχνευσης διαρροής. Αυτές οι μέθοδοι είναι πολύ ακριβείς και γίνονται με την αντίστοιχη σειρά:

- Τα τεστ πτώσης πίεσης αναδεικνύουν αν υπάρχει διαρροή σε μία μεγάλη γενικευμένη περιοχή.
- Τα φορητά μηχανήματα αναδεικνύουν αν υπάρχει διαρροή σε μεμονωμένες περιοχές
- Τα διαλύματα ανίχνευσης διαρροής αναδεικνύουν αν υπάρχει διαρροή σε συγκεκριμένο σημείο.

2.3.3 Σταματώντας τις Διαρροές

Τυπικά, οι διαρροές υδρογόνου σταματούν με τη σύσφιξη του χαλαρού σημείου ή με την αντικατάσταση του στοιχείου στο οποίο παρατηρείται η διαρροή.

Όταν συμβαίνει μια διαρροή το υπόλοιπο υδρογόνο φυλάσσεται με ασφάλεια πάνω στο όχημα. Ο μόνος λόγος για να απελευθερώσουμε το καύσιμο είναι είτε για να επιδιορθώσουμε κάποιο στοιχείο από το κύκλωμα αποθήκευσης καυσίμου, είτε για να μετακινήσουμε το όχημα από περιοχή που δεν είναι πιστοποιημένη ως ασφαλής για το υδρογόνο.

Πριν επιδιορθωθεί μία διαρροή πρέπει πρώτα να εντοπιστεί από τα τέστ που αναφέραμε προηγουμένως. Αν η διαρροή συμβεί σε ένα όχημα που χρησιμοποιεί υδρογόνο για καύσιμο, τότε τα τεστ της συντήρησης μπορούν να εφαρμοστούν ώστε να εξακριβωθεί ο τόπος της διαρροής. Η διαρροή συμβαίνει μόνο όταν τα στοιχεία του συστήματος βρίσκονται σε πίεση.

2.3.4 Υδρογονικές Φωτιές

Οι ιδιότητες του υδρογόνου που συμβάλλουν στην ευφλεκτότητά του είναι:

- έχει το μεγαλύτερο εύρος ευφλεκτότητας από όλα τα άλλα καύσιμα
- έχει την μικρότερη ενέργεια πυροδότησης από κάθε άλλο καύσιμο
- έχει την μεγαλύτερη ενέργεια ανά μονάδα βάρους (ενθαλπία) από κάθε άλλο καύσιμο
- καίγεται αόρατα και χωρίς καπνό
- μπορεί να προκαλέσει φορτία που δημιουργούν σπινθήρες κατά τη ροή.

Μόλις διαρρεύσει, το υδρογόνο αναμειγνύεται με τον αέρα και είναι εύφλεκτο σε ένα μεγάλο εύρος συγκεντρώσεων. Αυτό το εύφλεκτο μείγμα είναι πολύ εύκολο να πυροδοτηθεί και μόλις πυροδοτηθεί καίγεται με μεγάλο σθένος. Η φλόγα είναι σχεδόν αόρατη στο φως του ήλιου. Αν το υδρογόνο διαρρεύσει σε ένα κλειστό περιβάλλον, ο κίνδυνος ανάφλεξης και έκρηξης είναι πολύ μεγάλος. Αν αντίθετα η διαρροή γίνει σε ανοιχτό περιβάλλον ανέρχεται γρήγορα και διαχέεται ταχύτατα μειώνοντας έτσι τον κίνδυνο πυρκαγιάς. Η φωτιές αυτές καίνε ταχύτατα και για μικρό χρονικό διάστημα.

Τα περισσότερα μείγματα υδρογόνου και αέρα είναι δυναμικά εύφλεκτα και εκρηκτικά και μπορούν εύκολα να πυροδοτηθούν με σπινθήρα ή ζεστή επιφάνεια. Οι υδρογονικές φλόγες είναι σχεδόν αόρατες στο φως του ήλιου.

Μέχρι κάποιο σημείο η πιθανότητα της φωτιάς μειώνεται μέσω του σχεδιασμού. Τα υλικά της κατασκευής είναι άφλεκτα και πλήρως γειωμένα εμποδίζοντας έτσι το σχηματισμό στατικού ηλεκτρισμού.

Οι κύλινδροι αποθήκευσης καυσίμου υψηλής πίεση περιέχουν συσκευές απελευθέρωσης πίεσης που είναι σχεδιασμένες να απελευθερώνουν το περιεχόμενο των κυλίνδρων όταν ανιχνευτεί φωτιά ώστε να αποφευχθεί ο κίνδυνος έκρηξης

3. Το σύστημα μελέτης

Αντικείμενο μελέτης της παρούσας διπλωματικής είναι ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας το οποίο καλείται να καλύψει της ανάγκες της νήσου Άγιος Ευστράτιος. Σκοπός της μελέτης είναι η διαστασιολόγηση του συστήματος και η διερεύνηση της βιωσιμότητάς του με αρχή πάντα την κατά το δυνατότερο λιγότερη χρήση ορυκτών καυσίμων και την μικρότερη εκπομπή ρυπογόνων ουσιών κατά την παραγωγή. Σ' αυτό το κεφάλαιο θα περιγράψουμε τις συνιστώσες του συστήματος, θα αιτιολογήσουμε την επιλογή τους και θα εξηγήσουμε την λογική με την οποία αυτές συνεργάζονται. Τέλος θα επεξηγήσουμε τα αποτελέσματα της μελέτης ενώ στο τέλος θα γίνει και οι παράθεση γραφημάτων με τα αποτελέσματα των υπολογισμών

3.1 Οι συνιστώσες του συστήματος

Το σύστημα που εξετάζουμε είναι ένα υβριδικό σύστημα παραγωγής ενέργειας η οποία λαμβάνει χώρα στα εξής υποσυστήματα:

- Το αιολικό σύστημα (ανεμογεννήτριες)
- Το ηλιακό (φωτοβολταϊκά)
- Τη γεννήτρια Diesel
- και Το Fuel Cell όταν αυτό απαιτείται από το σχεδιασμό του συστήματος

3.1.1 Το αιολικό σύστημα

Το αιολικό σύστημα αποτελείται από τις ανεμογεννήτριες. Λόγω του διαθέσιμου δυναμικού και του γεγονότος ότι δεν θέλουμε εκτεταμένη χρήση του Diesel (το τελευταίο θα αναλυθεί περισσότερο παρακάτω), το αιολικό υποσύστημα παρέχει την μεγαλύτερη συχνότητα σε ενεργειακές αιχμές. Το αιολικό δυναμικό της περιοχής είναι τέτοιο, ώστε υπάρχουν στιγμές κατά τις οποίες οι ανεμογεννήτριες σε χρήση καλύπτουν και την περίπτωση της μέγιστης ζήτησης από μόνες τους, χωρίς να χρειαστεί η συνεισφορά και των άλλων υποσυστημάτων. Ένα στοιχείο που κάνει τις ανεμογεννήτριες ιδιαίτερες ανταγωνιστικές είναι και το γεγονός ότι λόγω των συνηθισμένων και δοκιμασμένων μερών τους αποτελούν και μια σχετικά φτηνή λύση για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ. Δεν αποτελούνται από ακριβά υλικά, τα υποσυστήματα τους είναι δοκιμασμένες off the shelve τεχνολογίες και η συμπεριφορά του κόστους σε σχέση με την αυξομείωση της δυναμικότητας τους είναι η καλύτερη από όλες της υπόλοιπες τεχνολογίες που χρησιμοποιούμε σ' αυτή την μελέτη. Συγκεκριμένα το κόστος αγοράς και εγκατάστασης μπορεί να ληφθεί ίσο προς 1500 €/kW (εγκαταστημένο).

Το πρόβλημα με το συγκεκριμένο υποσύστημα είναι αυτό που συναντάται πάντοτε με τα αιολικά πάρκα και έχει να κάνει με την εγγενή στοχαστικότητα της διακύμανσης της απόδοσης ισχύος. Μπορεί να υπάρξουν μεγάλα κενά ανάμεσα σε περιπτώσεις που φυσάει αρκετά ώστε να καλύπτεται σημαντικά μεγάλο ποσοστό της ζήτησης, αλλά υπάρχουν και μεγάλα διαστήματα κατά τα οποία δεν φυσάει καθόλου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να θέτουμε ένα μέγιστο όριο διείσδυσης των αιολικών και να μην αφήνουμε ένα σύστημα να εξαρτάται μόνο από την παραγωγή των. Τέλος ένα ακόμα πρόβλημα που συναντούμε στο σχεδιασμό ενός αιολικού συστήματος είναι και το γεγονός ότι πολλές φορές αυτό παράγει ενέργεια την οποία επειδή η ζήτηση δεν έχει ανάγκη, την απορρίπτει.

Τα προβλήματα που αναφέρθηκαν παραπάνω κάνουν απαραίτητη τη χρήση ενός αποθηκευτικού μηχανισμού για την ενέργεια που παράγουν οι ανεμογεννήτριες σε χρονικές στιγμές που η ζήτηση απορροφάει μέρος της ή και καθόλου. Συνήθως η λύση είναι η χρήση συσσωρευτών. Αντικείμενο της

παρούσας διπλωματικής είναι η αποθήκευση της ενέργειας δια μέσου της παραγωγής υδρογόνου.

Για την οικονομική ανάλυση της επένδυσης σε αιολική ενέργεια μπορούμε να λάβουμε μία τιμή της τάξεως του 2 - 2.5% της συνολικής επένδυσης στην συγκεκριμένη τεχνολογία για την συνολική διάρκεια της επένδυσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι ανεμογεννήτριες παρότι δεν έχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις στην συντήρηση, χρειάζονται κάποια τακτική επιθεώρηση λόγω των κινητών μερών που έχουν και των μηχανισμών που την αποτελούν και συμβάλουν στην μετάδοση της κίνησης. Η ισχύς που πηγάζει από τα αιολικά πάρκα μπορεί να πωληθεί για την περίπτωση του Άγιου Ευστράτιου στην τιμή των 91,74 €/MWh (0,0917€/kWh) (πηγή P.A.E.).

3.1.2 Το ηλιακό (φωτοβολταϊκό) σύστημα

Το εν λόγω σύστημα συνίσταται στα φωτοβολταϊκά πλαίσια. Το σύστημα αυτό λόγω του διαθέσιμου δυναμικού αποδίδει αρκετά συχνά μεγάλα ποσά ενέργειας και σε πολύ τακτικά διαστήματα. Η αυξομείωση όμως είναι τεράστια αφού η αποδιδόμενη ισχύς πέφτει από το μέγιστο στο μηδέν ακολουθώντας την εναλλαγή μέρας και νύκτας. Ένα ακόμη στοιχείο καθοριστικό για τα φωτοβολταϊκά είναι και το γεγονός ότι με 5000 €/kW(εγκαταστημένο), αποτελούν και την πιο ακριβή τεχνολογία από αυτές που χρησιμοποιούμε. Τα παραπάνω στοιχεία μας οδηγούν στην απόφαση να περιορίσουμε τα φωτοβολταϊκά σε ένα συμπληρωματικό, επικουρικό ρόλο και να διατηρήσουμε την δυναμικότητα τους περιορισμένη.

Το θετικό με την εν λόγω τεχνολογία είναι το ότι ενώ αποτελεί μια ακριβή λύση στην αρχική αγορά της, δεν επιβαρύνει τον προϋπολογισμό της επένδυσης με επιπλέον κόστη μετά την τοποθέτηση της. Για την ακρίβεια το κόστος χρήση και συντήρησης (O&M cost “operations & maintenance cost”) μπορεί χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα στην οικονομική ανάλυση του συστήματος να ληφθεί μηδέν. Για υπολογισμούς στους οποίους θα θέλαμε να κάνουμε εκτίμηση αυξημένου ρίσκου μπορεί να ληφθεί ως το 1% της συνολικής επένδυσης στην συγκεκριμένη τεχνολογία για την συνολική διάρκεια της επένδυσης. Τέλος η τιμή πώλησης της ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά συστήματα για την περίπτωση του Αγίου Ευστράτιου είναι 507,14 €/MWh (0,507 €/kWh) (πηγή P.A.E.).

3.1.3 Η γεννήτρια Diesel

Γίνεται προσπάθεια στην κατεύθυνση της απομάκρυνσης του νησιού από την χρήση ορυκτών καυσίμων. Σε σενάρια στα οποία αυτό δεν καθίσταται δυνατόν, γίνεται χρήση γεννητριών (εμβολοφόρων) Diesel για την κάλυψη των υψηλών αιχμών της ζήτησης.

Οι γεννήτριες Diesel επιβαρύνουν τον προϋπολογισμό με 1500 €/kW εγκαταστημένο. Τα έξοδα για τα καύσιμα που καταναλώνουν είναι

μεταβαλλόμενα γι' αυτό το λόγο στη μελέτη λαμβάνονται τρεις αντιπροσωπευτικές τιμές 55, 75 και 100 λεπτά/λίτρο για το Brent. Μία ακόμα επιβάρυνση στον προϋπολογισμό της επένδυσης εκτός από τα έξοδα λειτουργίας, είναι και τα έξοδα συντήρησης.

3.1.4 Το σύστημα του Υδρογόνου

Στο σύστημα αυτό όπως έχει γίνει λόγος και προηγουμένως κάνουμε χρήση της τεχνολογίας PEM και στο στάδιο του fuel cell και στο στάδιο του ηλεκτρολύτη. Για τους υπολογισμούς των ενεργειακών μεγεθών και τις κατανάλωσης υδρογόνου λαμβάνουμε την τιμή $4,5 \text{ kWh/Nm}^3$ και για την παραγωγή και για την κατανάλωση υδρογόνου. Η παραπάνω τιμή είναι η τιμή με την οποία κάνουν υπολογισμούς οι περισσότεροι κατασκευαστές.

Οι αιχμές της ζήτησης καλύπτονται σε όλα τα σενάρια από τις γεννήτριες Diesel. Μοναδική εξαίρεση αποτελεί το σενάριο 100% ΑΠΕ στο οποίο το σύνολο της ζήτησης καλύπτεται από τις ανανεώσιμες πηγές. Η κάλυψη των αιχμών της ζήτησης είναι πολύ δαπανηρή αν πρόκειται να γίνει με ΑΠΕ. Γι' αυτό και στα υπόλοιπα σενάρια το σύστημα των ΑΠΕ και υδρογόνου επιτελούν συμπληρωματικό ρόλο, καλύπτοντας αυξανόμενα επίπεδα πάνω από την μέση τιμή της ζήτησης.

3.2 Η μελέτη του συστήματος

3.2.1 Το υπολογιστικό εργαλείο

Οι ανάγκες που πρέπει να καλυφθούν υπολογιστικά είναι η ενεργειακή περιγραφή της συμπεριφοράς του συστήματος μας, η διαστασιολόγηση των μερών του συστήματος και η οικονομική μελέτη καθεμιάς από τις περιπτώσεις που λαμβάνουμε υπόψη. Ακόμα χρειάζεται και ένα περιβάλλον στο οποίο να έχουμε καλή εποπτεία των επιλογών μας και των αλληλεπιδράσεων των μερών του συστήματος. Το υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε είναι σε περιβάλλον Microsoft Office Excel, στο οποίο προσαρτήθηκαν και κάποιες μακροεντολές μέσω Visual Basic.

A) Βασικές Επιλογές

Σ' αυτό το φύλλο εργασίας εισάγονται στο σύστημα όλα τα αρχικά δεδομένα με τα οποία εν συνεχεία γίνονται όλοι οι υπόλοιποι υπολογισμοί. Συγκεκριμένα στο φύλλο αυτό έχουμε:

- Τα χαρακτηριστικά του καταναλωτή ενέργειας που έχουμε επιλέξει, στην περίπτωση μας, έχουμε τα χαρακτηριστικά της κατανάλωσης του νησιού Άγιος Ευστράτιος. Σ' αυτά συμπεριλαμβάνονται το γεωγραφικό πλάτος, ο πληθυσμός, η μέγιστη ζήτηση (kW) και η ελάχιστη ζήτηση (kW) στη χρονιά που εξετάζουμε, η παραγόμενη ενέργεια (kWh) του συστήματος σε εκείνο το μέρος για την ίδια χρονιά και το μέσο ετήσιο φορτίο ζήτησης (kW).

1. νησί		Αγ.Ευστράτιος
γεωγρ.πλάτος		39,5
πληθυσμός		371
μέγιστη ζήτηση(kW)		369,4
ελάχιστη ζήτηση (kW)		73,9
παραγόμενη ενέργεια(MWh)		1285,2
μέσο ετήσιο φορτίο ζήτησης (kW)		146,7
έτος προσομοίωσης		2009

- Τα χαρακτηριστικά της διάταξης των φωτοβολταϊκών όπως: ο τύπος των φωτοβολταϊκών (στην περίπτωσή μας έχουμε επιλέξει mono-Si), ο βαθμός απόδοσης, οι παραγόμενες kWh ανά επιφάνεια (m²), η προτεινόμενη επιφάνεια των φ/β, η ισχύς των ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο, η χρησιμοποιούμενη επιφάνεια συλλεκτών, η ετήσια παραγόμενη ενέργεια (MWh), η μέγιστη στιγμιαία διεύθυνση φ/β και η ονομαστική ισχύς της διάταξης.

3. διάταξη φ/β		mono-Si
τύπος		mono-Si
βαθμός απόδοσης		0,13
παραγόμενες kWh ανά m2		247,3
προτεινόμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)		5197,6
ισχύς φ/β ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο χρησιμοποιούμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)		68%
ετήσια παραγόμενη ενέργεια από φ/β (MWh)		210,1
μέγιστη στιγμιαία διεύθυνση Φ/Β		100%
ονομαστική ισχύς διάταξης (kW)		100,0

- Τα χαρακτηριστικά των/της ανεμογεννήτριας όπως: η αιολική ισχύς (αδιάστατη ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο σε kWh), ονομαστική ισχύς

της διάταξης των α/γ (kWh), μέγιστη στιγμιαία διείσδυση των α/γ, συντελεστής διόρθωσης ανέμου, μέση ταχύτητα του ανέμου.

4. διάταξη Α/Γ	
αιολική ισχύς (αδιάστατη ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο)	682%
ονομαστική ισχύς διάταξης Α/Γ (kW)	1000,0
μέγιστη στιγμιαία διείσδυση αιολικών	40%
συντελεστής διόρθωσης ανέμου	90%
μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	8,1

- Τα χαρακτηριστικά των Fuel Cell όπως: ο τύπος των fc (στην περίπτωση αυτή έχουν επιλεγεί τα PEM), ο αριθμός των fc, η ονομαστική ισχύς των fc, ο βαθμός απόδοσης των fc, η απαιτούμενη ποσότητα υδρογόνου για την παραγωγή 1 kW, η ονομαστική ισχύς του ηλεκτρολύτη, η απαιτούμενη ισχύς για την παραγωγή 1 Nm³ υδρογόνου, ο βαθμός απόδοσης του η/λ, η χωρητικότητα της δεξαμενής σε Nm³, το ενεργειακό επίπεδο της δεξαμενής, το αρχικό επίπεδο της δεξαμενής, την πίεση της δεξαμενής, η θερμοκρασία στη δεξαμενή, ενεργειακό περιεχόμενο υδρογόνου στην δεξαμενή και τα fc kJ/mol, και η πίεση λειτουργίας των fc.

5. Fuel Cells / Buffer Tank / Ηλεκτρολύτης		3
τύπος fuel cell		
αριθμός fuel cells	34	
συνολική ονομαστική ισχύς fuel cell (kW)	170	
βαθμός απόδοσης fuel cell	45%	
Απαιτούμενα m ³ H ₂ για παραγωγή Ισχύος	1/4,5	
Ηλεκτρολύτης (kW)	100,097	
Απαιτούμενη Ισχύ για την παραγωγή Nm ³ H ₂	4,500	KWh/Nm ³
Βαθμός Απόδοσης Ηλεκτρολύτη	0,450	
χωρητικότητα δεξαμενής (m ³ υδρογόνου)	8,000	m ³
χωρητικότητα δεξαμενής (Nm ³ υδρογόνου)	900,000	
ενεργειακό επίπεδο δεξαμενής (kWh)	4050,0000	
αρχικό επίπεδο δεξαμενής (%)	0	
πίεση δεξαμενής	25	bar
όγκος H ₂ στη δεξαμενή	8	m ³
θερμοκρασία στη δεξαμενή	298	K
R	0,0821	
ενεργειακό περιεχόμενο mol H ₂ (δεξ/νη)	231	Kj/mol
ενεργειακό περιεχόμενο mol H ₂ (FC)	228	Kj/mol
ενεργειακό περιεχόμενο mol H ₂ (δεξ/νη)	3,5	KWh/Nm ³
θερμοκρασία λειτουργίας FC	353	K
πίεση λειτουργίας FC	5	bar

- Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρολογικού συστήματος υποστήριξης, όπως η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης του inverter.

6. Ηλεκτρολογικά	
ονομαστική ισχύς inverter (kW)	99,98
βαθμός απόδοσης inverter	95%

- Τα χαρακτηριστικά του συστήματος γεννητριών Diesel, όπως η ελάχιστη απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς, ο αριθμός των απαιτούμενων μονάδων, η παραγωγική ικανότητα του συστήματος καθώς και ο βαθμός εφεδρείας.

7. Γεννήτριες diesel	
Ελάχιστη απαιτούμενη εγκατεστημένη ισχύς diesel	672,1 kW
Απαιτούμενες μονάδες	5
Ικανότητα μονάδων	568 kW
Εφεδρεία εγκατεστημένων συμβατικών μονάδων	100%

- Τα στοιχεία από τον υπολογισμό της τιμής του πετρελαίου, όπως η επιλογή για την τιμή του Brent, η τιμή του Diesel και το αποδιδόμενο κόστος παραγωγής ενέργεια του συστήματος (από στοιχεία της ΔΕΗ)

8. τιμή πετρελαίου	
Τιμή Brent (\$/b)	55
	100000
Τιμή diesel	763 €/1000kg
ΚΠΕ υπάρχοντος συστήματος - στοιχεία ΔΕΗ	5339,200 €/kWh
	1936,4

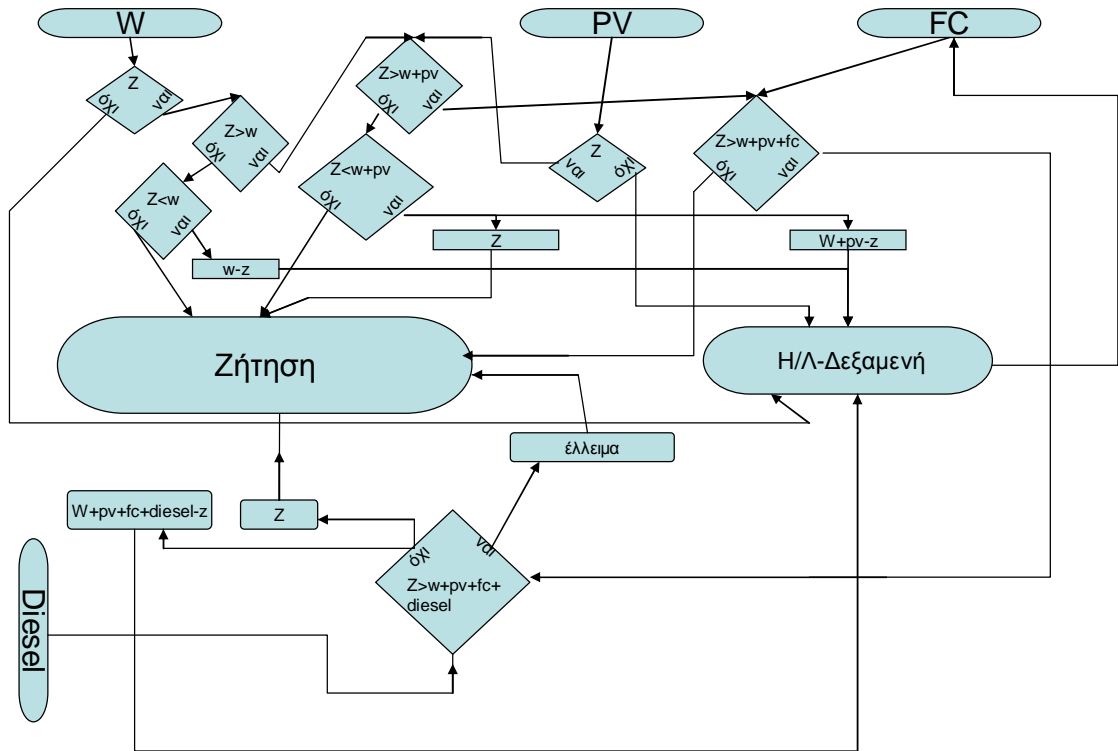
- Τέλος κάποια οικονομικά στοιχεία όπως τα ποσοστά επιδότησης για ενεργειακές επενδύσεις στο συγκεκριμένο τόπο και για συγκεκριμένη τεχνολογία.

10 Οικονομικά στοιχεία	
Ποσοστά επιδότησης	
φ/β	40%
α/γ	40%
fuel cell	0%

B) Το φύλλο HYBRID

Το συγκεκριμένο φύλλο εργασίας θα μπορούσε να χαρακτηριστεί η καρδιά του συστήματος. Σ' αυτό περιγράφονται όλες οι λειτουργίες του συστήματος, οι αλληλεπιδράσεις των μερών του και οι ενεργειακές ροές που λαμβάνουν χώρα.

Το παρακάτω διάγραμμα περιγράφει επαρκώς της λειτουργίες που συντελούνται στο σύστημα όπως είναι προγραμματισμένες στο παρόν φύλλο εργασίας.



Λειτουργικό διάγραμμα λειτουργίας του υβριδικού συστήματος

Από το παραπάνω διάγραμμα γίνεται αντιληπτή η λειτουργία του συστήματος η οποία συνοψίζεται στα εξής:

Το σύστημα έχει εισόδους ισχύος από τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά. Ελέγχει αν σε εκείνη την στιγμή υπάρχει ζήτηση και αν η ζήτηση είναι μηδενική τότε η ενέργεια κατευθύνεται στον ηλεκτρολύτη και από εκεί αποθηκεύεται σαν υδρογόνο στην δεξαμενή. Αν υπάρχει ζήτηση, το σύστημα ελέγχει αν αυτή η ζήτηση ικανοποιείται από την αποδιδόμενη αιολική ισχύ. Αν ικανοποιείται, τότε ελέγχεται το αν υπάρχει περίσσεια ισχύος και αν υπάρχει τότε αυτή αποθηκεύεται δια μέσου του ηλεκτρολύτη στη δεξαμενή με την μορφή υδρογόνου. Αν δεν υπάρχει περίσσεια, τότε όλη η ισχύς τροφοδοτεί την ζήτηση. Αν η ζήτηση δεν ικανοποιείται από την αποδιδόμενη αιολική ισχύ, τότε ελέγχεται αν μπορεί να ικανοποιηθεί και με την ισχύ από τα φωτοβολταϊκά. Κατόπιν ακολουθείται η ίδια διαδικασία, αν ικανοποιείται η ζήτηση, ελέγχεται η περίπτωση της περίσσειας ισχύος και στην περίπτωση που αυτή υπάρχει αποδίδεται στον ηλεκτρολύτη και αποθηκεύεται ως υδρογόνο στην δεξαμενή. Αν δεν υπάρχει τότε αποδίδεται ολόκληρη η ισχύς στην

ζήτηση. Στην περίπτωση που και η αιολική και η ισχύς από τα φωτοβολταικά δεν επαρκούν για την ζήτηση, τότε ελέγχεται η περίπτωση της από κοινού απόδοσης ισχύος και από τις κυψέλες καυσίμου. Στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν γίνεται έλεγχος περισσειας γιατί οι κυψέλες καυσίμου μας αποδίδουν την αναγκαία ισχύ για να συμπληρωθεί το αίτημα της ζήτησης. Εξάλλου η μετατροπή της ενέργειας της κυψέλης σε υδρογόνο θα ήταν μια αντίστροφη διαδικασία με πάρα πολύ μικρή απόδοση. Στην περίπτωση που το άθροισμα της ισχύος και της ανεμογεννήτριας, των φωτοβολταικών και των κυψελών καυσίμου δεν επαρκεί για την ζήτηση το σύστημα ζητά την παραγωγή ισχύος από τις γεννήτριες Diesel. Ελέγχει αν ικανοποιείται η ζήτηση, αν υπάρχει περίσσεια ισχύος, διοχετεύεται στον ηλεκτρολύτη και κατόπιν αποθηκεύεται στην δεξαμενή ως υδρογόνο. Αν δεν υπάρχει περίσσεια τροφοδοτείται κατευθείαν η ζήτηση ενώ αν δεν μπορεί ούτε με την γεννήτρια Diesel να καλυφθεί η ζήτηση, τότε αποδίδεται η παραγόμενη ισχύς και έχουμε την ένδειξη του ελλείμματος. Το τελευταίο είναι δύσκολο να συμβεί καθότι η διαστατοποίηση του συστήματος γίνεται και με γνώμονα να ικανοποιείται πάντα η ζήτηση ώστε να μην υπάρχει ποτέ έλλειμμα ισχύος. Στο τέλος του τεύχους μπορεί ο αναγνώστης να βρει το φύλλο εργασίας HYBRID στο οποίο υπάρχει ο σχεδιασμός του συστήματος.

Γ) Τα οικονομικά και ενεργειακά αποτελέσματα

Εδώ αποτυπώνονται τα αποτελέσματα λειτουργίας του συστήματος. Αφορούν αποτελέσματα της παραγωγής ενέργειας και αποτελέσματα της οικονομικής ανάλυσης. Τα παραπάνω αποδίδονται στ εξής:

- Αποδίδει τα γενικά χαρακτηριστικά της ζήτησης για εποπτικούς λόγους.

1. Γενικά	
Νησί	Αγ.Ευστράτιος
μέγιστη ζήτηση(kW)	369
ελάχιστη ζήτηση (kW)	74
παραγόμενη ενέργεια(MWh)	1285
μέσο ετήσιο φορτίο ζήτησης (kW)	146,7

- Αποδίδει τα ενεργειακά αποτελέσματα της λειτουργίας του συστήματος σε ετήσια βάση.

2. Ενεργειακά	
ετήσια δυνάμενη να παραχθεί ενέργεια από ρν (kWh)	210144
ετήσια δυνάμενη να παραχθεί ενέργεια από Α/Γ (kWh)	3324983
ετήσια παραγόμενη ενέργεια από diesel (kWh)	10863
μέγιστος αριθμός μονάδων diesel που τέθηκαν σε λειτουργία	2
diesel προς ζήτηση (kWh)	10477
ρν προς ζήτηση (kWh)	197026
Α/Γ προς ζήτηση (kWh)	423388
Fuel Cell προς ζήτηση (kWh)	654302

	Σύνολο (kWh)	1285193
ποσοστό ζήτησης που καλύπτεται από diesel		0,8%
ποσοστό ζήτησης που καλύπτεται από ρν		15,3%
ποσοστό ζήτησης που καλύπτεται από Α/Γ		32,9%
ποσοστό ζήτησης που καλύπτεται από FC		50,9%
	Σύνολο	100%
diesel προς δεξαμενή (kWh)		386
ρν προς δεξαμενή (kWh)		11921
Α/Γ προς δεξαμενή (kWh)		1463125
	Σύνολο (kWh)	1475432
diesel προς απόρριψη (kWh)		0
ρν προς απόρριψη (kWh)		1198
Α/Γ προς απόρριψη (kWh)		1438470
	Σύνολο (kWh)	1439668
Χρήση παραγόμενης ενέργειας από ρν :		
για κάλυψη της ζήτησης		94%
για πλήρωση της δεξαμενής		6%
προς απόρριψη		1%
Χρήση παραγόμενης ενέργειας από Α/Γ :		
για κάλυψη της ζήτησης		13%
για πλήρωση της δεξαμενής		44%
προς απόρριψη		43%
Χρήση παραγόμενης ενέργειας από diesel :		
για κάλυψη της ζήτησης		96%
για πλήρωση της δεξαμενής		4%
προς απόρριψη		0%
capacity factor Α/Γ		22%
capacity factor ρν		24%
μέγιστη συμβατική παραγωγή/αιχμή		48%

- Αποδίδει τη οικονομική ανάλυση του συστήματος και αναλύει την αποδοτικότητα της επένδυσης σε βάση 20ετίας.

3. Οικονομική αξιολόγηση	
i	5%
N _{a/γ}	20
N _{ρν}	30
N _{diesel}	30
N _{bat}	10
N _{inv}	12
R _{a/γ}	0,080242587
R _{ρν}	0,065051435
R _{diesel}	0,065051435
R _{fc}	0,129504575

R_{inv} 0,11282541

Κόστος επένδυσης :

fuel cell	3000
δεξ/νη	38
ΗΛ/ΤΗΣ	1300
Α/Γ	1500
ρν	5000
inverter	1300
γεννήτριες diesel	1600

τιμές από :	εως:	χωρίς επιδότηση	επιδοτούμενο	
1500	3000	750000	450000	€
		361000	216600	
		929474	557685	
1000	1600	1499979	1499978	€
5.000	8000	499920	299952	€
1250	2000	129979	77987	€
800	1600	908800	908800	€
	Σύνολο	5079152	4011002	€

Επιδοτήσεις

Α/Γ
ρν
inverter
δεξ/νη
ΗΛ/ΤΗΣ
Fuel Cell

Κόστος συντήρησης και λειτουργίας :

FC
Α/Γ
ρν
inverter
Η/ΤΗΣ
γεννήτριες diesel - σταθερό κόστος
γεννήτριες diesel - μεταβλητό κόστος
γεννήτριες diesel - κόστος καυσίμου
συνολικό ΚΣΛ γεννητριών diesel
Σύνολο

Κόστος Παραγόμενης Ενέργειας:

ΚΠΕ diesel
ΚΠΕ α/γ
ΚΠΕ φ/β

**ΚΠΕ υβριδικού συστήματος
κάλυψη ζήτησης**

% συμβολή των ΑΠΕ στην κάλυψη της ζήτησης

Κόστος παραγόμενης ενέργειας υπάρχοντος συστήματος (στ.ΔΕΗ)

Κόστος παραγόμενης ενέργειας υπάρχοντος συστήματος

(προσομοίωση)

ΚΠΕ υβριδικού με επιδότηση 0,07670451

Κόστος Εκπομπών:		Εκπομπές (g)	
		CO	16294,460 g
		HC	4996,968 g
		NOx	38020,40679 g
		PM	217,259 g
Εκπομπές (t)			
0,01629446 t	Τελικό κόστος εκπ.	σε €	0,203681
0,004996968 t			
0,038020407 t			
0,000217259 t			
Έσοδα			
		αιλική ενέργεια	0,0917 €/kWh
		ηλιακή ενέργεια	0,457 €/kWh
		ενέργεια από τα FC	0,0917 €/kWh
		ενέργεια από το Diesel	0,0016 €/kWh
Τελικά έσοδα			
38824,697 €			
90040,68 €			
59999,514 €			
16,763 €			
188881,654 € (Σύνολο)			

Οικονομική Αξιολόγηση

Ετος	Χωρίς Επιδότηση	Επιδότηση
1	- 4.044.513,6	- 2.976.364,0
2	125838	125838
3	125838	125838
4	125838	125838
5	125838	125838
6	125838	125838
7	125838	125838
8	125838	125838
9	125838	125838
10	-624162	-324162
11	125838	125838
12	125838	125838
13	125838	125838
14	125838	125838
15	125838	125838
16	125838	125838
17	125838	125838
18	125838	125838
19	125838	125838
20	125838	125838
NPV	-2.796.883,04 €	-1.617.349,18 €
IRR	-7%	-4%

Δ) Δεδομένα του συστήματος Φωτοβολταϊκών

Η αποδιδόμενη ισχύς από τα φωτοβολταϊκά καταλήγει στο φύλλο HYBRID με βάση τα δεδομένα και του υπολογισμού που λαμβάνουν χώρα στο παρόν φύλλο. Εδώ γίνεται υπολογισμός της αποδιδόμενης ωριαίας ισχύος του υποσυστήματος των φωτοβολταϊκών λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα που έχουμε για τον συγκεκριμένο τόπο και χρησιμοποιώντας και του κατάλληλους συντελεστές διόρθωσης. Τα φωτοβολταϊκά που χρησιμοποιούμε είναι τεχνολογίας Mono- Si.

Ε) Δεδομένα του αιολικού συστήματος

Η αποδιδόμενη ισχύς από την ανεμογεννήτρια καταλήγει στο φύλλο HYBRID από τα δεδομένα που υπολογίζονται στο παρόν φύλλο. Σ' αυτό το φύλλο έχουμε σαν δεδομένα τα συγκεντρωτικά ωριαία διαγράμματα των ταχυτήτων των ανέμων στην περιοχή για την οποία κάνουμε την μελέτη και κατόπιν από τις ταχύτητες μπορούμε να υπολογίσουμε κάθε ώρα την παραγόμενη ισχύ των ανεμογεννητριών ανάλογα και με την εγκατεστημένη ισχύ τους. Δεδομένα για την συμπεριφορά των γεννητριών σε κάθε κλίμακα ταχύτητας του ανέμου λαμβάνουμε από το πρόγραμμα windrose που διανέμει δωρεάν το ΚΑΠΕ από την ιστοσελίδα του. Στο παράρτημα στο τέλος του παρόντος τεύχους παρατίθενται τα φύλλα για την παραπομπή του αναγνώστη.

ΣΤ) Δεδομένα του συστήματος Fuel Cell

Όλα τα δεδομένα που είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς στο φύλλο HYBRID και έχουν σχέση με το σύστημα του υδρογόνου (ηλεκτρολύτης, κυψέλη καυσίμου) βρίσκονται σ' αυτό το φύλλο. Μπορούμε να επιλέξουμε ανάμεσα σε διαφορετικά είδη κυψελών και ανάμεσα σε διαφορετικά είδη ηλεκτρολυτών. Τέλος υπάρχει και η καμπύλη της συμπεριφοράς του ηλεκτρολύτη στην παρεχόμενη ενέργεια που λαμβάνει. Αυτό συμβαίνει γιατί ο ηλεκτρολύτης δεν είναι τελείως γραμμικό σύστημα με αποτέλεσμα η καμπύλη να είναι απαραίτητη για τον υπολογισμό της ποσότητας του υδρογόνου σε κάθε είσοδο ισχύος. Όπως και προηγουμένως στο τέλος παρατίθεται το συγκεκριμένο φύλλο εργασίας.

Ζ) & Η) Δεδομένα λειτουργίας των γεννητριών Diesel

Τα δεδομένα που αφορούν τις γεννήτριες Diesel βρίσκονται σ' αυτό το φύλλο. Υπάρχουν πληροφορίες που αφορούν τον χρησιμοποιούμενο τύπο της γεννήτριας (όλοι οι τύποι αφορούν εμβολοφόρους Diesel) και τα χαρακτηριστικά που τον συνοδεύουν.

τρέχον Αγ.Ευστράτι ος					
αριθμός μονάδων	σειρά ένταξη ς	κατασκευαστή ς-τύπος	καύσιμο	ειδική κατανάλωση(gr/kW h)	ονομαστικ ή ισχύς (kW)
5	1	MAN D2566/ME	diesel	281,5	90
	2	MAN D2566/ME	diesel	291,4	90
	3	MAN D2566/ME	diesel	296,1	90
	4	MAN D2566/ME	diesel	297,8	90
	5	KTS KOREA D8AX	diesel	290	208
	6	KTS KOREA D8AX	diesel	290	208
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0

τεχνικό ελάχιστο (kW)	κατανάλωση στην αθροιστική ονομαστική ισχύ (gr/h)	μέση ειδική κατανάλωση ενταγμένων μονάδων (gr/kWh)
30	25335	90
30	51561	286
30	78210	290
30	105012	292
55	165332	291
55	225652	291
0	225652	291
0	225652	291
0	225652	291

Υπάρχουν ακόμα και οι προδιαγραφές εκπομπής ρύπων που χρησιμεύουν στον υπολογισμό του κόστους εκπομπών για το φύλλο RESULTS στο οποίο κάναμε αναφορά προηγουμένως.

Θ) Συγκεντρωτικά εποπτικά διαγράμματα

Σ' αυτό το φύλλο μπορεί ο χρήστης του εργαλείου να έχει την εποπτεία σε όλο το σύστημα και τα αποτελέσματά του (βλ παράρτημα: charts). Εμφανίζονται τα διαγράμματα της απόδοσης ισχύος στη ζήτηση για κάθε μήνα. Στην ίδια χρονική βάση εμφανίζονται και οι συνεισφορές των υποσυστημάτων καθώς και η διαχείριση της περίσσειας από κάθε υποσύστημα. Στο τέλος του τεύχους παρατίθενται όλα τα σχετικά διαγράμματα.

Ι) Πίνακες χρονικών συμμετοχών

Στο τελευταίο φύλλο εμφανίζεται η χρονική διάρκεια λειτουργίας του κάθε υποσυστήματος στη βάση του ενός έτος (βλ παράρτημα: TIME). Υπολογίζεται ακόμα και το ποσοστό της χρονικής συνεισφοράς των ΑΠΕ. Χρήσιμο εργαλείο για τον χρήστη στην περίπτωση που μελετά το σύστημα της αποθήκευσης ενέργειας από ΑΠΕ αφού εκτός των άλλων πρέπει να γνωρίζει και για πόσο μπορεί να καλύπτει μέρος ή όλη την ζήτηση από την αποθηκευμένη ενέργεια. Για να μπορεί δηλαδή να διακρίνει πόσο αποτελεσματικό είναι το σύστημα που μελετάει και σχεδιάζει σαν UPS και σε χρονική βάση πέρα από ενεργειακή.

3.2.2. Τα σενάρια μελέτης

Στα πλαίσια αυτής της μελέτης, η διαστασιολόγηση ενός τέτοιου συστήματος γίνεται με κριτήρια την οικονομική απόδοση, τον μεγαλύτερο δυνατό εκτοπισμό των γεννητριών Diesel και την μεγαλύτερη δυνατή κάλυψη της ζήτησης από ΑΠΕ (και σε χρονική και σε ενεργειακή βάση).

Θα πρέπει να επισημανθεί ότι η οικονομική ανάλυση σε κάθε σενάριο γίνεται με δύο υποπεριπτώσεις. Μία περίπτωση στην οποία η επένδυση επιδοτείται από το κράτος και σε μία περίπτωση στην οποία η επένδυση δεν επιδοτείται. Στην περίπτωση της επιδότησης, αυτή διαμορφώνεται στο 40% για τον Άγιο Ευστράτιο αφού αποτελεί απομακρυσμένη και αναπτυσσόμενη περιοχή μακριά από δίκτυο.

Τα οικονομικά στοιχεία που πρέπει να έχει υπόψη του ο αναγνώστης είναι τα εξής:

Για τα φωτοβολταϊκά συστήματα το κόστος είναι περίπου 5000 €/kW της εγκατάστασης. Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης είναι 0% - 1% του κόστους της εγκατάστασης ανά έτος (στοιχεία ΚΑΠΕ).

Για τις ανεμογεννήτριες το κόστος είναι περίπου 1500 €/kW της εγκατάστασης. Το κόστος λειτουργίας είναι περίπου 2% του κόστους εγκατάστασης ανά έτος (στοιχεία ΚΑΠΕ).

Για τα fuel cell το κόστος κυμαίνεται από 2500 €/kW έως 4000 €/kW. Για τους υπολογισμούς λαμβάνουμε 3000 €/kW. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας είναι ίσο προς 2.5% του κόστους εγκατάστασης ανά έτος. Επειδή όμως ο χρόνος ζωής τους είναι 10 χρόνια ενώ ο ορίζοντας της επένδυσης είναι 20, το κόστος επιβαρύνεται και με το κόστος αντικατάστασής τους κάθε 10 χρόνια.

Για τον ηλεκτρολύτη το κόστος είναι 1300 €/kW της εγκατάστασης. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας ανέρχεται στα 2% του κόστους εγκατάστασης ανά έτος και ο χρόνος ζωής φτάνει τα 20 χρόνια.

Για την δεξαμενή το κόστος είναι 38 €/Nm³. Το κόστος συντήρησης και λειτουργίας είναι πρακτικά μηδενικό

Τα έσοδα από την πώληση της ενέργειας αποδίδονται στο παρακάτω πίνακα για καθένα από τα υποσυστήματα και για την δεδομένη χρήση και τοποθεσία (πηγή PAE).

Έσοδα			
	αιολική ενέργεια	0,0917	€/kWh
	ηλιακή ενέργεια	0,457	€/kWh
	ενέργεια από τα FC	0,400	€/kWh
	ενέργεια από το Diesel	0,0016	€/kWh

Ο τύπος που χρησιμοποιούμε σε όλα τα σενάρια είναι ο PEMFC. Ένας από τους λόγους για την επιλογή αυτή είναι και το γεγονός ότι η συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η πλέον χρησιμοποιούμενη σε σύγχρονες εφαρμογές. Αυτό σημαίνει ότι είναι δοκιμασμένη τεχνολογία και άρα είναι εύκολο να ανατρέξει κανείς σε βιβλιογραφία και μελέτες για να εκτιμήσει την συμπεριφορά τους και στο δικό του σύστημα, ενώ παράλληλα είναι κάθε άλλο παρά ξεπερασμένη αφού πλέον όλη η έρευνα στρέφεται σε αυτή και στη τεχνολογία των SOFC. Ακόμα όπως έχει αναφερθεί τα PEMFC (και τα SOFC) έχουν την μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος ενώ παράλληλα έχουν και τις καλύτερες επιδόσεις σε αυξομειώσεις του φορτίο στις οποίες δεν δείχνουν να είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα. Τέλος έχουν και την καλύτερη συμπεριφορά σε διαδικασίες on – off και το καλύτερο χρόνο εκκίνησης ο οποίος κυμαίνεται από 20’’ έως 5’ αναλόγως με την απόσταση των στοιχείων από την δεξαμενή. Όλοι οι παραπάνω λόγοι οδηγούν στο συμπέρασμα ότι τα PEMFC είναι η ιδανικότερη επιλογή για την εφαρμογή που μελετάται στην παρούσα διπλωματική.

Το ζητούμενο είναι η μεγαλύτερη αυτονομία του συστήματος (αποφυγή χρήσης του Diesel) με το μικρότερο δυνατό κόστος. Η συσκευές ηλεκτρόλυσης είναι ακριβή τεχνολογία ενώ το κόστος για την δεξαμενή είναι σχετικά μικρό. Η ηλεκτρόλυση διαστασιοποιείται με βάση τη εγκατεστημένη ισχύ σε ΑΠΕ (ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά). Η λογική πίσω από την διαστασιολόγηση του συστήματος του υδρογόνου είναι να πετυχαίνει το σύστημα να αποθηκεύει όσον το δυνατόν μεγαλύτερη ενέργεια γίνεται από την απορριπτόμενη των άλλων συστημάτων, χωρίς να μειώνεται ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης (IRR) και ταυτόχρονα να αναπληρώνει τα κενά της ζήτηση όταν αυτά συμβαίνουν. Εκτοπίζοντας, όσο είναι δυνατόν, τις γεννήτριες diesel, ενώ ταυτόχρονα να διατηρεί τον IRR σε ανεκτές τιμές.

3.2.2.α Οι εξεταζόμενες λύσεις

Έχουμε τα εξής σενάρια:

97% της χρονικής ζήτησης

80% της χρονικής ζήτησης

60% της χρονικής ζήτησης

A) Σενάριο στο 97% της ζήτησης

Στην προκειμένη περίπτωση, η μελέτη και η προσομοίωση του μοντέλου μας οδηγούν στην επιλογή συνολικής εγκαταστημένης ισχύος των συστημάτων ΑΠΕ (αιολικά και ηλιακά) ίσο προς 450 kW. Αυτό αποδίδει στο σύστημα μία συνολική ισχύ ίση προς 247 kW. Η προφανής μείωση οφείλεται στο γεγονός ότι έχουμε βάλει ως βαθμό διείσδυσης των αιολικών ίση προς 40%. Όσον αφορά το σύστημα του υδρογόνου, αυτό διαστασιολογείται ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών αφού όπως έχει αναφερθεί και στα προηγούμενα επιτελεί το ρόλο του συστήματος υποστήριξης η αλλιώς του UPS. Καλύπτουμε έτσι το 97% της χρονικής ζήτησης. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάσταση στη περίπτωση αυτή είναι τέτοιας ισχύος ώστε να ξεπερνάει την ζήτηση στο 97% των περιπτώσεων. Οι γεννήτριες Diesel καλύπτουν τις αιχμές της ζήτησης που ξεπερνούν την εγκατεστημένη ισχύ του υπόλοιπου συστήματος και αντιστοιχούν στο 3% των περιπτώσεων.

Η προσομοίωση του συστήματος μας οδηγεί στις εξής επιλογές όσον αφορά τα μέρη του συστήματος:

- Φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα αποτελούν το ακριβότερο κομμάτι του πάζλ. Η επιλογή των 100 kW γίνεται γιατί έτσι πετυχαίνουμε τη μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ σε σχέση με τα έσοδα που αποφέρει η χρήση αυτής της τεχνολογίας. Συγκεκριμένα η ΡΑΕ (Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας) έχει εκδώσει πίνακα τιμών πώλησης της ενέργειας σύμφωνα με τον οποίο η ανώτατη τιμή πώλησης της kWh για τα φωτοβολταϊκά αφορά εγκατεστημένη ισχύ συστήματος 100 kW. Πάνω από αυτή την ισχύ η τιμή πώλησης πέφτει δραματικά και κάνει μία επένδυση ασύμφορη. Το τελευταίο στοιχείο είναι μείζονος σημασίας αφού τα φωτοβολταϊκά αποτελούν την ακριβότερη τεχνολογία που χρησιμοποιείται σ' αυτή την μελέτη.

Συνεπώς η δυναμικότητα του εν λόγω συστήματος περιορίζεται στα 100 kW (δηλαδή στο 68% του μέσου ετήσιου φορτίου). Η δυναμικότητα αυτή εκτιμάται ότι θα αποφέρει έσοδα από την πώληση της αντίστοιχης ισχύος ίση προς περίπου 90.000 €ετησίως. Ο παρακάτω πίνακας αποτυπώνει τα χαρακτηριστικά του ηλιακού υποσυστήματος.

3. διάταξη φ/β	
mono-Si	mono-Si
τύπος	mono-Si
βαθμός απόδοσης	0,13
παραγόμενες kWh ανά m2	247,3
προτεινόμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)	5197,6
ισχύς φ/β ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο χρησιμοποιούμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)	68%
ετήσια παραγόμενη ενέργεια από φ/β (MWh)	849,2397096
μέγιστη στιγμιαία διείσδυση Φ/Β	100%
ονομαστική ισχύς διάταξης (kW)	99,9

Η τελική τιμή για τα φωτοβολταϊκά διαμορφώνεται στα 499.553 €η οποία επαληθεύεται και από τις υπάρχουσες επενδύσεις στην αγορά. Για την περίπτωση της επιδότησης (40%) η τιμή των φωτοβολταϊκών διαμορφώνεται στα 299.732 €.

Όσον αφορά την ενεργειακή αναφορά για αυτό το σύστημα, καλύπτει το 15,3% της ετήσιας ζήτησης. Αποδίδει στην ζήτηση 196.881 kWh στον ηλεκτρολύτη 10.776 kWh. Από το σύνολο της παραγωγής μόνο το 1% δηλαδή 2.333 απορρίπτεται από το σύστημα. Τέλος το capacity factor για τα φωτοβολταϊκά είναι ίσο προς 24%.

- Ανεμογεννήτριες

Οι ανεμογεννήτριες είναι το υποσύστημα με την μεγαλύτερη δυναμικότητα. Όπως έχει αναφερθεί και νωρίτερα το δυναμικό σε σχέση με την ζήτηση στο συγκεκριμένο μέρος αλλά και η σχετική χαμηλή τιμή της τεχνολογίας αυτής την φέρνει στην κυρίαρχη θέση του συστήματος. Έχοντας υπόψη το βαθμό διείσδυσης για τον οποίο κάναμε λόγο παραπάνω η ισχύς των ανεμογεννητριών ανέρχεται στα 370 kW το οποίο είναι αρκετά βολικό γιατί υπάρχουν ανεμογεννήτριες σε αυτή την ισχύ από την εταιρία Vestas. Τα στοιχεία για την ανεμογεννήτρια που αφορούν αυτό το σενάριο βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα:

4. διάταξη Α/Γ	
αιολική ισχύς (αδιάστατη ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο)	251%
ονομαστική ισχύς διάταξης Α/Γ (kW)	368,0
μέγιστη στιγμιαία διείσδυση αιολικών	40%
συντελεστής διόρθωσης ανέμου	90%
μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	8,1

Τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν τις ανεμογεννήτριες είναι τα εξής:

Τιμή ανεμογεννήτριας 551.929 € (χωρίς επιδότηση)
Τιμή ανεμογεννήτριας 331.157 € (με επιδότηση)
Κόστος λειτουργίας και συντήρησης 11.038 €/έτος
Έσοδα από την πώληση ενέργειας 34.519 €/έτος

Τα ενεργειακά στοιχεία είναι τα εξής:

Η ενέργεια που αποδίδεται στην ζήτηση είναι ίση προς 376.442 kWh
Ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από την ανεμογεννήτρια (30%)
Ποσοστό της παραγωγής της α/γ που καταλήγει στη ζήτηση (31%)
Η ενέργεια που αποδίδεται στην ηλεκτρόλυση είναι 463.455 kWh (38%)
Η ενέργεια που απορρίπτεται είναι ίση προς 383557 kWh (31%)
Capacity Factor 26%

- Σύστημα υδρογόνου

Το σύστημα αυτό όπως προαναφέρθηκε διαδραματίζει το ρόλο του UPS. Αποθηκεύει ενέργεια και την αποδίδει όταν αυτό απαιτηθεί, σύμφωνα με τον σχεδιασμό του συστήματος. Στο σύστημα αυτό ο σχεδιασμός ενέχει τρία στοιχεία τα οποία χρειάζονται διαστασιολόγηση ανάλογα με το σενάριο το οποίο είναι υπό μελέτη. Τα fuel cell, ο ηλεκτρολύτης και η δεξαμενή είναι τα στοιχεία των οποίων της διαστάσεις αυξομειώνονται ώστε να επιτευχθεί ο στόχος του κάθε σεναρίου.

Με δοκιμές το υπολογιστικό εργαλείο καταλήγει στην βέλτιστη, για τα δεδομένα και ζητούμενα λύση, διαστασιολόγηση των μερών του συστήματος υδρογόνου.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας δίνουν:

Αριθμός f/c : 19

Συνολική ονομαστική ισχύς f/c: 95 kW

Ονομαστική Ισχύς Ηλ/τη: 117 kW

Χωρητικότητα Δεξαμενής : 200 Nm³

Η ενέργεια που αποδίδεται στην ζήτηση είναι ίση προς 295.389 kWh

Ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από τα fuel cell (23%)

Τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν το σύστημα υδρογόνου είναι τα εξής:

Κόστος Fuel Cell χωρίς επιδότηση = 285000 €

Κόστος Fuel Cell με επιδότηση = 171000 €

Κόστος Ηλ/τη χωρίς επιδότηση = 152056 €

Κόστος Ηλ/τη με επιδότηση = 91233 €

Κόστος δεξαμενής χωρίς επιδότηση = 7600 €

Κόστος δεξαμενής με επιδότηση = 4560 €

Συνεπώς για τα δεδομένα του σεναρίου παρατίθενται στο πίνακα τα αποτελέσματα για την βιωσιμότητα της επένδυσης.

4. Οικονομική Αξιολόγηση

Έτος	Χωρίς Επιδότηση	Επιδότηση
1	- 1.407.384,1	- 977.746,9
2	218637	218637
3	218637	218637
4	218637	218637
5	218637	218637
6	218637	218637
7	218637	218637
8	218637	218637
9	218637	218637
10	-66363	47637
11	218637	218637
12	218637	218637
13	218637	218637
14	218637	218637
15	218637	218637
16	218637	218637
17	218637	218637
18	218637	218637
19	218637	218637
20	218637	218637
NPV	1.087.949,46 €	1.558.782,18 €
IRR	13%	21%

Παρατηρούμε ότι η συγκεκριμένη επένδυση παρουσιάζει μεγάλο ενδιαφέρον. Τα αρχικά έξοδα εγκατάστασης είναι μεγάλα, όμως αναλόγως μεγάλα είναι και τα έσοδα από την παραγωγή ενέργειας. Συνεπώς η συγκεκριμένη λύση είναι εφαρμόσιμη αφού η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ – υδρογόνο καλύπτει το 70% της συνολικής ζήτησης και το 97% της ζήτησης σε χρονική βάση. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μπορεί να καλύψει την ζήτηση μέσω ΑΠΕ – υδρογόνου στο 97% του χρόνου. Χαρακτηριστικά στη περίπτωση της εγκατάστασης χωρίς επιδότηση, ο IRR είναι 13% -αρκετά ικανοποιητικός-, ενώ στην περίπτωση της επιδότησης είναι 21% δηλαδή αρκετά αποδοτική.

Τέλος, το κόστος των εκπεμπόμενων ρύπων για αυτή τη λύση είναι ίσο προς 8,10 € (Στοιχεία από τις προδιαγραφές ρύπων EURO4)

Β) Σενάριο στο 80% της ζήτησης

Ισχύει ότι και στο προηγούμενο σενάριο μόνο που στην προκειμένη περίπτωση, η μελέτη και η προσομοίωση του μοντέλου, μας οδηγούν στην επιλογή συνολικής εγκαταστημένης ισχύος των συστημάτων ΑΠΕ (αιολικά και ηλιακά) ίσο προς 322 kW. Αυτό αποδίδει στο σύστημα μία συνολική ισχύ ίση προς 170 kW. Καλύπτουμε έτσι το 80% της χρονικής ζήτησης. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάσταση στη περίπτωση αυτή είναι τέτοιας ισχύος ώστε να ξεπερνάει την ζήτηση στο 80% των ωριαίων περιπτώσεων. Οι γεννήτριες Diesel καλύπτουν τις αιχμές της ζήτησης που ξεπερνούν την εγκατεστημένη ισχύ του υπόλοιπου συστήματος και αντιστοιχούν στο 20% των περιπτώσεων.

Η προσομοίωση του συστήματος μας οδηγεί στις εξής επιλογές όσον αφορά τα μέρη του συστήματος:

- Φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά όπως έχουμε αναφέρει αποτελούν το πιο ακριβό υποσύστημα. Η ανάλυση του συστήματος και οι υπολογισμοί μας οδηγούν στην επιλογή των 74 kW εγκατεστημένης ισχύος, δηλαδή στο 50% του μέσου ετήσιου φορτίου.

Η εγκατάσταση αυτή εκτιμάται ότι θα αποφέρει κατά την λειτουργία της 66.139,42 €/έτος. Ο παρακάτω πίνακας αποδίδει τα χαρακτηριστικά του συστήματος.

διάταξη φ/β	mono-Si
τύπος	mono-Si
βαθμός απόδοσης	0,13
παραγόμενες kWh ανά m2	247,3
προτεινόμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)	5197,6
ισχύς φ/β ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο χρησιμοποιούμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)	50%
ετήσια παραγόμενη ενέργεια από φ/β (MWh)	623,5240159
μέγιστη στιγμιαία διείσδυση Φ/Β	100%
ονομαστική ισχύς διάταξης (kW)	73,4

Η τελική τιμή για τα φωτοβολταϊκά διαμορφώνεται στα 366.779 €. Για την περίπτωση της επιδότησης (40%) η τιμή των φωτοβολταϊκών διαμορφώνεται στα 220.067 €. Τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας ανέρχονται στα 3667,8 €/έτος.

Όσον αφορά την ενεργειακή αναφορά για αυτό το σύστημα:

Καλύπτει: 11,3% της ετήσιας ζήτησης.

Αποδίδει: στην ζήτηση 144.725 kWh
στον ηλεκτρολύτη 8029 kWh.

Από το σύνολο της παραγωγής μόνο το 0,92% δηλαδή 1423 kWh απορρίπτεται από το σύστημα
capacity factor: 24%

- Ανεμογεννήτριες

Έχοντας υπόψη το βαθμό διείσδυσης για τον οποίο κάναμε λόγο παραπάνω η ισχύς των ανεμογεννητριών ανέρχεται στα 250 kW το οποίο είναι αρκετά βολικό γιατί υπάρχουν ανεμογεννήτριες και σε αυτή την ισχύ στην αγορά. Τα στοιχεία για την ανεμογεννήτρια που αφορούν αυτό το σενάριο βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα:

διάταξη A/Γ	
αιολική ισχύς (αδιάστατη ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο)	170%
ονομαστική ισχύς διάταξης A/Γ (kW)	249,4
μέγιστη στιγμιαία διείσδυση αιολικών	40%
συντελεστής διόρθωσης ανέμου	90%
μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	8,1

Τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν τις ανεμογεννήτριες είναι τα εξής:
 Τιμή ανεμογεννήτριας 374.114 € (χωρίς επιδότηση)
 Τιμή ανεμογεννήτριας 224.469 € (με επιδότηση 40%)
 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης 7.482 €/έτος
 Έσοδα από την πώληση ενέργειας 32.026 €/έτος

Τα ενεργειακά στοιχεία είναι τα εξής:
 Η ενέργεια που αποδίδεται στην ζήτηση είναι ίση προς 349.251 kWh
 Ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από την ανεμογεννήτρια (27,2%)
 Ποσοστό της παραγωγής της α/γ που καταλήγει στη ζήτηση (42%)
 Η ενέργεια που αποδίδεται στην ηλεκτρόλυση είναι 463.455 kWh (49%)
 Η ενέργεια που απορρίπτεται είναι ίση προς 383557 kWh (9%)
 Capacity Factor 35%

- Σύστημα υδρογόνου
 Με δοκιμές το υπολογιστικό εργαλείο καταλήγει στην βέλτιστη, για τα δεδομένα και ζητούμενα λύση, διαστασιολόγηση των μερών του συστήματος υδρογόνου.
 Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας δίνουν:
 Αριθμός f/c : 13
 Συνολική ονομαστική ισχύς f/c: 65 kW
 Ονομαστική Ισχύς Ηλ/τη: 145 kW
 Χωρητικότητα Δεξαμενής : 200 Nm³
 Τα διαστασιολογικά αποτελέσματα για τα fuel cell μας δίνουν:
 Η ενέργεια που αποδίδεται στην ζήτηση είναι ίση προς 233.297 kWh
 Ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από τα fuel cell (18,2%)

Τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν το σύστημα υδρογόνου είναι τα εξής:
 Κόστος Fuel Cell χωρίς επιδότηση = 195000 €
 Κόστος Fuel Cell με επιδότηση = 117000 €
 Κόστος Ηλ/τη χωρίς επιδότηση = 188818 €
 Κόστος Ηλ/τη με επιδότηση = 113291 €
 Κόστος δεξαμενής χωρίς επιδότηση = 7600 €

Κόστος δεξαμενής με επιδότηση = 4560 €

Συνεπώς για τα δεδομένα του σεναρίου παρατίθενται στο πίνακα τα αποτελέσματα για την βιωσιμότητα της επένδυσης.

Οικονομική Αξιολόγηση			
Έτος	Χωρίς Επιδότηση	Επιδότηση	Επιδότηση
1	- 1.053.209,5	- 711.785,4	
2	174464	174464	
3	174464	174464	
4	174464	174464	
5	174464	174464	
6	174464	174464	
7	174464	174464	
8	174464	174464	
9	174464	174464	
10	-20536	57464	
11	174464	174464	
12	174464	174464	
13	174464	174464	
14	174464	174464	
15	174464	174464	
16	174464	174464	
17	174464	174464	
18	174464	174464	
19	174464	174464	
20	174464	174464	
NPV	953.604,39 €	1.320.954,74 €	
IRR	15%	23%	

Η συγκεκριμένη λύση παρουσιάζει και αυτή καλή αποδοτικότητα (χωρίς επιδότηση 15%, με επιδότηση 23%) και σχετικά χαμηλότερα κεφάλαια εκκίνηση. Όμως η ελαφρώς καλύτερη αποδοτικότητα (1% με επιδότηση, 2% χωρίς) δεν αντισταθμίζει το γεγονός ότι η προηγούμενη λύση (βλ. Α) καλύπτει μεγαλύτερο μέρος των ενεργειακών αναγκών μέσω ΑΠΕ – υδρογόνου, έχοντας μικρότερο αντίκτυπο στο περιβάλλον. Συγκεκριμένα αυτή η λύση καλύπτει το 60% των συνολικών ενεργειακών απαιτήσεων μέσω ΑΠΕ – υδρογόνου και το 80% της ζήτησης σε χρονική βάση. Τέλος, το κόστος των εκπεμπόμενων ρύπων για αυτή τη λύση είναι ίσο προς 11,06 € (στοιχεία από τις προδιαγραφές ρύπων EURO4)

Γ) Σενάριο στο 60% της ζήτησης

Ισχύει ότι και στο προηγούμενο σενάριο μόνο που στην προκειμένη περίπτωση, η μελέτη και η προσομοίωση του μοντέλου μας οδηγούν στην επιλογή συνολικής εγκαταστημένης ισχύος των συστημάτων ΑΠΕ (αιολικά και

ηλιακά) ίσο προς 285 kW. Αυτό αποδίδει στο σύστημα μία συνολική ισχύ ίση προς 146 kW. Καλύπτουμε έτσι το 60% της χρονικής ζήτησης. Αυτό σημαίνει ότι η εγκατάσταση στη περίπτωση αυτή είναι τέτοιας ισχύος ώστε να ξεπερνάει την ζήτηση στο 60% των ωριαίων περιπτώσεων. Οι γεννήτριες Diesel καλύπτουν της αιχμές της ζήτησης που ξεπερνούν την εγκατεστημένη ισχύ του υπόλοιπου συστήματος και αντιστοιχούν στο 40% των περιπτώσεων.

Η προσομοίωση του συστήματος μας οδηγεί στις εξής επιλογές όσον αφορά τα μέρη του συστήματος:

- Φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά όπως έχουμε αναφέρει αποτελούν το πιο ακριβό υποσύστημα. Η ανάλυση του συστήματος και οι υπολογισμοί μας οδηγούν στην επιλογή των 46,9 kW εγκατεστημένης ισχύος, δηλαδή στο 32% του μέσου ετήσιου φορτίου.

Η εγκατάσταση αυτή εκτιμάται ότι θα αποφέρει κατά την λειτουργία της 42421,55 €/έτος. Ο παρακάτω πίνακας αποδίδει τα χαρακτηριστικά του συστήματος.

διάταξη φ/β	mono-Si
τύπος	mono-Si
βαθμός απόδοσης	0,13
παραγόμενες kWh ανά m2	247,3
προτεινόμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)	5197,6
ισχύς φ/β ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο χρησιμοποιούμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)	32%
ετήσια παραγόμενη ενέργεια από φ/β (MWh)	399,0553702
μέγιστη στιγμιαία διεύθυνση Φ/B	98,7
ονομαστική ισχύς διάταξης (kW)	100%
	46,9

Η τελική τιμή για τα φωτοβολταϊκά διαμορφώνεται στα 234738 €η οποία. Για την περίπτωση της επιδότησης (40%) η τιμή των φωτοβολταϊκών διαμορφώνεται στα 140843 €. Τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας ανέρχονται στα 2347,38 €/έτος.

Όσον αφορά την ενεργειακή αναφορά για αυτό το σύστημα:

Καλύπτει: 7,2% της ετήσιας ζήτησης.

Αποδίδει: στην ζήτηση 92.826 kWh

στον ηλεκτρολύτη 5145 kWh.

Από το σύνολο της παραγωγής μόνο το 0,71% δηλαδή 703 kWh απορρίπτεται από το σύστημα.

capacity factor: 24%.

- Ανεμογεννήτριες

Έχοντας υπόψη το βαθμό διείδυσης για τον οποίο κάναμε λόγο παραπάνω η ισχύς των ανεμογεννητριών ανέρχεται στα 240 kW το οποίο είναι αρκετά βολικό γιατί υπάρχουν ανεμογεννήτριες και σε αυτή την ισχύ στην αγορά. Τα στοιχεία για την ανεμογεννήτρια που αφορούν αυτό το σενάριο βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα

διάταξη Α/Γ	
αιολική ισχύς (αδιάστατη ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο)	163%
ονομαστική ισχύς διάταξης Α/Γ (kW)	238,4
μέγιστη στιγμιαία διείδυση αιολικών	40%
συντελεστής διόρθωσης ανέμου	90%
μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	8,1

Τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν τις ανεμογεννήτριες είναι τα εξής:
 Τιμή ανεμογεννήτριας 357609 € (χωρίς επιδότηση)
 Τιμή ανεμογεννήτριας 140843 € (με επιδότηση 40%)
 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης 7152 €/έτος
 Έσοδα από την πώληση ενέργειας 31702 €/έτος

Τα ενεργειακά στοιχεία είναι τα εξής:
 Η ενέργεια που αποδίδεται στην ζήτηση είναι ίση προς 345.716 kWh
 Ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από την ανεμογεννήτρια (26,9%)
 Ποσοστό της παραγωγής της α/γ που καταλήγει στη ζήτηση (44%)
 Η ενέργεια που αποδίδεται στην ηλεκτρόλυση είναι 463.455 kWh (48%)
 Η ενέργεια που απορρίπτεται είναι ίση προς 383557 kWh (9%)
 Capacity Factor 35%

- Σύστημα υδρογόνου

Με δοκιμές το υπολογιστικό εργαλείο καταλήγει στην βέλτιστη, για τα δεδομένα και ζητούμενα λύση, διαστασιολόγηση των μερών του συστήματος υδρογόνου.

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας δίνουν:

Αριθμός f/c : 13

Συνολική ονομαστική ισχύς f/c: 65 kW

Ονομαστική Ισχύς Ηλ/τη: 128,41 kW

Χωρητικότητα Δεξαμενής : 200 Nm³

Τα διαστασιολογικά αποτελέσματα για τα fuel cell μας δίνουν:

Η ενέργεια που αποδίδεται στην ζήτηση είναι ίση προς 233.915 kWh

Ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από τα fuel cell (18,2%)

Τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν το σύστημα υδρογόνου είναι τα εξής:

Κόστος Fuel Cell χωρίς επιδότηση = 195000 €

Κόστος Fuel Cell με επιδότηση = 117000 €

Κόστος Ηλ/τη χωρίς επιδότηση = 166932 €

Κόστος Ηλ/τη με επιδότηση = 100159 €
 Κόστος δεξαμενής χωρίς επιδότηση = 7600 €
 Κόστος δεξαμενής με επιδότηση = 4560 €

Συνεπώς για τα δεδομένα του σεναρίου παρατίθενται στο πίνακα τα αποτελέσματα για την βιωσιμότητα της επένδυσης.

Οικονομική Αξιολόγηση			
	Έτος	Χωρίς Επιδότηση	Επιδότηση
	1	- 870.285,6	- 461.120,8
	2	152626	152626
	3	152626	152626
	4	152626	152626
	5	152626	152626
	6	152626	152626
	7	152626	152626
	8	152626	152626
	9	152626	152626
	10	-42374	35626
	11	152626	152626
	12	152626	152626
	13	152626	152626
	14	152626	152626
	15	152626	152626
	16	152626	152626
	17	152626	152626
	18	152626	152626
	19	152626	152626
	20	152626	152626
	NPV	868.630,97 €	1.300.496,29 €
	IRR	15%	32%

Είναι προφανές ότι αυτή είναι η πιο αποδοτική οικονομικά λύση. Χρειάζεται μικρό σχετικά κεφάλαιο εκκίνησης και η αποδοτικότητά της στην περίπτωση της επιδότησης είναι αζεπέραστη. Όμως η κάλυψη αναγκών μέσω ΑΠΕ – υδρογόνου είναι οι ελάχιστες και έτσι έχει μεγάλο περιβαλλοντικό αντίκτυπο. Τα αρχικά έξοδα να είναι ίσα προς 1.483.547 € και η επιστροφή σε ορίζοντα 20ετίας είναι περίπου 457.804 €.

Τέλος, το κόστος των εκπεμπόμενων ρύπων για αυτή τη λύση είναι ίσο προς 12.7 € (στοιχεία από τις προδιαγραφές ρύπων EURO4)

Συμπερασματικά, από όλα τα σενάρια που εξετάστηκαν παραπάνω, το σενάριο του 97% εμφανίζεται ως το βέλτιστο. Οικονομικά αποτελεί μια βιώσιμη λύση, αλλά και ενεργειακά εξασφαλίζει μία καλή ανεξαρτησία από της γεννήτριες Diesel.

3.2.2.β Η «Πράσινη» λύση

Στα πλαίσια της μελέτης του εν λόγω συστήματος, έχει εξεταστεί και η περίπτωση το νησί του Αγίου Ευστρατίου να εξυπηρετείται μόνο από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μελετήθηκε δηλαδή και ο πλήρης εκτοπισμός του Diesel. Για να γίνει αυτό, απαντήθηκαν τα ερωτήματα της διαστασιολόγησης των συστημάτων ΑΠΕ και του συστήματος υδρογόνου που θα τα υποστηρίζει, καθώς και των οικονομικών ενός τέτοιου σχεδίου. Προϋποθέσεις αυτού του σχεδίου είναι λοιπόν η πλήρης κάλυψη της ζήτησης και σε ενεργειακή βάση αλλά και σε χρονική βάση. Με αυτά τα δεδομένα έχουμε τα παρακάτω αποτελέσματα των υπολογισμών.

- Φωτοβολταϊκά

Η ανάλυση του συστήματος και οι υπολογισμοί μας οδηγούν στην επιλογή των 604 kW εγκατεστημένης ισχύος, δηλαδή στο 500% του μέσου ετήσιου φορτίου.

Η εγκατάσταση αυτή εκτιμάται ότι θα αποφέρει κατά την λειτουργία της 179587,76 €έτος. Ο παρακάτω πίνακας αποδίδει τα χαρακτηριστικά του συστήματος.

διάταξη φ/β	mono-Si
τύπος	mono-Si
βαθμός απόδοσης	0,13
παραγόμενες kWh ανά m2	247,3
προτεινόμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)	4276,0
ισχύς φ/β ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο	500%
χρησιμοποιούμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)	5129,74751
ετήσια παραγόμενη ενέργεια από φ/β (MWh)	1268,4
μέγιστη στιγμιαία διεύθυνση Φ/Β	100%
ονομαστική ισχύς διάταξης (kW)	603,5

Η τελική τιμή για τα φωτοβολταϊκά διαμορφώνεται στα 3017499 €. Για την περίπτωση της επιδότησης (40%) η τιμή των φωτοβολταϊκών διαμορφώνεται στα 1810499 €. Τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας ανέρχονται στα 30175 €έτος.

Όσον αφορά την ενεργειακή αναφορά για αυτό το σύστημα:

Καλύπτει: 41,7% της ετήσιας ζήτησης.

Αποδίδει: στην ζήτηση 441.248 kWh
στον ηλεκτρολύτη 219.466 kWh.

Από το σύνολο της παραγωγής το 48% δηλαδή 607.712 kWh απορρίπτεται από το σύστημα.

capacity factor: 12%

- Ανεμογεννήτριες

Έχοντας υπόψη το βαθμό διείδυσης για τον οποίο κάναμε λόγο παραπάνω η ισχύς των ανεμογεννητριών ανέρχεται στα 1 MW το οποίο είναι αρκετά βολικό γιατί υπάρχουν ανεμογεννήτριες και σε αυτή την ισχύ στην αγορά. Τα στοιχεία για την ανεμογεννήτρια που αφορούν αυτό το σενάριο βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα:

διάταξη Α/Γ	
αιολική ισχύς (αδιάστατη ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο)	880%
ονομαστική ισχύς διάταξης Α/Γ (kW)	1062,2
μέγιστη στιγμιαία διείδυση αιολικών	40%
συντελεστής διόρθωσης ανέμου	90%
μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	8,1

Τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν τις ανεμογεννήτριες είναι τα εξής:
 Τιμή ανεμογεννήτριας 1.593.239 € (χωρίς επιδότηση)
 Τιμή ανεμογεννήτριας 955.944 € (με επιδότηση 40%)
 Κόστος λειτουργίας και συντήρησης 29076 €/έτος
 Έσοδα από την πώληση ενέργειας 19.610 €/έτος

Τα ενεργειακά στοιχεία είναι τα εξής:
 Η ενέργεια που αποδίδεται στην ζήτηση είναι ίση προς 213.856 kWh
 Ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από την ανεμογεννήτρια (20.2%)
 Ποσοστό της παραγωγής της α/γ που καταλήγει στη ζήτηση (7%)
 Η ενέργεια που αποδίδεται στην ηλεκτρόλυση είναι 463.455 kWh (21%)
 Η ενέργεια που απορρίπτεται είναι ίση προς 2.340.141 kWh (73%)
 Capacity Factor 10%

- Σύστημα υδρογόνου

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας δίνουν:

Αριθμός f/c : 50

Συνολική ονομαστική ισχύς f/c: 250 kW

Ονομαστική Ισχύς Ηλ/τη: 1,5 MW

Χωρητικότητα Δεξαμενής : 2595 Nm³

Τα διαστασιολογικά αποτελέσματα για τα fuel cell μας δίνουν:

Η ενέργεια που αποδίδεται στην ζήτηση είναι ίση προς 402.228 kWh

Ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από τα fuel cell (38%)

Στα οικονομικά έχουμε:

Κόστος f/c = 7.785.000 €χωρίς επιδότηση, 4.671.000 €με επιδότηση

Κόστος ηλ/τη = 2.044.536 €χωρίς επιδότηση, 1.226.722 €με επιδότηση

Κόστος δεξαμενής = 98.610 €χωρίς επιδότηση, 59.166 €με επιδότηση.

Συνεπώς για τα δεδομένα του σεναρίου παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα τα αποτελέσματα για την βιωσιμότητα της επένδυσης.

Οικονομική Αξιολόγηση

Έτος	χωρίς Επιδότηση	με Επιδότηση
1	- 13.380.797,4	- 8.347.607,6
2	- 13.272,2	- 13.272,2
3	- 13.272,2	- 13.272,2
4	- 13.272,2	- 13.272,2
5	- 13.272,2	- 13.272,2
6	- 13.272,2	- 13.272,2
7	- 13.272,2	- 13.272,2
8	- 13.272,2	- 13.272,2
9	- 13.272,2	- 13.272,2
10	- 5.981.772,2	- 3.594.372,2
11	- 13.272,2	- 13.272,2
12	- 13.272,2	- 13.272,2
13	- 13.272,2	- 13.272,2
14	- 13.272,2	- 13.272,2
15	- 13.272,2	- 13.272,2
16	- 13.272,2	- 13.272,2
17	- 13.272,2	- 13.272,2
18	- 13.272,2	- 13.272,2
19	- 13.272,2	- 13.272,2
20	- 13.272,2	- 13.272,2
NPV	-16.560.518,33 €	-10.301.347,66 €
IRR	#ΔΙΑΙΡ/0!	

Είναι φανερό ότι η μελέτη βιωσιμότητας σ' αυτή την περίπτωση στερείται νοήματος. Το αρχικό ύψος της επένδυσης αγγίζει τα 13.367.525 € χωρίς επιδότηση και τα 8.334.335 € με επιδότηση. Γι' αυτό το κόστος δεν επιτυγχάνεται απόσβεση ποτέ και αυτό γιατί τα πάγια έξοδα σε ετήσια βάση είναι μεγάλα συγκριτικά με τα έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας. Συνεπώς το σχέδιο αυτό είναι κατάλληλο μόνο για εγκατάσταση επίδειξης και δεν είναι δυνατή η βιωσιμότητά του. Παρά ταύτα επιτυγχάνεται η πλήρης ανεξάρτηση από το Diesel και ο μηδενισμός των ρύπων.

3.2.2.γ Οριακά Βιώσιμη

Με κριτήριο το γεγονός ότι λαμβάνουμε ως επιτόκιο αναγωγής ίσο προς 5%, επιχειρήθηκε ο υπολογισμός του συστήματος ώστε να έχουμε οριακά θετικά οικονομικά αποτελέσματα. Τα αποτελέσματα αυτού του σεναρίου παρατίθενται παρακάτω.

- Φωτοβολταϊκά

Η ανάλυση του συστήματος και οι υπολογισμοί μας οδηγούν στην επιλογή των 100 kW εγκατεστημένης ισχύος, δηλαδή στο 68% του μέσου ετήσιου φορτίου.

διάταξη φ/β	
τύπος	mono-Si
βαθμός απόδοσης	0,13
παραγόμενες kWh ανά m2	247,3
προτεινόμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)	5197,6
ισχύς φ/β ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο χρησιμοποιούμενη επιφάνεια συλλεκτών (m2)	68%
ετήσια παραγόμενη ενέργεια από φ/β (MWh)	210,0
μέγιστη στιγμιαία διεύθυνση Φ/Β	100%
ονομαστική ισχύς διάταξης (kW)	99,9

Η τελική τιμή για τα φωτοβολταϊκά διαμορφώνεται στα 499553 €. Για την περίπτωση της επιδότησης (40%) η τιμή των φωτοβολταϊκών διαμορφώνεται στα 299732 €. Τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας ανέρχονται στα 4995,5 €/έτος.

Όσον αφορά την ενεργειακή αναφορά για αυτό το σύστημα:

Καλύπτει: 15,3% της ετήσιας ζήτησης.

Αποδίδει: στην ζήτηση 196.881 kWh
στον ηλεκτρολύτη 11.289 kWh.

Από το σύνολο της παραγωγής το 1% (δηλαδή 1820 kWh) απορρίπτεται από το σύστημα.

capacity factor: 24%

- Ανεμογεννήτριες

Η ισχύς των ανεμογεννητριών ανέρχεται στα 1 MW το οποίο είναι αρκετά βολικό γιατί υπάρχουν ανεμογεννήτριες με αυτή την ισχύ στην αγορά. Τα στοιχεία για την ανεμογεννήτρια που αφορούν αυτό το σενάριο βρίσκονται στον παρακάτω πίνακα:

διάταξη Α/Γ	
αιολική ισχύς (αδιάστατη ως προς το μέσο ετήσιο φορτίο)	700%
ονομαστική ισχύς διάταξης Α/Γ (kW)	1027,0
μέγιστη στιγμιαία διεύθυνση αιολικών	40%
συντελεστής διόρθωσης ανέμου	90%
μέση ταχύτητα ανέμου (m/s)	8,1

Τα οικονομικά στοιχεία που αφορούν τις ανεμογεννήτριες είναι τα εξής:

Τιμή ανεμογεννήτριας 1.593.239 € (χωρίς επιδότηση)

Τιμή ανεμογεννήτριας 924.283 € (με επιδότηση 40%)

Κόστος λειτουργίας και συντήρησης 30.809 €/έτος

Έσοδα από την πώληση ενέργειας 38.907 €/έτος

Τα ενεργειακά στοιχεία είναι τα εξής:

Η ενέργεια που αποδίδεται στην ζήτηση είναι ίση προς 424.295 kWh

Ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από την ανεμογεννήτρια (12%)

Η ενέργεια που αποδίδεται στην ηλεκτρόλυση είναι 1.114.901 kWh (33%)

Η ενέργεια που απορρίπτεται είναι ίση προς 1.875.547 kWh (55%)

Capacity Factor 17%

- Σύστημα υδρογόνου

Τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας δίνουν:

Αριθμός f/c : 25

Συνολική ονομαστική ισχύς f/c: 125 kW

Ονομαστική Ισχύς Ηλ/τη: 620 kW

Χωρητικότητα Δεξαμενής : 1000 Nm³

Τα διαστασιολογικά αποτελέσματα για τα fuel cell μας δίνουν:

Η ενέργεια που αποδίδεται στην ζήτηση είναι ίση προς 522.966 kWh

Ποσοστό της ζήτησης που καλύπτεται από τα fuel cell (40,7%)

Στα οικονομικά έχουμε:

Κόστος f/c = 3.750.000 €χωρίς επιδότηση, 2.250.000 €με επιδότηση

Κόστος ηλ/τη = 805.727 €χωρίς επιδότηση, 483.436 €με επιδότηση

Κόστος δεξαμενής = 38.000 €χωρίς επιδότηση, 22.800 €με επιδότηση

Το σενάριο αυτό προτείνει μία αρκετά «πράσινη» λύση σε οικονομικά βιώσιμα πλαίσια. Αν για κάποιον το ζήτημα είναι να παράγει ενέργεια με μεθόδους περιβαλλοντικά ευεργετικές, χωρίς να τον απασχολεί η αποκόμιση υψηλών κερδών, αυτό το σενάριο προσφέρει την πιο εφικτή λύση.

Συνεπώς για τα δεδομένα του σεναρίου παρατίθενται στον παρακάτω πίνακα τα αποτελέσματα για την βιωσιμότητα της επένδυσης

Οικονομική Αξιολόγηση

Έτος	Χωρίς Επιδότηση	Επιδότηση
1	- 3.103.577,2	- 1.748.123,3
2	285058	285058
3	285058	285058
4	285058	285058
5	285058	285058
6	285058	285058
7	285058	285058
8	285058	285058
9	285058	285058
10	-89942	60058
11	285058	285058
12	285058	285058
13	285058	285058
14	285058	285058
15	285058	285058
16	285058	285058
17	285058	285058
18	285058	285058
19	285058	285058
20	285058	285058
NPV	208.241,77 €	1.580.274,54 €
IRR	5%	15%

Επίλογος – Συμπεράσματα

Η μελέτη των παραπάνω σεναρίων οδηγεί σε κάποια συμπεράσματα για την λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος σε μέρη απομακρυσμένα από το δίκτυο όπως είναι στην περίπτωση της παρούσας μελέτης ο Άγιος Ευστράτιος.

Εξετάστηκαν 5 περιπτώσεις λειτουργίας και μεγέθους του συστήματος από τις οποίες πιστεύω πως ο μελετητής θα έπρεπε να επικεντρωθεί στις εξής τρεις :

- Το σενάριο 97% είναι εφαρμόσιμο αφού η παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ – υδρογόνο καλύπτει το 70% της συνολικής ζήτησης και το 97% της ζήτησης σε χρονική βάση. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι μπορεί να καλύψει την ζήτηση μέσω ΑΠΕ – υδρογόνου στο 97% του χρόνου. Χαρακτηριστικά στη περίπτωση της εγκατάστασης χωρίς επιδότηση, ο IRR είναι 13% -αρκετά ικανοποιητικός-, ενώ στην περίπτωση της επιδότησης είναι 21% δηλαδή αρκετά αποδοτική. Η συγκεκριμένη πρόταση αποτελεί μία ιδιαίτερα ικανοποιητική λύση για εταιρίες και επενδυτές οι οποίοι θα αποσκοπούσαν στην αποκόμιση αξιόλογου κέρδους από την επένδυση τους ενώ παράλληλα στόχος τους θα ήταν συνέβαλλαν αρκετά και στην αποφόρτιση του Νησιού από την προμήθεια και την χρήση Diesel. Δημιουργούνται έτσι η συνθήκες για μια πιο πράσινη παραγωγή ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών του νησιού
- Το «οριακά βιώσιμο» σενάριο λέγεται οριακά βιώσιμο καθαρά για οικονομικούς λόγους. Αποτελεί τον υπολογισμό του συστήματος ώστε αυτό να καλύπτει της ανάγκες του νησιού με την μεγαλύτερη χρήση ΑΠΕ και οριακά οικονομικά αποτελέσματα, δηλαδή χωρίς η επένδυση να είναι ζημιογόνος. Η μελέτη του συγκεκριμένου σεναρίου αποτελεί πολύτιμο οδηγό για μη κερδοσκοπικές ή κρατικές εταιρίες οι οποίες θα ενδιαφέρονται να εγκαταστήσουν μία μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καθαρή και με ελάχιστους ρύπους χωρίς αυτό να προβάλλει οικονομικά ζητήματα για την λειτουργία την ίδιας της εγκατάστασης.
- Τέλος η «Πράσινη» λύση είναι η μελέτη και ο υπολογισμός μιας εγκατάστασης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εξ' ολοκλήρου από ανανεώσιμες πηγές. Με τις παρούσες τιμές των τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται στην εργασία αυτή, τα οικονομικά μεγέθη για αυτή την λύση είναι αρνητικά. Η πλήρης απεξάρτηση του νησιού από το Diesel όμως για την ώρα δεν μπορεί να επιτευχθεί με οικονομικότερους όρους όταν χρησιμοποιούμε της συγκεκριμένες τεχνολογίες. Αυτό σημαίνει ότι η συγκεκριμένη λύση αφορά μόνο την περίπτωση εγκατάστασης επίδειξης για δοκιμαστικούς σκοπούς. Αξίζει όμως να σημειωθεί ότι η εργασία αυτή κατάφερα να εκτιμήσει επιτυχώς το κόστος μιας τέτοιας πράσινης λύσης. Σύμφωνα με την μελέτη που έχει διεξαχθεί από την ΔΕΗ στα πλαίσια των προσπαθειών της να κάνει τον Αϊ Στράτη πράσινο νησί, υπολογίζεται ότι το κόστος της εγκατάστασης για την παραγωγή ενέργειας είναι 10 με 12 εκατομμύρια €. Η τιμή αυτή είναι αρκετά κοντά στην τιμή που υπολογίζεται στα πλαίσια αυτής της

διπλωματικής εργασίας. Η διαφορά οφείλεται στο γεγονός ότι στην μελέτη της ΔΕΗ η εγκατάσταση συμπεριλαμβάνει την χρήση τεχνολογιών βιομάζας των οποίων η τιμή ανά εγκατεστημένο kW είναι πολύ μικρότερη αυτή των τεχνολογιών υδρογόνου οι οποίες αποτελούν κεντρικό αντικείμενο μελέτης αυτής της διπλωματικής.

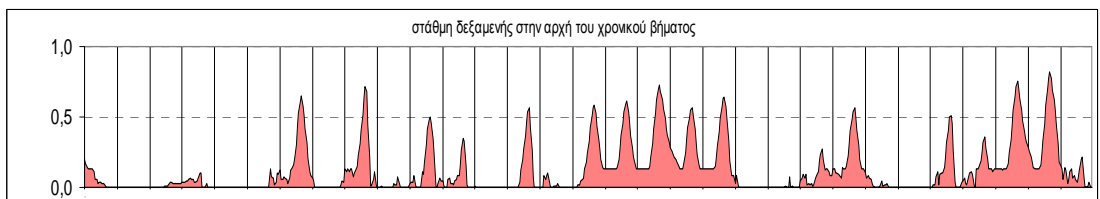
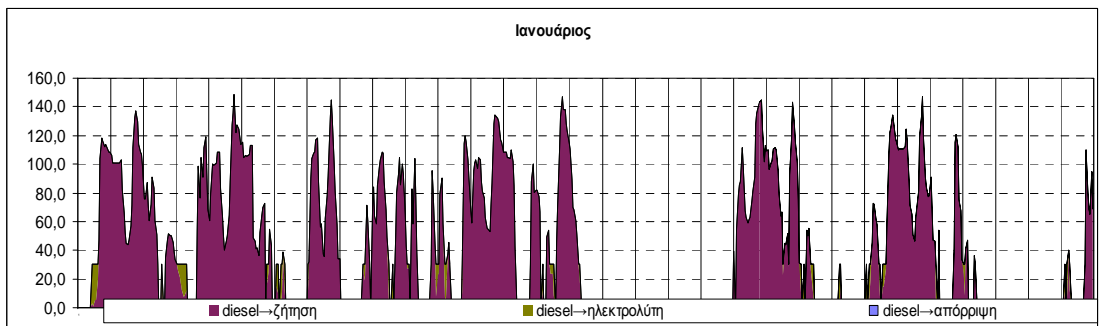
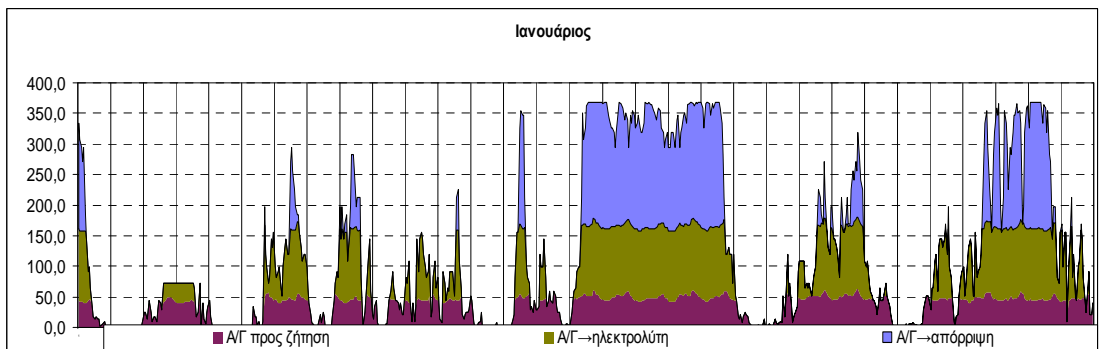
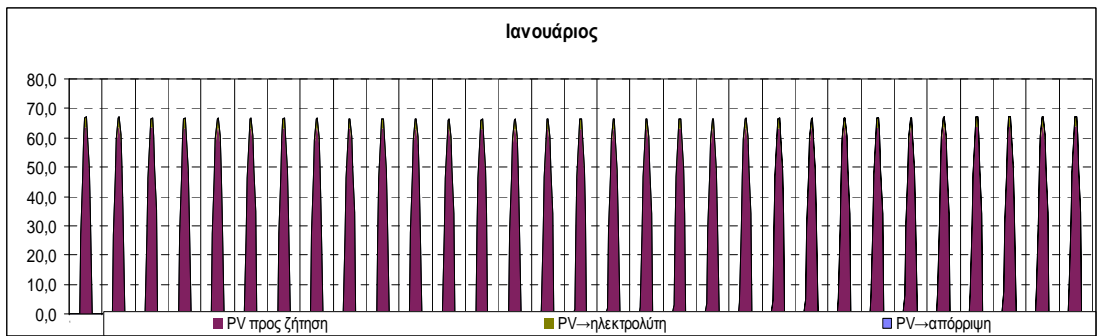
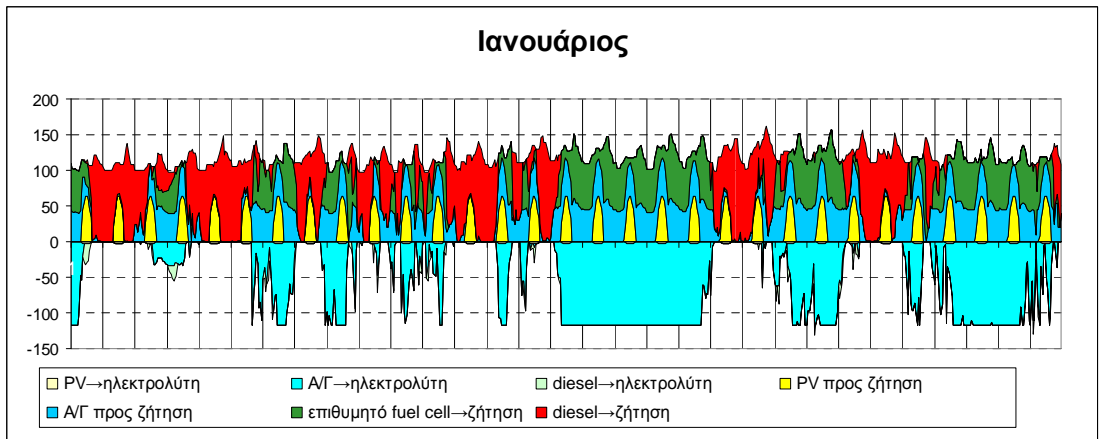
Προχωρώντας από το ένα σενάριο στο άλλο και αυξάνοντας διαδοχικά την συνεισφορά των ΑΠΕ έναντι του Diesel το κόστος της εγκατάστασης και τα έξοδα συντήρησης και λειτουργίας δεν αυξάνονται αναλόγως. Η στοχαστικότητα των ΑΠΕ (συγκεκριμένα της αιολικής) οδηγεί σε δυσανάλογη αύξηση των εξόδων όταν απαιτείται αυξημένη κάλυψη από ΑΠΕ. Αυτό έγινε εμφανές κατά την μελέτη των σεναρίων και αρκεί να ανατρέξει κανείς στα αποτελέσματα της διερεύνησης του κόστους για να το διαπιστώσει. Συνεπώς ως ο μελετητής υποστηρίζω ότι η καλύτερη λύση για μία κοινότητα σαν τον Άγιο Ευστράτιο είναι η λύση του 97%. Καλύπτει στο μέγιστο δυνατό βαθμό μέσω ΑΠΕ της απαιτήσεις του νησιού ώστε συγχρόνως να αποφέρει και σημαντικό κέρδος στον επενδυτή, κάτι που θα έκανε την χρήση τεχνολογιών υδρογόνου πιο δελεαστική.

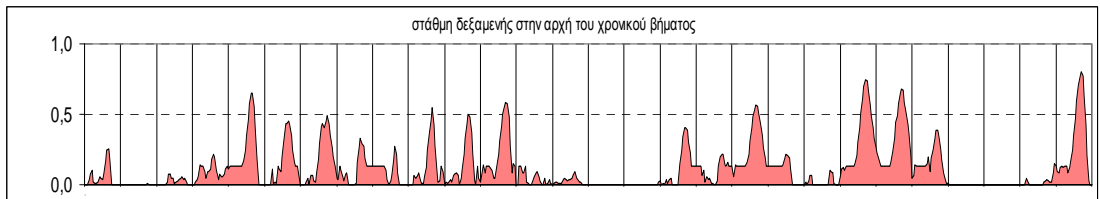
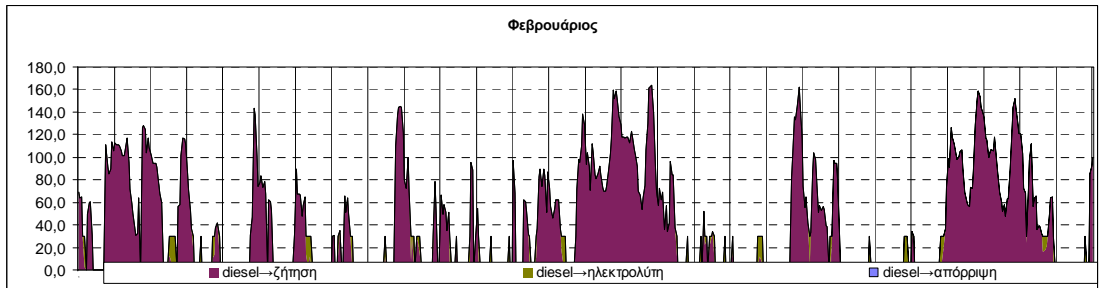
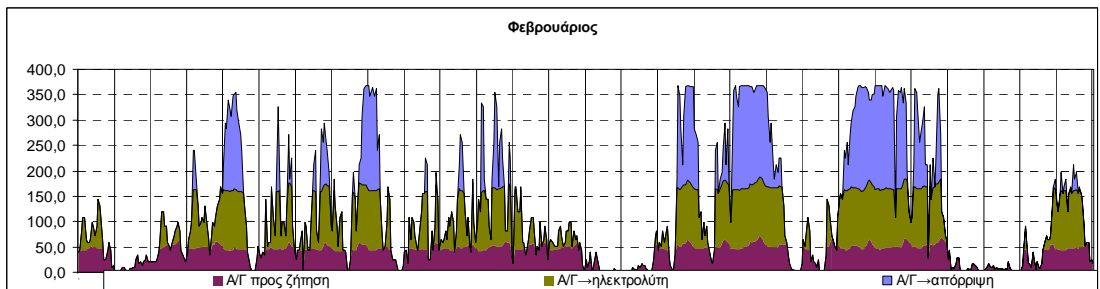
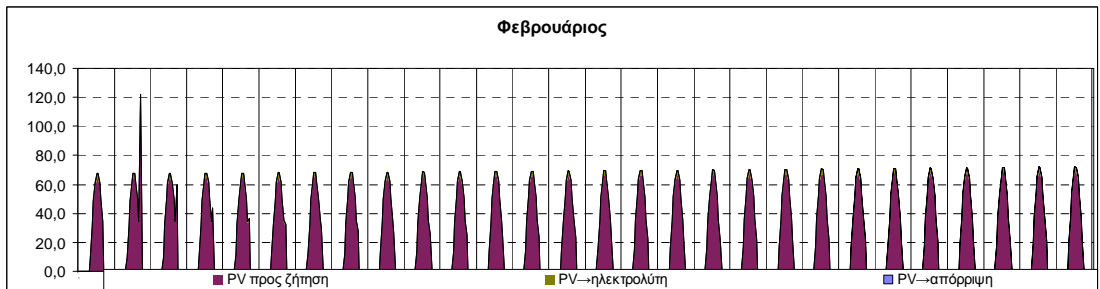
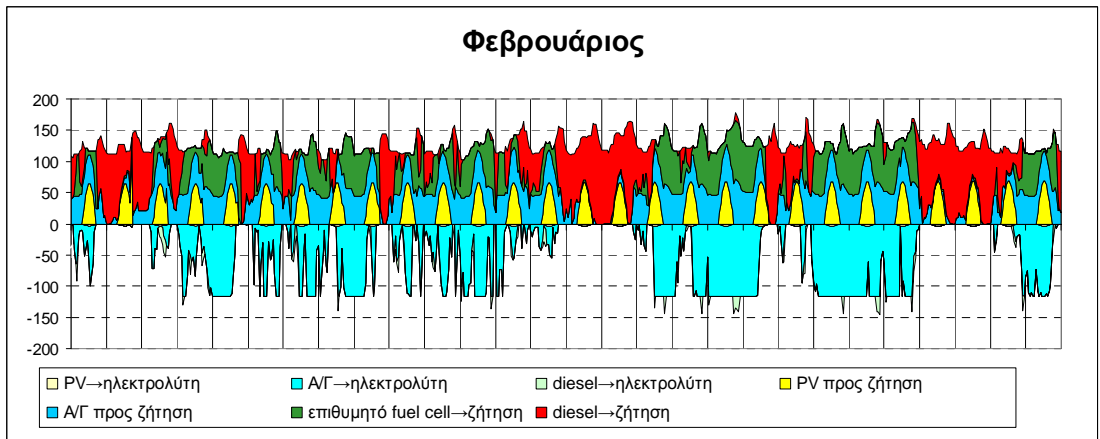
Μελετώντας τις τεχνολογίες υδρογόνου και προσπαθώντας να τις ενσωματώσει κανείς σε μία κεντρική εγκατάσταση παραγωγής ενέργειας διαπιστώνει ότι αποτελούν μία καθαρή και αξιόπιστη λύση. Δεν έχουν ιδιαίτερη πολυπλοκότητα ούτε στην δομή ούτε και στην λειτουργία τους. Συγκεκριμένες κατηγορίες (βλ PEM, SOFC) έχουν ιδανικά λειτουργικά χαρακτηριστικά για την κάλυψη ενεργειακών αναγκών κοινοτήτων απομακρυσμένων από το δίκτυο. Τέλος ένα ακόμα στοιχείο που συνηγορεί υπέρ της χρήση των τεχνολογιών υδρογόνου είναι ότι λειτουργικά έχουν γραμμικό χαρακτήρα όπως και περίπου και οι μπαταρίες. Τα σημαντικότερα προβλήματα που αντιμετωπίζει κανείς με αυτές τις τεχνολογίες αφορούν κυρίως την καθαρότητα του καυσίμου και την πολύ υψηλή τιμή αγοράς. Το πρώτο έχει αρχίσει σχεδόν να εξαλείφεται με την εξέλιξη των κυψελών SOFC όμως το δεύτερο αποτελεί σημαντικό τροχοπέδη στη εξάπλωση της τεχνολογίας σε τέτοιες εφαρμογές.

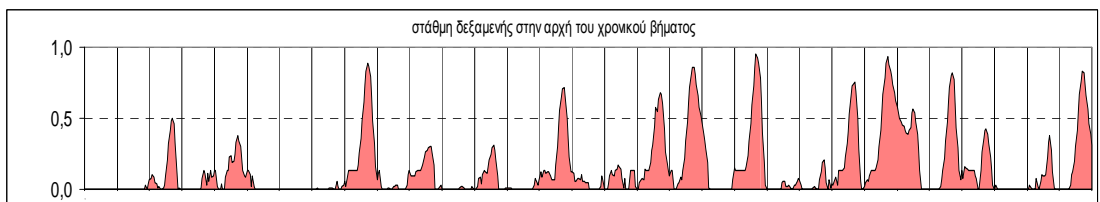
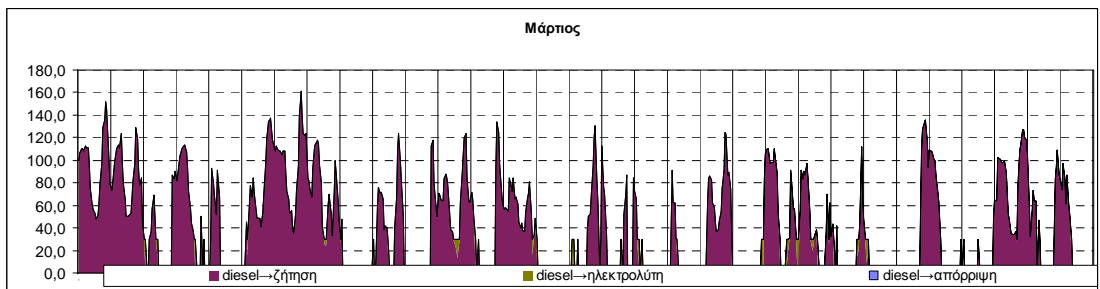
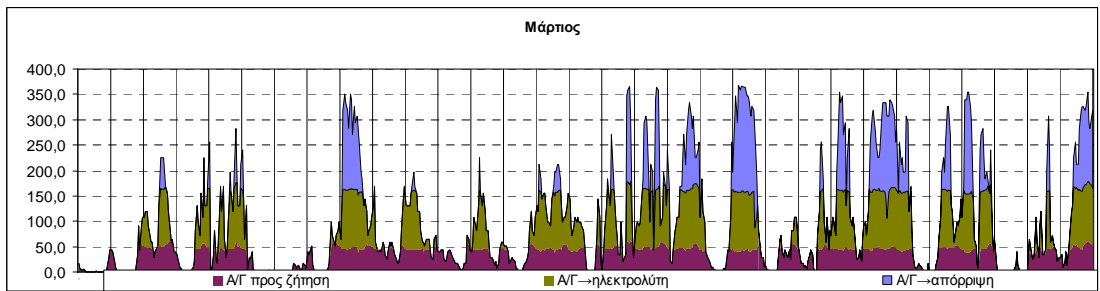
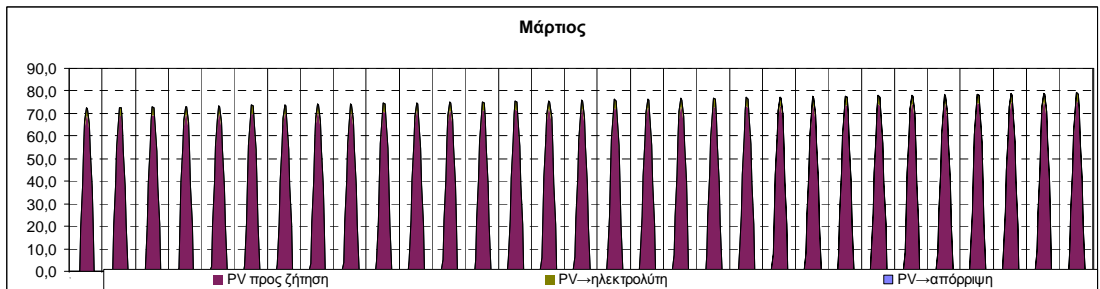
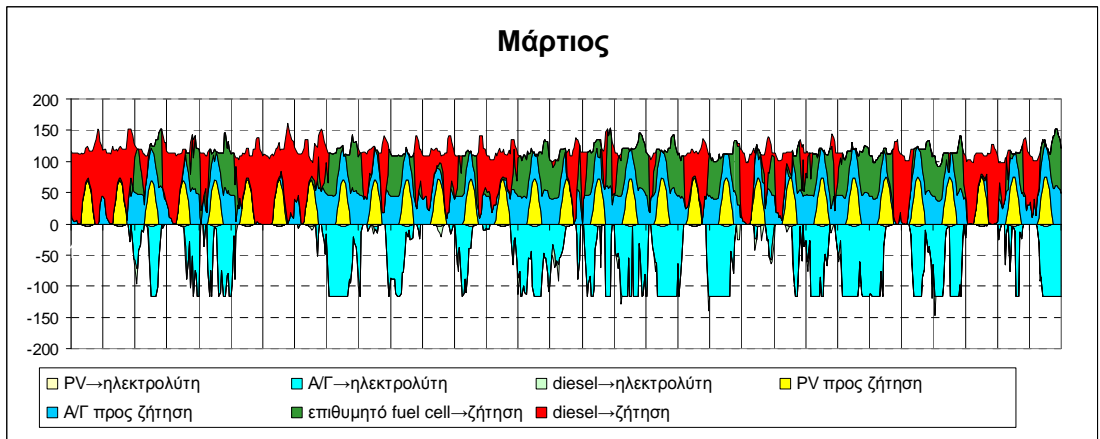
Τέλος η μελέτη αυτή αποτελεί ένδειξη ότι η τεχνολογίες του υδρογόνου δεν αποτελούν μόνο μία μεταβατική και δυσεφάρμοστη τεχνολογία. Αν ξεπεραστεί το οικονομικό εμπόδιο με την πρόοδο, την ωρίμανση και την ευρύτερη εφαρμογή της, η τεχνολογία αυτή μπορεί να γίνει άκρως ανταγωνιστική και να αποτελέσει μία πολύ αποδοτική λύση για μια πληθώρα εφαρμογών και κυρίως για εφαρμογές αντίστοιχες με αυτή του Αγίου Ευστρατίου.

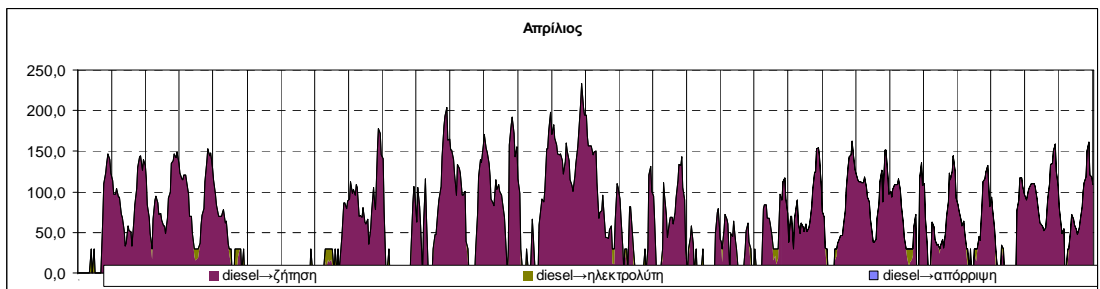
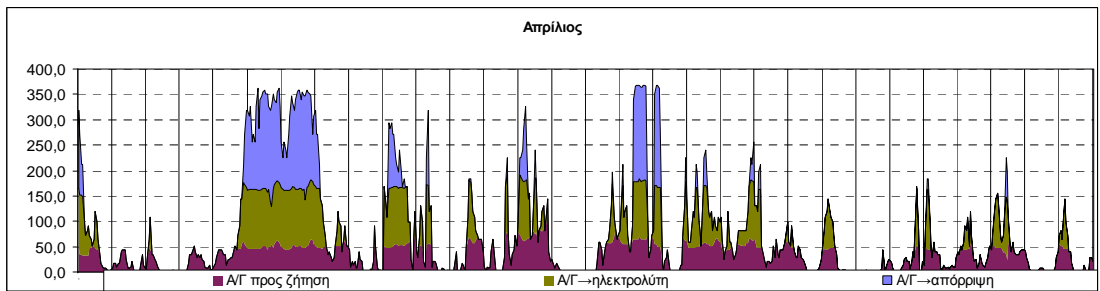
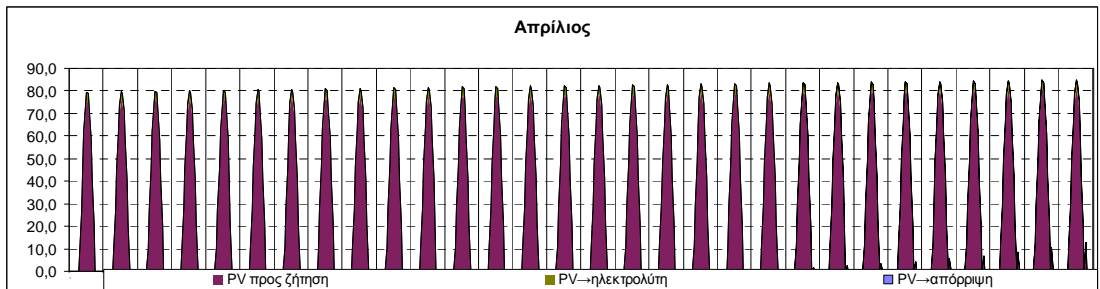
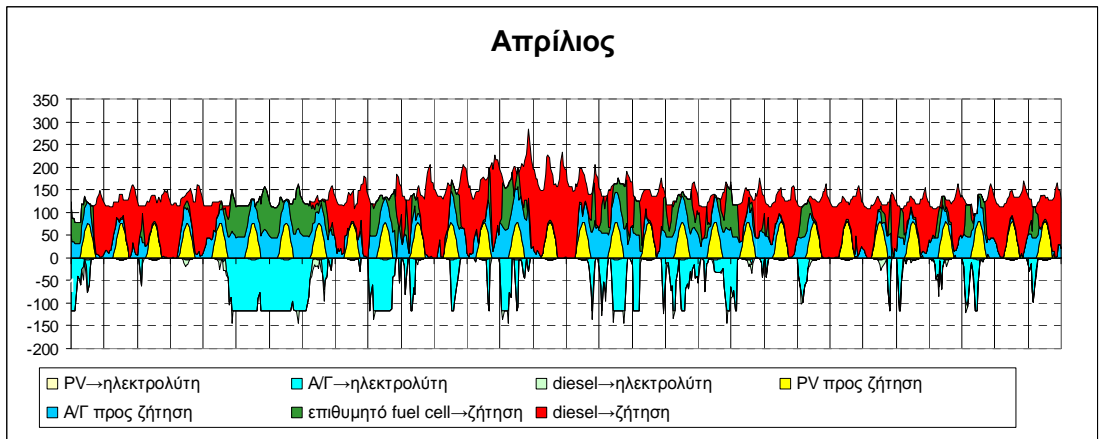
Παράρτημα

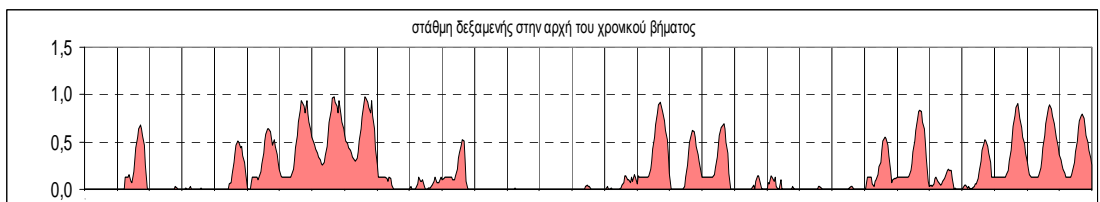
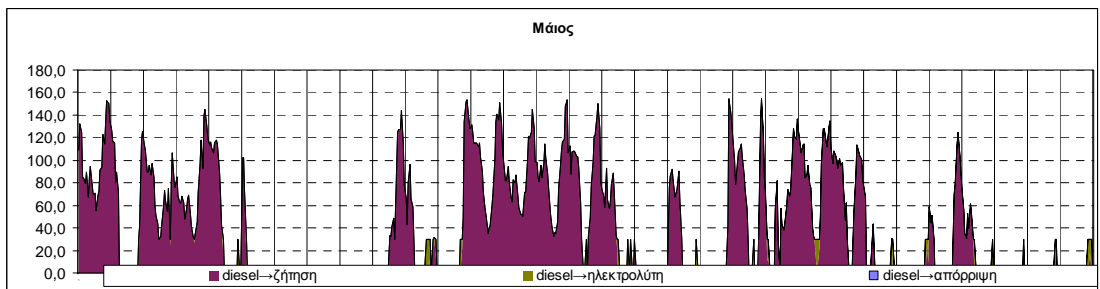
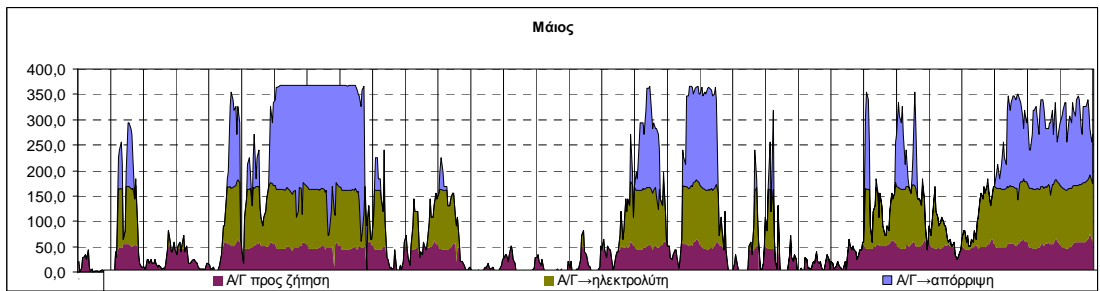
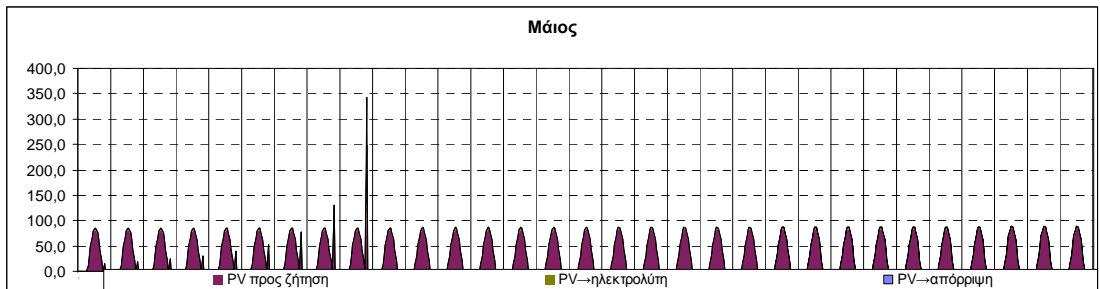
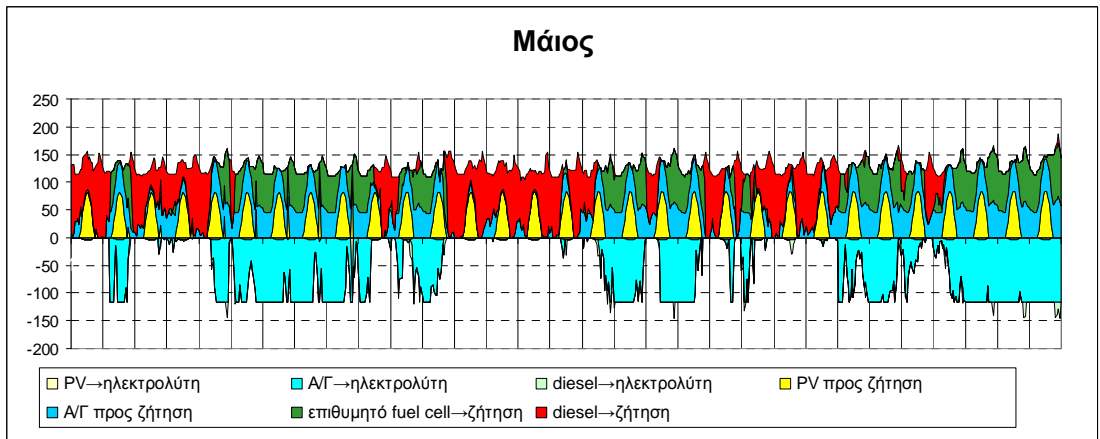
Σενάριο 97%

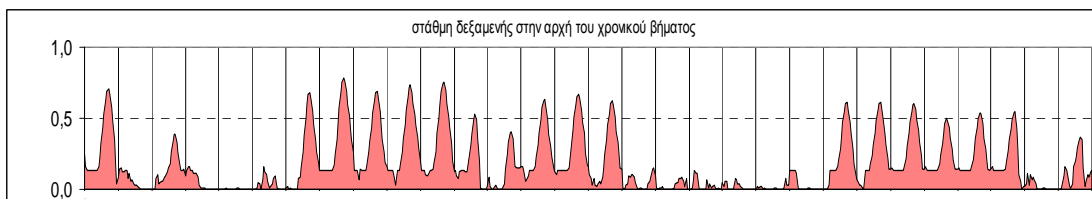
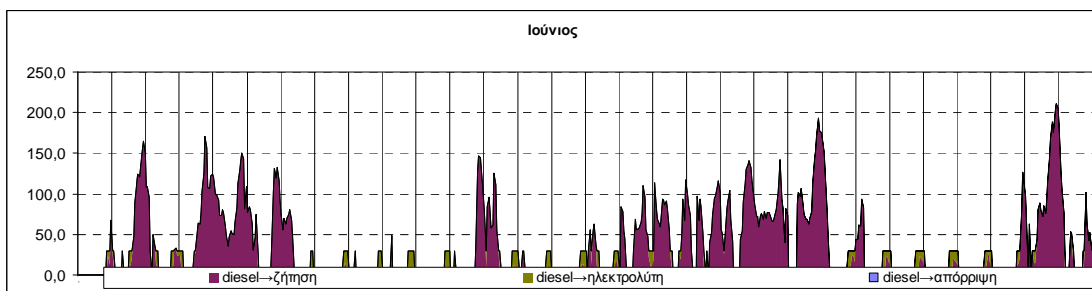
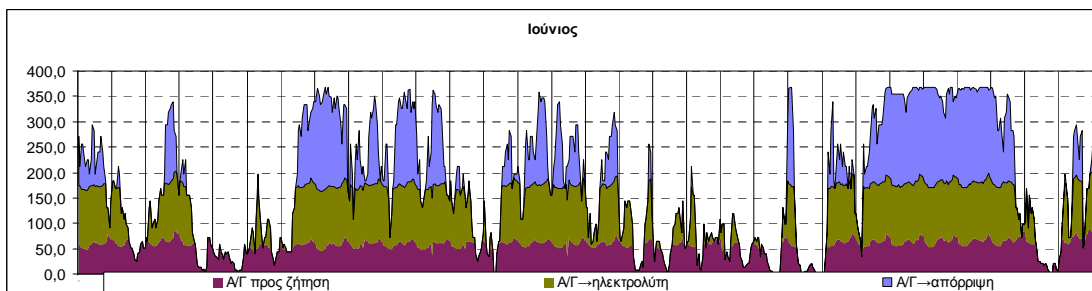
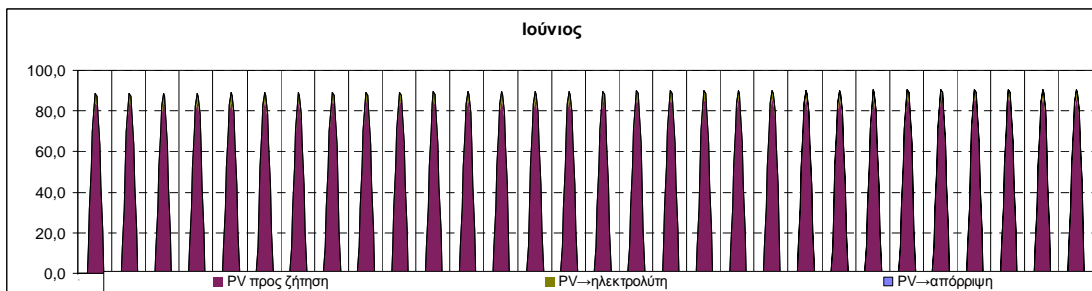
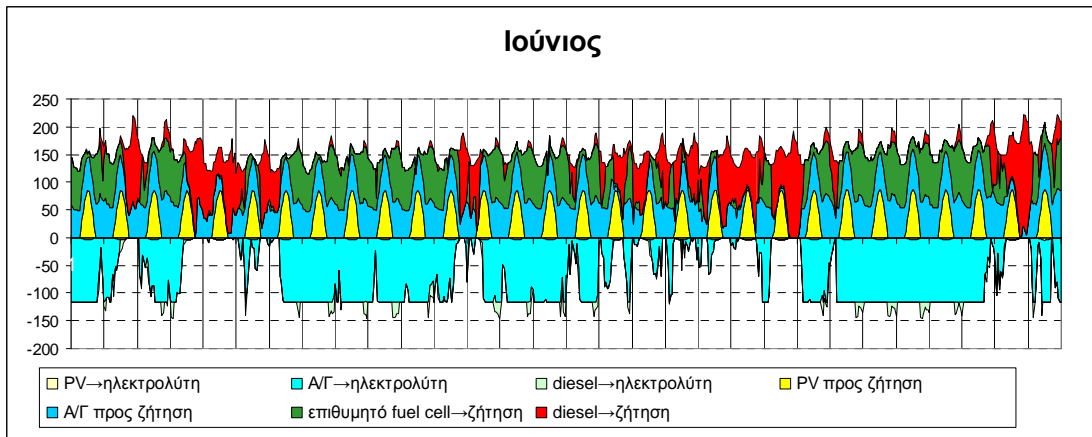


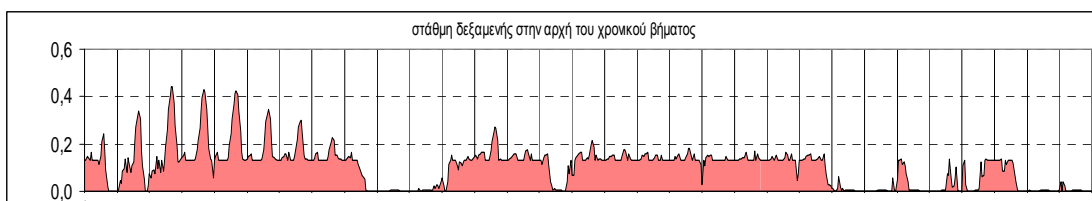
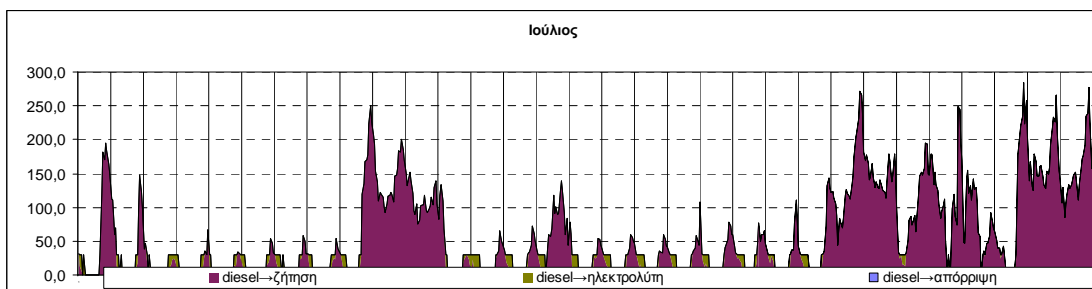
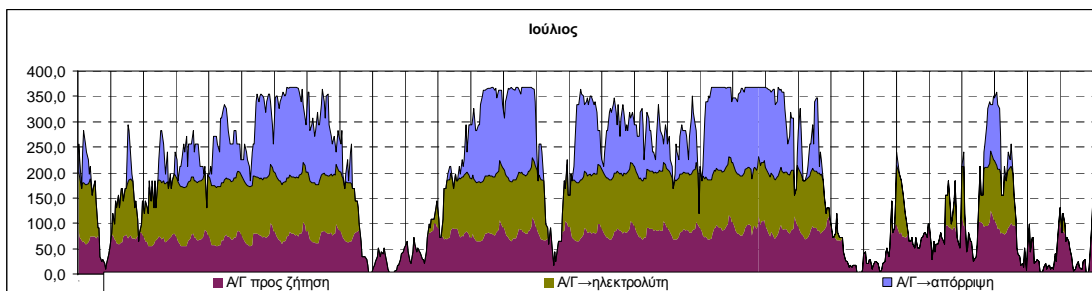
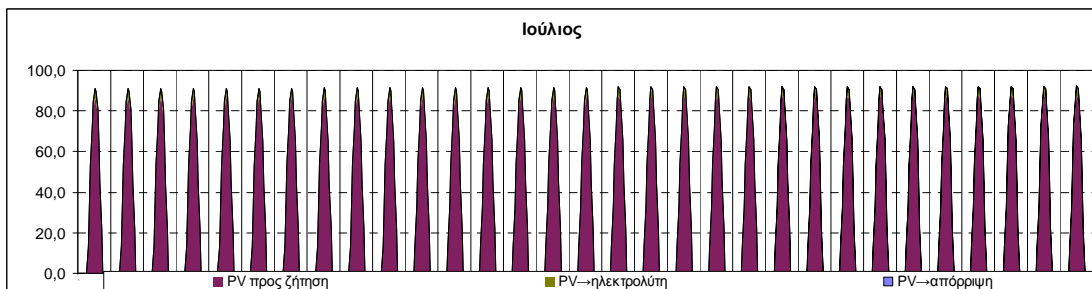
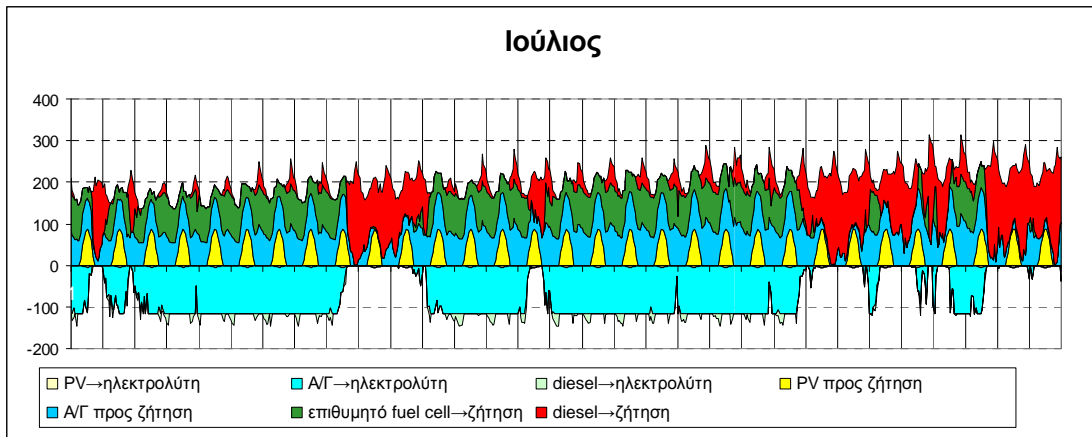


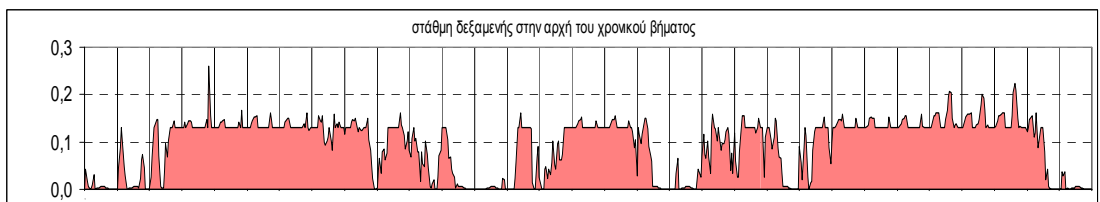
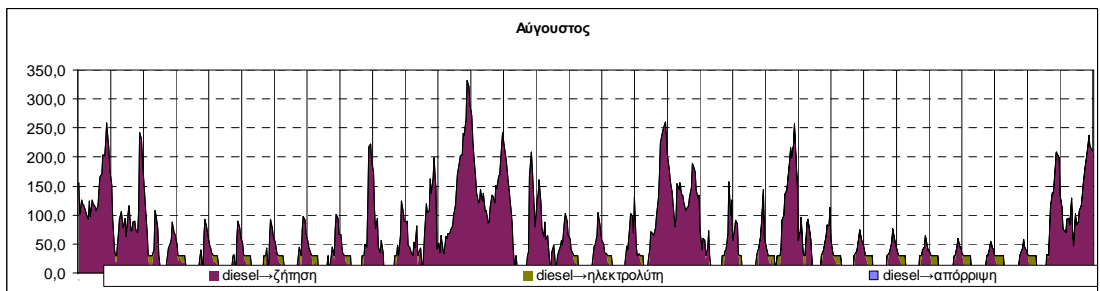
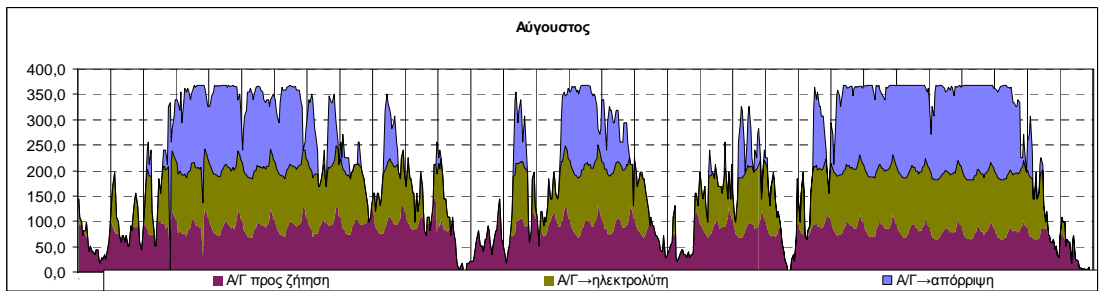
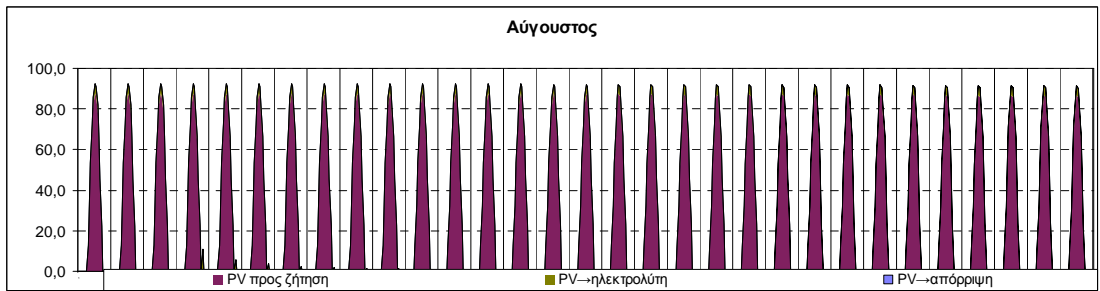
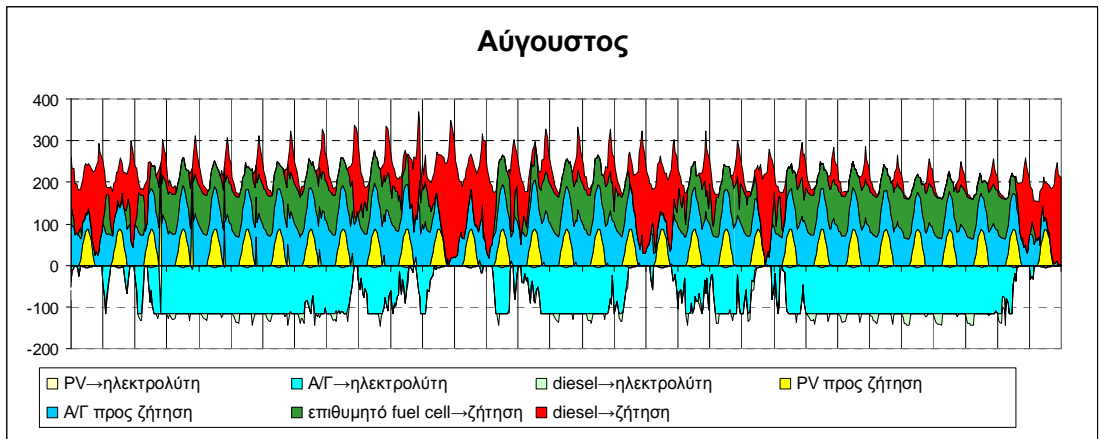


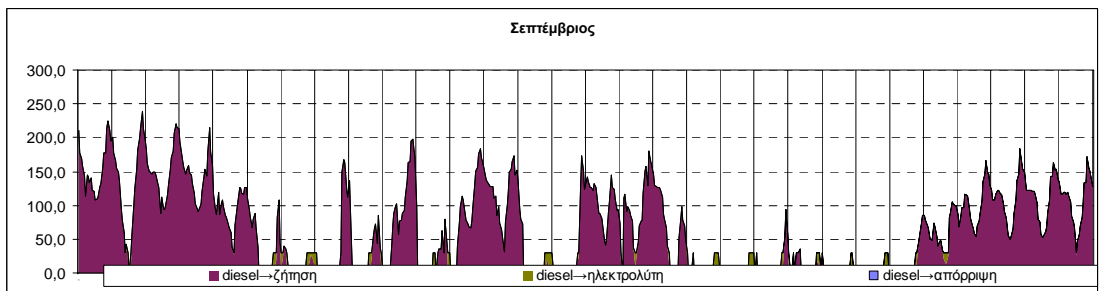
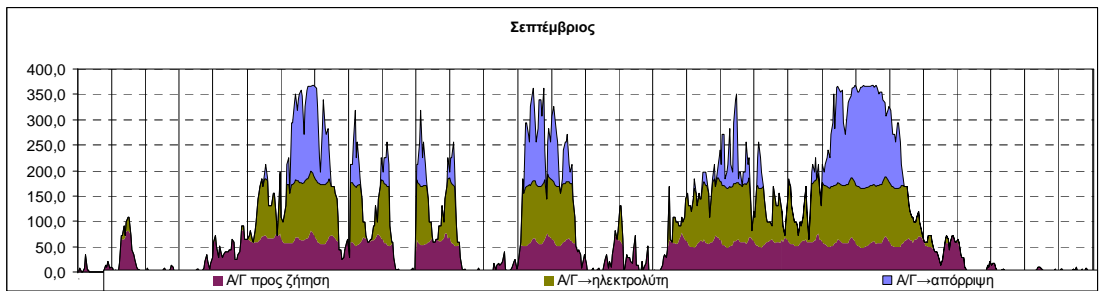
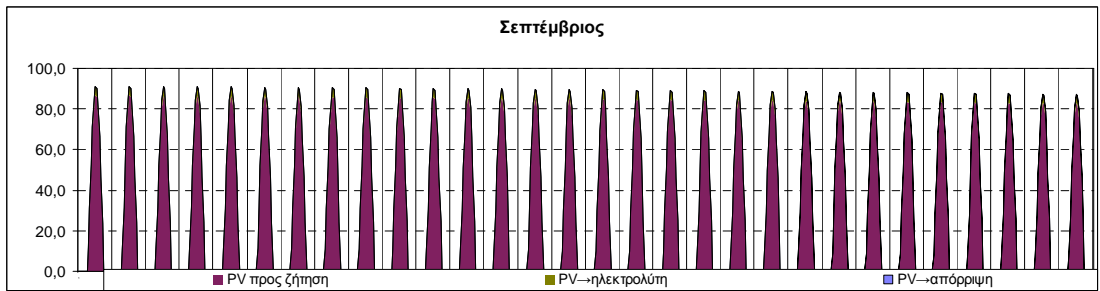
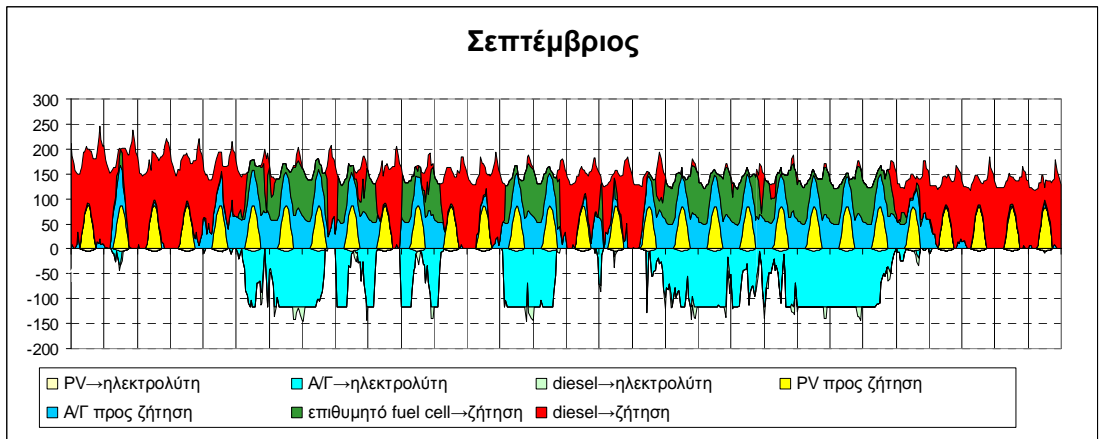


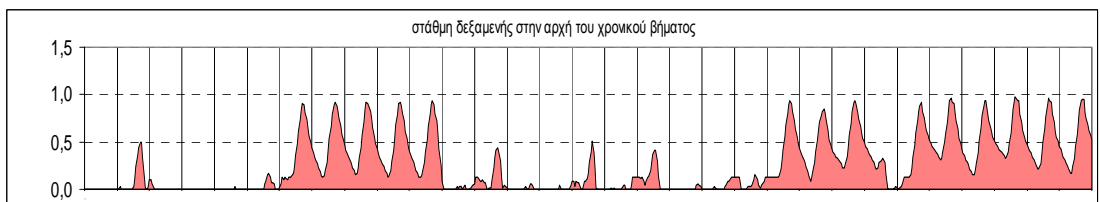
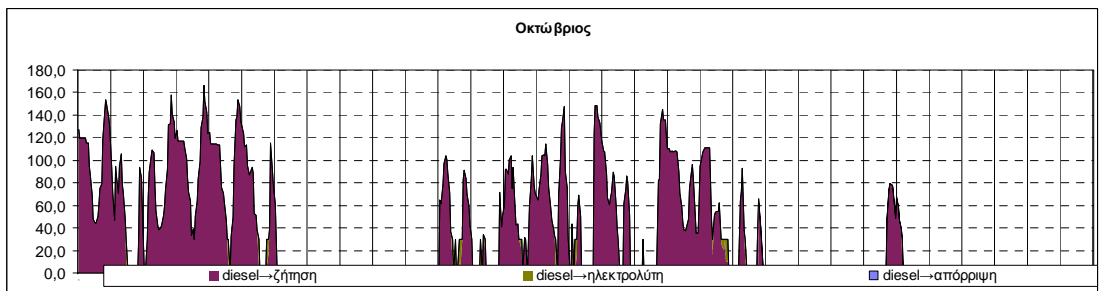
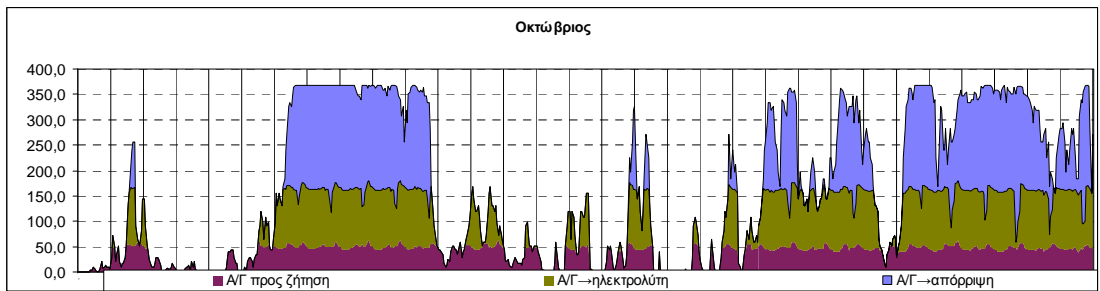
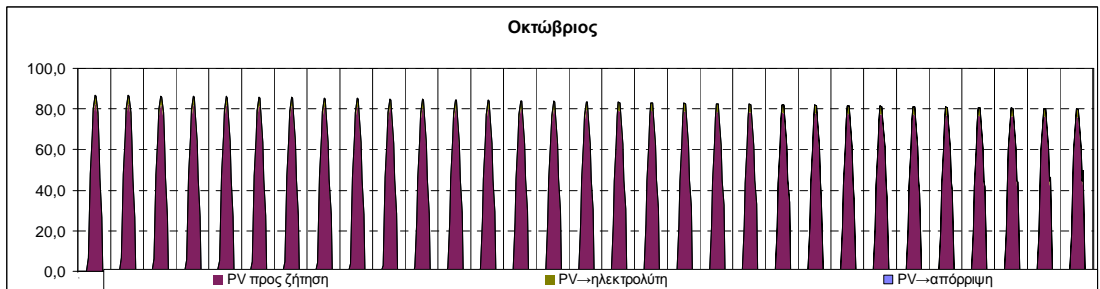
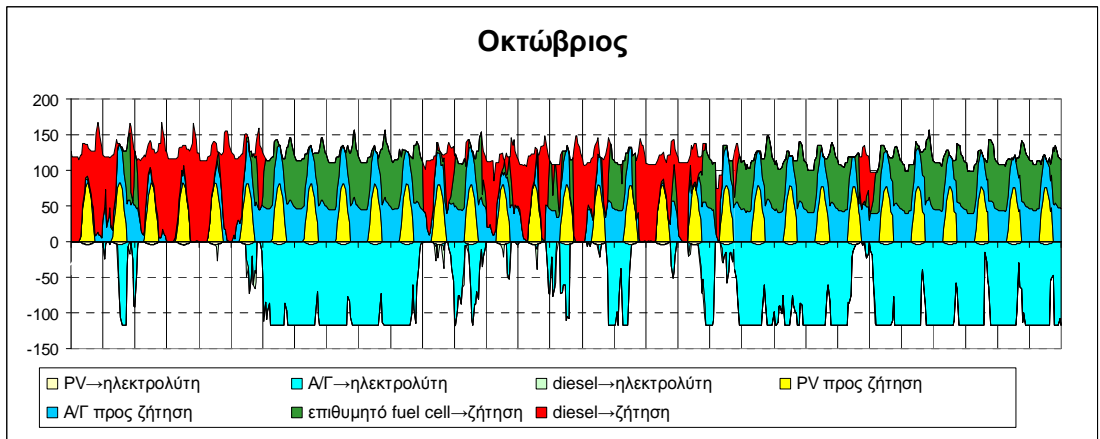


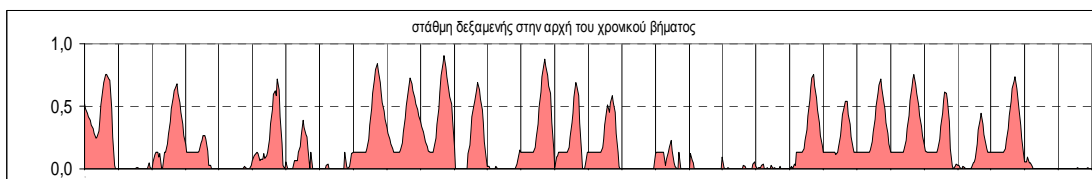
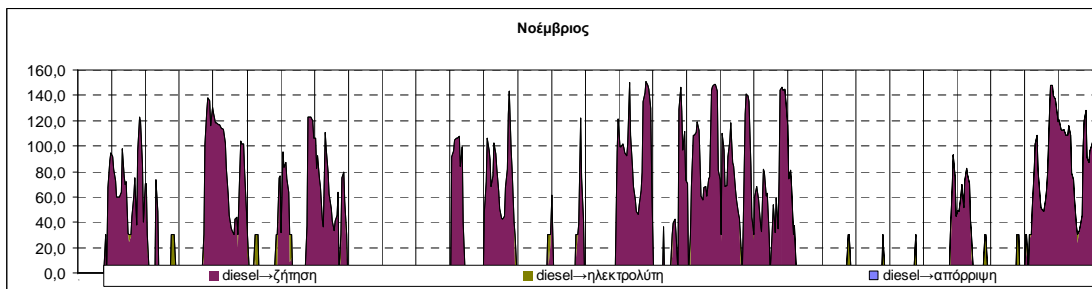
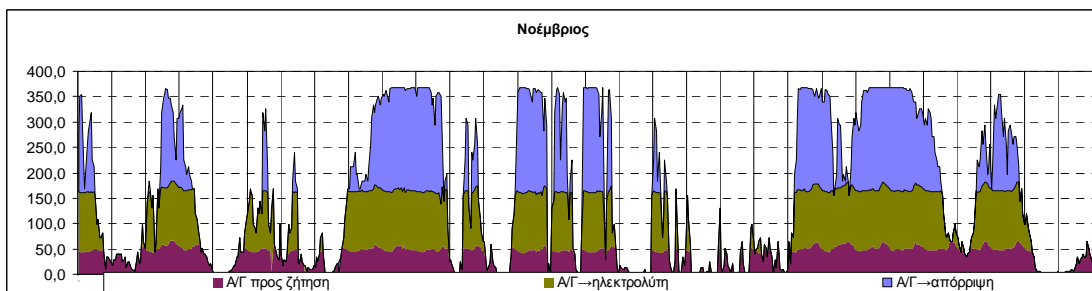
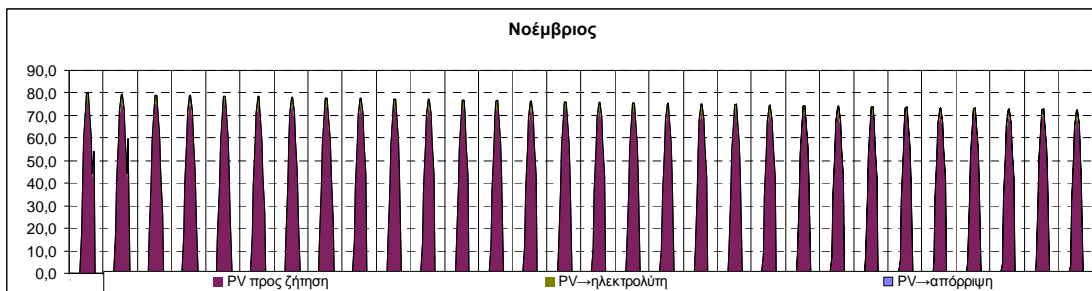
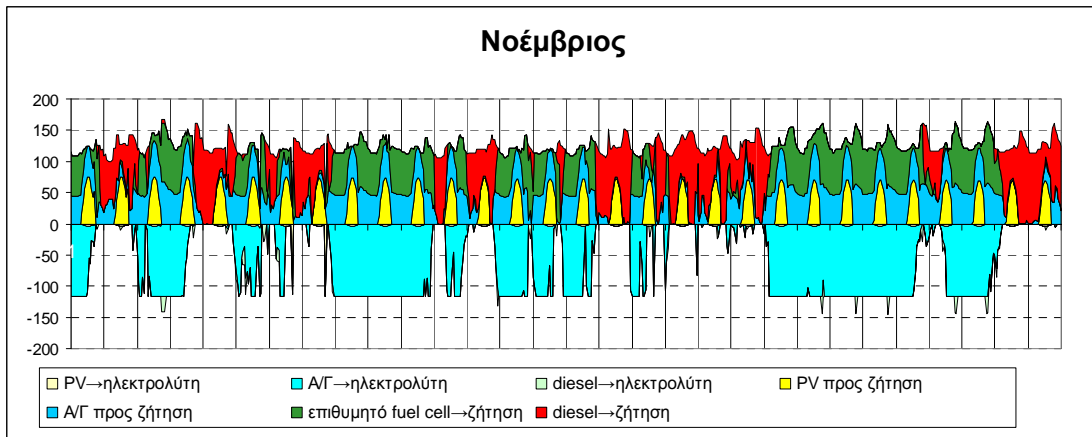


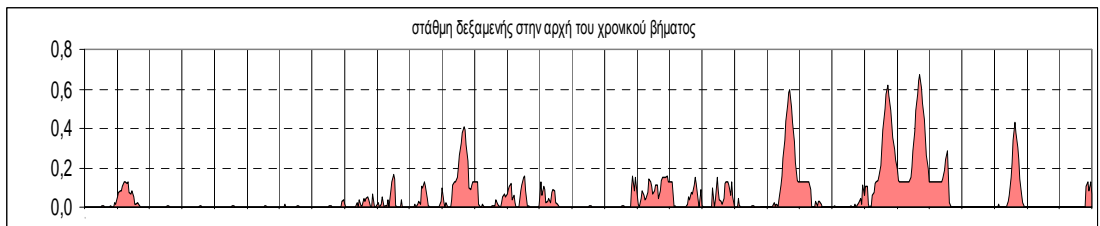
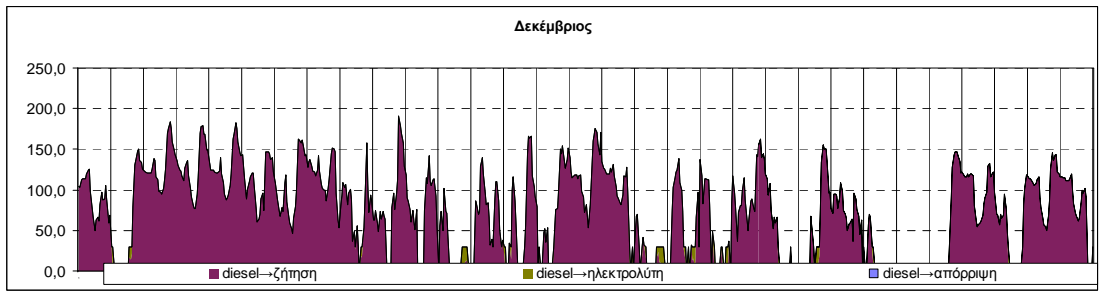
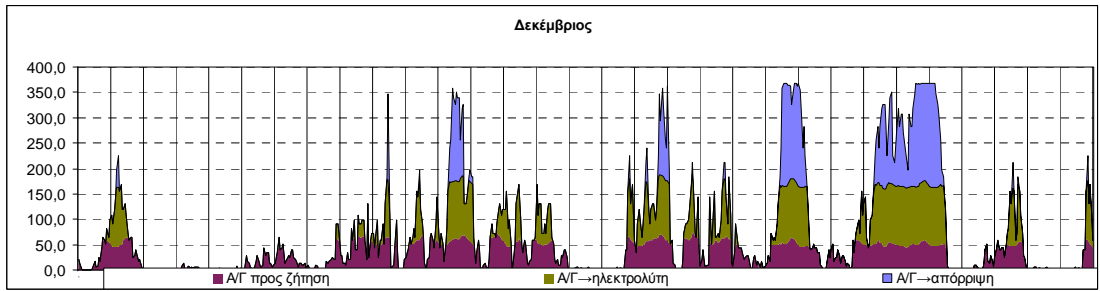
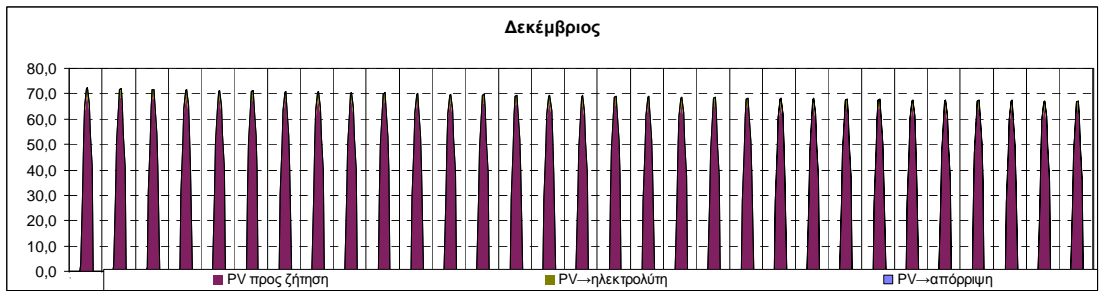
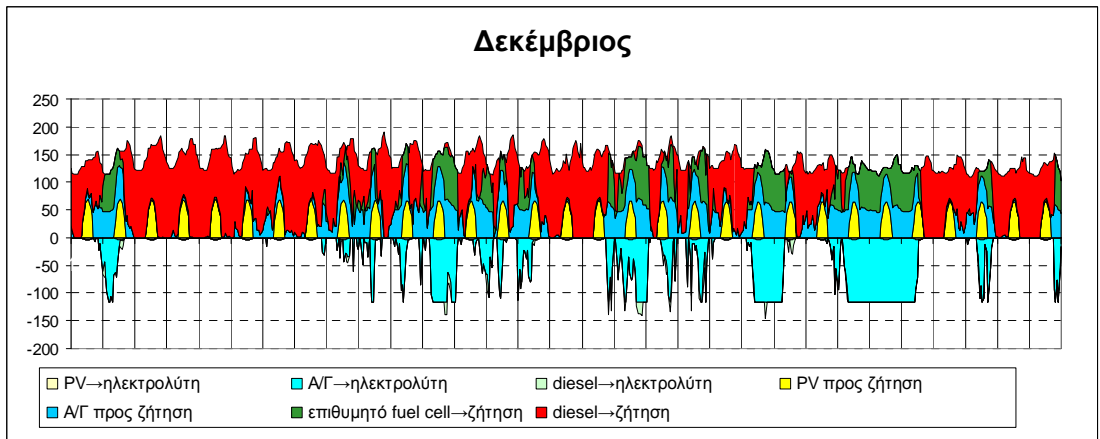






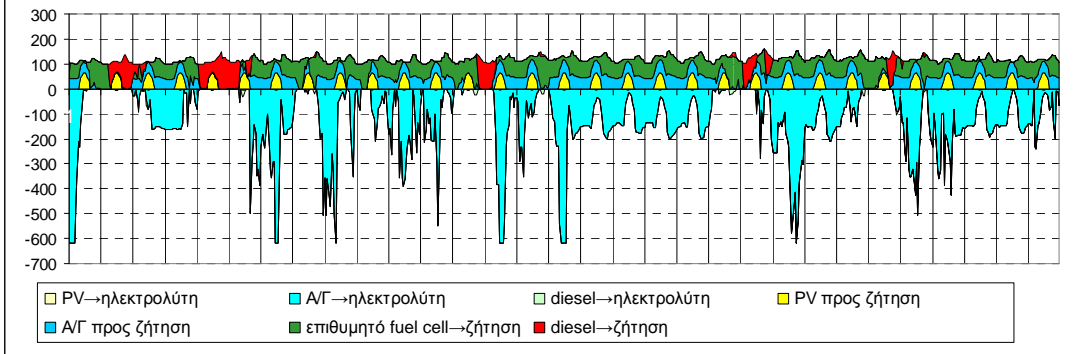




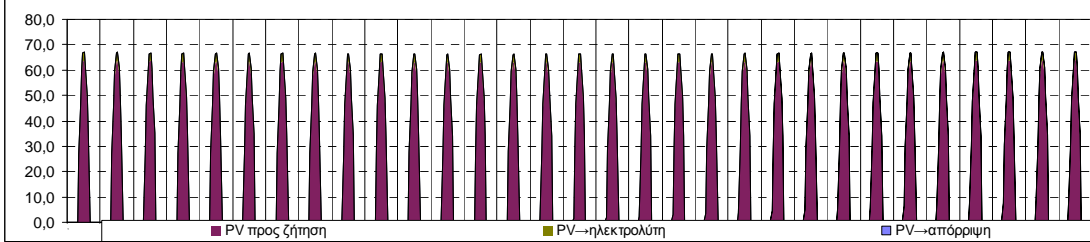


Σενάριο «Οριακά Βιώσιμο»

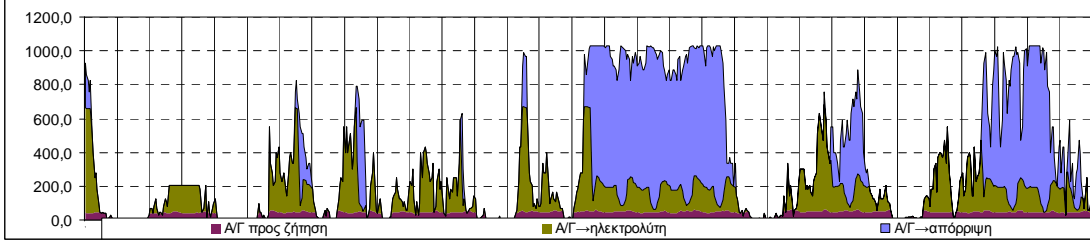
Ιανουάριος



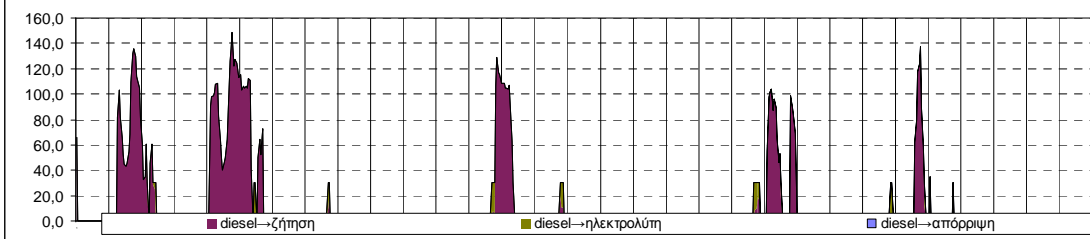
Ιανουάριος



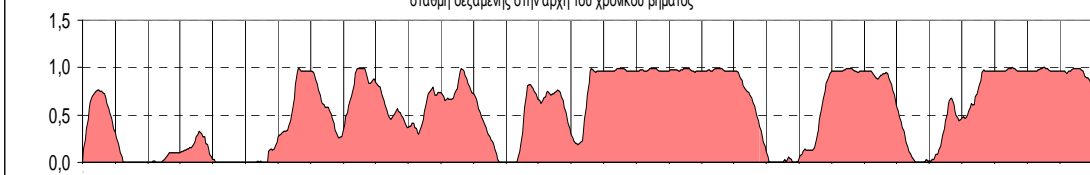
Ιανουάριος

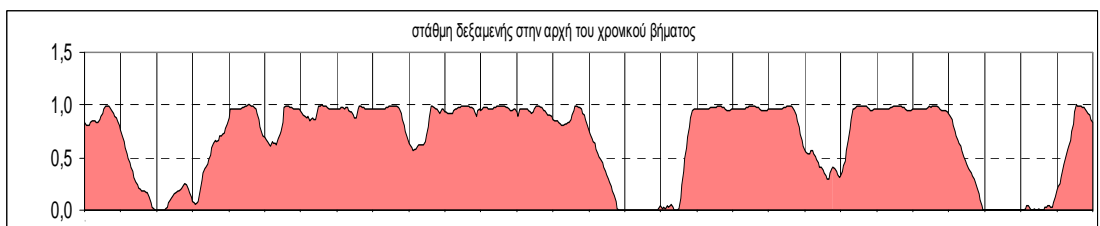
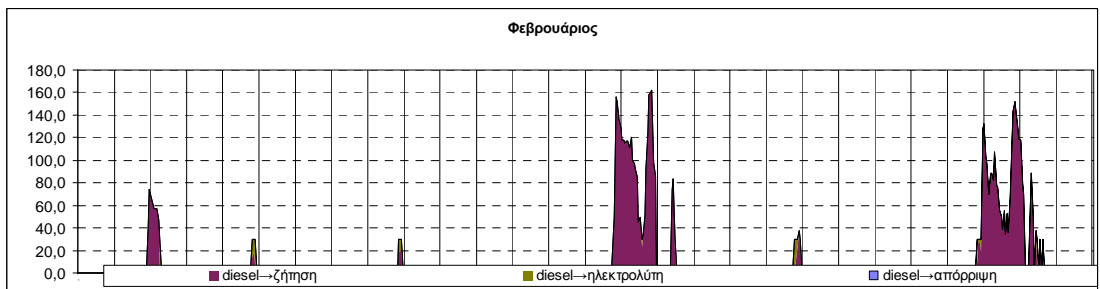
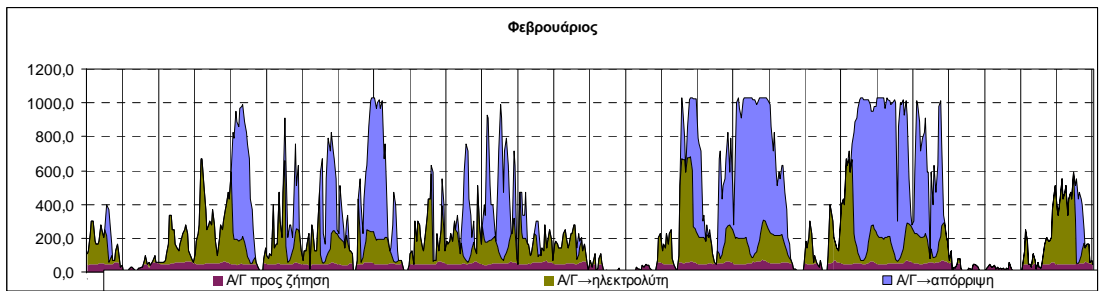
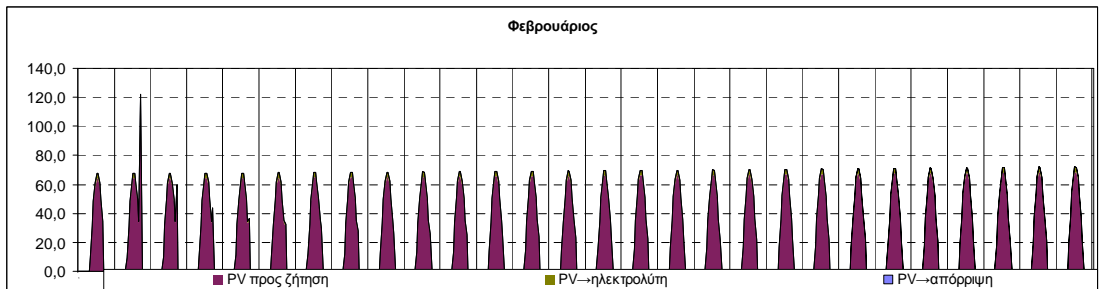
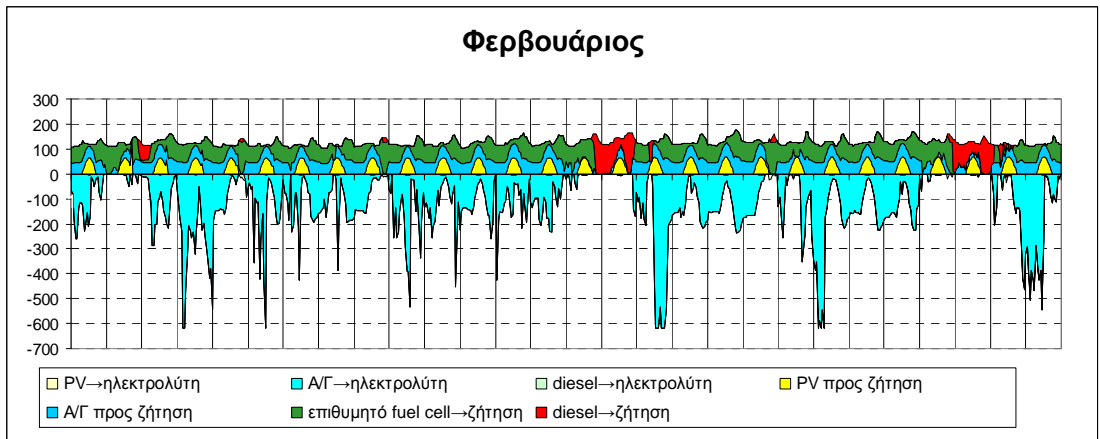


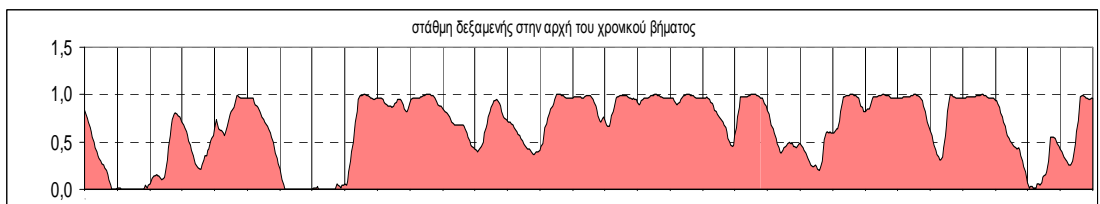
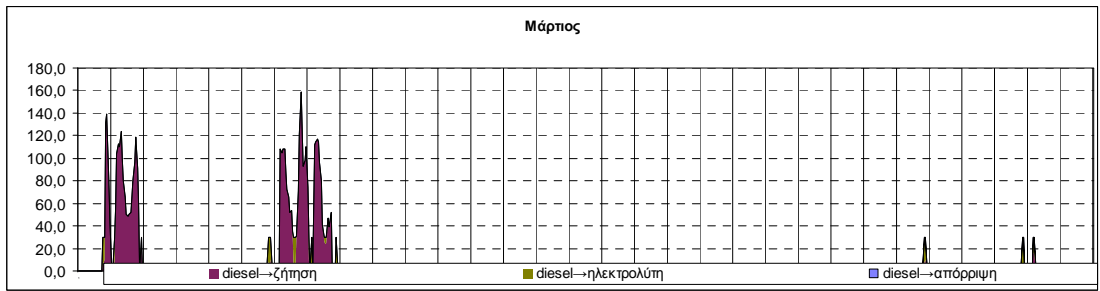
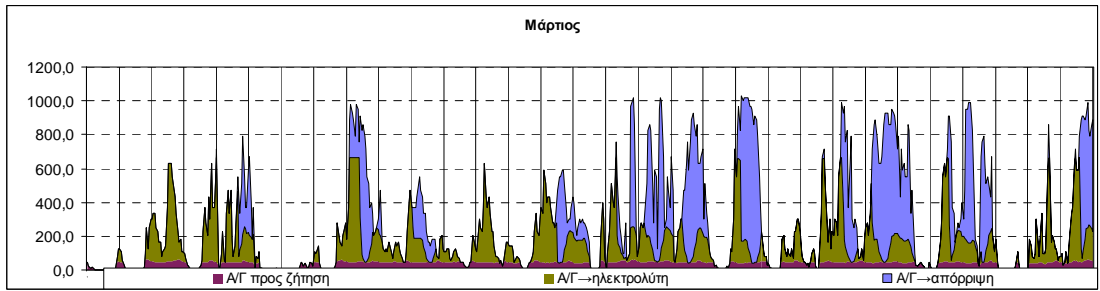
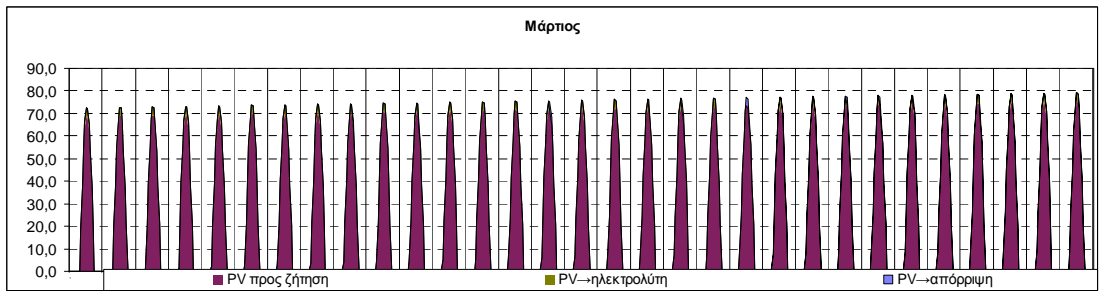
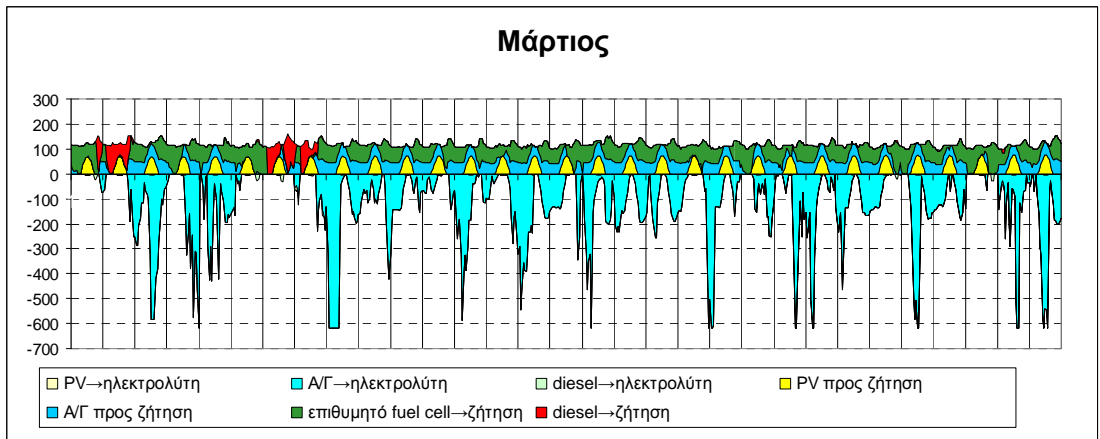
Ιανουάριος

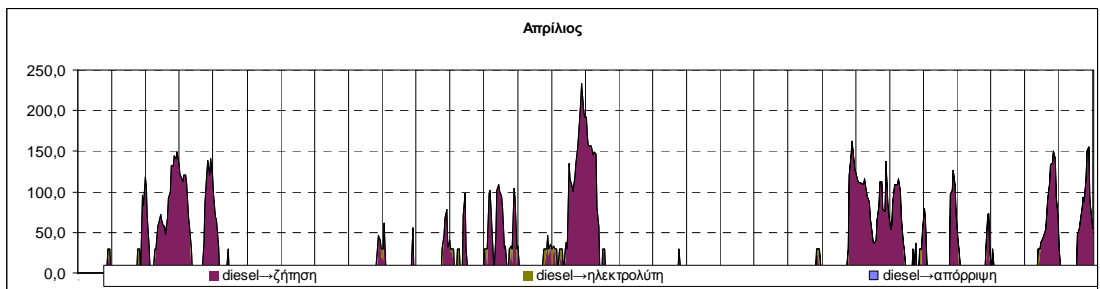
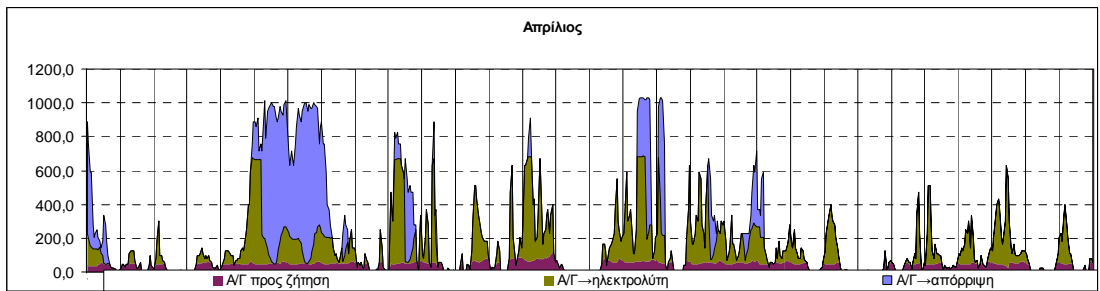
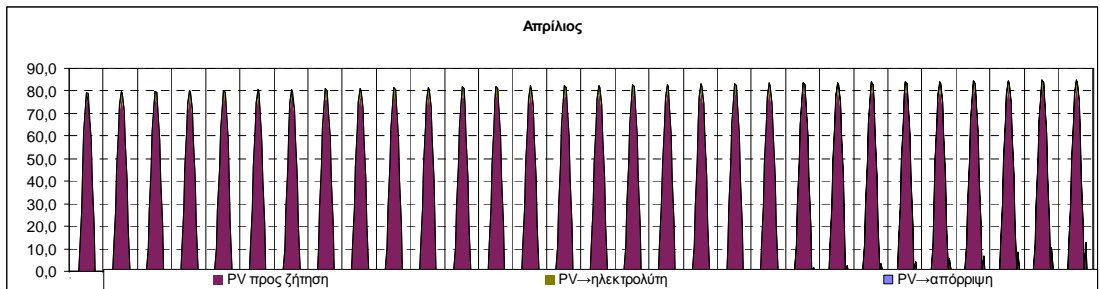
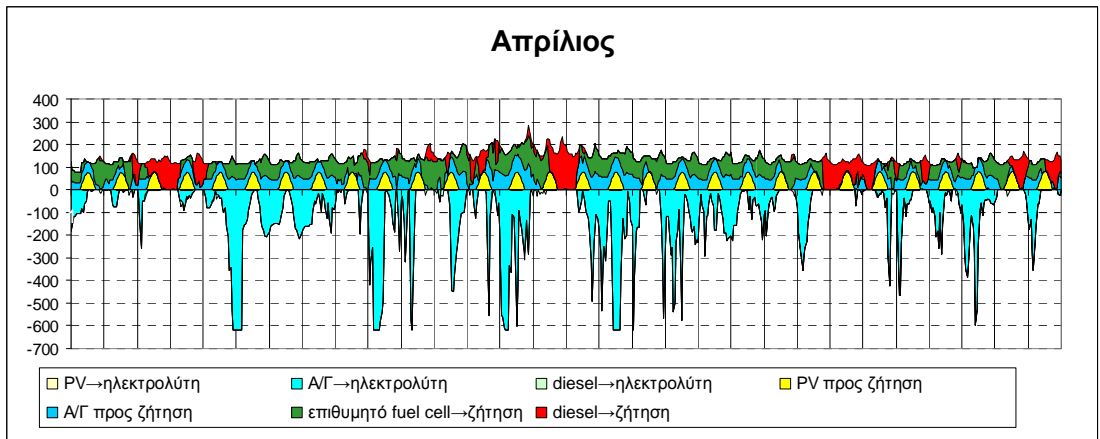


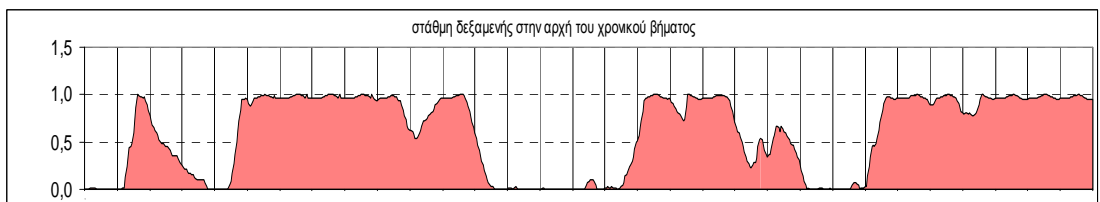
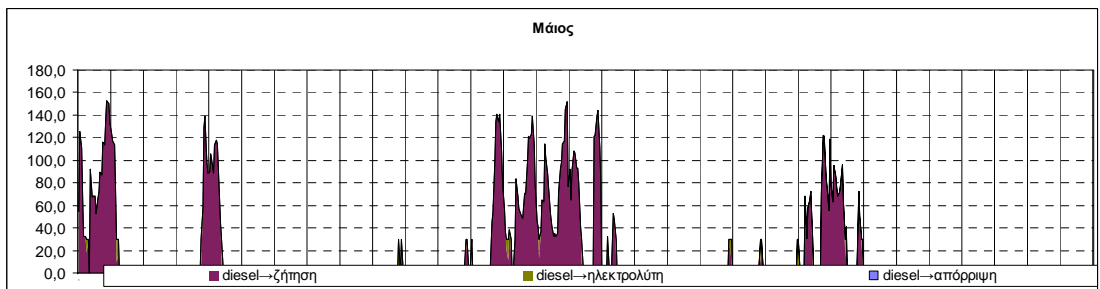
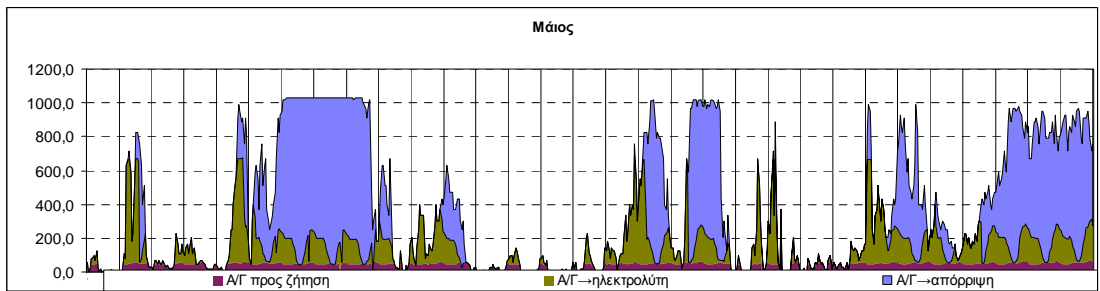
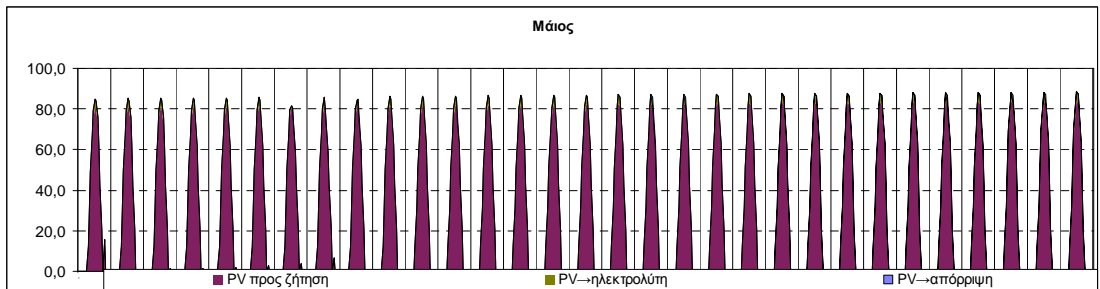
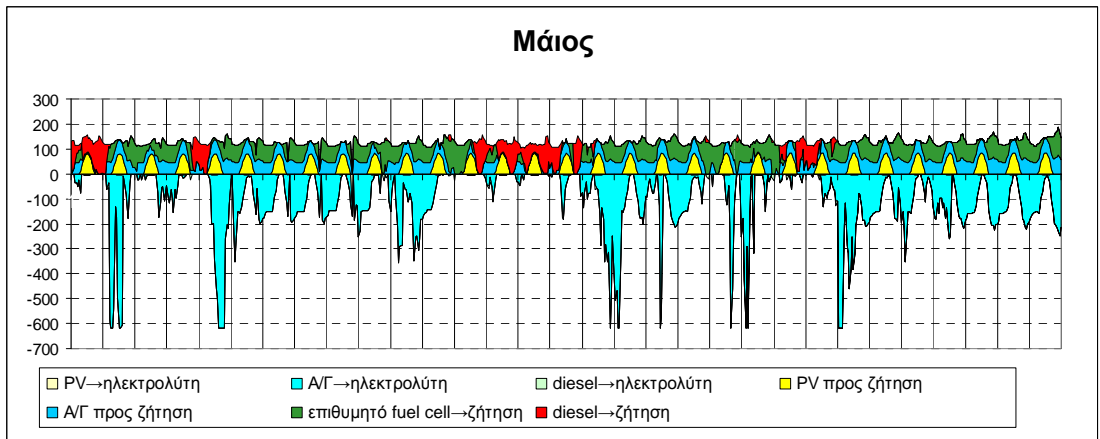
στάθμη δεξαμενής στην αρχή του χρονικού βήματος

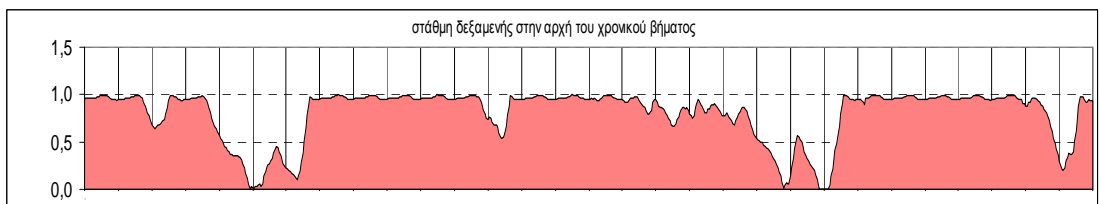
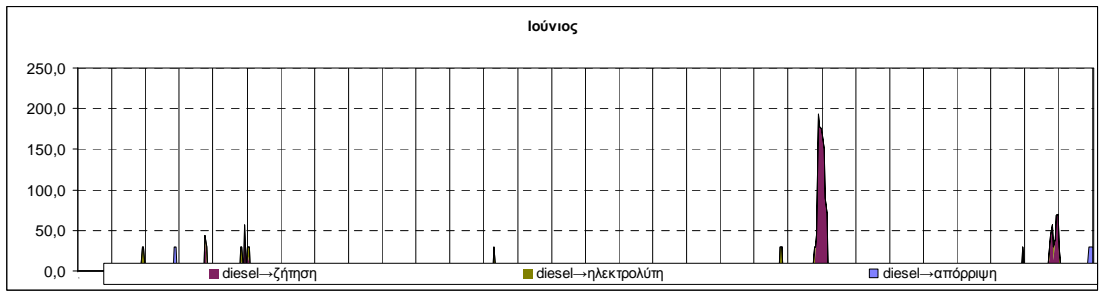
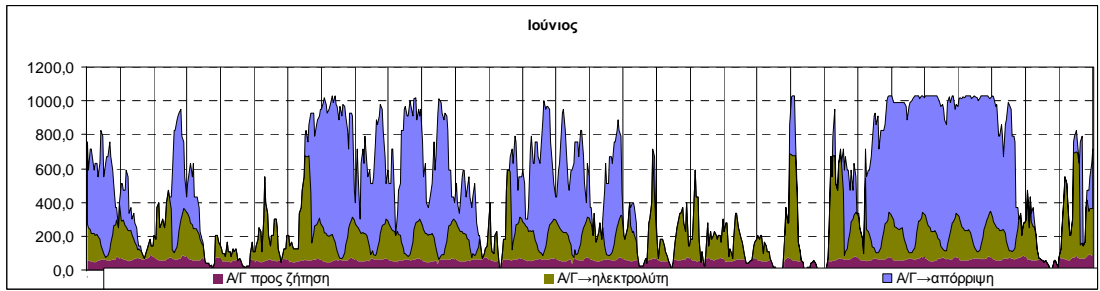
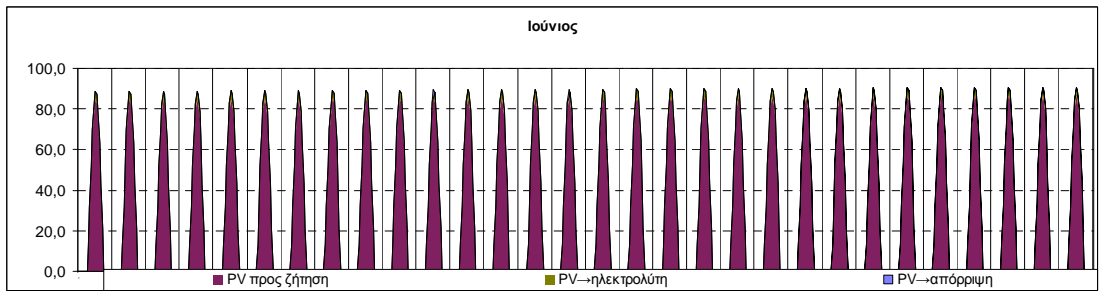
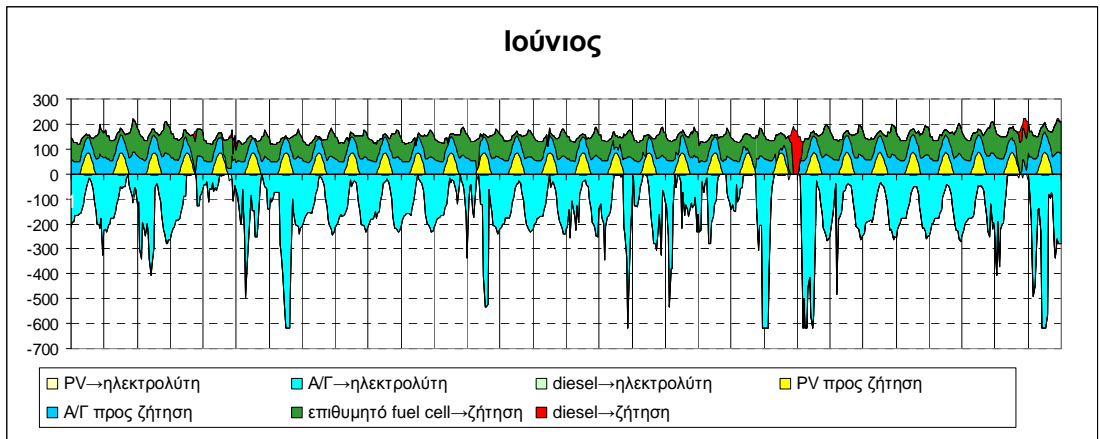


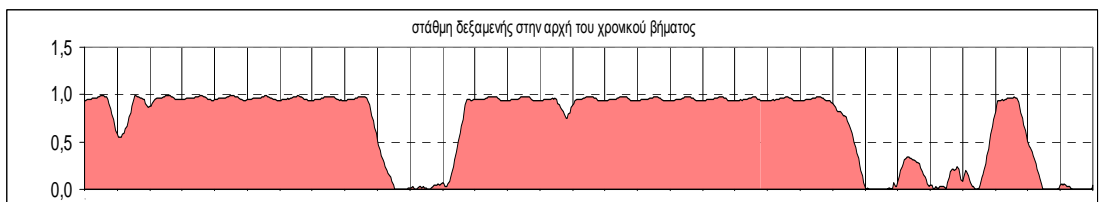
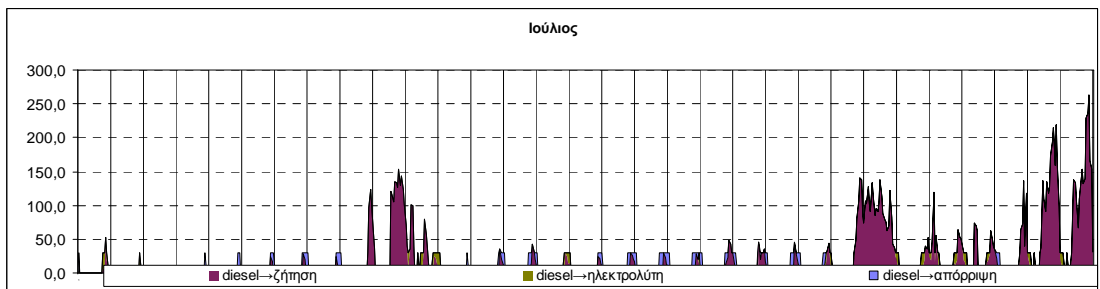
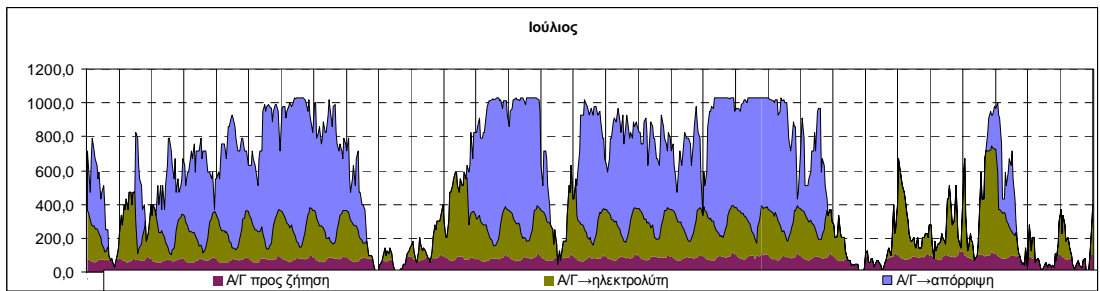
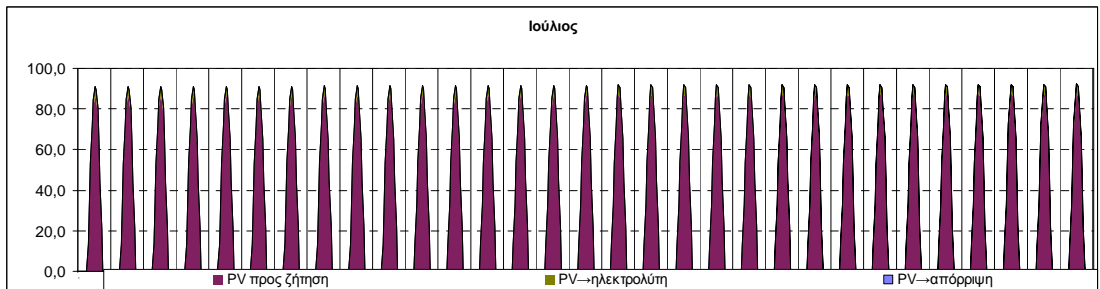
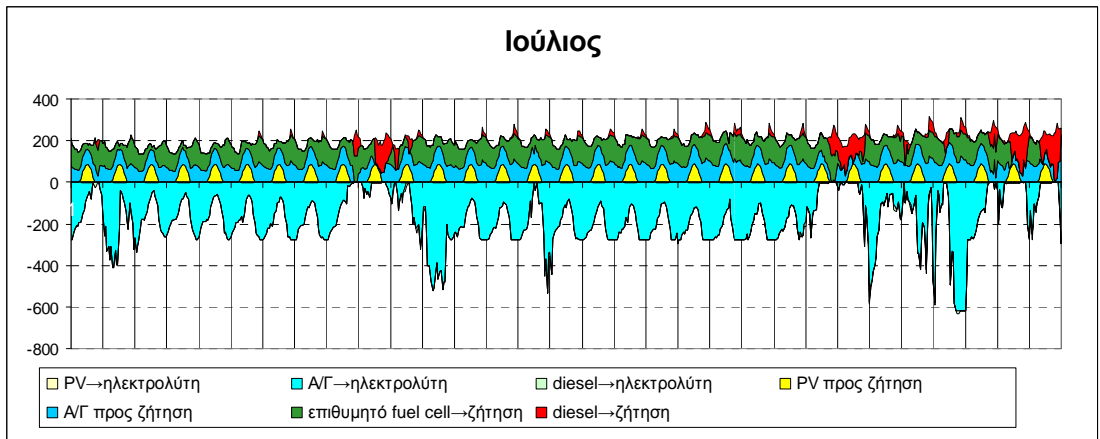


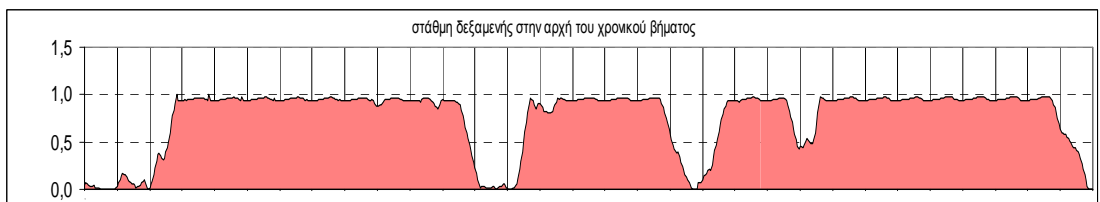
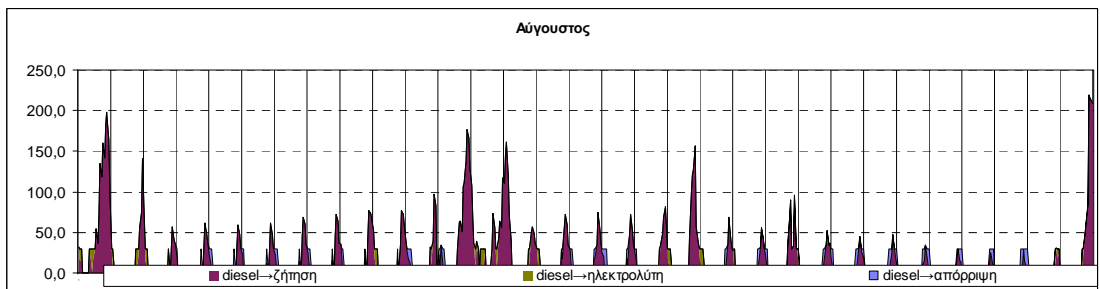
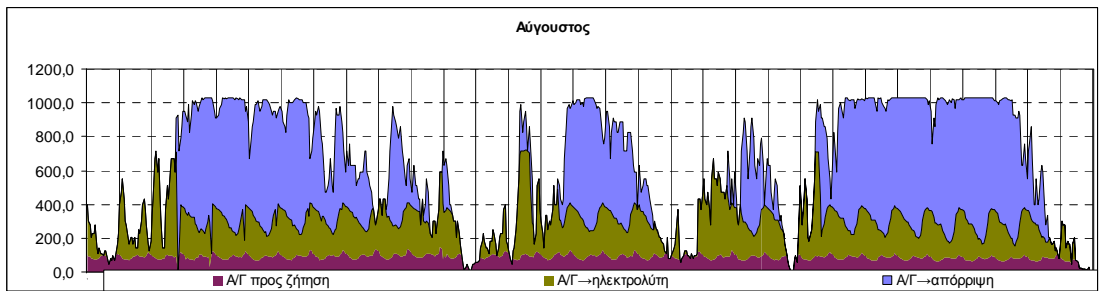
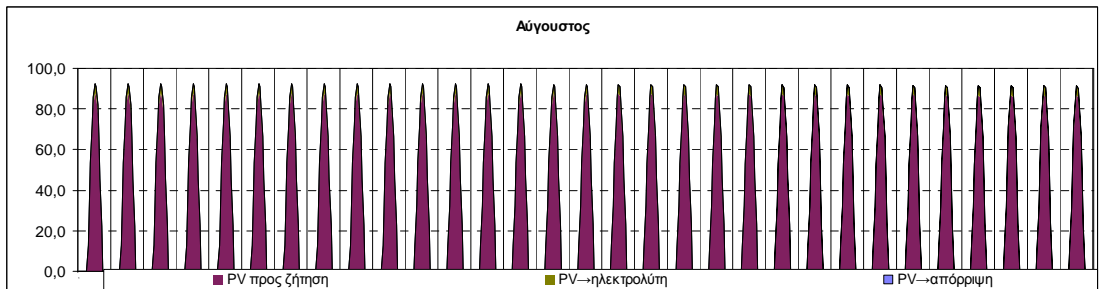
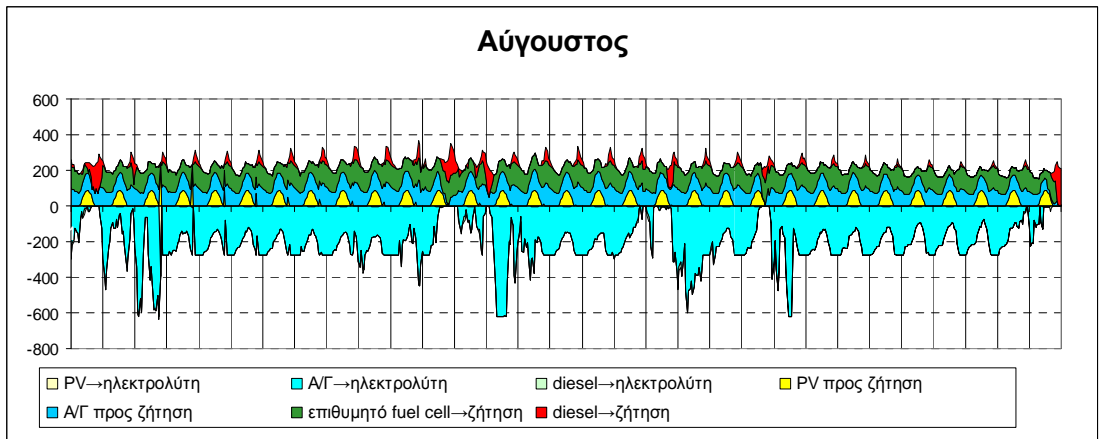


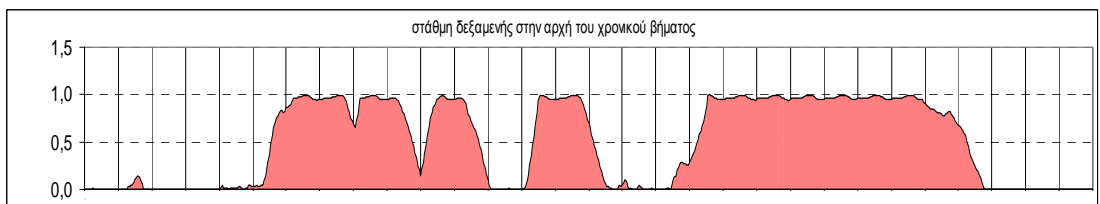
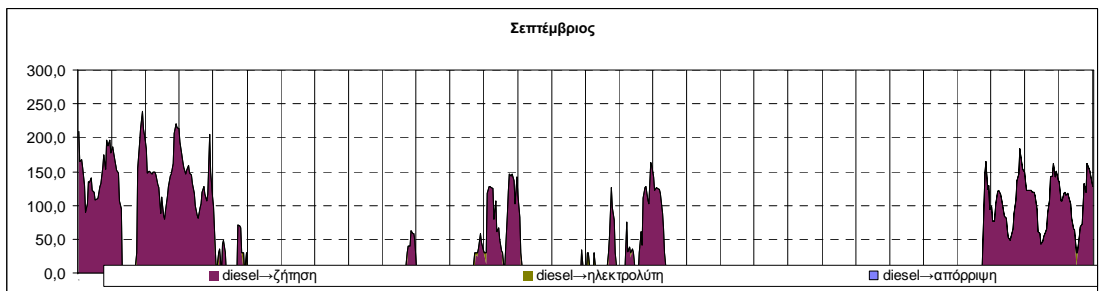
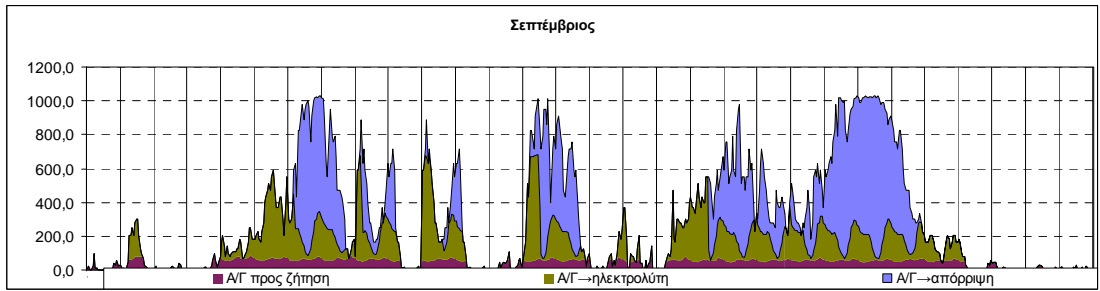
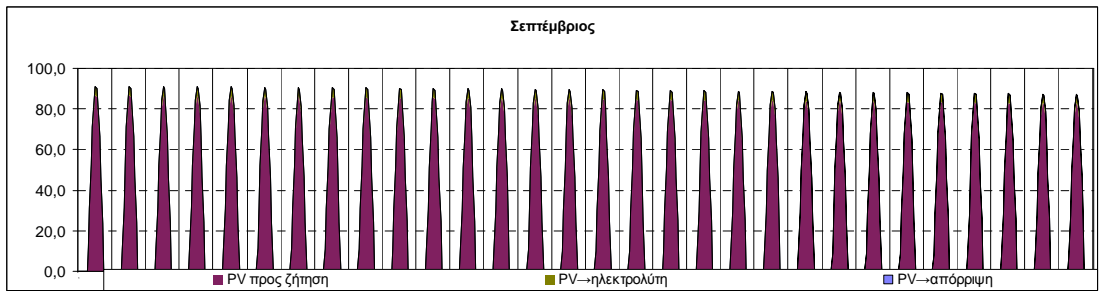
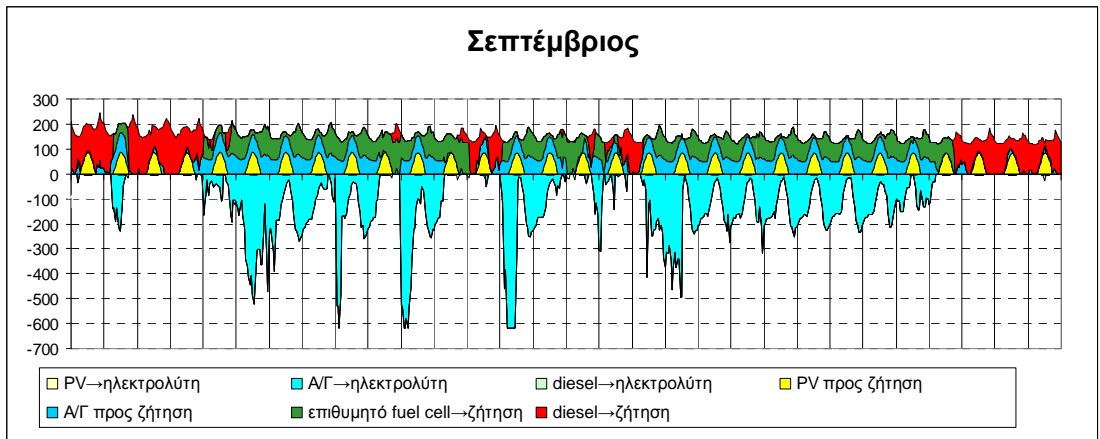


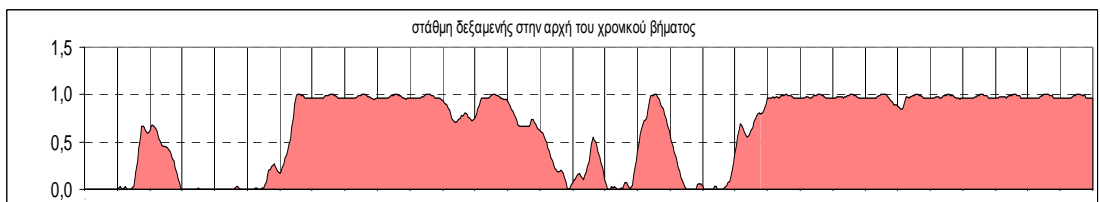
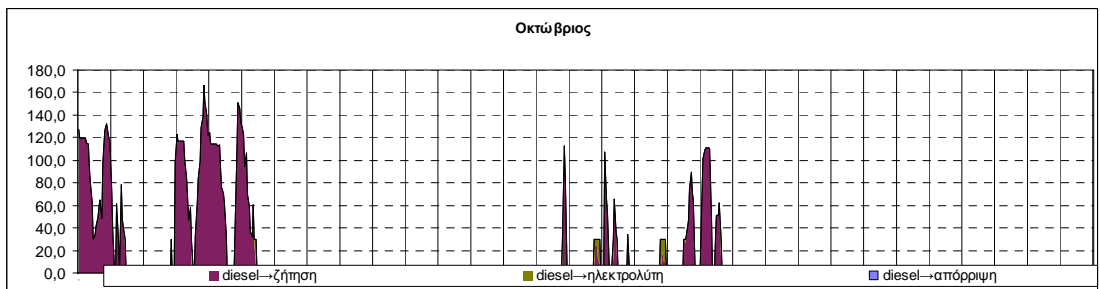
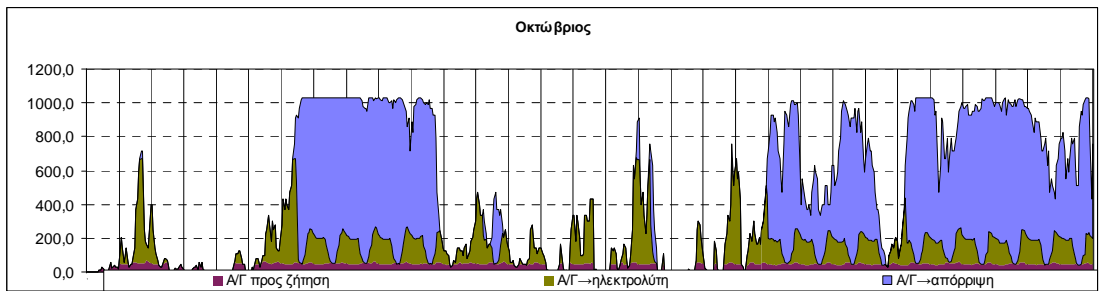
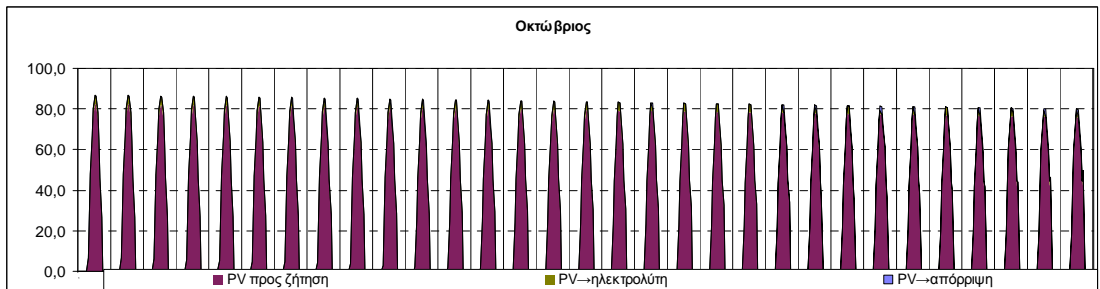
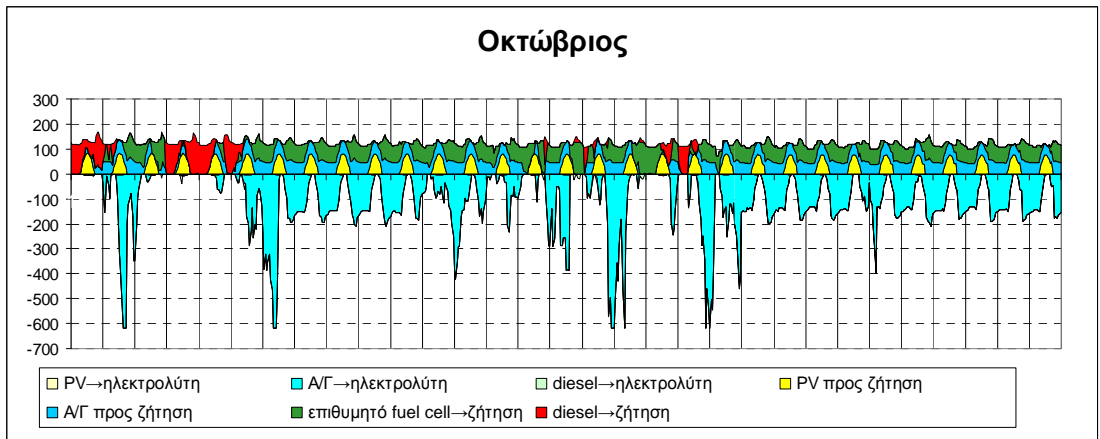


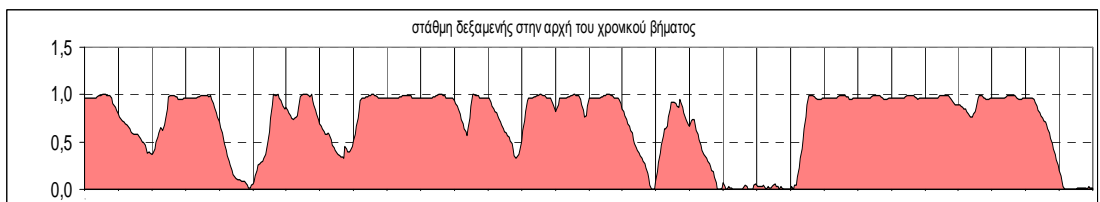
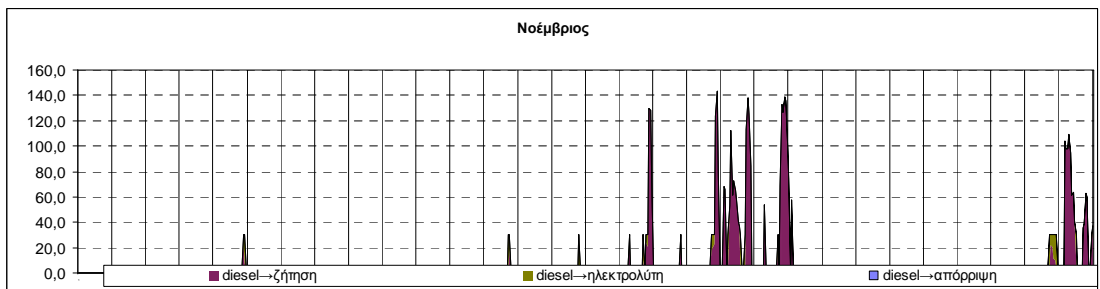
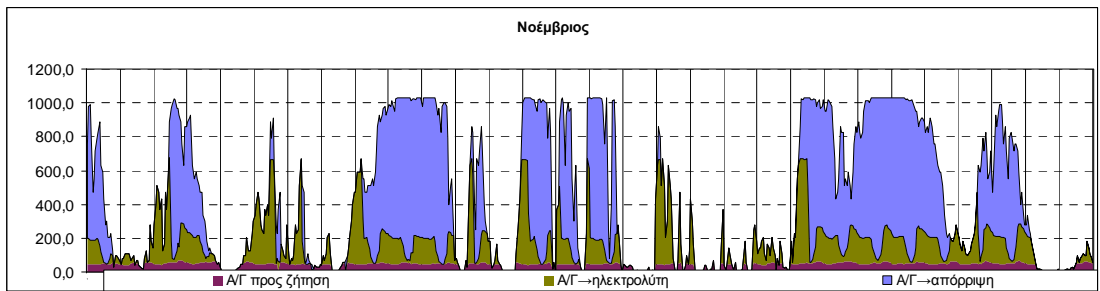
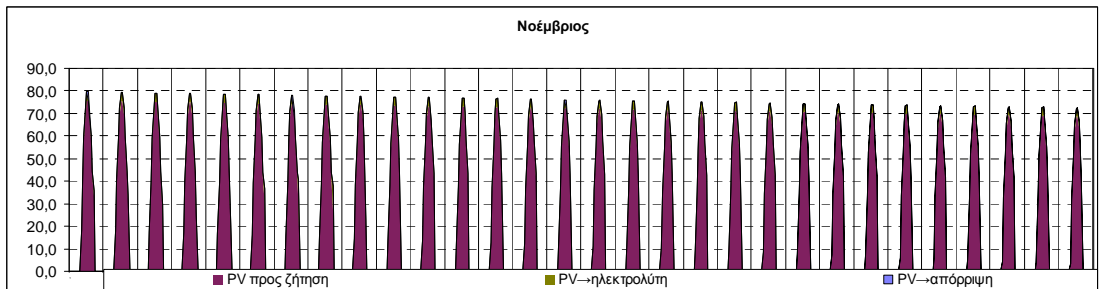
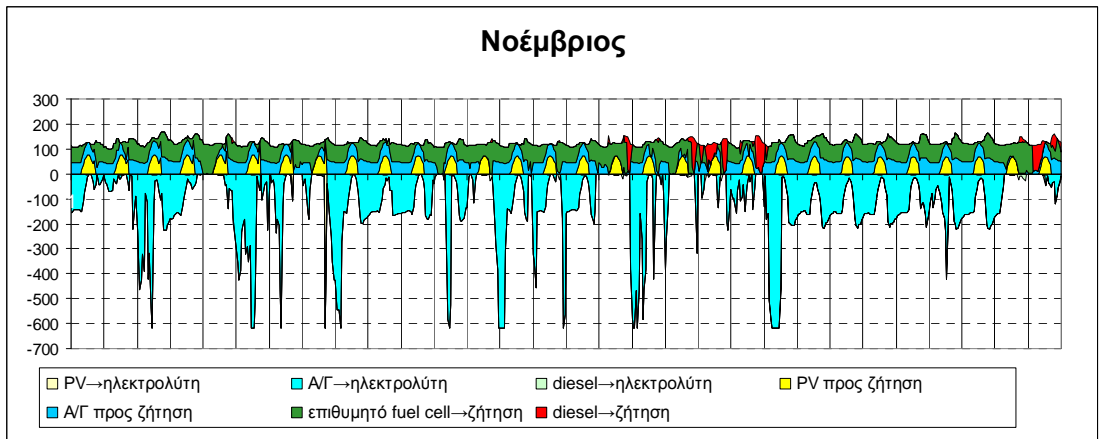


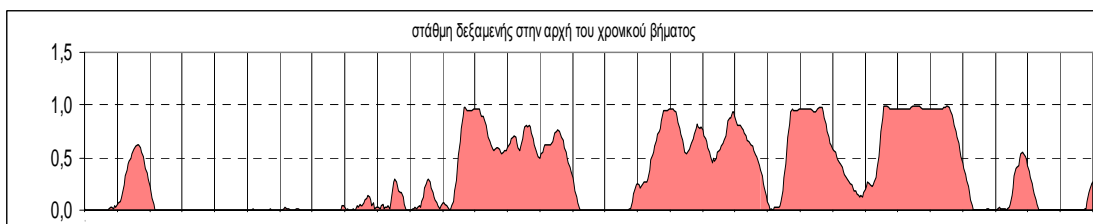
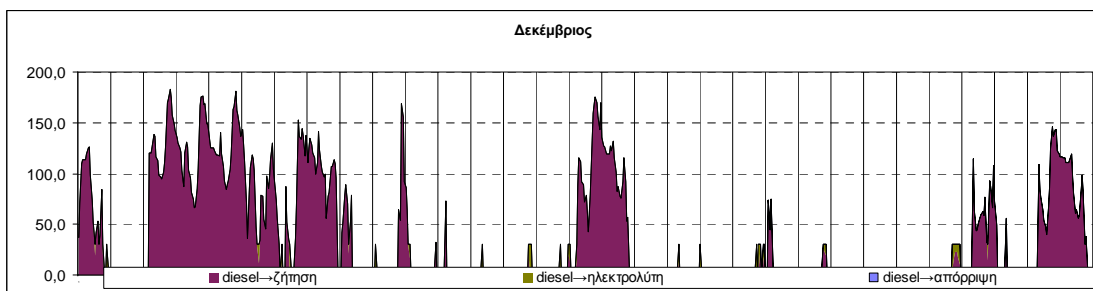
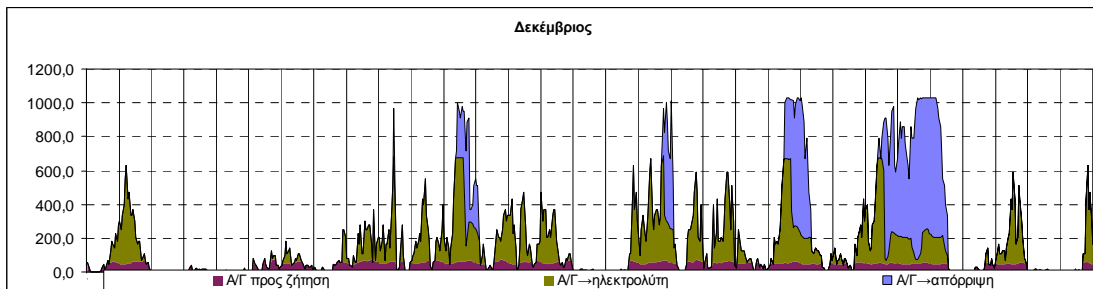
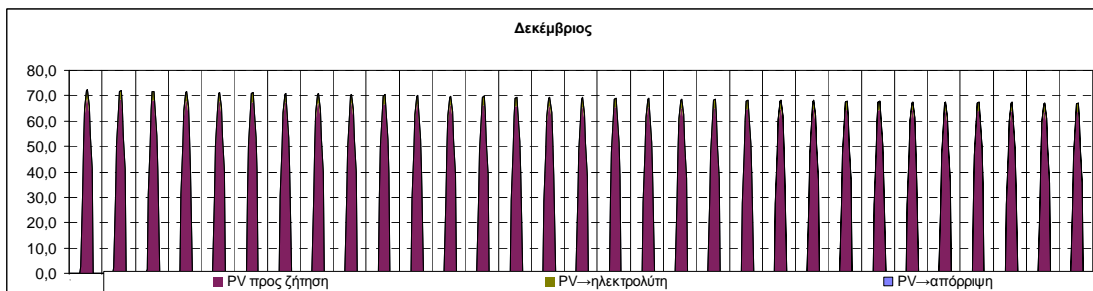
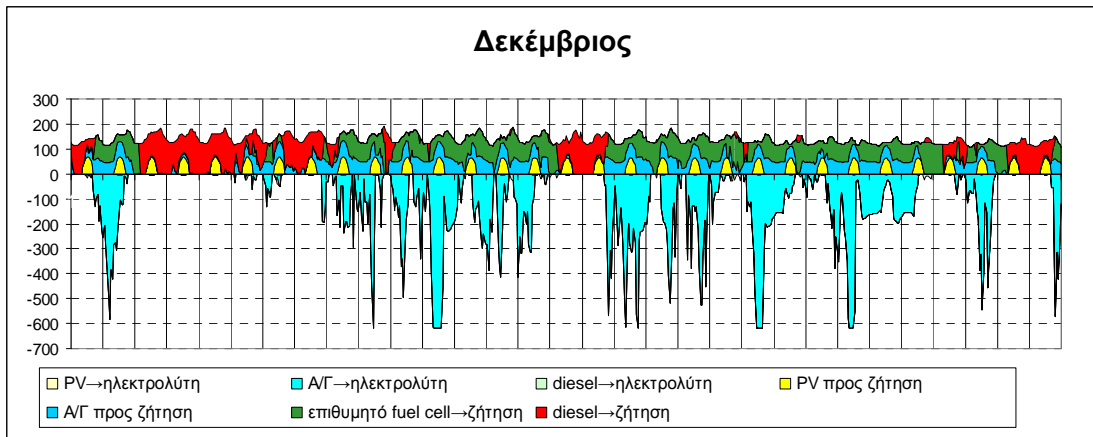






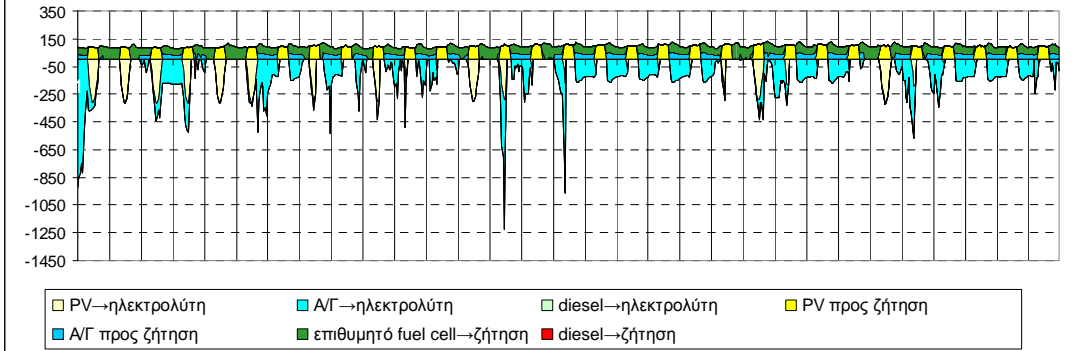




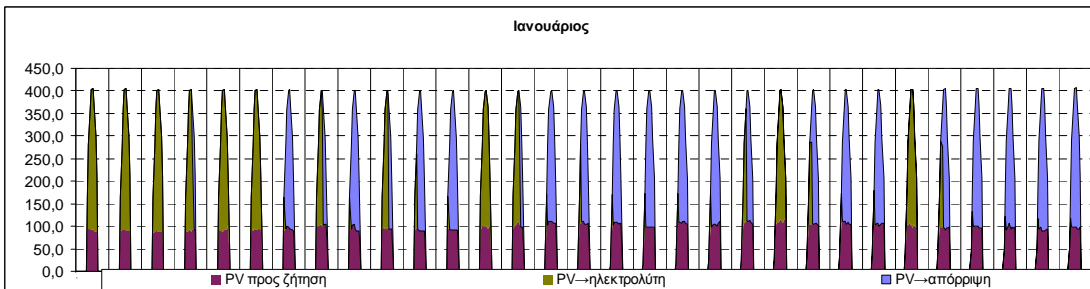


Η «πράσινη» λύση

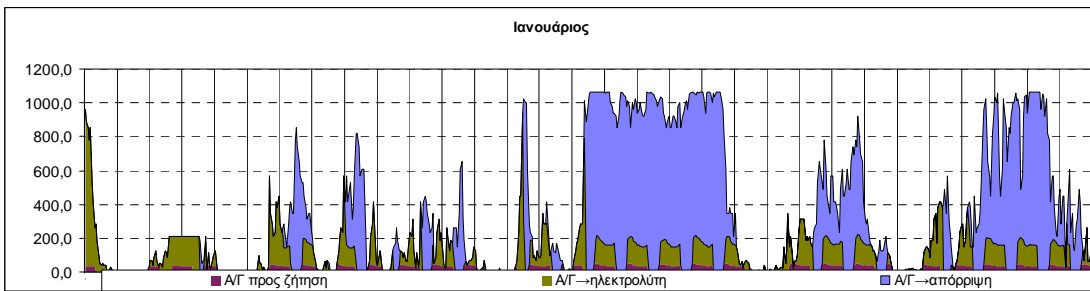
Ιανουάριος



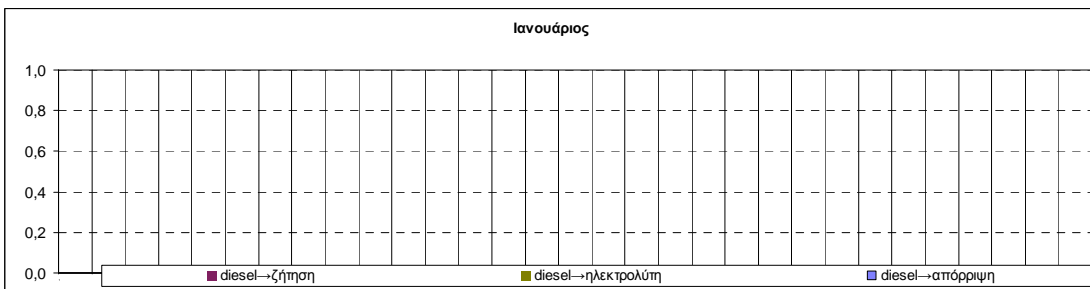
Ιανουάριος



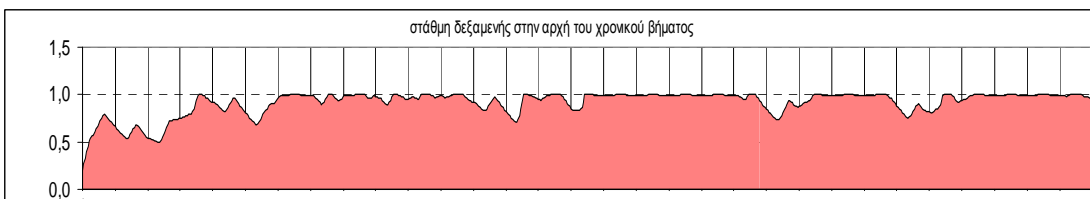
Ιανουάριος

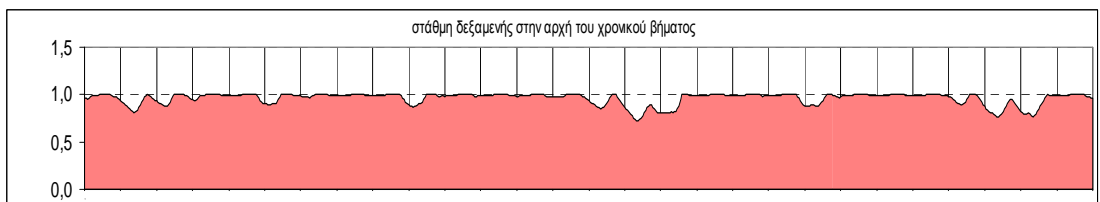
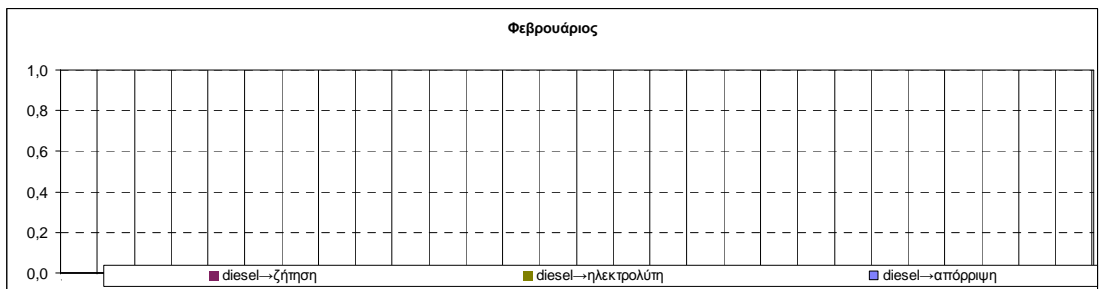
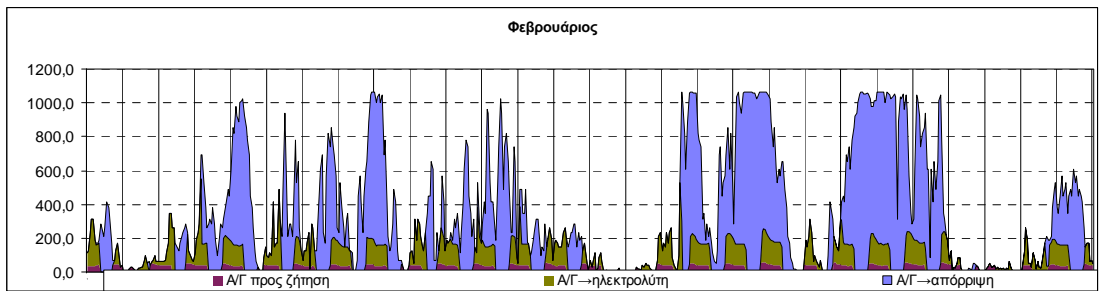
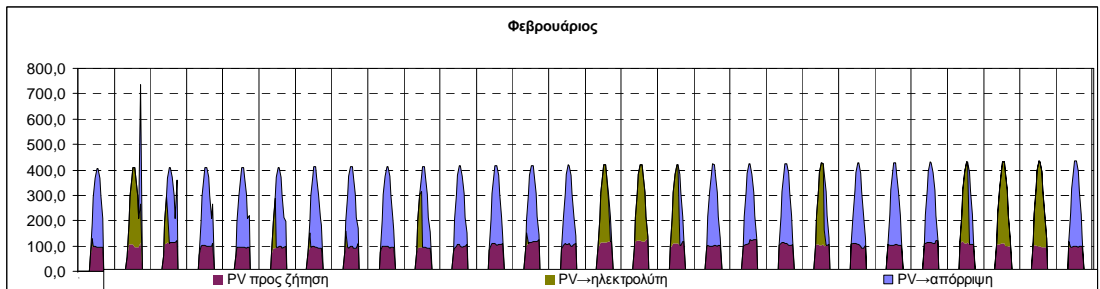
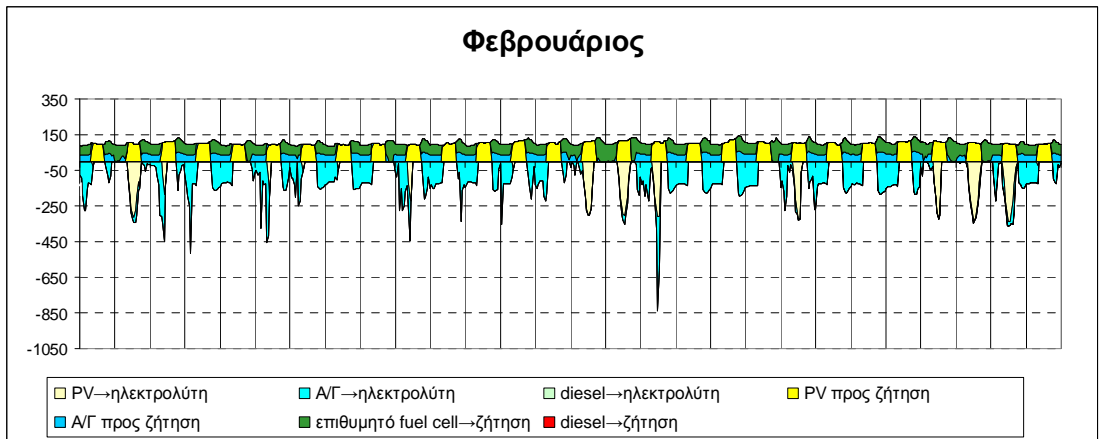


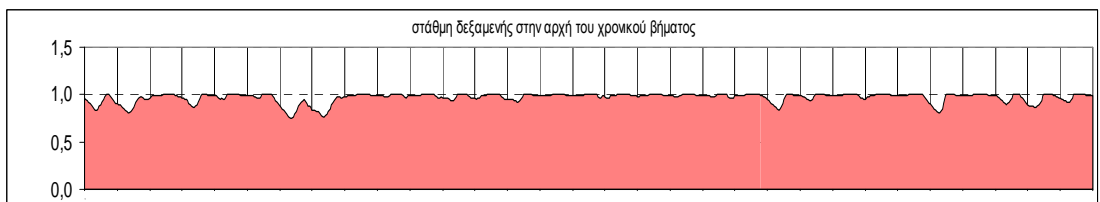
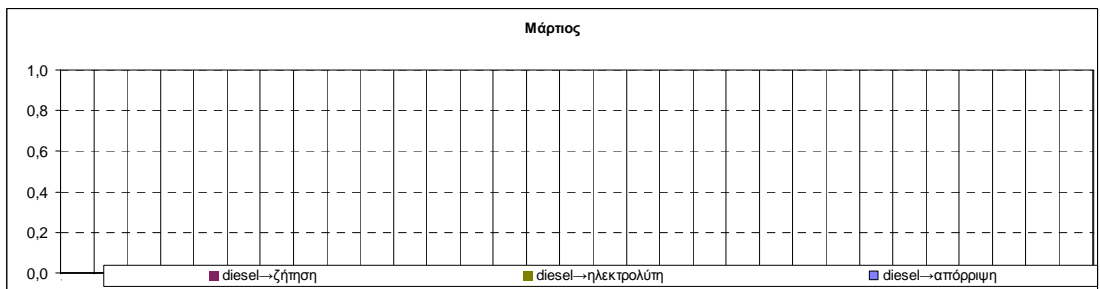
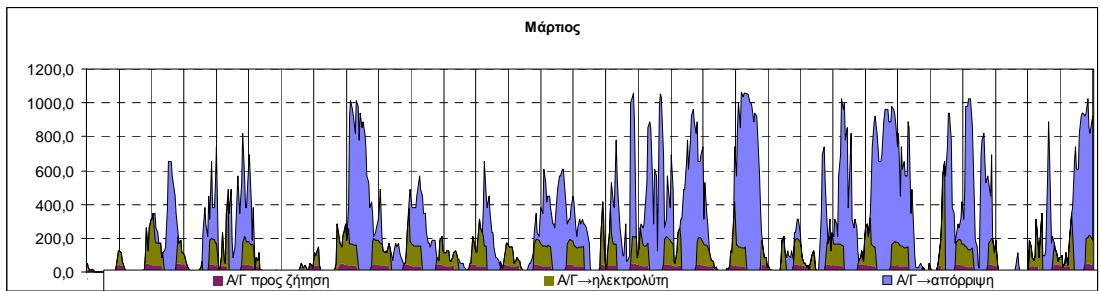
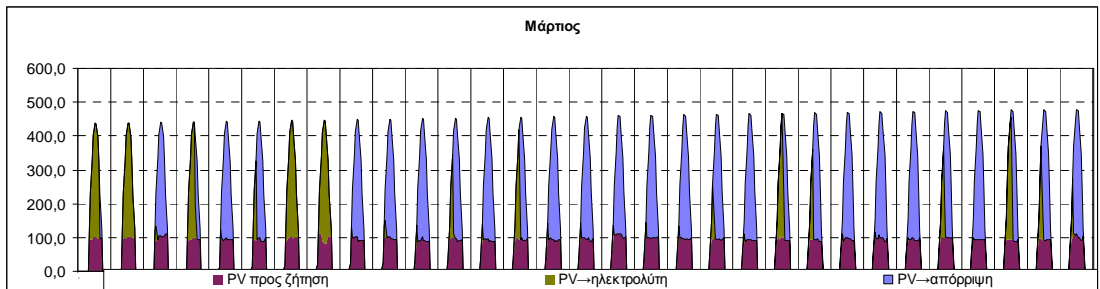
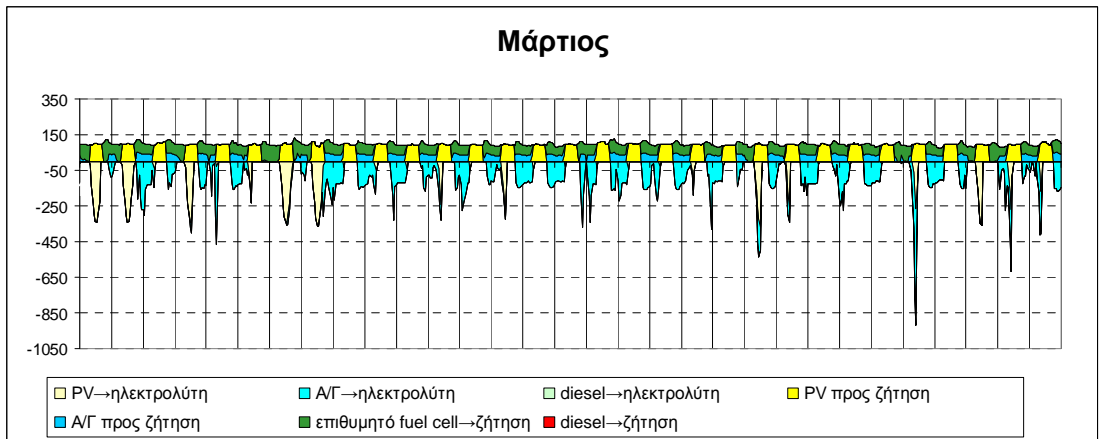
Ιανουάριος

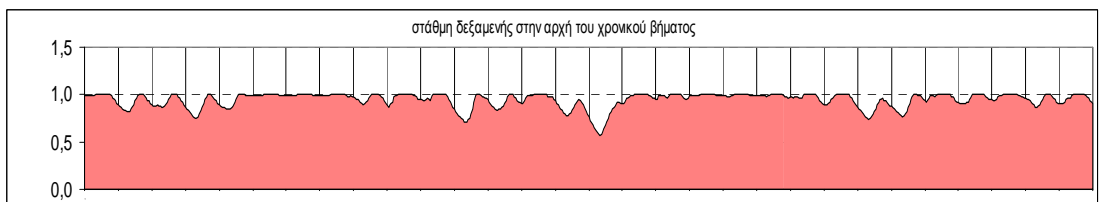
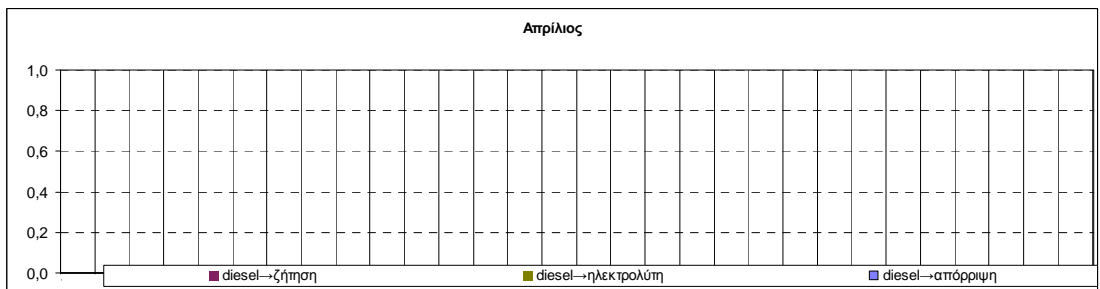
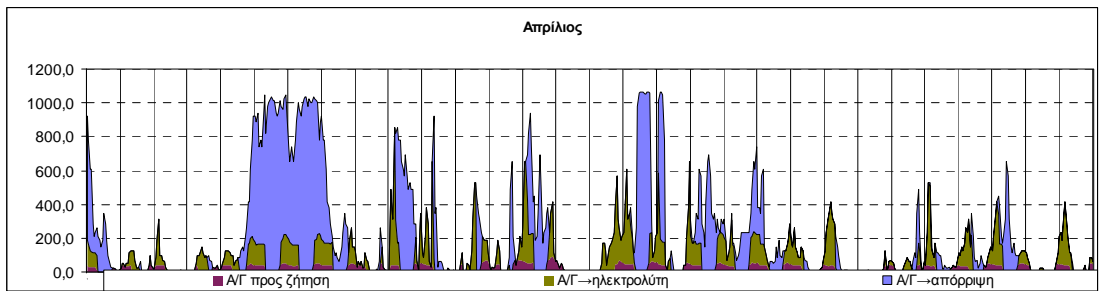
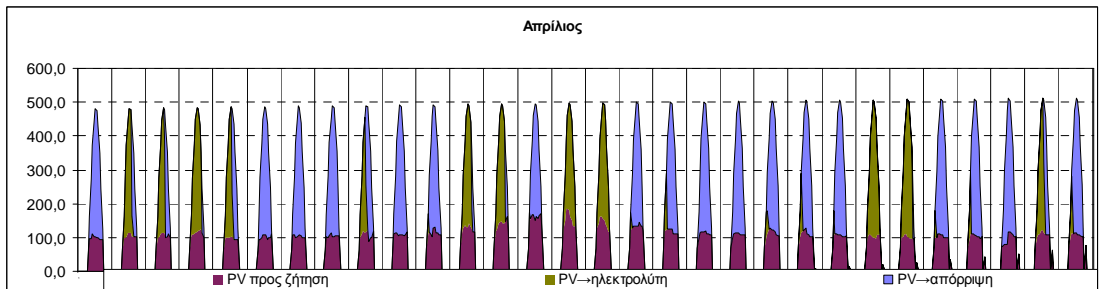
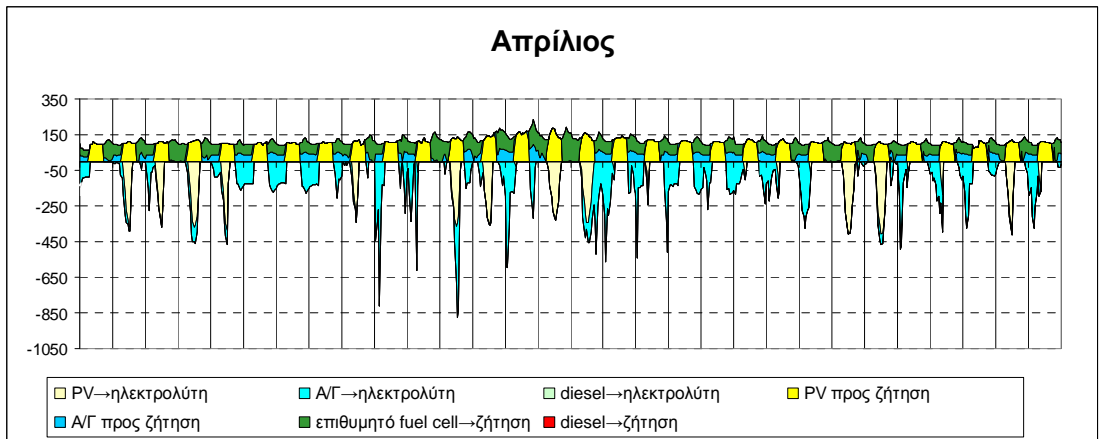


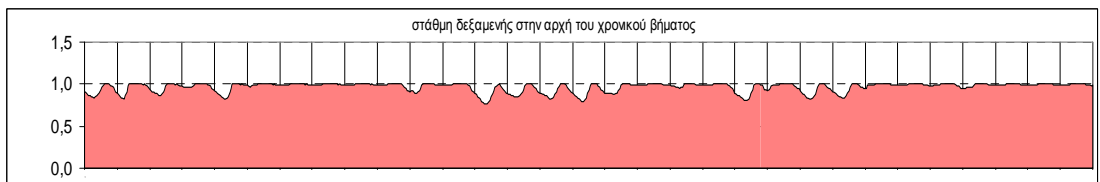
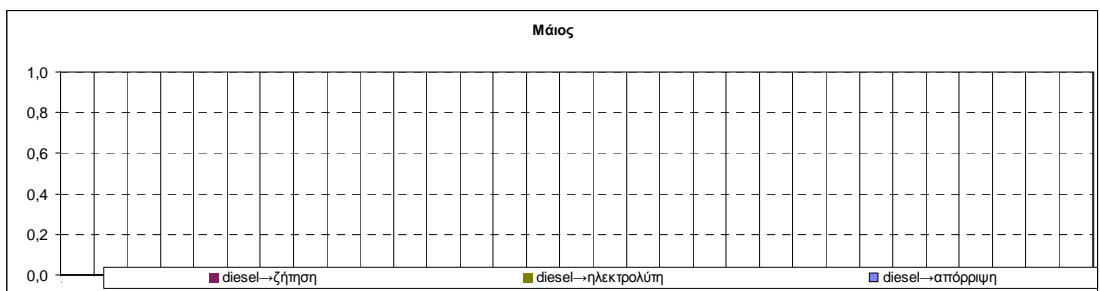
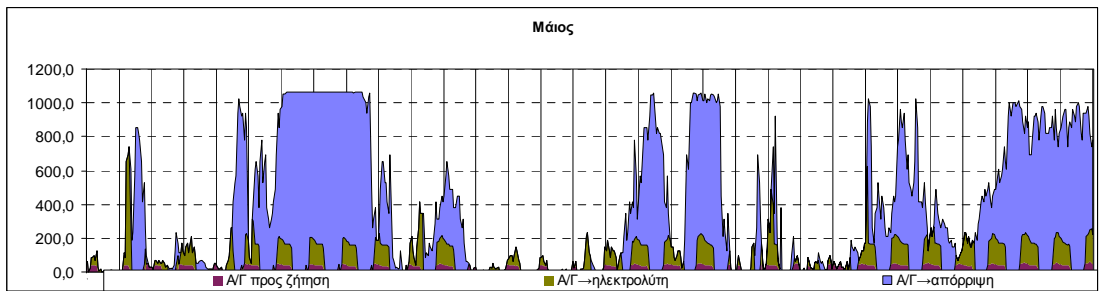
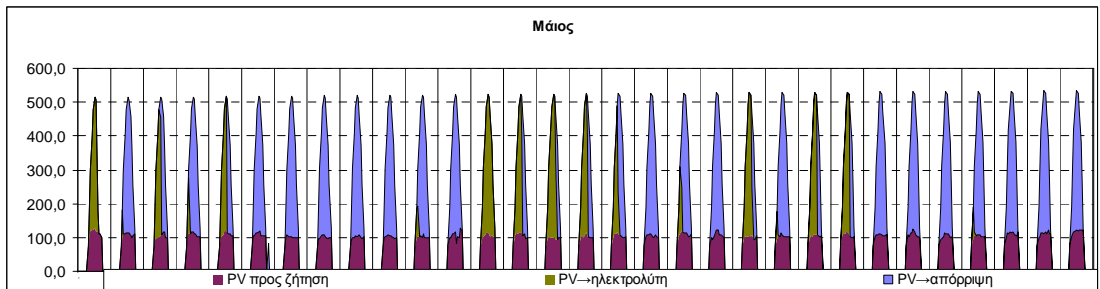
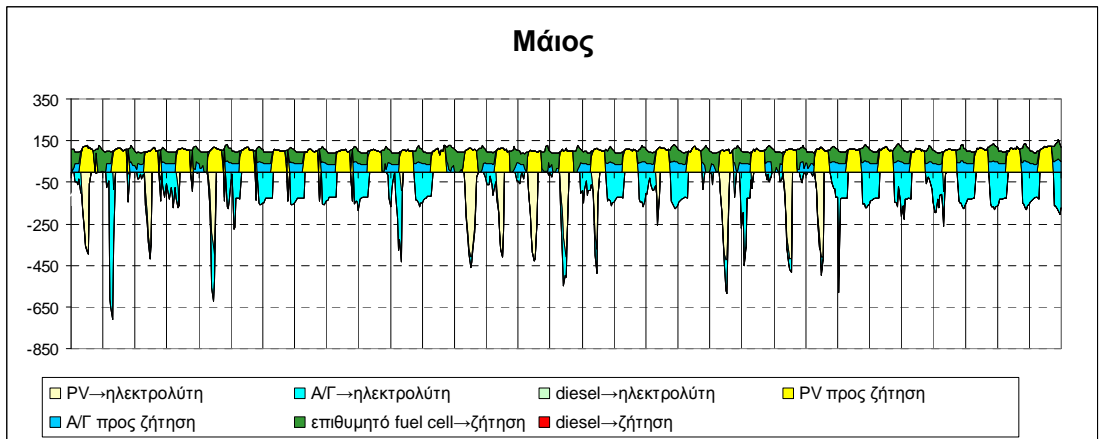
στάθμη δεξαμενής στην αρχή του χρονικού βήματος

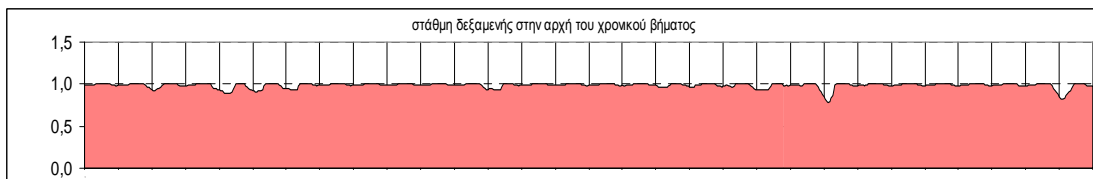
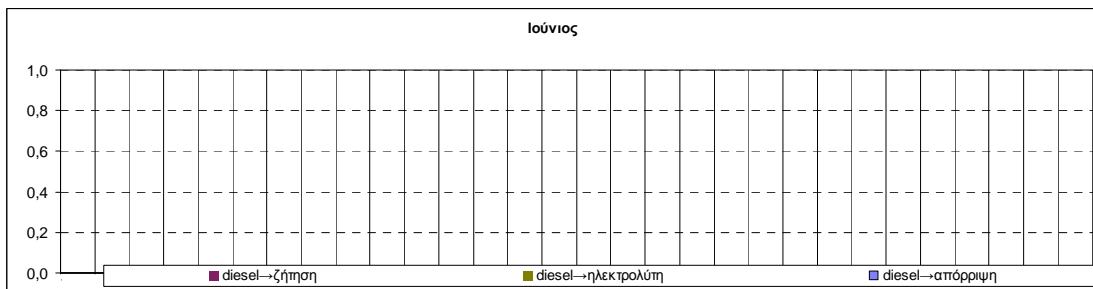
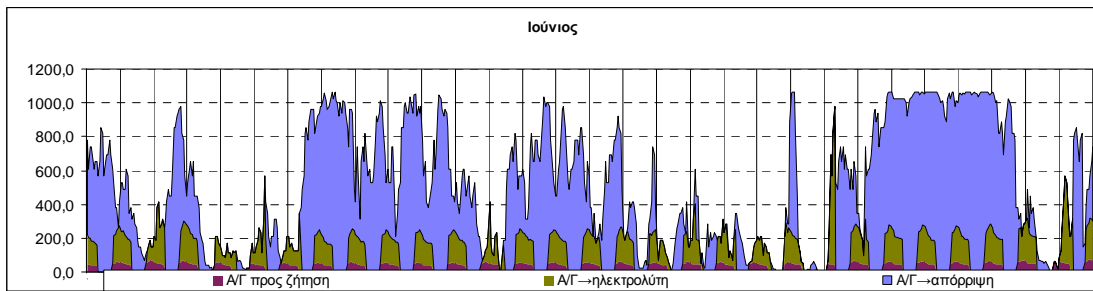
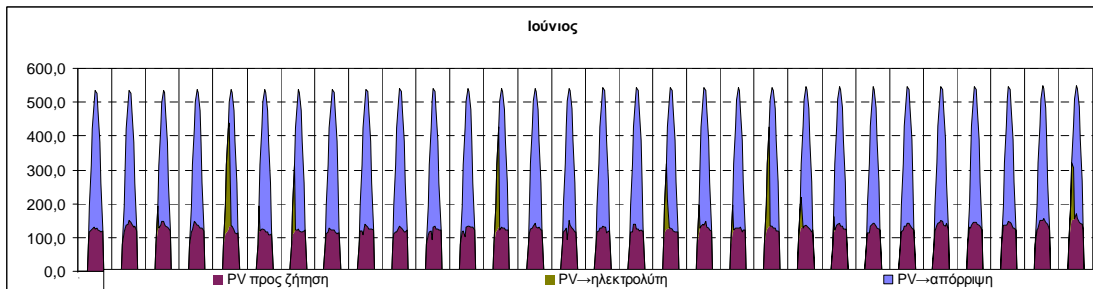
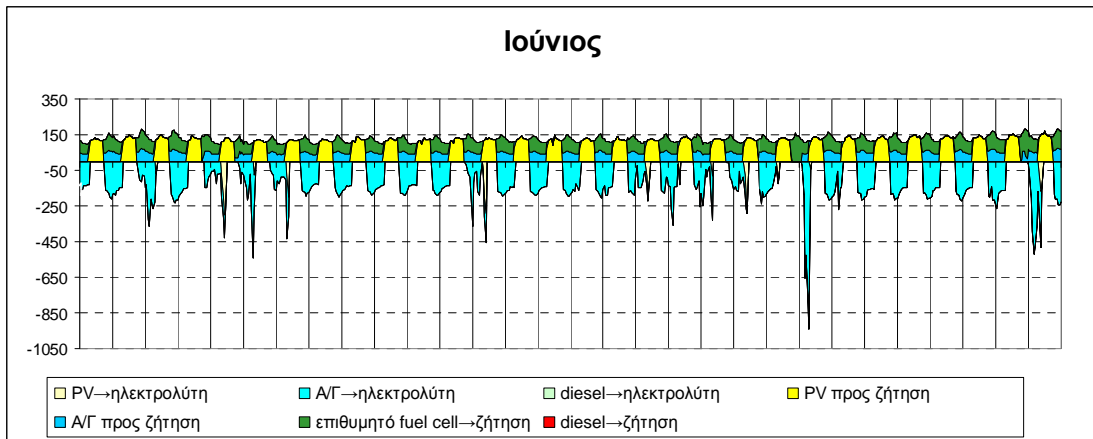


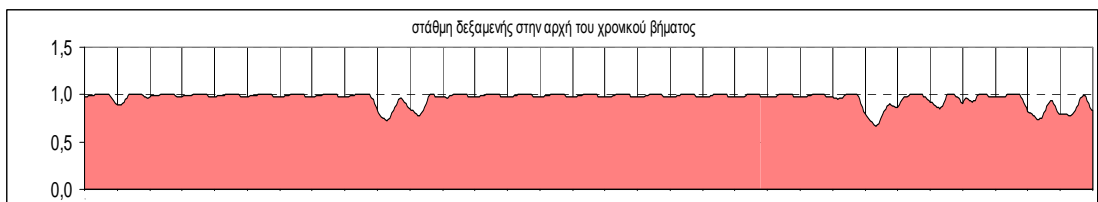
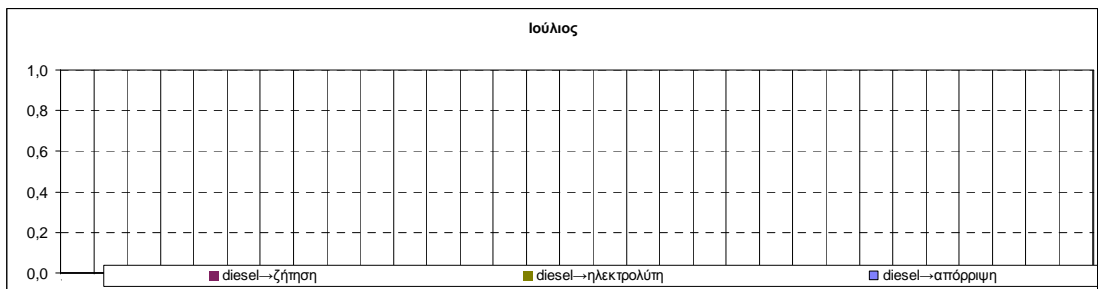
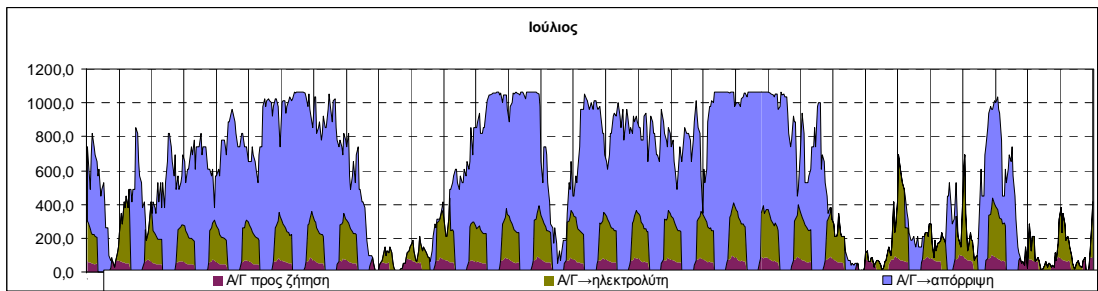
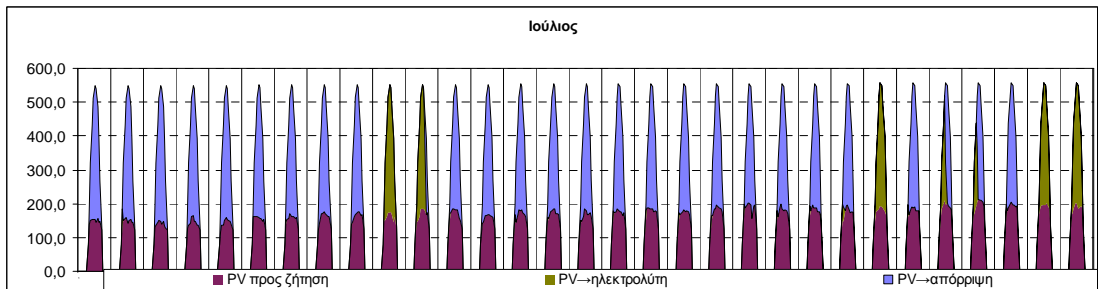
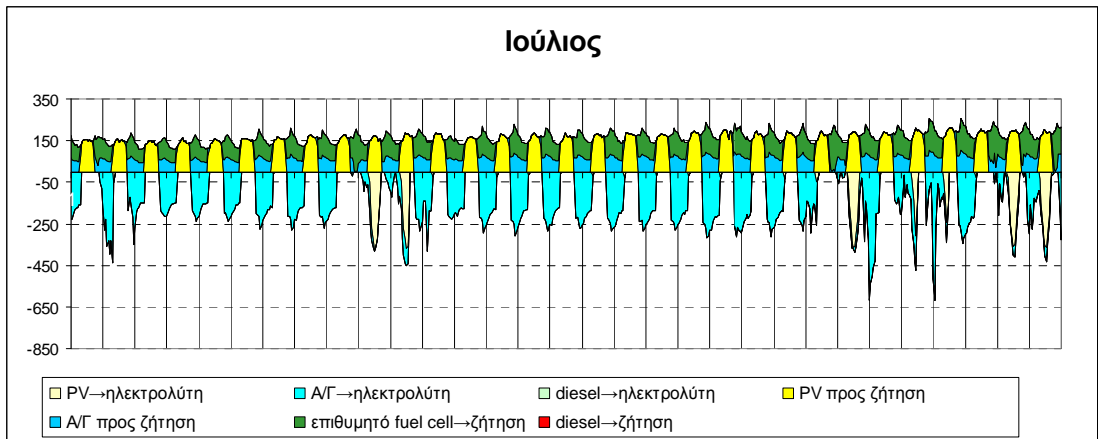


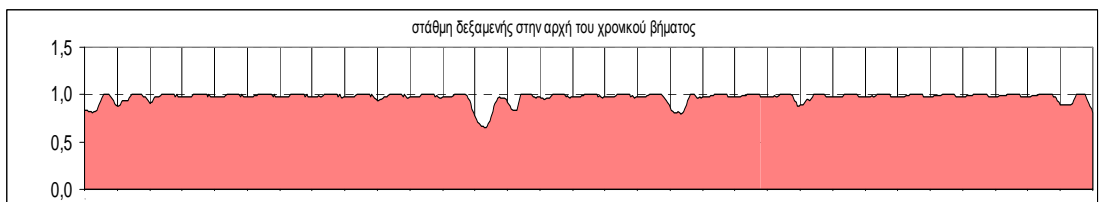
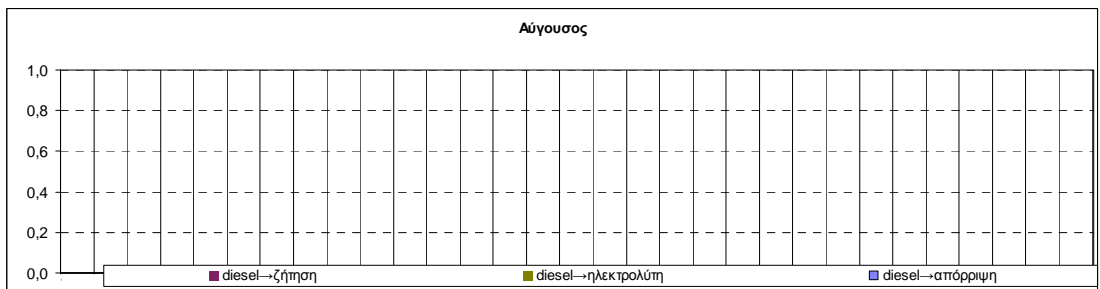
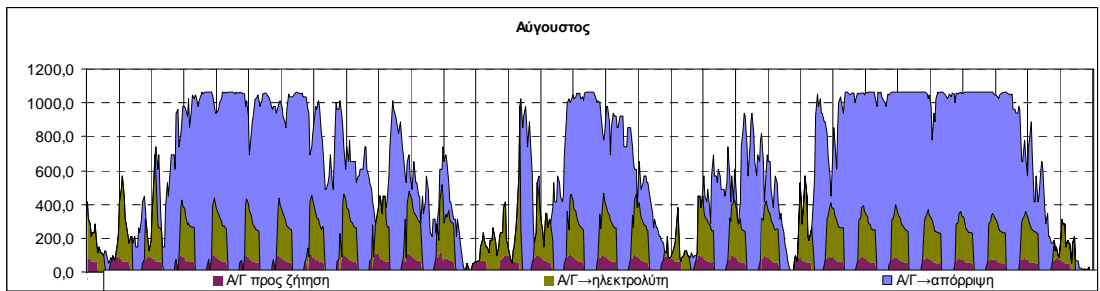
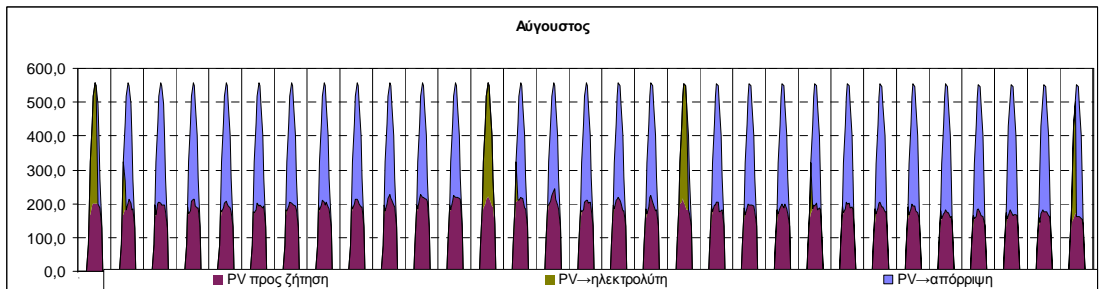
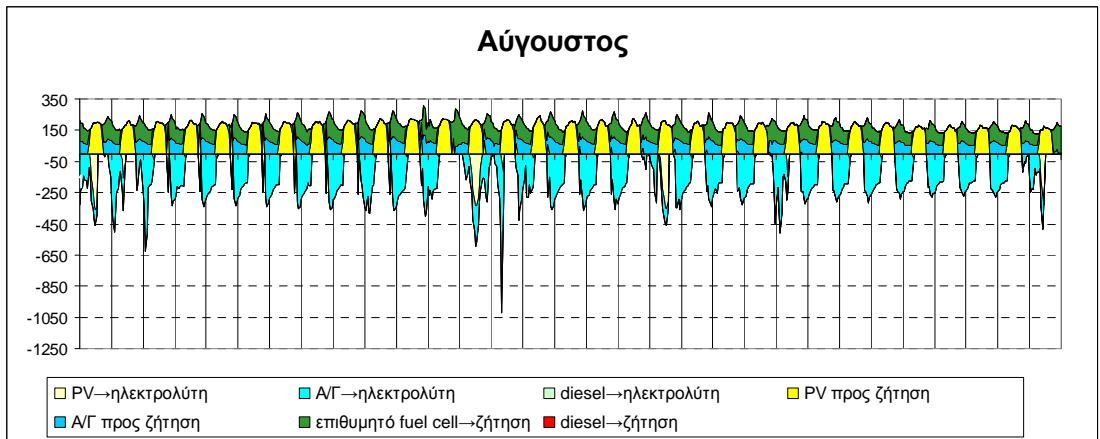




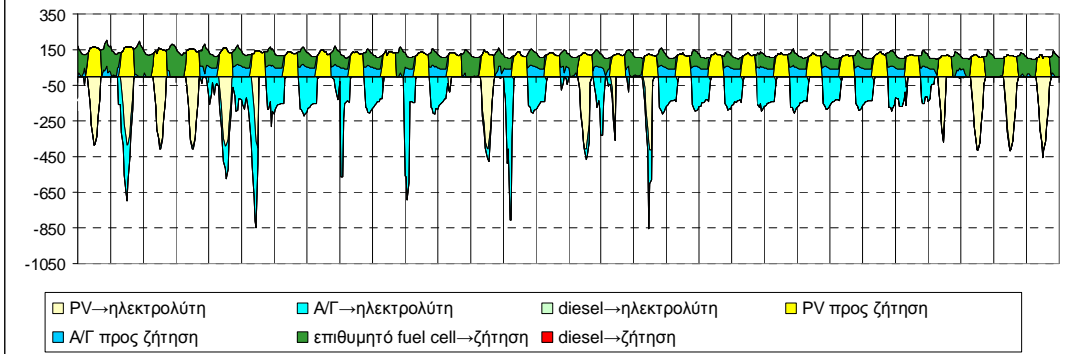




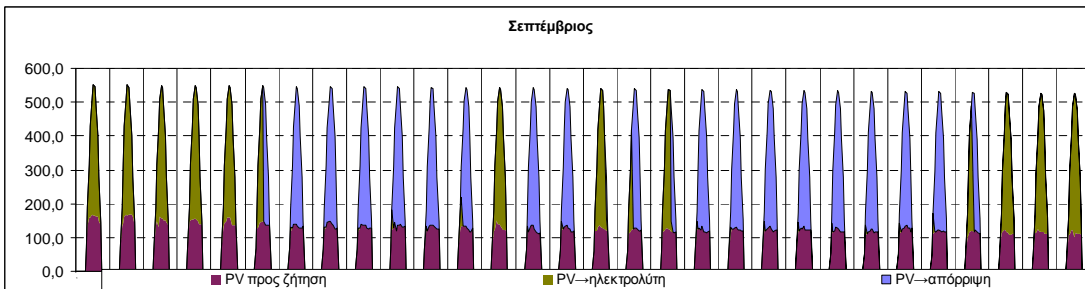




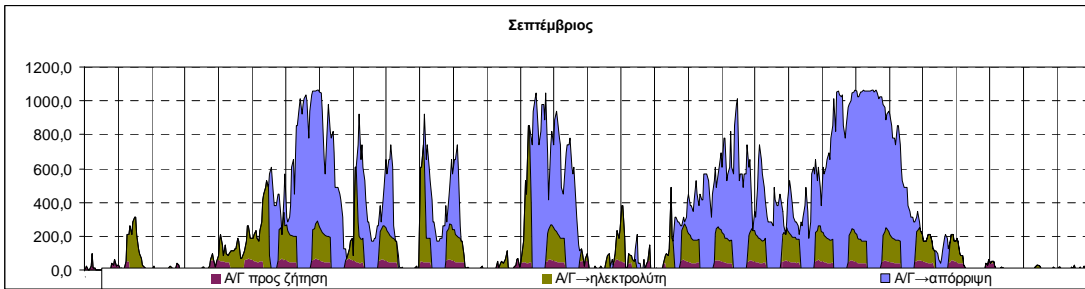
Σεπτέμβριος



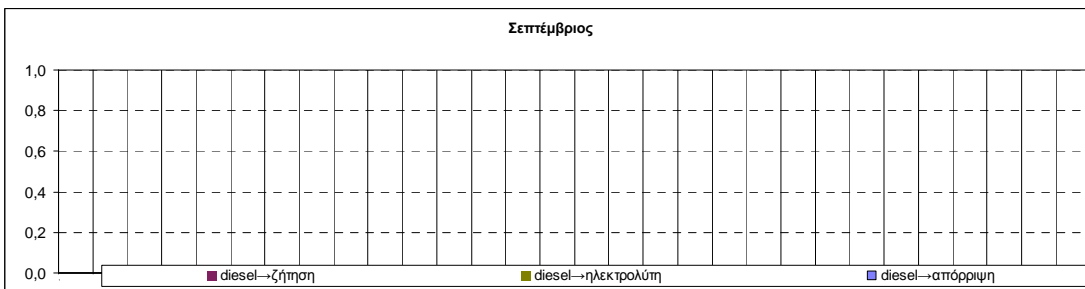
Σεπτέμβριος



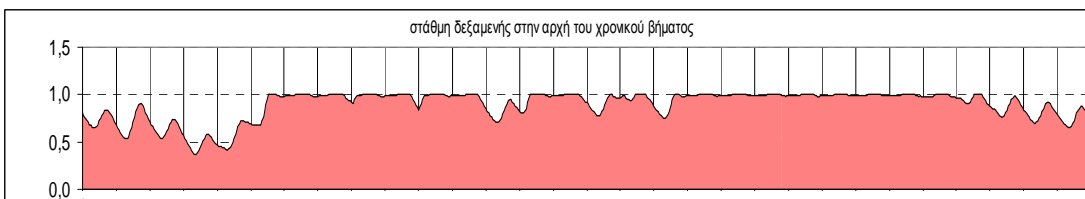
Σεπτέμβριος

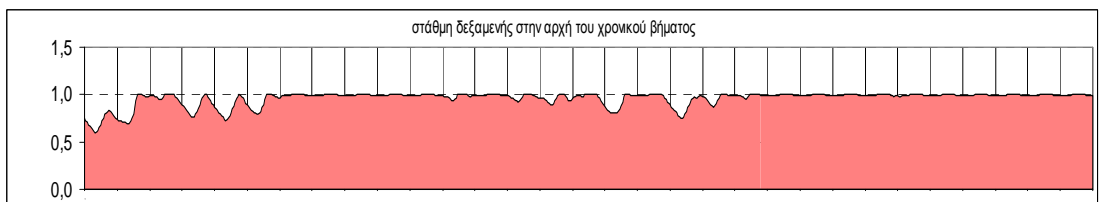
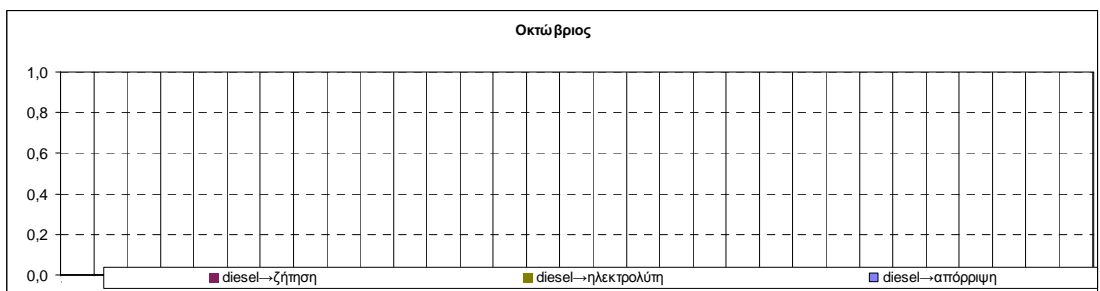
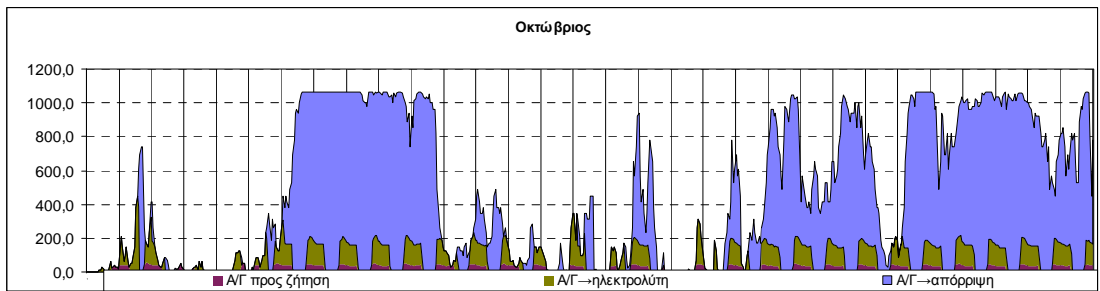
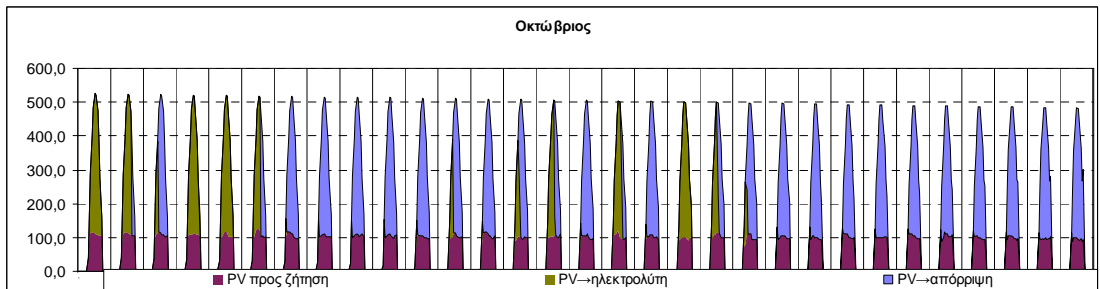
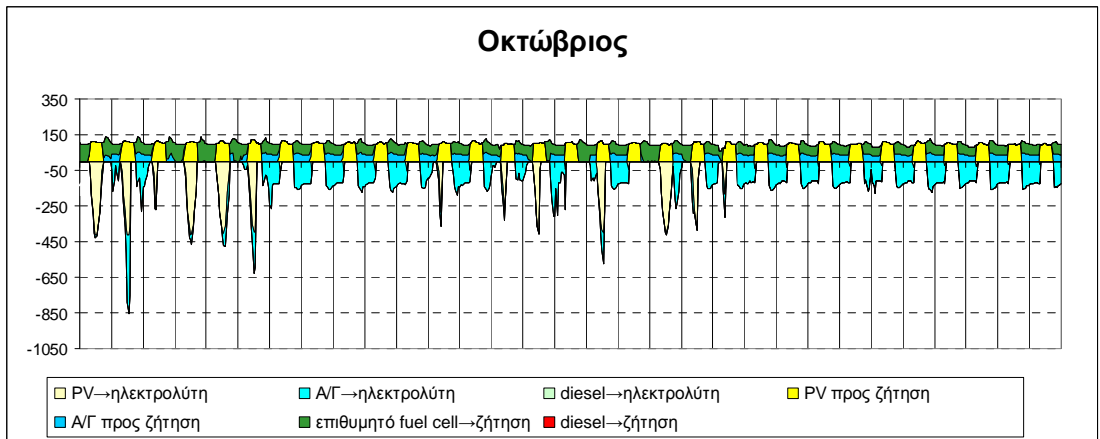


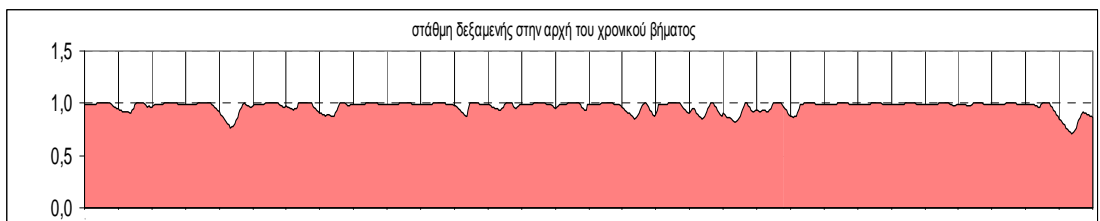
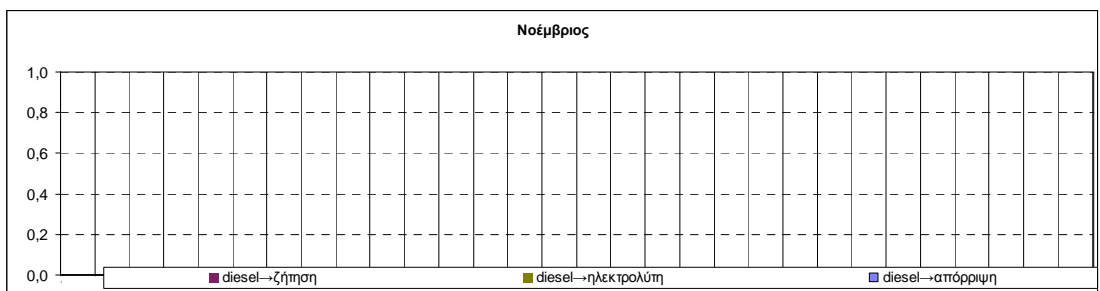
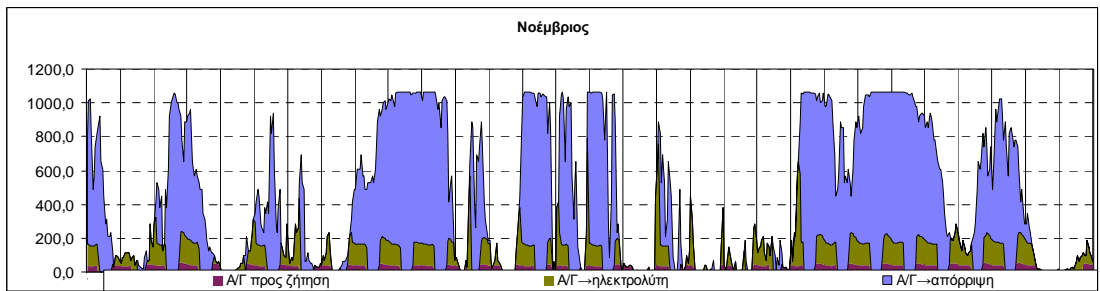
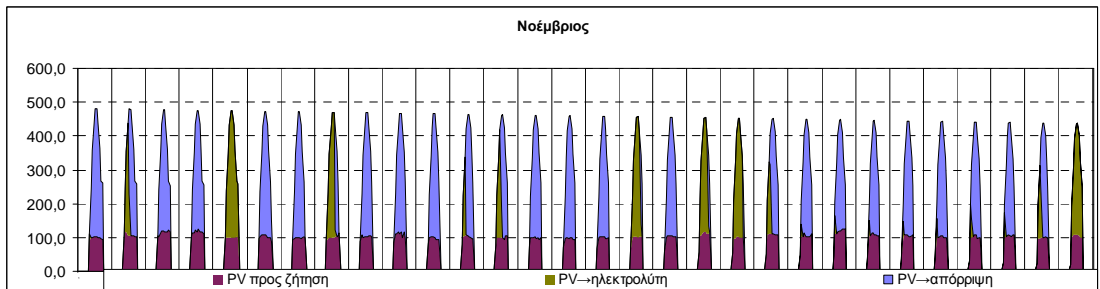
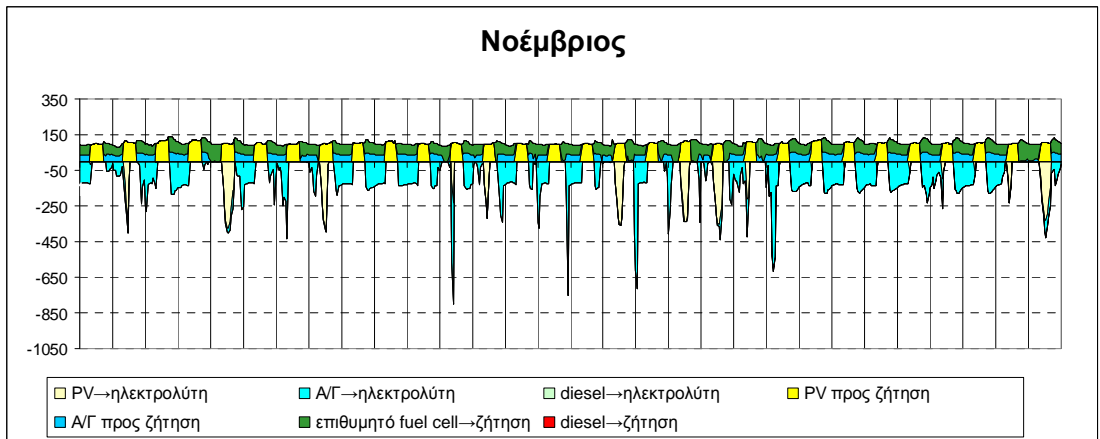
Σεπτέμβριος



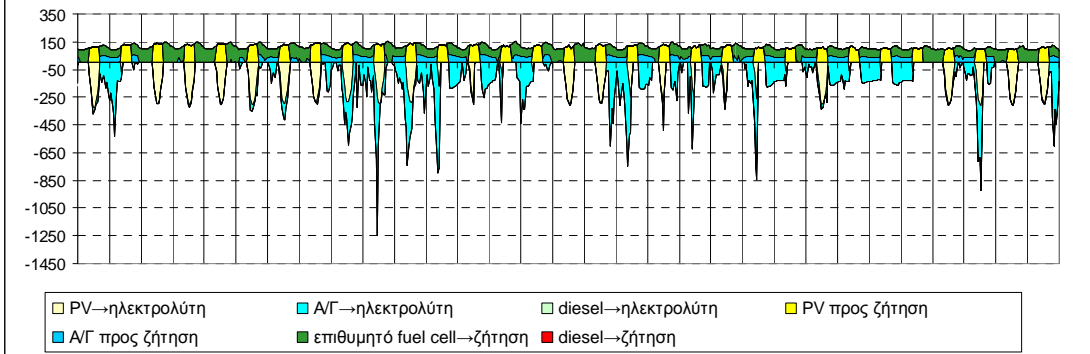
στάθμη δεξαμενής στην αρχή του χρονικού βήματος



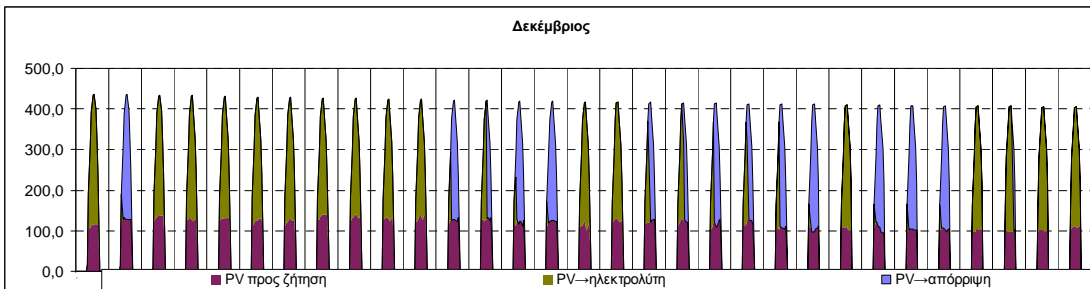




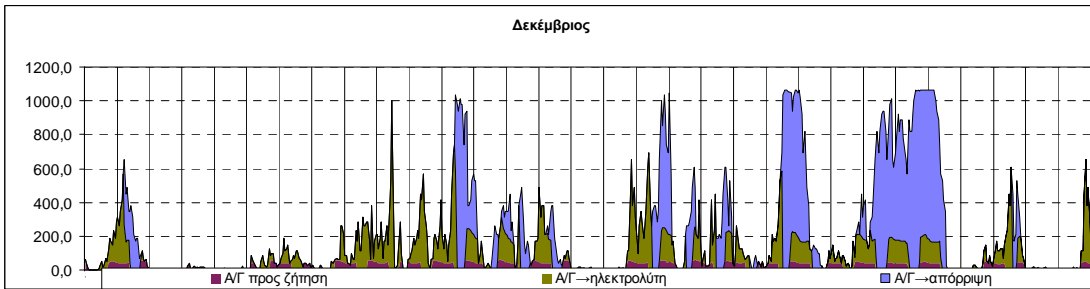
Δεκέμβριος



Δεκέμβριος



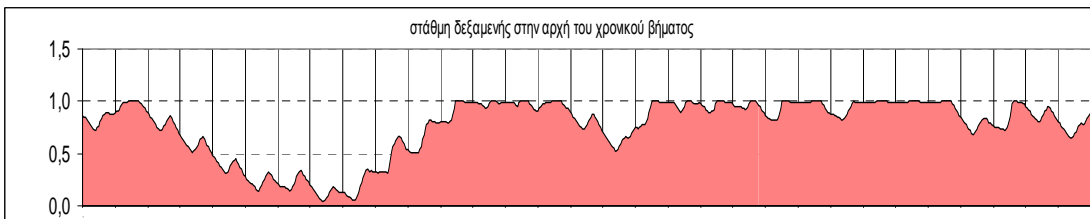
Δεκέμβριος



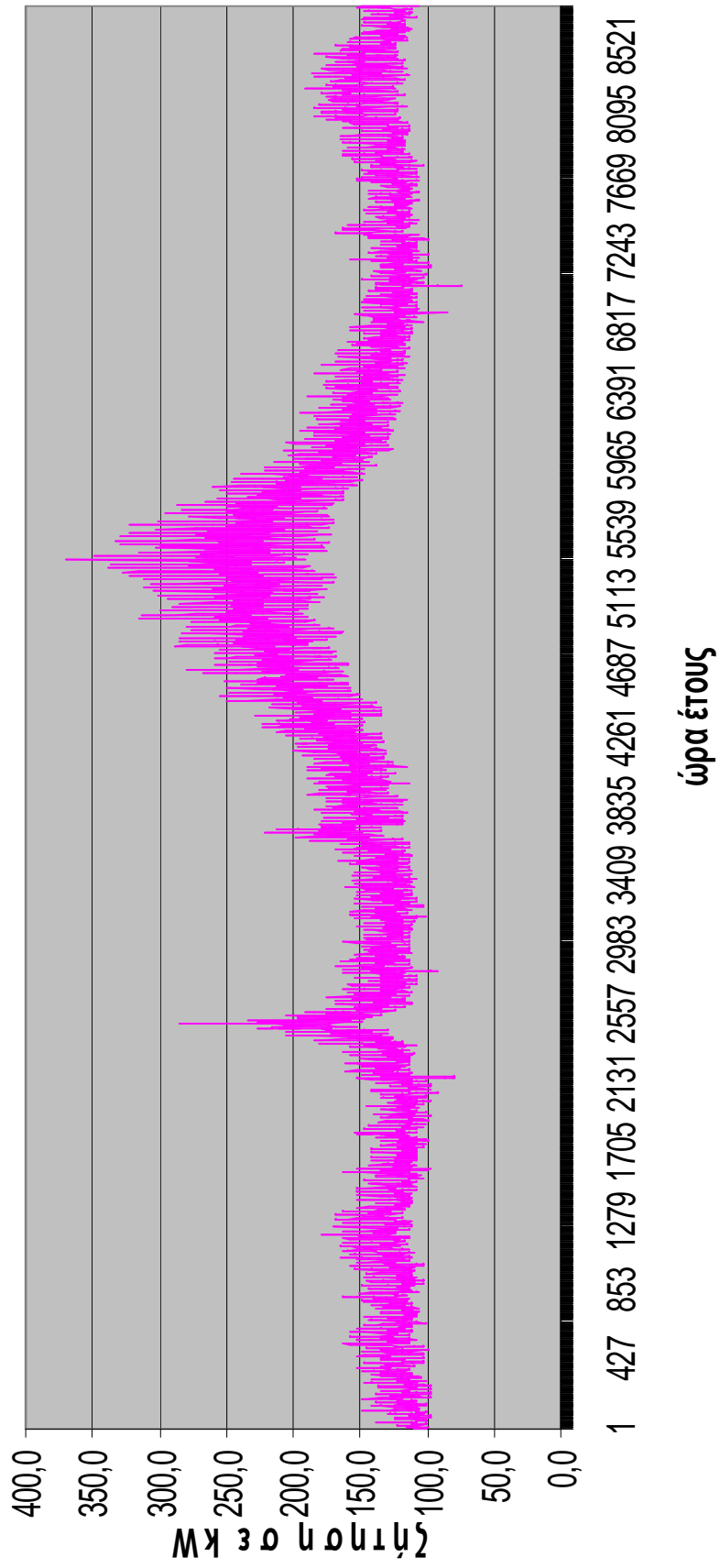
Δεκέμβριος



στάθμη δεξαμενής στην αρχή του χρονικού βήματος



Διάγραμμα Ζήτησης για τον Αϊ Στράτη



Βιβλιογραφία

1. Frano Barbir, “*PEM Fuel Cells*”, Elsevier Academic Press
2. Ryan O’Hayre, Suk-Won Cha, Whitney Colella, Fritz B. Prinz, “*Fuel Cell Fundamentals*”
3. ΚΑΠΕ, IFE, Trama Tecno Ambientale, Econect, “*Market Potential Analysis for Introduction of Hydrogen Energy Technology in Stand-Alone Power Systems*”, Altener Program
4. Ballard power systems, www.ballard.com
5. Brian Walsh, Robert Wichert, “*Fuel Cell Technology*”, www.wbdg.com
6. PAE, www.rae.gr
7. CLAIND, Hydrogen Technologies, www.claind.com
8. P.C. Ghosh, B. Emonts, H. Janssen, J. Mergel, D. Stolten, Elsevier, “*Ten years of operational experience with a hydrogen – based renewable energy supply system*”.
9. Σαλιάγκας Α., «Συνδυασμένη χρήση αιολικής ενέργειας υδρογόνου και κυψελών καυσίμου για την κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια της νήσου Σέριφος.», Διπλωματική εργασία, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, 2003.
10. Κάραλης Γ. “Ανάπτυξη και Ανάλυση Συστημάτων Ανεμοκινητήρων και Αντλιοσταμειωτήρων”, Διδακτορική διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ, 2008.

