



48



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΑ

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης
& Τεχνολογίας

Σχολή Χημικών Μηχανικών

Διπλωματική εργασία στα πλαίσια του Διατμηματικού
Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών:
«Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας και Προστασίας
Περιβάλλοντος»

**ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΟΙΚΙΑΚΗΣ
ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ
ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ**

Μπούμπουκας Αλέξιος
Γεωλόγος , Καποδιστριακού Παν/μίου Αθηνών

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια :
Φούντη Μαρία
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ	
ΑΡ. ΕΙΣ.	55603 + 4D
COMP.	37352
ΤΑΞΗ	333.793 Μπo
ΒΙΒΛΙΟΘΗΚΗ	

ΑΘΗΝΑ 2008



00155603

*ΣΥΓΚΡΙΤΙΚΗ ΜΕΛΕΤΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ ΗΛΕΚΤΡΙΣΜΟΥ*

*Μπούμπουκας Αλέξιος
Γεωλόγος, Καποδιστριακού Παν/μίου Αθηνών*

*Επιβλέπουσα Καθηγήτρια : Φούντη Μαρία, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο*

Απρίλιος 2008

Πρόλογος

Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας του ΔΠΜΣ στην «Οργάνωση και Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων» με εξειδίκευση στα «Συστήματα Διαχείρισης της Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος» μου ανατέθηκε από την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Κα Φούντη Μαρία η παρούσα εργασία με τίτλο : «Συγκριτική Μελέτη Περιβαλλοντικών Επιπτώσεων Λειτουργίας Συστημάτων Οικιακής Συμπαραγωγής Θερμότητας και Ηλεκτρισμού».

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Τμήματος Μηχανολόγων Μηχανικών του Μετσόβιου Πολυτεχνείου με συνεπίβλεψη του Υποψήφιου Διδάκτορα Κου Γιαννόπουλου Δημήτρη.

Η διπλωματική εργασία είχε ως αντικείμενο την ανάλυση δύο διαφορετικών τεχνολογιών οικιακής συμπαραγωγής με βάση την ενεργειακή τους συμπεριφορά και τα περιβαλλοντικά οφέλη που μπορούν να προκύψουν από την εγκατάσταση και εφαρμογή τους σε μια κοινή κατοικία. Περιγράφοντας τη δομή της εργασίας τα κεφάλαια 1 και 2 αποτελούν το θεωρητικό υπόβαθρο της μελέτης. Με βάση τις πηγές της σύγχρονης βιβλιογραφίας δίνεται μια εισαγωγή στην οικιακή συμπαραγωγή και στις διαθέσιμες ή υπανάπτυξη τεχνολογίες. Στο 3^ο κεφάλαιο αποτυπώνονται δύο κατάλληλα επιλεγμένα συστήματα συμπαραγωγής τα οποία στα επόμενα κεφάλαια ελέγχονται ως προς την ενεργειακή τους συμπεριφορά και τις περιβαλλοντικές τους επιδόσεις. Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία με τα αποτελέσματα της μελέτης και γίνεται συζήτηση επί των αποτελεσμάτων αυτών. Τα συμπεράσματα που προκύπτουν παρουσιάζονται στο 5^ο κεφάλαιο ενώ στο τέλος παρατίθενται τα δύο παραρτήματα της εργασίας.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Αναπληρώτρια Καθηγήτρια Κα Φούντη Μαρία για την αποδοχή της στην επίβλεψη της εργασίας που επικεντρώθηκα τους τελευταίους μήνες και την προθυμία της να εργαστώ στο χώρο του εργαστηρίου στο οποίο θα ενθυμούμαι το άριστο κλίμα και τη συνεργασία που συνάντησα. Επίσης, θα ήθελα να τονίσω ότι για την άριστη συνεργασία που βρήκα στο εργαστήριο υπεύθυνος ήταν ο Υποψήφιος Διδάκτορας Κος Δημήτρης Γιαννόπουλος τον οποίο και ευχαριστώ από βάθους καρδιάς για τη βοήθεια και τις συμβουλές που μου προσέφερε προκειμένου να ολοκληρωθεί η παρούσα εργασία.

Τέλος, ευχαριστώ ακόμη τους καθηγητές της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής Φούντη Μ., Ασημακόπουλο Δ. και Διακουλάκη Δ., για την τιμή και τη χαρά που μου έκαναν να συμμετέχουν στη εξεταστική επιτροπή της διπλωματικής μου εργασίας, καθώς και για τις καίριες παρατηρήσεις τους κατά τη διάρκεια της παρουσίας.

Αφιερωμένο, στους γονείς μου και στο αγαπητό μου Μαράκι,

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. Εισαγωγή

1.1. Γενικά στοιχεία οικιακών συστημάτων ΣΗΘ.....	1
---	---

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. Διαθέσιμες Τεχνολογίες Οικιακής ΣΗΘ

2.1. Παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) βασιζόμενες σε συστήματα συμπαραγωγής.....	7
2.1.1. Αρχή λειτουργίας.....	7
2.1.1.1. Θερμοδυναμικές αρχές (κύκλος Otto).....	10
2.1.2. Λειτουργικά χαρακτηριστικά.....	12
2.1.2.1. Βαθμός απόδοσης.....	12
2.1.2.2. Λειτουργία σε μερικό φορτίο.....	13
2.1.2.3. Ανάκτηση θερμότητας.....	14
2.1.2.4. Συντήρηση.....	15
2.1.3. Εκπομπές.....	16
2.1.4. Εμπορικές εφαρμογές ΣΗΘ από ΜΕΚ και αντίστοιχα κόστη.....	18
2.2. Μικρό-τουρμπίνες.....	19
2.2.1. Αρχή λειτουργίας.....	20
2.2.2. Λειτουργικά χαρακτηριστικά.....	21
2.2.2.1. Βαθμός απόδοσης.....	21
2.2.2.2. Λειτουργία σε μερικό φορτίο.....	23
2.2.2.3. Ανάκτηση θερμότητας.....	24
2.2.2.4. Συντήρηση.....	25
2.2.3. Εκπομπές.....	25
2.2.4. Εμπορικές εφαρμογές ΣΗΘ από μικρο-τουρμπίνες και αντίστοιχα κόστη.....	27
2.3. Μηχανές Stirling.....	27
2.3.1. Αρχή λειτουργίας.....	28
2.3.2. Διαμορφώσεις.....	30
2.3.3. Λειτουργικά χαρακτηριστικά.....	31
2.3.3.1. Απόδοση και λειτουργία σε μερικό φορτίο.....	32
2.3.3.2. Ανάκτηση θερμότητας.....	32
2.3.3.3. Συντήρηση.....	32
2.3.4. Εκπομπές.....	33
2.3.5. Εμπορικές εφαρμογές ΣΗΘ από μηχανές Stirling και αντίστοιχα κόστη.....	33
2.4. Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cells) σε οικιακά συστήματα ΣΗΘ.....	35
2.4.1. Αρχή λειτουργίας.....	35
2.4.1.1. Θερμοδυναμική θεώρηση.....	37
2.4.2. Συστατικά στοιχεία κυψέλης.....	40
2.4.2.1. Ηλεκτρολύτης.....	40
2.4.2.2. Ηλεκτρόδια.....	41
2.4.2.3. Άνοδος.....	42
2.4.2.4. Κάθοδος.....	43
2.4.3. Λειτουργικά χαρακτηριστικά.....	44
2.4.3.1. Απόδοση συστήματος.....	45
2.4.3.2. Λειτουργία σε μερικό φορτίο.....	45
2.4.3.3. Διαχείριση θερμότητας.....	47
2.4.3.4. Συντήρηση.....	49
2.4.4. Εκπομπές.....	50

2.3.5. Διαθέσιμα συστήματα συμπαραγωγής από SOFCs και αντίστοιχα κόστη.....	50
--	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. Περιγραφή Υπάρχουσας & Προτεινόμενης Εγκατάστασης

3.1. Περιγραφή υπο μελέτης εγκατάστασης.....	52
3.2. Περιγραφή προτεινόμενης εναλλακτικής εγκατάστασης	54
3.2.1. Α' εναλλακτική εγκατάσταση.....	54
3.2.1.1. Επιλογή κατάλληλα διαστασιολογημένης Μ.Ε.Κ.....	54
3.2.1.2. Αποτύπωση συστήματος Μ.Ε.Κ. για οικιακή συμπαραγωγή	56
3.2.2. Β' εναλλακτική εγκατάσταση.....	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. Μεθοδολογία - Αποτελέσματα - Αξιολόγηση

4.1. Μεθοδολογία	62
4.1.1. Καταγραφή ημερήσιων ενεργειακών προφίλ.....	64
4.1.2. Ανάλυση σεναρίων ημερήσιας λειτουργίας.....	66
4.1.3. Βαθμοί απόδοσης σε μερικό ηλεκτρικό φορτίο	68
4.1.3.1. Βαθμοί απόδοσης της μηχανής εσωτερικής καύσης σε μερικό ηλεκτρικό φορτίο	68
4.1.3.2. Βαθμοί απόδοσης της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου σε μερικό ηλεκτρικό φορτίο.....	70
4.1.4. Βαθμοί απόδοσης σε μερικό θερμικό φορτίο	72
4.1.4.1. Βαθμοί απόδοσης της μηχανής εσωτερικής καύσης σε μερικό θερμικό φορτίο	72
4.1.4.2. Βαθμοί απόδοσης της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου σε μερικό θερμικό φορτίο.....	73
4.1.4.3. Βαθμός απόδοσης λέβητα Φ.Α. συμβατικού συστήματος.....	74
4.1.5. Υπολογισμός ημερήσιας απόδοσης ισχύος.....	75
4.1.5.1. Υπολογισμός ημερήσιας απόδοσης ισχύος ΜΕΚ	75
4.1.5.2. Υπολογισμός ημερήσιας απόδοσης ισχύος SOFC.....	77
4.1.6. Υπολογισμός ετήσια παραγόμενης ενέργειας.....	80
4.1.7. Υπολογισμός ετήσια καταναλισκόμενη ενέργειας και παροχής φυσικού αερίου	81
4.1.8. Υπολογισμός ετήσιων εκπομπών CO ₂ και CH ₄	83
4.2. Αποτελέσματα - Αξιολόγηση	85
4.2.1 Κατανομή κάλυψης ετήσιων ενεργειακών αναγκών	85
4.2.2 Κατανομή ετήσιων ενεργειακών καταναλώσεων	89
4.2.3 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων	92

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. Συμπεράσματα

Παράρτηματα

Κεφάλαιο 1^ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Από τις αρχές του 21ου αιώνα παρατηρείται μια διαρκώς αυξανόμενη δυναμική αναφορικά με την εκμετάλλευση συστημάτων μικρο-συμπαγωγής (micro-CHP) στον οικιακό τομέα λόγω της ικανότητάς τους να παράγουν ταυτόχρονα ωφέλιμη θερμική ενέργεια και ηλεκτρισμό από πετρέλαιο ή φυσικό αέριο. Στα συστήματα συμπαγωγής, ο συνδυαστικός βαθμός απόδοσης της ενεργειακής μετατροπής ανέρχεται πάνω από 80%, όταν ένα συμβατικό σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας εμφανίζει μια μέση απόδοση της τάξεως του 30-35%. Αυτή η αύξηση στην ενεργειακή αποδοτικότητα μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλότερα κόστη καθώς και στη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου όταν αντισταθμάσσεται με συμβατικές μεθόδους χωριστής παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού.

Συστήματα συμπαγωγής κατάλληλα για οικιακές και μικρής κλίμακας εμπορικές εφαρμογές είτε διατίθενται ήδη είτε βρίσκονται στο στάδιο της ανάπτυξης. Τα συστήματα αυτά καλούνται να καλύψουν τις ηλεκτρικές και θερμικές απαιτήσεις ενός κτηρίου για θέρμανση των εσωτερικών χώρων, για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και δυνητικά για κλιματισμό.

1.1 ΓΕΝΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΟΙΚΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΣΗΘ

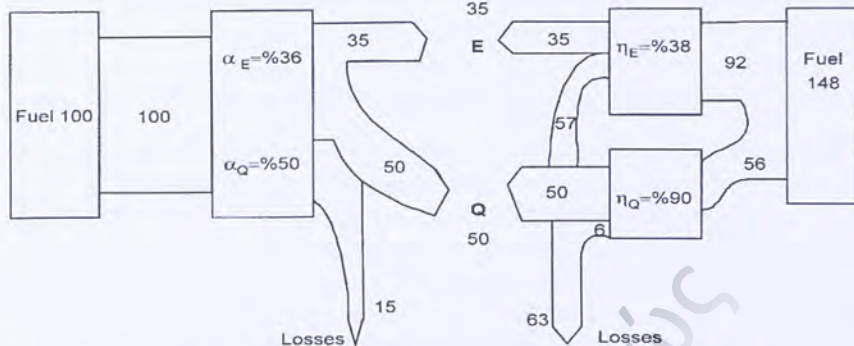
Με τον όρο συμπαγωγή ορίζεται η λειτουργία μιας θερμικής μηχανής ή ενός ηλεκτροπαραγωγικού σταθμού κατά την οποία παράγεται ταυτόχρονα ηλεκτρισμός ή μηχανική ενέργεια (ισχύς) και ωφέλιμη θερμική ενέργεια από ένα και μοναδικό ενεργειακό ρεύμα (καύσιμο) όπως είναι το πετρέλαιο, ο ορυκτός άνθρακας, το φυσικό ή υγροποιημένο αέριο, η βιομάζα ή η ηλιακή ενέργεια ⁽¹⁾.

Ο όρος συμπαγωγή δεν αποτελεί μια καινούργια έννοια. Βιομηχανικές εγκαταστάσεις εφάρμοσαν την ιδέα της συμπαγωγής από το 1880 όταν ο ατμός ήταν η κύρια πηγή ενέργειας στη βιομηχανία και ο ηλεκτρισμός εμφανιζόταν ως μορφή ενέργειας κατάλληλη για την κάλυψη διάφορων ενεργειακών αναγκών (π.χ. παροχή μηχανικής ισχύος και ανάγκες φωτισμού) ⁽²⁾. Η χρήση της συμπαγωγής αποτέλεσε κοινή πρακτική καθώς οι μηχανικοί αντικατέστησαν τους ατμοκίνητους μηχανισμούς ιμάντα και τροχαλίας με ηλεκτρικούς κινητήρες, προσανατολισμένοι πλέον σε συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Στη διάρκεια των πρώτων δεκαετιών του 20^{ου} αιώνα, το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής ηλεκτρισμού προερχόταν από λέβητες καύσης ορυκτού άνθρακα και γεννήτριες ατμοστρόβιλων των οποίων τα καυσαέρια χρησιμοποιούνταν σε εφαρμογές βιομηχανικής

θέρμανσης. Το 58% της συνολικής ισχύος που παρήγαγαν εγχώριες βιομηχανικές εγκαταστάσεις στις ΗΠΑ προερχόταν από συμπαραγωγή ⁽²⁾.

Η κατασκευή και λειτουργία κεντρικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και αξιόπιστων δικτύων ευρείας χρήσεως προκάλεσε μείωση στα κόστη του ηλεκτρισμού και πολλές βιομηχανικές εγκαταστάσεις ξεκίνησαν να αγοράζουν ηλεκτρισμό από εταιρίες κοινής ωφέλειας σταματώντας την εγγενή παραγωγή. Έτσι, η εγχώρια βιομηχανική συμπαραγωγή παρουσίασε πτωτική τάση αποδίδοντας μόνο ένα 15% της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος στα μέσα του προηγούμενου αιώνα και περίπου 5% το 1974 ⁽²⁾. Επιπρόσθετα, άλλοι παράγοντες που οδήγησαν σε αυτή τη βαθμιαία παρακμή της συμπαραγωγής ήταν οι διαρκώς αυξανόμενες ρυθμιστικές διατάξεις αναφορικά με την παραγωγή ηλεκτρισμού, η πτώση του κόστους των καυσίμων και η πρόοδος της τεχνολογίας που οδήγησε σε μαζική παραγωγή ολοκληρωμένων συστημάτων λεβήτων με συγκεκριμένη διαστασιολόγηση και αυστηρότερους περιβαλλοντικούς ελέγχους. Ωστόσο, αυτή η καθοδική πορεία άρχισε να αντιστρέφεται μετά την πρώτη πετρελαϊκή κρίση του 1973. Λόγω της αύξησης της τιμής της κιλοβατώρας (kWh) καθώς και της αβεβαιότητας που ενείχε η προμήθεια καυσίμων, αποδοτικά συστήματα που μπορούσαν να αξιοποιήσουν εναλλακτικά καύσιμα άρχισαν να προσελκύουν την προσοχή των ενδιαφερομένων. Επιπλέον, η συμπαραγωγή επανήλθε στο προσκήνιο εξαιτίας της χαμηλότερης κατανάλωσης καυσίμου και της συνεπαγόμενης μείωσης των ρύπων. Σήμερα, πολλές κυβερνήσεις, κυρίως στην Ευρώπη, τις ΗΠΑ, τον Καναδά και την Ιαπωνία, προωθούν εφαρμογές συμπαραγωγής όχι μόνο στο βιομηχανικό τομέα αλλά επίσης και σε άλλους τομείς ένας από τους οποίους είναι και ο οικιακός ⁽³⁾.

Μια συνεχώς αυξανόμενη δυναμική στην χρησιμοποίηση συστημάτων συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας στον οικιακό τομέα γίνεται αντιληπτή καθώς τα συστήματα αυτά έχουν το πλεονέκτημα της ταυτόχρονης παραγωγής ωφέλιμης θερμικής ενέργειας και ηλεκτρισμού από μια μοναδική πηγή καυσίμου όπως είναι το φυσικό αέριο σε πολύ υψηλές αποδόσεις. Στο διάγραμμα ροής της εικόνας 1 φαίνεται πώς η χημική ενέργεια ενός καυσίμου μετατρέπεται σε ωφέλιμη θερμική και ηλεκτρική για καθένα από τα δύο προαναφερθέντα συστήματα ⁽¹⁾.



Εικόνα 1. Διάγραμμα ροής ενέργειας που παριστάνει την ενεργειακή αξιοποίηση δύο συστημάτων (συμπαραγωγή - συμβατικό σύστημα ξεχωριστής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας) από την ίδια καυσίμη πρώτη ύλη. Οι αποδόσεις α_E και α_Q παριστάνουν τα ποσοστά της ενέργειας που μετατρέπονται σε ηλεκτρισμό και ωφέλιμη θερμική ενέργεια στη συμπαραγωγική μονάδα, ενώ η_E είναι η ηλεκτρική απόδοση μια μονάδας παραγωγής ηλεκτρικού φορτίου και η_Q η απόδοση του εγκατεστημένου λέβητα στο συμβατικό σύστημα. Τέλος E και Q είναι η ζήτηση σε ηλεκτρική και θερμική ισχύ αντίστοιχα (Η.Ι. Οπουνιώνα et al, 2006).

Η αύξηση της ενεργειακής απόδοσης λόγω συμπαραγωγής μπορεί να προκαλέσει μείωση στα κόστη και τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου σε αντιδιαστολή με τις συμβατικές μεθόδους χωριστής παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού όπως άλλωστε φαίνεται καθαρά από την κατανάλωση καυσίμου στην εικόνα 1. Η ιδέα της συμπαραγωγής μπορεί να σχετιστεί με εγκαταστάσεις παραγωγής ισχύος ποικίλων διαστάσεων μέσα στις οποίες συμπεριλαμβάνονται και μονάδες πολύ μικρής κλίμακας για εφαρμογές σε κτήρια του οικιακού τομέα. Οι φορείς που πρόκειται να ωφεληθούν από τη συμπαραγωγή είναι αυτοί που μπορούν να χρησιμοποιήσουν τον παραγόμενο ηλεκτρισμό και τη θερμότητα του συστήματος. Κατά συνέπεια, η συμπαραγωγή είναι κατάλληλη για κτηριακές εφαρμογές εφόσον υπάρχει ζήτηση της παραγόμενης θερμικής ενέργειας. Οι κτηριακές εφαρμογές που είναι πρόσφορες για συμπαραγωγή περιλαμβάνουν νοσοκομεία, ιδρύματα, ξενοδοχεία, κτήρια γραφείων, μονοκατοικίες καθώς και μικρά διαμερίσματα.

Στην περίπτωση των ιδιόκτητων κατοικιών, ο σχεδιασμός τέτοιων συστημάτων αποτελεί μια ιδιαίτερη τεχνική πρόκληση εξαιτίας της μη απόλυτης ταύτισης των θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων, γεγονός που καθιστά αναγκαία την αποθήκευση θερμότητας και ηλεκτρισμού ή την παράλληλη σύνδεση με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Οι εφαρμογές της συμπαραγωγής σε κτήρια πρέπει να ικανοποιούν τόσο τις ηλεκτρικές όσο και τις θερμικές απαιτήσεις, ή τουλάχιστον την ζήτηση σε θερμότητα και ένα μέρος της ζήτησης σε ηλεκτρισμό. Ανάλογα με το μέγεθος των θερμικών και των ηλεκτρικών φορτίων, ανεξάρτητα με το αν αυτά συμπίπτουν ή όχι, και το λειτουργικό καθεστώς, τα συστήματα συμπαραγωγής μπορεί να χρειαστεί να λειτουργούν σε καταστάσεις μερικού φορτίου, με το πλεόνασμα της ενέργειας (θερμική ή ηλεκτρική) να πρέπει να αποθηκευθεί ή να πουληθεί και οι όποιες ανεπάρκειες ισχύος να πρέπει να αναπληρωθούν αγοράζοντας ηλεκτρισμό (ή θερμότητα) από άλλες πηγές όπως το δίκτυο ηλεκτρισμού (ή ένα λέβητα καυσίμου) ⁽¹⁾. Η περίσσεια της παραγόμενης θερμότητας μπορεί να αποθηκευτεί σε μια

συσκευή θερμικής συσσώρευσης όπως μια υδατοδεξαμενή, ενώ η περίσσεια ηλεκτρισμού μπορεί να αποθηκευτεί σε μια συσκευή ηλεκτρικής συσσώρευσης όπως είναι οι μπαταρίες και οι πυκνωτές. Επιπλέον, η οικονομική βιωσιμότητα της λειτουργίας ενός συστήματος συμπαραγωγής εξαρτάται από τη διακύμανση των τιμών του ηλεκτρισμού, με τις οικονομικά ελκυστικότερες περιόδους να τοποθετούνται σε περιόδους αύξησης των τιμών.

Οι εφαρμογές της συμπαραγωγής στον οικιακό τομέα προσφέρουν μοναδικές ευκαιρίες από την άποψη της βελτίωσης της ενεργειακής αποδοτικότητας και τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου. Τεχνολογίες όπως οι μηχανές Stirling και οι κυψέλες καυσίμου είναι πολλά υποσχόμενες για συμπαραγωγή πολύ μικρής κλίμακας σε κτήρια του οικιακού τομέα λόγω της προοπτικής τους στην επίτευξη πολύ υψηλών αποδόσεων και πολύ χαμηλού επιπέδου εκπομπών, αλλά για την ώρα, οι μηχανές εσωτερικής καύσης αποτελούν τη μοναδική διαθέσιμη τεχνολογία σε λογικές τιμές ⁽⁴⁾. Ακόμη, οι μηχανές εσωτερικής καύσης είναι ελκυστικές λόγω της ευρωστίας τους και της καθιερωμένης τεχνολογίας τους. Μια ακόμη τεχνολογία συμπαραγωγής που έχει προοπτική σε οικιακές εφαρμογές είναι τα συστήματα μικροστροβίλων. Ωστόσο, οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης εμφανίζουν υψηλότερες αποδόσεις σε κλίμακα μικρότερης ισχύος και τα κόστη κεφαλαίου (capital costs) των μικροστροβίλων είναι υψηλότερα σε σχέση με αυτά των συμπαραγωγών συστημάτων που λειτουργούν με μηχανές εσωτερικής καύσης ⁽⁴⁾.

Η απόδοση ενός συστήματος συμπαραγωγής μπορεί να υπολογιστεί ως το κλάσμα της εισαγόμενης ενέργειας μέσω του καυσίμου που μπορεί ωφέλιμα να ανακτηθεί ως θερμότητα και ισχύς ως προς τη θεωρητικά μέγιστη αποδιδόμενη ενέργεια από την ίδια ποσότητα καυσίμου. Το υπόλοιπο της ενέργειας του καυσίμου χάνεται με τη μορφή χαμηλής θερμοκρασίας θερμότητας από τα καυσαέρια, ως ακτινοβολία και μέσω συμβατικών απωλειών από τη μηχανή και την ηλεκτρογεννήτρια. Το νερό παράγεται σαν προϊόν της καύσης όταν το καύσιμο καίγεται υπό την παρουσία οξυγόνου και αυτό ατμοποιείται από την θερμότητα της αντίδρασης. Οι κατασκευαστές τέτοιων συστημάτων συμπαραγωγής συνδέουν την απόδοση με την κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου (LHV). Κατώτερη θερμογόνο δύναμη ορίζεται η ανώτερη θερμογόνο δύναμη (HHV, δηλαδή η ποσότητα της θερμότητας που απελευθερώνεται κατά την πλήρη καύση του καυσίμου θεωρώντας ότι το νερό που παράγεται κατά την καύση έχει υγροποιηθεί και έχει απελευθερώσει την λανθάνουσα θερμότητά του) μειωμένη κατά την ενέργεια που απαιτείται για την εξάτμιση του νερού που παράγεται κατά τη διάρκεια την καύσης ⁽¹⁾. Η απόδοση αυτή εκφράζεται σε αντιστοιχία προς την ηλεκτρική και τη συνολική απόδοση ως εξής:

$$\text{Elect. efficiency} = \frac{\text{electr.output (kW)}}{\text{fuel.input (kW)}}$$

$$\text{Overall efficiency} = \frac{\text{useful thermal} + \text{electrical.output (kW)}}{\text{fuel.input (kW)}}$$

Η απόδοση ενός συστήματος εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου, το μέγεθος της μηχανής και τη θερμοκρασία στην οποία μπορεί να αξιοποιηθεί η ανακτώμενη θερμότητα.

Επίσης, η απόδοση εξαρτάται από τις συνθήκες και το επίπεδο δυναμικότητας που θα λειτουργήσει η μονάδα συμπαραγωγής ⁽¹⁾.

Το επίπεδο δυναμικότητας που λειτουργούν είναι ζωτικής σημασίας για τα συστήματα συμπαραγωγής εφόσον αυτά σπανίως λειτουργούν αποδοτικά σε ποσοστό χαμηλότερο του 50% της συνολικής τους δυναμικότητας. Σε χαμηλό φορτίο, η ηλεκτρική απόδοση πέφτει σημαντικά σε σχέση με την ονομαστική, με εξαίρεση αυτή των κυψελών καυσίμου και των μηχανών Stirling που έχουν εξίσου καλές επιδόσεις και σε μερικά φορτία ⁽³⁾. Ακόμα, σε χαμηλά φορτία, ο λόγος θερμότητας/ισχύος επηρεάζεται σε μεγαλύτερο ποσοστό από την ανακτώμενη θερμική ενέργεια του νερού ψύξης. Η χαμηλή θερμότητα προκαλεί αυξομειώσεις στη διανεμημένη ισχύ, αυξάνοντας τις ώρες συντήρησης και μειώνοντας τη διάρκεια ζωής του συστήματος. Η θερμική απόδοση μεγιστοποιείται όταν τα συστήματα συμπαραγωγής ελέγχονται έτσι ώστε να ακολουθούν το θερμικό φορτίο του κτηρίου ⁽¹⁾.

Όταν σχεδιάζεται ένα σύστημα συμπαραγωγής για οικιακή εφαρμογή πρέπει να εξετασθούν προσεκτικά τα επίπεδα εκμεταλευσιμότητας του συστήματος. Για το λόγο αυτό, ένα τέτοιο σύστημα δεν πρέπει να λειτουργεί λιγότερο από 4000-4500 h/year ⁽¹⁾. Υψηλά επίπεδα αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας είναι ιδιαίτερα κρίσιμα μεταξύ προγραμματισμένων διακοπών στη λειτουργία του συστήματος που είναι απαραίτητες για τη διεξαγωγή προληπτικής συντήρησης. Μη προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας είναι ανεπιθύμητες για τους χρήστες των συστημάτων και επομένως πρέπει να γίνονται βήματα με κατεύθυνση την ελαχιστοποίηση τέτοιου είδους επιδράσεων.

Η αξιοπιστία (reliability) καθορίζεται από το σύνολο των μη προγραμματισμένων διακοπών λειτουργίας σαν αποτέλεσμα αστοχίας στον εξοπλισμό, ενώ η διαθεσιμότητα (availability) είναι το μέτρο του χρόνου που μια εγκατάσταση συμπαραγωγής βρίσκεται σε λειτουργία ⁽¹⁾. Λεπτομερείς ορισμοί ⁽¹⁾ των δύο εννοιών δίνονται παρακάτω:

$$\% \text{Reliability} = \frac{T - (S + U)}{T - S} \times 100, \quad \% \text{Availability} = \frac{T - (S + U)}{T} \times 100$$

όπου S είναι οι ώρες προγραμματισμένης συντήρησης (h/year), U ώρες μη προγραμματισμένης συντήρησης (h/year) και T είναι ο χρόνος που η εγκατάσταση χρειάζεται να βρίσκεται σε λειτουργία (h/year).

Εκτός από τη δυναμική λειτουργία ενός συστήματος συμπαραγωγής για οικιακές εφαρμογές, παράγοντες όπως το κόστος (καυσίμου, συντήρησης κ.λπ.), τα περιβαλλοντικά οφέλη και η ζήτηση σε ηλεκτρική ισχύ επηρεάζουν την τεchnο-οικονομική βιωσιμότητα της μονάδας. Συστήματα συμπαραγωγής μεγάλης κλίμακας επωφελούνται από οικονομίες κλίμακας και τείνουν να έχουν χαμηλότερα κόστη εγκατάστασης ανά μονάδα παραγωγής (€/kW²) ⁽¹⁾. Από τη άλλη μεριά, πολύ μικρής κλίμακας συστήματα συμπαραγωγής τείνουν να έχουν υψηλά κόστη κεφαλαίου που φαίνεται να αποτελούν οικονομικό εμπόδιο στην εφαρμογή τους. Επιπρόσθετα, η παρατηρούμενη χαμηλή αξιοπιστία και αντοχή στη φθορά του χρόνου των μεταλλικών εξαρτημάτων των συστημάτων συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας, η πιθανή ασυμβατότητα με τη τεχνολογία Η(θέρμανση) V(εξαερισμός) AC(κλιματισμός) και η αδυναμία προσαρμογής με το ηλεκτρικό δίκτυο διασύνδεσης έχουν έως τώρα περιορίσει τη χρήση τους στο οικιακό τομέα ⁽¹⁾.

Συχνά, οι εφαρμογές της συμπαραγωγής προϋποθέτουν την καύση ορυκτών καυσίμων. Ως αποτέλεσμα της καύσης, εκλύονται προϊόντα που μολύνουν το περιβάλλον, όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), οξείδια του αζώτου (NO_x), διοξείδιο του θείου (SO_2), μονοξείδιο του άνθρακα (CO), άκαυστοι υδρογονάνθρακες και σωματίδια. Ωστόσο, από τη στιγμή που η απόδοση του εκμεταλλεόμενου καυσίμου είναι υψηλότερη στα συστήματα συμπαραγωγής σε σχέση με αυτή των συμβατικών συστημάτων μετατροπής ενέργειας, τα επίπεδα των ειδικών εκπομπών (εκπομπές ανά μονάδα παραγωγής ωφέλιμης ενέργειας) από τα συστήματα συμπαραγωγής είναι χαμηλότερα από αυτά των συμβατικών συστημάτων.

Μια πληθώρα τύπων συστημάτων συμπαραγωγής είναι εμπορικά διαθέσιμη, ή βρίσκεται στο στάδιο της έρευνας και ανάπτυξης, για οικιακά συστήματα συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας. Τέτοια συστήματα αναφέρονται σε μηχανές εσωτερικής καύσης (μηχανές σπινθηριστών ανάφλεξης – κινητήρας Otto, ή συμπίεσης – κινητήρας Diesel), μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου και μηχανές Stirling εξωτερικής καύσης. Οι τεχνολογίες αυτές μπορούν αφενός να αντικαταστήσουν τους συμβατικούς λέβητες σε μια κατοικία και αφετέρου να παρέχουν ταυτόχρονα θερμότητα και ηλεκτρισμό και ενδεχομένως ψύξη μέσω απορρόφησης, πιθανώς με σύνδεση της περίσσειας ηλεκτρισμού με το τοπικό δίκτυο και αποθήκευση της περίσσειας θερμότητας⁽¹⁾.

ΔΙΑΘΕΣΙΜΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΟΙΚΙΑΚΗΣ ΣΗΘ

Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην παρουσίαση μιας σύγχρονης βιβλιογραφικής ανασκόπησης των διαθέσιμων τεχνολογιών συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας που είναι κατάλληλες για οικιακές εφαρμογές. Ως τέτοιες, για λειτουργικούς λόγους, θα ορίσουμε τις διαθέσιμες ή υποανάπτυξη τεχνολογίες συστημάτων συμπαραγωγής ονομαστικής ισχύος μικρότερης των 50kW_{el}. Τέτοιες τεχνολογίες που είναι κατάλληλες για συστήματα οικιακής συμπαραγωγής είναι οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης, οι μικροτουρμπίνες, οι κυψέλες καυσίμου SOFC και οι μηχανές Stirling εξωτερικής καύσης. Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη αναφορά στα χαρακτηριστικά της κάθε τεχνολογίας, στο καθεστώς ανάπτυξης και λειτουργίας, στις βασικές εφαρμογές και στα περιβαλλοντικά οφέλη, με ιδιαίτερη έμφαση να δίνεται στις τεχνολογίες των μηχανών εσωτερικής καύσης (συγκεκριμένα του κινητήρα Otto) και των κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFCs).

2.1 ΠΑΛΙΝΔΡΟΜΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ (ΜΕΚ) ΒΑΣΙΖΟΜΕΝΕΣ ΣΕ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης είναι κατάλληλες για εφαρμογές συμπαραγωγής μικρής κλίμακας λόγω της εύρωστης και δοκιμασμένης τεχνολογίας τους. Ποικίλουν σε διάφορα επίπεδα ισχύος από μερικά kWatts μέχρι και άνω των 10 MWatt και μπορούν να χρησιμοποιούν μια πληθώρα καυσίμων ⁽²⁾ γεγονός που τις κάνει κατάλληλες για ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών σε οικιακά, εμπορικά και μικρής κλίμακας βιομηχανικά φορτία.

2.1.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Μια παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης, επίσης γνωστή ως εμβολοφόρος κινητήρας, είναι μια μηχανή που χρησιμοποιεί ένα ή περισσότερα έμβολα για να μετατρέψει την πίεση σε περιστρεφόμενη κίνηση ⁽⁵⁾. Στη μηχανή εσωτερικής καύσεως, η καύση (με άλλα λόγια η γρήγορη οξειδωση) του αερίου με τον αέρα γίνεται σε ένα περιορισμένο χώρο που καλείται θάλαμος καύσης. Αυτή η εξώθερμη αντίδραση του καυσίμου με τον οξειδωτικό παράγοντα παράγει αέρια σε συνθήκες υψηλής θερμοκρασίας και πίεσης, που είναι σε θέση να

διασταλούν. Το πιο προφανές χαρακτηριστικό σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης είναι ότι παράγεται ωφέλιμο έργο μέσα από τη διαστολή των θερμών καυσαερίων που αντιδρούν ακριβώς στην πρόκληση πίεσης, προσδίδοντας κίνηση στο έμβολο του κινητήρα που βρίσκεται εντός του κυλίνδρου.

Όλες οι μηχανές εσωτερικής καύσης βασίζονται σε εξώθερμες χημικές διεργασίες καύσης, δηλαδή στην αντίδραση του καυσίμου με τον αέρα αν και είναι πιθανό ότι και άλλοι οξειδωτικοί παράγοντες μπορούν να τον αντικαταστήσουν.

Για να επιτευχθεί η καύση πρέπει να προκληθεί ανάφλεξη εσωτερικά του κυλίνδρου. Οι πιο κοινές μηχανές χρησιμοποιούν τη μέθοδο ανάφλεξης σπινθηριστών (μηχανές Otto) ή συμπίεσης (μηχανές Diesel) (που συμπιέζουν τον αέρα και κατόπιν ψεκάζεται το καύσιμο μέσα στο θερμά συμπιεσμένο μίγμα αέρος το οποίο υφίσταται αυτανάφλεξη) ⁽⁶⁾.

Μετά την ανάφλεξη και την καύση, τα προϊόντα της καύσης, δηλαδή τα θερμά καυσαέρια, έχουν περισσότερη διαθέσιμη ενέργεια από το πρότυπο συμπιεσμένο μίγμα αέρος/καυσίμου (το οποίο είχε πιο υψηλή χημική ενέργεια). Η διαθέσιμη ενέργεια εκδηλώνεται με την υψηλή πίεση και θερμοκρασία η οποία μπορεί να μετατραπεί σε μηχανικό έργο. Σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης, τα υψηλής πίεσης αέρια προϊόντα που βρίσκονται εντός του κυλίνδρου θέτουν σε κίνηση τα έμβολα της μηχανής.

Καθώς η διαθέσιμη ενέργεια χάνεται τα θερμά καυσαέρια εκτονώνονται, μέσω απαγωγής, επιτρέποντας έτσι στο έμβολο να επανέλθει στο άνω νεκρό σημείο (Top Dead Center - TDC). Η θερμότητα που δεν μεταφράζεται σε έργο θεωρείται απώλεια, και αποβάλλεται από τη μηχανή μέσω ενός αέριου ή υγρού συστήματος ψύξης.

Για ένα κινητήρα εσωτερικής καύσης τα κυριότερα μέρη της μηχανής περιλαμβάνουν το στροφαλοφόρο άξονα, έναν ή περισσότερους εκκεντροφόρους και τις βαλβίδες. Υπάρχουν ένας οι περισσότεροι κύλινδροι σε καθένα από τους οποίους λειτουργεί ένα μπουζί, ένα έμβολο και ένας στρόφαλος ⁽⁶⁾.

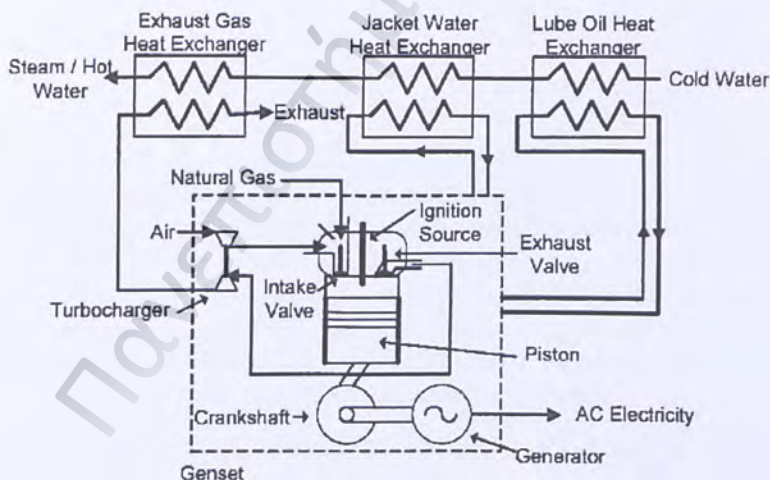
Οι μηχανές Diesel είναι κυρίως τετράχρονοι μηχανές απευθείας έγχυσης που εξοπλίζονται με ένα σύστημα υπερπλήρωσης και εναλλακτών θερμότητας και τροφοδοτούνται κυρίως με καύσιμο diesel. Οι στατικές μηχανές diesel περιστρέφονται σε ταχύτητες από 500 έως και 1500 rpm ⁽³⁾. Τα συστήματα ψύξης των μονάδων αυτών είναι πολυσύνθετα σε σχέση με τα αντίστοιχα συστήματα των μηχανών Otto και η θερμοκρασία τους είναι συχνά χαμηλότερη (φτάνει μέχρι 85°C το μέγιστο) περιορίζοντας έτσι τη δυνατότητα ανάκτησης της θερμότητας των καυσαερίων.

Συγκριτικά με τις μηχανές Diesel οι μηχανές Otto είναι πιο ελκυστικές σε εφαρμογές συμπαραγωγής που αφορούν συστήματα μικρότερης κλίμακας, με το σύστημα ανάκτησης θερμότητας να παράγει ζεστό νερό χρήσης σε θερμοκρασίες άνω των 160°C ή πεπιεσμένο ατμό 20 bar ⁽³⁾. Σε χρήσεις συμπαραγωγής, οι κινητήρες που λειτουργούν με ανάφλεξη σπινθηριστών τροφοδοτούνται κατά κύριο λόγο με φυσικό αέριο, ενώ μπορούν επίσης να στηθούν έτσι ώστε να λειτουργούν με καύσιμο προπάνιο, βενζίνη ή βιοαέριο. Οι μηχανές Otto που χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας (οικιακός τομέας) είναι μηχανές ανοικτού θαλάμου. Πρόσφατα, τα προφίλ των εκπομπών των

μηχανών Otto που τροφοδοτούνται με καύσιμο φυσικό αέριο έχουν βελτιωθεί σημαντικά χάρη στο καλύτερο σχεδιασμό και στον έλεγχο των διεργασιών της καύσης καθώς και στη δράση καταλυτικών ουσιών στην απαγωγή των καυσαερίων. Επιπλέον, οι κινητήρες Otto που λειτουργούν με καύσιμο φυσικό αέριο έχουν χαμηλό επενδυτικό κόστος, γρήγορη εκκίνηση και σημαντικά ποσοστά ανάκτησης θερμότητας ⁽¹⁾.

Πλέον, μονάδες συμπαραγωγής με ολοκληρωμένα συστήματα υψηλών αποδόσεων, με μόλις 1 kW ηλεκτρική ισχύ και 3 kW θερμική, όπως είναι η μονάδα που κατασκευάστηκε από τη Honda Motors Co.⁽¹⁾, είναι εμπορικά διαθέσιμες και μπορούν να λειτουργήσουν σε μικρής κλίμακας εφαρμογές. Τα «πακέτα» αυτά χρησιμοποιούνται προς το παρόν για να καλύψουν τις απαιτήσεις σε βασικά φορτία ενός κτηρίου ή μιας εγκατάστασης, καθώς επίσης για εφεδρεία ή για κάλυψη των φορτίων αιχμής. Τα πλεονεκτήματα που έχουν τέτοια πακέτα συμπαραγωγής μηχανών εσωτερικής καύσης έναντι άλλων τεχνολογιών συμπαραγωγής επικεντρώνονται στα χαμηλά κόστη κεφαλαίου, στην αξιόπιστη παραγωγή ενέργειας, στα χαμηλά λειτουργικά κόστη, στη εύκολη συντήρηση και στην ευρεία ανάπτυξη υποδομών παροχής υπηρεσιών.

Τα βασικά συστατικά ενός συστήματος συμπαραγωγής που βασίζεται σε μια μηχανή εσωτερικής καύσης αποτελούν ο κινητήρας, η ηλεκτρογεννήτρια το σύστημα ανάκτησης θερμότητας, το σύστημα απόρριψης των καυσαερίων, το σύστημα ελέγχου και ακουστικής μόνωσης. Η δομή ενός τυπικού συστήματος συμπαραγωγής με μηχανή εσωτερικής καύσης παριστάνεται στην εικόνα 2 ⁽¹⁾.



Εικόνα 2. Τυπική δομή ενός συστήματος συμπαραγωγής από μια μηχανή εσωτερικής καύσης με ανάφλεξη σπινθηριστών (H.I. Ononwiona et al, 2006)

Οι μηχανές που λειτουργούν σε ένα τέτοιο σύστημα είναι μηχανές με στοιχειομετρικά φτωχό καύσιμο μίγμα ενώ η περίσσεια οξυγόνου των ασαερίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε βοηθητική ανάφλεξη ⁽¹⁾. Ωστόσο, η αύξηση της ροής των καυσαερίων προκαλεί μείωση στη θερμοκρασία, που έχει ως συνέπεια μικρότερα επίπεδα ανάκτησης θερμότητας.

Στα περισσότερα συστήματα συμπαραγωγής, ο κινητήρας ψύχεται με τη βοήθεια ενός συστήματος ψύξης μέσω μιας αντλίας κυκλοφορίας η οποία οδηγεί το ψυκτικό μέσο σε κυκλώματα και εναλλάκτες θερμότητας για να παράγει ζεστό νερό χρήσης.

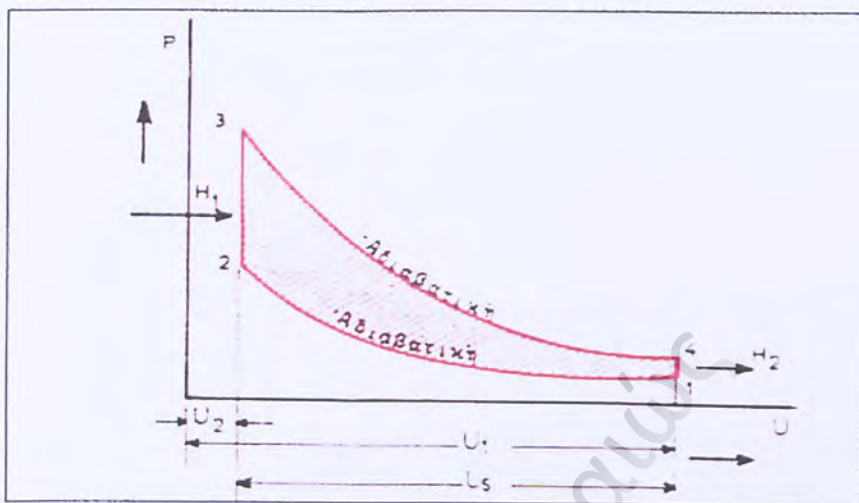
Για τις περισσότερες συμβατικές μηχανές εσωτερικής καύσης του οικιακού τομέα υπολογίζεται μια μέση διάρκεια ζωής της τάξεως των 20.000 ωρών. Οι πιο μικρές μηχανές είναι φθηνότερες από αυτές του βιομηχανικού τύπου αλλά και λιγότερο αξιόπιστες καθώς εμφανίζουν μικρότερη διάρκεια ζωής.

Ανάλογα με το μέγεθος και τον τύπο της μηχανής, χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές συμπαραγωγής κινητήρες υψηλών, μεσαίων και χαμηλών ταχυτήτων περιστροφής. Σε εφαρμογές οικιακής συμπαραγωγής τοποθετούνται κινητήρες υψηλών ταχυτήτων περιστροφής της τάξεως των 1000-1500rpm. Οι κινητήρες υψηλών ταχυτήτων έχουν κατά γενική ομολογία τα χαμηλότερα κόστη παραγωγής (€/kW). Το γεγονός αυτό εξηγείται από το ότι η συνολική παραγωγή ισχύος μιας τέτοιας μηχανής είναι ανάλογη με την ταχύτητα της. Έτσι, οι κινητήρες υψηλών ταχυτήτων επιτυγχάνουν μεγαλύτερη παραγωγή ανά μονάδα όγκου (μεγέθους κυλίνδρου) και υψηλότερη πυκνότητα ισχύος. Ωστόσο, οι κινητήρες υψηλών ταχυτήτων είναι κατασκευασμένοι έτσι ώστε να έχουν μεγαλύτερα όρια αντοχής με συνέπεια τα διαστήματα μεταξύ δύο διαδοχικών λεπτομερών επιθεωρήσεων να πέφτουν σημαντικά ⁽¹⁾. Επιπλέον, για την ενίσχυση της συνολικής παραγωγής μηχανών μικρής μετατόπισης, πολλές φορές, χρησιμοποιούνται συστήματα υπερπλήρωσης που ανεβάζουν την ισχύ μέχρι και 40% ⁽¹⁾. Η υψηλότερη πίεση λειτουργίας προσδίδει αυξημένες αποδόσεις σε συνδυασμό με χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου αλλά επηρεάζει τη ευπάθεια της μηχανής από το φαινόμενο της αυτανάφλεξης (knocking).

2.1.1.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ (ΚΥΚΛΟΣ ΟΤΤΟ)

Ο κύκλος Otto είναι ο ιδανικός κύκλος για παλινδρομικές μηχανές ανάφλεξης με σπινθηριστές. Ετέθη σε εφαρμογή από τον Nicholas A. Otto, ο οποίος το 1876 κατασκεύασε με επιτυχία μια τετράχρονη μηχανή χρησιμοποιώντας τον κύκλο που προτάθηκε το 1862 από το Γάλλο Beau de Rochas. Λόγω της απλότητας και της μεγαλύτερης ταχύτητάς της, η μηχανή Otto επεβλήθη των μέχρι τότε άλλων μηχανών, οι οποίες εργαζόνταν με βάση άλλους κύκλους. Σήμερα, όλες οι βενζινοκίνητες μηχανές αυτοκινήτων, οι παλινδρομικές βενζινομηχανές των αεροπλάνων και πολλές άλλες μικρότερες μηχανές εσωτερικής καύσης ανάφλεξης με σπινθηριστές, εργαζόνται με βάση τον κύκλο Otto.

Ο ιδανικός κύκλος Otto φαίνεται στο παρακάτω σχήμα (διάγραμμα P-V) ⁽¹³⁾.



Εικόνα 3. Ιδανικός κύκλος Otto (Dr.Tsirikoglou T., 2006)

Είναι κλειστός, δηλαδή το εργαζόμενο μέσο (αέρας) θεωρείται ότι παραμένει πάντοτε εντός του κυλίνδρου, ενώ η πραγματική μηχανή εργάζεται με ανοιχτό κύκλο, στον οποίο το μίγμα αέρος/καυσίμου εισέρχεται και εξέρχεται περιοδικώς από τον κύλινδρο. Στο σημείο 1, όπως φαίνεται και στην εικόνα 3, ο κύλινδρος είναι πλήρης με αέρα κατάστασης P_1, V_1, T_1 .

Το έμβολο ανέρχεται και συμπιέζει τον αέρα κατά την αδιαβατική μεταβολή (1-2), έως ότου ο αέρας καταλάβει των όγκο των διακένων. Λόγω της αδιαβατικής αυτής συμπίεσεως η πίεση και η θερμοκρασία του αέρα ανέρχεται σε P_2, T_2 ενώ ο όγκος των διακένων είναι V_2 (ο όγκος αυτός ονομάζεται όγκος διαδρομής και είναι $V_2 + V_5 = V_1$).

Στο σημείο 2 τοποθετείται ένα «θερμό σώμα» στο άκρο του κυλίνδρου και ο αέρας θερμαίνεται κατά τη μεταβολή (2-3) υπό σταθερό όγκο, με αποτέλεσμα αύξηση της πίεσης και της θερμοκρασίας του αέρα σε P_3 και T_3 , ενώ ο όγκος παραμένει σταθερός ($V_3 = V_2$). Αφαιρείται στη συνέχεια το θερμό σώμα και καθώς το έμβολο κατέρχεται ο αέρας εκτονώνεται αδιαβατικά κατά τη μεταβολή (3-4) με αποτέλεσμα την πτώση της πίεσης και της θερμοκρασίας του σε P_4, T_4 , ενώ ο όγκος αυξάνει σε V_4 .

Στο σημείο 4 τοποθετείται ένα «ψυχρό σώμα» στο άκρο του κυλίνδρου και ο αέρας αποβάλλει θερμότητα υπό σταθερό όγκο ($V_4 = V_1$), και επανέρχεται στην αρχική κατάσταση του σημείου 1.

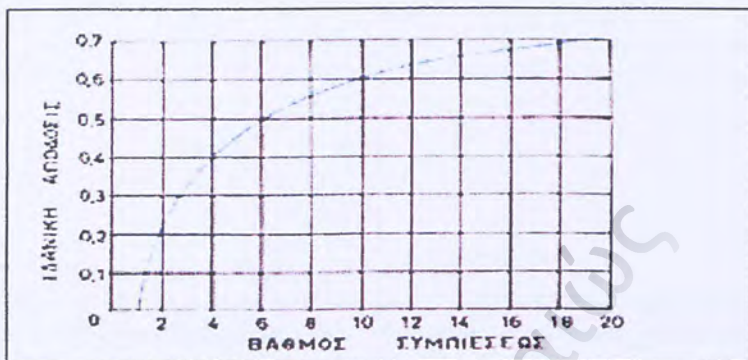
Η επιφάνεια 1, 2, 3, 4 του διαγράμματος είναι το λαμβανόμενο έργο ανά κύκλο.

Ο βαθμός συμπίεσης $\frac{V_1}{V_2}$ ισούται με τον βαθμό εκτονώσεως $\frac{V_4}{V_3} = r$.

Αποδεικνύεται ότι η θερμική απόδοση του κύκλου n_o ισούται με :

$$n_o = 1 - \frac{1}{r^{\gamma-1}}, \text{ όπου } \gamma = \frac{C_p}{C_v}.$$

Από την ισότητα αυτή βλέπουμε ότι η απόδοση του κύκλου Otto εξαρτάται από το βαθμό συμπίεσης. Στην εικόνα 4, έχει χαραχθεί μια καμπύλη η οποία δείχνει την αύξηση της ιδανικής απόδοσης με την αύξηση του βαθμού συμπίεσης ⁽¹³⁾.



Εικόνα 4. Καμπύλη μεταβολής της απόδοσης ιδανικού κύκλου Otto σε σχέση με το βαθμό συμπίεσης (Dr.Tsirikoglou T., 2006)

Ο κύκλος Otto ονομάζεται και κύκλος σταθερού όγκου γιατί η θερμοκρασία χορηγείται με σταθερό όγκο, ή κύκλος εκρήξεως γιατί η θερμότητα χορηγείται ακαριαία.

2.1.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Για να είναι κερδοφόρα και αποδοτικά τα συστήματα συμπαραγωγής χρειάζεται να έχουν αρκετά εκτεταμένες περιόδους σχεδόν συνεχούς λειτουργίας. Παράγοντες όπως μη προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας που αυξάνουν τα κόστη συντήρησης, η πιθανή διακοπή των πηγών τροφοδοσίας, η απαιτούμενη τεχνική εξυπηρέτηση με σκοπό την άμεση επισκευή καθώς και τα πρόσθετα κόστη που σχετίζονται με την προμήθεια ενέργειας σε αρκετά υψηλές τιμές περιορίζουν το λειτουργικό χρόνο των συστημάτων συμπαραγωγής. Έτσι, η λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος ρυθμίζεται κατά κανόνα σε αντιστοιχία προς τον βαθμό απόδοσης, την αξιοπιστία, τη διαθεσιμότητα, τις ανάγκες συντήρησης και τις προβλεπόμενες εκπομπές.

2.1.2.1 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

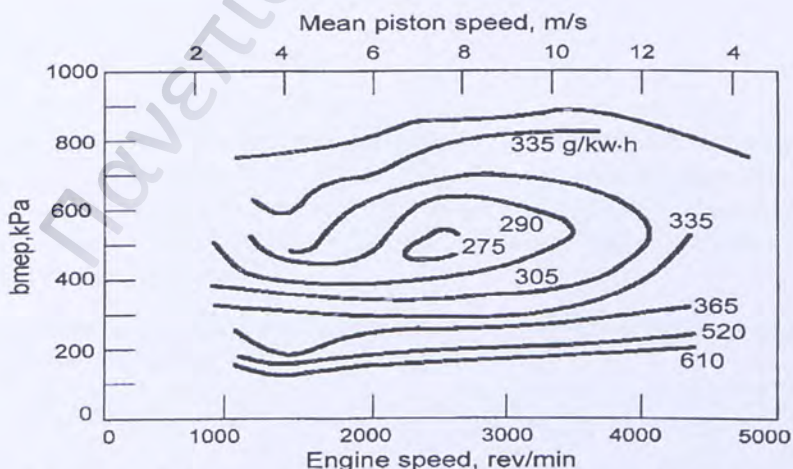
Οι μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν ηλεκτρικές αποδόσεις που κυμαίνονται μεταξύ 25 και 45% ⁽¹⁾. Γενικά, στη συμπαραγωγή μικρής κλίμακας οι μηχανές Diesel είναι πιο αποδοτικές ενεργειακά από τις μηχανές Otto καθώς εμφανίζουν υψηλότερους λόγους συμπίεσης. Σύμφωνα με τις προδιαγραφές ISO ορίζονται σε θερμοκρασία 25°C και πίεση 1 bar ⁽¹⁾. Τόσο η παραγωγή όσο και η απόδοση μιας παλινδρομικής μηχανής εσωτερικής καύσης

μειώνεται περίπου κατά 4% για κάθε υψομετρική αύξηση 333m και κατά 1% για κάθε 5.6°C πάνω από την θερμοκρασία των 25°C.

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν από μια γενική επισκόπηση κατασκευαστών⁽¹⁾ έδειξαν ότι η συνολικός βαθμός απόδοσης μιας τέτοιας μηχανής συμπαραγωγής φτάνει το 85-90% με μικρές διακυμάνσεις που εξαρτώνται από το μέγεθος του κινητήρα. Η ηλεκτρική απόδοση σε πλήρες φορτίο κυμαίνεται μεταξύ 28 και 39% και αυξάνει με το μέγεθος του κινητήρα.

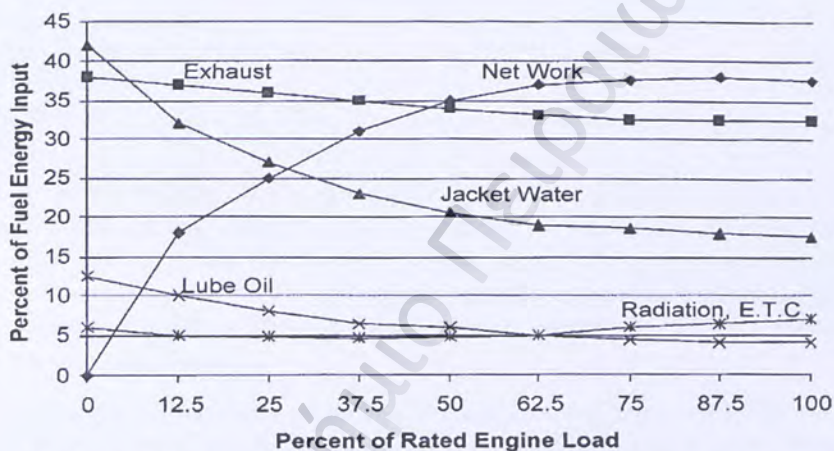
2.1.2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΜΕΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Μια μηχανή εσωτερικής καύσης λειτουργεί με μια συγχρονισμένη ηλεκτρογεννήτρια σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής ώστε να παράγει σταθερά εναλλασσόμενο ρεύμα (AC). Ο λειτουργικός χάρτης ενεργειακής εξοικονόμησης και το ισοζύγιο θερμότητας μιας αντιπροσωπευτικής μηχανής παριστάνεται στις εικόνες 5 και 6⁽¹⁾ αντίστοιχα. Η εικόνα 5 απεικονίζει το λειτουργικό χάρτη μιας τυπικής μηχανής με ανάφλεξη σπινθηριστών. Οι καμπύλες παριστάνουν τη ειδική κατανάλωση καυσίμου (bsfc) σε g/kWh. Η βέλτιστη κατανάλωση επιτυγχάνεται κοντά στη μέση τιμή ταχύτητας περιστροφής και φορτίου⁽¹⁾. Η αύξηση της πίεσης του θαλάμου καύσης και άρα του φορτίου σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής προκαλεί μια αύξηση στην ειδική κατανάλωση καυσίμου από τη στιγμή που είναι αναγκαίος ο εμπλουτισμός του μίγματος για να ανεβάσει τη ροπή στρέψης της μηχανής. Η μείωση του φορτίου σε σταθερή ταχύτητα περιστροφής από το ελάχιστο σημείο ειδικής κατανάλωσης θα οδηγήσει επίσης σε αύξηση της κατανάλωσης καυσίμου λόγω της πρόσθετης λειτουργίας των αντλιών και λόγω των απωλειών θερμότητας που μειώνουν την απόδοση της μηχανής



Εικόνα 5. Λειτουργικός χάρτης ενεργειακής εξοικονόμησης για μια μηχανή με ανάφλεξη σπινθηριστών (H.I. Onowwiona et al, 2006)

Για τις εφαρμογές συμπαραγωγής, ο λόγος θερμότητας και ισχύος της μηχανής είναι κρίσιμος. Όπως μπορεί να φανεί στην εικόνα 6, το ποσοστό του καθαρού ενεργειακού περιεχομένου του καυσίμου που χρησιμοποιείται για την παραγωγή μηχανικού έργου, και το οποίο εξαρτάται άμεσα με τη τελική παράγωγη ηλεκτρισμού, παραμένει σχεδόν σταθερό μέχρι το 75% του συνολικού φορτίου ενώ στη συνέχεια αρχίζει και πέφτει. Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η ειδική κατανάλωση καυσίμου αυξάνει σε χαμηλότερα μερικά φορτία, οδηγώντας έτσι σε μειωμένη απόδοση. Επίσης, από την εικόνα 6, μπορεί να διαπιστωθεί ότι το ποσό της θερμότητας που δεσμεύεται από το νερό ψύξης της μηχανής αλλά και από τα καυσαέρια αυξάνει όσο η απόδοση μειώνεται, δηλαδή η ποσότητα της ωφέλιμης θερμότητας που προκύπτει από το σύστημα συμπαραγωγής αυξάνει με ενδεχόμενη μείωση της ηλεκτρικής απόδοσης.



Εικόνα 6. Θερμικό ισοζύγιο μιας τυπικής παλινδρομικής μηχανής εσωτερικής καύσης (H.I. Ononwiona et al, 2006)

2.1.2.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Σε ένα εμβολοφόρο κινητήρα που χρησιμοποιείται σε ένα σύστημα συμπαραγωγής η θερμότητα που παράγεται δε δεσμεύεται εξ ολοκλήρου για παραγωγή ηλεκτρισμού, αφού ένα μέρος της θερμικής ενέργειας «χάνεται» ως χαμηλής θερμοκρασίας θερμότητα μέσω των καυσαερίων, ως ακτινοβολία και μέσω άλλων απωλειών που προέρχονται από τον κινητήρα και τη γεννήτρια.

Υπάρχουν τεσσάρων ειδών πηγές, από όπου η απορριπτόμενη θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα για ένα σύστημα συμπαραγωγής:

- η θερμότητα των καυσαερίων,
- του νερού ψύξης,

- από το λιπαντικό μέσο (σε μικρότερα ποσοστά ανάκτησης) και
- το σύστημα υπερπλήρωσης

Η θερμότητα που προέρχεται από το νερό ψύξης αντιστοιχεί σε πάνω από το 30% της εισερχόμενης ενέργειας, ενώ η ανακτώμενη ενέργεια των καυσαερίων της μηχανής παριστάνει το 30-50%. Έτσι, ανακτώντας θερμότητα από τα συστήματα ψύξης και απαγωγής, περίπου το 70-80% της ενέργειας του καυσίμου αξιοποιείται με σκοπό την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού και ωφέλιμης θερμότητας όπως άλλωστε φαίνεται από τον πίνακα 1 ⁽⁷⁾.

Πίνακας 1. Κατανομή ενέργειας σε μηχανή εσωτερικής καύσης με και χωρίς ανάκτηση ενέργειας (Aspen Systems Corp, 2000)

	Χωρίς ανάκτηση (%)	Με ανάκτηση (%)
Εξαγωγή στον σφόνδυλο	35	35
Μη ανακτώμενη θερμότητα	65	21
Ανακτώμενη θερμότητα	0	44
Συνολική ωφέλιμη ενέργεια	35	79

Η ανακτώμενη θερμότητα του νερού ψύξης για χρήση ζεστού νερού φτάνει τους 85-90°C, ενώ η θερμότητα που προέρχεται από την απαγωγή των καυσαερίων για χρήση ζεστού νερού ή χαμηλής πίεσης ατμού φτάνει τους 100 με 120°C⁽¹⁾. Τη θερμότητα αυτή είναι δυνατόν να γίνει εκμεταλλεύσιμη για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης ή χαμηλής πίεσης ατμού για θέρμανση των εσωτερικών χώρων, οικιακή χρήση ζεστού νερού, ή παραγωγή ψύξης μέσω απορρόφησης.

Η ανακτώμενη θερμότητα δεν μπορεί να αξιοποιηθεί σε ένα κτήριο απευθείας εξαιτίας προβλημάτων που σχετίζονται με πίεση, διάβρωση και θερμικά σοκ. Επομένως θερμικοί εναλλάκτες σωλήνα-κελύφους ή ελασμάτων είναι απαραίτητοι για να πραγματοποιηθεί η μεταφορά θερμότητας από το μηχανικό μέσο ψύξης στο κτήριο. Θερμικοί εναλλάκτες συμπίκνωσης μπορούν επίσης να ανακτήσουν τη λανθάνουσα θερμότητα που σε άλλη περίπτωση θα χανόταν. Ένα τέτοιο σύστημα είναι κατάλληλο σε συστήματα καύσης που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ενώ με άλλο διαθέσιμο καύσιμο εμφανίζονται προβλήματα διάβρωσης ⁽¹⁾.

2.1.2.4 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Η συντήρηση ενός συστήματος συμπαραγωγής από μηχανή εσωτερικής καύσης περιλαμβάνει τακτικές επιθεωρήσεις ρουτίνας και προληπτικές συντηρήσεις. Αυτές καλύπτουν την αλλαγή λαδιών, ψυκτικού μέσου και μπουζί, πραγματοποιούνται κάθε 500-2.000 ώρες, ενώ οι κατασκευαστές συνιστούν διαστήματα μεταξύ λεπτομερών επιθεωρήσεων της κεφαλής του κυλίνδρου και του συστήματος υπερπλήρωσης, από 12.000 έως 15.000 ώρες λειτουργίας και διαστήματα αντικαταστάσεων του εμβόλου/δακτυλίου, των τριβέν του στροφαλοφόρου και του συστήματος στεγανοποίησης από 24.000 έως

30.000 ώρες. Ένα αντιπροσωπευτικό κόστος συντήρησης μιας τέτοιας μηχανής είναι από 0.007-0.01 €/kWh⁽¹⁾.

Με τη σωστή συντήρηση ένας εμβολοφόρος κινητήρας σε ένα σύστημα συμπαραγωγής λειτουργεί σε υψηλά επίπεδα διαθεσιμότητας. Με βάση ένα πρόγραμμα επίδειξης τριών συμπαραγωγικών μονάδων από παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης που πραγματοποιήθηκε στο Ηνωμένο Βασίλειο⁽¹⁾ έδειξε ότι η διαθεσιμότητα μπορεί να φτάσει τα επίπεδα του 87-98%, επίπεδα που είναι αρκετά υψηλά με βάση τις προδιαγραφές των κατασκευαστών.

2.1.3 ΕΚΠΟΜΠΕΣ

Οι βασικοί ρυπαντές των παλινδρομικών μηχανών εσωτερικής καύσης είναι τα οξειδία του αζώτου (NO_x), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και πτητικές οργανικές ουσίες (VOCs - άκαυστοι υδρογονάνθρακες). Άλλοι ρυπαντές όπως τα οξειδία του θείου (SO_x) πρωτίτως εξαρτώνται από τον τύπο του καυσίμου και της μηχανής που χρησιμοποιείται. Γενικά, οι εκπομπές των SO_x σχετίζονται με μεγάλες μηχανές Diesel, χαμηλών ταχυτήτων που χρησιμοποιούν βαριά καύσιμα⁽¹⁾.

Οι εκπομπές NO_x αποκτούν ιδιαίτερη σημασία για τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Παράγονται από την καύση ορυκτών καυσίμων υπό την παρουσία οξυγόνου. Η παραγωγή τους εξαρτάται από τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, από τη γεωμετρία του θαλάμου καύσης και από τον τύπο του μίγματος αέρος-καυσίμου της μηχανής. Στις περισσότερες των περιπτώσεων παριστάνουν ένα μίγμα NO και NO₂ σε ευμετάβλητη αναλογία. Οι μηχανές που καίνε φυσικό αέριο παράγουν τα χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών NO_x όπως φαίνεται από τις αντιπροσωπευτικές τιμές του πίνακα 2⁽¹⁾.

Πίνακας 2. Εκπομπές NO_x για διάφορους τύπους μηχανών εσωτερικής καύσης που καίνε διαφορετικά είδη φυσικών καυσίμων (H.I. Ononwiona et al, 2006)

Τύπος μηχανής	Καύσιμο	NO _x (ppmv)	NO _x (gm/kWh)
Diesel (υψηλών & μεσαίων ταχυτήτων)	Καύσιμο απόσταγμα (ελαφρύ diesel)	450-1350	7-18
Diesel (υψηλών & μεσαίων ταχυτήτων)	Βαριά καύσιμα	900-1800	12-20
Spark ignition (ανάφλεξη σπινθηριστών)	Φυσικό αέριο	45-150	0.7-2.5

Προς το παρόν, η υψηλή απόδοση δεν μπορεί να συνδυαστεί με χαμηλές εκπομπές NO_x διότι για να συμβεί κάτι τέτοιο θα πρέπει να βελτιστοποιηθεί ο χρόνος διαδρομής της ανάφλεξης και να επιτευχθεί ένας λόγος αέρος/καυσίμου ίσος με 1.5-1.6⁽¹⁾. Τα επίπεδα των εκπομπών NO_x μειώνονται όταν ο χρόνος διαδρομής της ανάφλεξης επιβραδύνει τη μέγιστη ροπή στρέψης της μηχανής⁽⁴⁾ ή με αύξηση του φορτίου και της πίεσης πολλαπλής εισαγωγής⁽¹⁾. Κατά συνέπεια, εξαιτίας αυτών των παραγόντων, πολλοί κατασκευαστές μηχανών εσωτερικής καύσης με καύσιμο φυσικό αέριο επιλέγουν να προωθήσουν

διαφορετικά μοντέλα μηχανών που περιλαμβάνουν ή χαμηλά επίπεδα εκπομπών NO_x είτε υψηλές αποδόσεις αντίστοιχα. Η επίτευξη υψηλών αποδόσεων οδηγεί σε συνθήκες εκπομπής διπλάσιων ποσοτήτων NO_x. Ο στόχος της ελαχιστοποίησης των εκπομπών αποτελεί προτεραιότητα όταν δεν απαιτείται μέγιστη ισχύς. Για παράδειγμα, επιβραδύνοντας το χρόνο διαδρομής της ανάφλεξης (με μετατόπιση του σπινθηριστή πιο κοντά στο άνω νεκρό σημείο του χρόνου συμπίεσης), η μέγιστη θερμοκρασία και η πίεση του κυλίνδρου μειώνεται. Η πτώση της θερμοκρασίας βοηθά στη ελαχιστοποίηση του σχηματισμού NO_x αλλά και του φαινομένου της αυτανάφλεξης (knocking).

Οι εκπομπές SO₂ προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων που περιέχουν θείο. Έχουν διαβρωτικές συνέπειες για τις μονάδες συμπαραγωγής, ειδικότερα για τους εναλλάκτες θερμότητας και το σύστημα απαγωγής των καυσαερίων. Ωστόσο οι μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν με φυσικό αέριο παράγουν αμελητέες ποσότητες SO_x.

Το CO που προέρχεται από ατελή καύση είναι δηλητηριώδες αέριο, αλλά οι εκπομπές του είναι αμελητέες όταν ο λόγος αέρα/καυσίμου ελέγχεται ικανοποιητικά ⁽¹⁾.

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες προέρχονται από ατελή οξείδωση, κατά τη διάρκεια της καύσης, από μακριές αλυσίδες υδρογονανθράκων. Οι εκπομπές τους από τις μηχανές εσωτερικής καύσης αναφέρονται συχνά σε υδρογονάνθρακες φτωχούς σε μεθάνιο που περιέχουν μια πληθώρα ουσιών, κάποιες από τις οποίες είναι επικίνδυνοι αέριοι ρυπαντές. Η χρήση οξειδωτικών καταλυτών μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO και των άκαυστων υδρογονανθράκων. Οι καταλύτες επιδιώκουν την οξείδωση σε CO₂ και νερό υπό την περίσσεια οξυγόνου. Η μετατροπή αυτή είναι εφικτή σε ποσοστό 98-99%. Οι καταλύτες οξείδωσης χρησιμοποιούνται σε όλους τους τύπους μηχανών και περισσότερο σε μηχανές Otto με καύσιμο φυσικό αέριο ⁽¹⁾.

Στον πίνακα 3 δίνεται μια εικόνα των χαρακτηριστικότερων εκπομπών για διάφορους τύπους παλινδρομικών μηχανών εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούνται σε συστήματα συμπαραγωγής μικρής κλίμακας. Τα δεδομένα έχουν αντληθεί από τη διαδικτυακή σελίδα ενός κατασκευαστή⁽⁸⁾ που διαχωρίζει τις εκπομπές μεταξύ δύο διαφορετικού τύπου μηχανών (Otto, Diesel) οι οποίες χρησιμοποιούν δύο διαφορετικά είδη καυσίμου (φυσικό αέριο, diesel). Συγκριτικά, στο μέτρο του εφικτού, μπορεί να παρατηρηθεί ότι η μηχανή Otto που χρησιμοποιεί φυσικό αέριο παράγει μικρότερες ποσότητες NO_x και άκαυστων υδρογονανθράκων από αυτές που παράγει μια μηχανή Diesel, αλλά και πολύ υψηλότερες ποσότητες CO. Η χρήση ειδικών οξειδωτικών καταλυτών μπορεί να μειώσει αισθητά τις εκπομπές CO σε μια μηχανή με ανάφλεξη σπινθηριστών από καύσιμο φυσικό αέριο.

Πίνακας 3. Χαρακτηριστικά εκπομπών από παλινδρομικές μηχανές συμπαραγωγής
(<http://www.cumminspower.com>)

Cummins					
Ηλεκτρική ισχύς (kW)	7.5	16	16	20	35
Τύπος μηχανής/καυσίμου	Diesel/diesel	SI/NG	Diesel/diesel	SI/NG	Diesel/diesel
Συσκευές ελέγχου εκπομπών	-	-	-	-	-
Λόγος αέρα/καυσίμου		16.8		16.6	
Λόγος συμπίεσης	18.5 : 1	9.4 : 1	18.5 : 1	9.4 : 1	17.3 : 1
NO _x (g/kWh)	9.45	5.85	9.45	6,15	5.24
CO ₂ (g/kWh)	2.35	27.6	2.35	28.95	0.95
Άκαυστοι υδρογονάνθρακες, (g/kWh)	1.23	0.98	1.23	0.9	0.38
SO ₂ (g/kWh)	-	-	-	-	0.47

2.1.4 ΕΜΠΟΡΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΣΗΘ ΑΠΟ ΜΕΚ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΚΟΣΤΗ

Ένας μεγάλος αριθμός μηχανών εσωτερικής καύσης που βασίζεται σε συστήματα συμπαραγωγής είναι κατάλληλος για οικιακές εφαρμογές και διατίθεται στην αγορά. Η Honda Motor Co. ανέπτυξε μια μονάδα συμπαραγωγής κατάλληλη για μικρές κατοικίες. Η μονάδα λειτουργεί με καύσιμο φυσικό αέριο και αποδίδει 1 kW ηλεκτρική και 3 kW θερμική ισχύ. Η συνολική απόδοση του συστήματος δηλώθηκε από την εταιρία στο 85%⁽¹⁾. Η εταιρία Tokyo Gas παρουσίασε το Φεβρουάριο του 2002 μια μηχανή ισχύος 6 kW με συνολική απόδοση 86%⁽¹⁾. Η Yanmar Diesel Engine Co. σε συνεργασία με την Osaka Gas Co. ανέπτυξαν δύο μονάδες ισχύος 9.8 και 8.2 kW με συνολική απόδοση 81.55 και 80.0% αντίστοιχα και ποσοστά ανάκτησης θερμότητας 58.0 και 56.5%. Η Cummins Inc. παρέχει στην αγορά μηχανές εσωτερικής καύσης που στηρίζουν συστήματα συμπαραγωγής ισχύος από 7.5 έως 150 kW, οι οποίες έχουν ως καύσιμο φυσικό αέριο ή diesel και οι μικρότερες είναι κατάλληλες για οικιακές εφαρμογές⁽¹⁾. Όμοια, τα συστήματα που δουλεύουν με καύσιμο φυσικό αέριο της Lister-Petter Inc. ισχύος 5-400 kW, της Alturdyne Power Systems Inc. ισχύος 25 kW και οι μονάδες της Tecogen Inc. ισχύος 60 και 75 kW μπορούν επίσης να βρουν εφαρμογή σε συμπαραγωγή μικρής κλίμακας. Άλλες εταιρίες που έχουν εμπορικά διαθέσιμες μηχανές εσωτερικής καύσης οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε συστήματα οικιακής συμπαραγωγής αποτελούν η DTE Energy (μονάδες ισχύος 8-1.000 kW με καύσιμο φυσικό αέριο) και η Senertec με μια μονάδα συμπαραγωγής κατάλληλη για μικρές κατοικίες με συνολική παραγωγή 5.5 kW_e και 10 kW_{th}.

Τα βασικά κόστη εξαρτώνται από τη συνολική ισχύ της μηχανής του συμπαραγωγικού συστήματος. Οι μικρότερες εμπορικά διαθέσιμες μηχανές έχουν κινητή βάση και στο σύστημα συμπεριλαμβάνονται τα θερμαντικά σώματα, οι ανεμιστήρες, τα συστήματα εκκίνησης, ελέγχου και καυσίμων καθώς και το δίκτυο σωληνώσεων. Κάποιες από αυτές τις

μονάδες κατασκευάζονται μαζί με ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάκτησης θερμότητας και ένα βασικό εξοπλισμό παράλληλης ροής⁽¹⁾.

Κατά γενικό κανόνα, οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης κάτω των 500 kW κοστίζουν από 555 έως και 900 €/kW, με τις μικρότερες σε μέγεθος μηχανές να κοστίζουν ακόμα περισσότερο⁽¹⁾. Στον πίνακα 4 απεικονίζονται ενδεικτικά τα εκτιμώμενα κόστη κεφαλαίου ενός αριθμού εμπορικά διαθέσιμων μηχανών εσωτερικής καύσης με διαφορετική εγκατεστημένη ισχύ⁽¹⁾. Τα κόστη αυτά είναι αντιπροσωπευτικά των μηχανών ανά κατηγορία μεγέθους κινητήρα και υποδηλώνουν ότι το κόστος ανά μονάδα παραγωγής αλλάζει με το μέγεθος της μηχανής.

Πίνακας 4. Εκτιμώμενα κόστη (€/kW) μηχανών εσωτερικής καύσης (H.I. Ononwiona et al, 2006)

	Senertec	Συστήματα συμπαραγωγής Β. Αμερικής			MAN
Εγκατεστημένη ισχύς (kW)	5.5	7.1-10.7	20.1-23.3	30.3-35.0	100.0
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (%)	27.5	28.1	37.4	33.1	30.6
Θερμικός βαθμός απόδοσης (%)	62.5	56.5	50.0	51.2	50.4
Κόστος εγκατάστασης (€/kW)	1890	1945	1110	903	750

Τα κόστη συντήρησης διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο, την ταχύτητα, το μέγεθος και τον αριθμό των κυλίνδρων της μηχανής. Τα κόστη αυτά περιλαμβάνουν την εργασία, τα υλικά και τα εξαρτήματα (π.χ. φίλτρο λαδιού, φίλτρο καθαρισμού αέρα, μπουζί, στεγανοποιητικό παρέμβυσμα, βαλβίδα, δακτύλιο εμβόλου και αλλαγή λαδιού). Οι μικρότερες μηχανές μπορούν να έχουν συνεχή λειτουργία για 15.000-20.000 ώρες μέχρι να υποβληθούν σε γενική συντήρηση⁽¹⁾. Το διάστημα αυτό μεγαλώνει αισθητά για μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν για βιομηχανικούς σκοπούς.

Το κόστος συντήρησης για μια μηχανή εσωτερικής καύσης με εγκατεστημένη ισχύ 5.5 kW της Senertec υπολογίζεται στα 0.007 €/kWh, με ένα μέσο διάστημα συντήρησης στις 3.500 ώρες⁽⁹⁾. Το κόστος αυτό είναι ενδεικτικό για τις περισσότερες μηχανές εσωτερικής καύσης συστημάτων συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας. Ακραίες τιμές έχουν εμφανιστεί στα 0.0035 €/kWh και 0.02 €/kWh που αφορούν μικρότερα συστήματα⁽¹⁾.

2.2 ΜΙΚΡΟ-ΤΟΥΡΜΠΙΝΕΣ

Τα συστήματα μικρο-τουρμπίνων αποτελούν περιορισμένες σειρές μαζικής παραγωγής από τουρμπίνες καύσης με ηλεκτρική απόδοση της τάξης του 30%, με δυνατότητα τροφοδοσίας διαφόρων ειδών καυσίμου (φυσικό αέριο, diesel, βιοαέριο, αιθανόλη κ.α.), χαμηλά επίπεδα

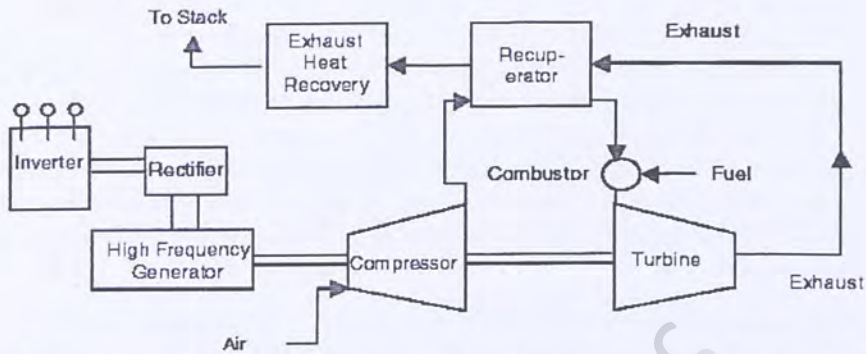
εκπομπών, με δυνατότητα ανάκτησης θερμότητας και ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης⁽⁷⁾. Σε εφαρμογές συμπαραγωγής μπορεί να επιτευχθεί μια συνολική απόδοση πάνω από 80%⁽¹⁰⁾. Τα συστήματα αυτά ποικίλουν σε μέγεθος από 25 έως και 80 kW και είναι σε θέση να καλύψουν τις θερμικές και ηλεκτρικές απαιτήσεις ενός κτηρίου ή ενός συγκροτήματος κατοικιών. Συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ κάτω των 25 kW (μονάδες ισχύος 1 και 10 kW) αποτελούν αντικείμενο έρευνας⁽¹⁰⁾.

Τα πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών σε σύγκριση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης επικεντρώνονται στο μικρότερο μέγεθος, το χαμηλό βάρος και τον περιορισμένο θόρυβο. Ακόμη, έχουν υψηλής αξίας απορριπτόμενη θερμότητα, λίγες απαιτήσεις συντήρησης (αλλά εξειδικευμένο προσωπικό), χαμηλούς κραδασμούς και άμεση παράδοση. Ωστόσο, ο βαθμός απόδοσης του συστήματος μειώνεται σε σχέση με αυτή των μηχανών εσωτερικής καύσης, όσο μικραίνει το μέγεθος της μηχανής⁽¹⁰⁾.

2.2.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η θερμοδυναμική διεργασία περιλαμβάνει την αύξηση, μέσω συμπίεσης, της πίεσης εισαγόμενου αέρα από τον συμπιεστή. Το επιλεγόμενο καύσιμο αναμειγνύεται με τον συμπιεσμένο αέρα και αναφλέγεται στον θάλαμο καύσης. Τα παραγόμενα θερμά καυσαέρια εκτονώνονται στρέφοντας τον στρόβιλο, ο οποίος κινεί τον συμπιεστή και παράγει ισχύ από την περιστροφή του ρότορα. Με τη βοήθεια ενός εναλλάκτη θερμότητας, μεταφέρεται ένα μέρος της απορριπτόμενης θερμότητας των καυσαερίων στο συμπιεσμένο αέρα, τον οποίο προθερμαίνουν καθώς αυτός διαβιβάζεται από τον συμπιεστή στον θάλαμο καύσης. Με τον τρόπο αυτό απαιτείται λιγότερο καύσιμο για να θερμάνει το αέριο μίγμα μέχρι τη θερμοκρασία εισαγωγής. Με την ανάκτηση ενός μέρους της ενέργειας που χάνεται με τη μορφή απορριπτόμενης θερμότητας από τα προϊόντα της καύσης, ο εναλλάκτης θερμότητας κάνει το σύστημα πιο αποδοτικό⁽¹¹⁾.

Όπως φαίνεται και από την εικόνα 7, τα βασικά συστατικά μέρη ενός συστήματος μικροτουρμπίνας αποτελούν ο συμπιεστής, η ηλεκτρογεννήτρια και ο εναλλάκτης θερμότητας. Το σύστημα συμπιεστής – τουρμπίνα συνήθως συνδέεται με την ηλεκτρογεννήτρια μέσω άξονα στηριζόμενου από δυο τριβείς. Τα συστήματα μικροστρόβιλων με μονό άξονα έχουν μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης και βελτιωμένη αξιοπιστία⁽¹⁾.



Εικόνα 7. Σχηματική αναπαράσταση ενός ολοκληρωμένου συστήματος μικροτροβίλου κατάλληλου για εφαρμογές συμπαγωγής (H.I. Ononwiona et al, 2006)

Η ταχύτητες περιστροφής του άξονα ενός τέτοιου συστήματος φτάνουν τα 80.000-120.000 rpm. Το μέγεθος των στοιχείων της μηχανής και η ταχύτητα περιστροφής επηρεάζονται σημαντικά από τα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά του συστήματος τουρμπίνα – συμπιεστή. Εγκαταστάσεις σχετικά μικρής δυναμικότητας παρουσιάζουν αυξημένη ταχύτητα περιστροφής⁽¹⁾.

2.2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Ενώ η τεχνολογία που εφαρμόζεται στις παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης είναι εδραιωμένη, για τα συστήματα μικρο-τουρμπίνων υπάρχει έλλειψη δεδομένων που προέρχεται από ένα περιορισμένο αριθμό επιδείξεων. Τα δεδομένα που αφορούν τον πραγματικό βαθμό απόδοσης, τη διάρκεια ζωής, τα λειτουργικά κόστη και τα κόστη συντήρησης δεν έχουν ευρέως γνωστοποιηθεί εξαιτίας των ελαχίστων πρακτικών δοκιμών πάνω σε αυτή τη τεχνολογία⁽¹⁾. Ομοίως, η πληροφόρηση πάνω σε θέματα αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας των μηχανών αυτών παραμένει ανεπαρκής λόγω της περιορισμένης πρακτικής εμπειρίας, αν και οι ίδιοι οι κατασκευαστές διαβεβαιώνουν ότι η διαθεσιμότητα των συστημάτων φτάνει το 90-95%⁽¹⁾.

2.2.2.1 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ

Η προσθήκη του εναλλάκτη θερμότητας στο σχεδιασμό της μικρο-τουρμπίνας συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου και επομένως στην ενεργειακή εξοικονόμηση ανεβάζοντας τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος. Ο εναλλάκτης έχει δυο λειτουργικές παραμέτρους: την αποδοτικότητα και την πτώση της πίεσης. Για να έχει το σύστημα προθέρμανσης υψηλή αποδοτικότητα πρέπει ο εναλλάκτης να έχει μεγάλο εμβαδό επιφάνειας, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε μεγαλύτερη πτώση πίεσης αυξάνοντας έτσι το κόστος. Επιπρόσθετα, ο τρόπος σύνδεσης του εναλλάκτη με την παροχή

του συμπιεστή, με το σύστημα εκτόνωσης της τουρμπίνας, με το στόμιο εισροής στο θάλαμο καύσης και το σύστημα εξαγωγής των καυσαερίων αποτελεί πρόκληση για τους σχεδιαστές να κρατήσουν σταθερή την πίεση και το κόστος κατασκευής σε χαμηλά επίπεδα χωρίς περιορισμούς στην αξιοπιστία του συστήματος. Εξοικονόμηση καυσίμου της τάξεως του 30-40% μπορεί να επιτευχθεί με τις διεργασίες προθέρμανσης από ένα συμβατικό σύστημα εναλλάκτη θερμότητας⁽¹⁰⁾. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται σε ένα τέτοιο σύστημα είναι ο ανοξείδωτος χάλυβας για μέγιστες θερμοκρασίες λειτουργίας 650°C, κράμα Inconel για θερμοκρασίες λειτουργίας 800°C και κεραμικά υλικά για θερμοκρασίες μεγαλύτερες των 870°C⁽¹⁾.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά ενός αριθμού διαθέσιμων συστημάτων συμπαραγωγής από μικρο-τουρμπίνες συνοψίζονται στον πίνακα 4⁽¹⁾. Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης αυξάνει όσο μεγαλώνει η ονομαστική ισχύς της μικρο-τουρμπίνας. Ωστόσο, ο ηλεκτρικός καθώς και ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος συμπαραγωγής από μικρο-τουρμπίνες είναι αισθητά μειωμένος σε σχέση με άλλα συστήματα που λειτουργούν με μηχανές εσωτερικής καύσης ή κυψέλες καυσίμου.

Πίνακας 4. Λειτουργικά χαρακτηριστικά μικρο-τουρμπίνων (H.I. Ononwiona et al, 2006)

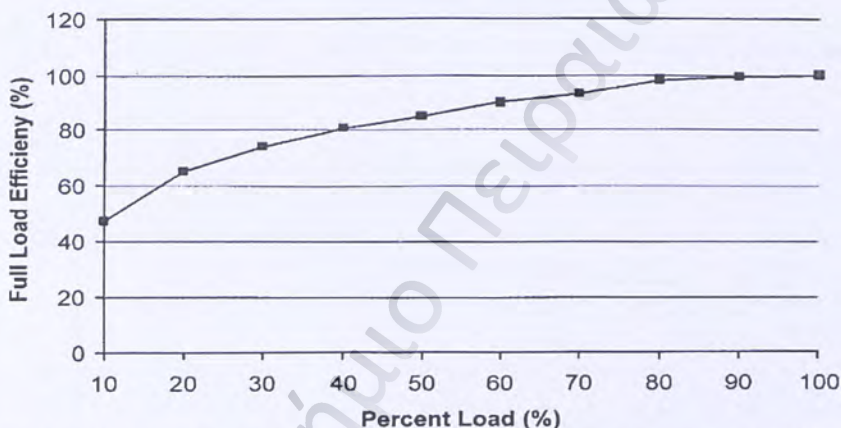
	Capstone 330 micro-turbine	Ingersoll Rand (IR) energy systems	Turbec T100
Ονομαστική ηλεκτρική ισχύς (kW)	30	70	100
Ρυθμός παραγωγής θερμότητας (electric heat rate), HHV (Btu/kWh)	14,581	13,540	12,639
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (%)	23.4	25.2	27.0
Θερμική ικανότητα εισαγωγής καυσίμου (MMBtu/h)	0.437	0.948	1.264
Απαιτούμενη πίεση λειτουργίας αερίου (psig)	55	55	75
Παροχή καυσαερίων (kg/s)	0.33	0.63	0.78
Θερμοκρασία καυσαερίων (F)	500	435	500
Θερμοκρασία εξόδου από τον εναλλάκτη θερμότητας (F)	150	130	131
Θερμική ικανότητα αερίου στην έξοδο (MMBtu/h)	0.218	0.369	0.555
Ισοδύναμη θερμική ισχύς στην έξοδο (kW equivalent)	64	108	163
Συνολικός βαθμός απόδοσης (%), HHV	73	64	71
Λόγος ισχύος/θερμότητα	0.47	0.65	0.62
Καθαρός ρυθμός παραγωγής θερμότητας (Net heat rate) (Btu/kWh)	5509	6952	5703

Η απόδοση της μικρο-τουρμπίνας μπορεί να αυξηθεί με αύξηση της μέγιστης πίεσης και θερμοκρασίας του κύκλου και με την παράλληλη επιλογή υλικών κατάλληλων για το σκοπό

αυτό. Ωστόσο, οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλά επίπεδα εκπομπών NO_x , παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο γενικό σχεδιασμό ⁽¹⁰⁾.

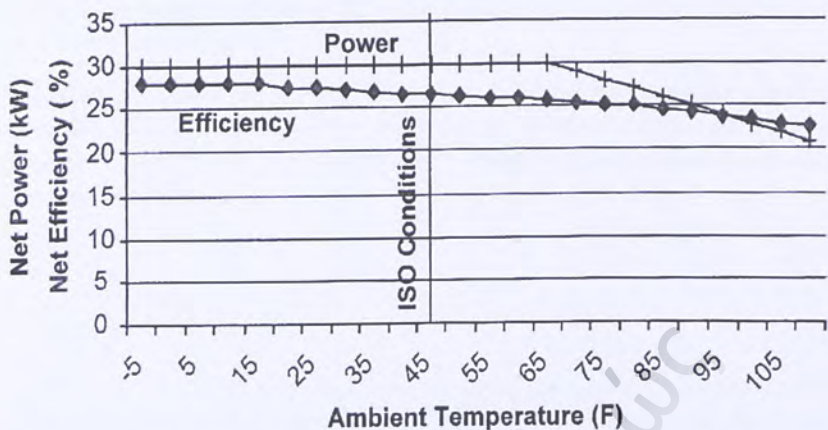
2.2.2.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΜΕΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Η συνολική παραγωγή ενός συστήματος μικρο-τουρμπίνας και επομένως η απόδοση της λειτουργίας του συστήματος σε μερικό φορτίο, ελαττώνεται με τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του συμπιεστή (μείωση του ρυθμού ροής του αέρα) και τη μείωση της θερμοκρασίας εισόδου στην τουρμπίνα. Η απόδοση σε μερικά φορτία για ένα τέτοιο σύστημα ισχύος 30 kW δίνεται στο διάγραμμα της εικόνας 8 ⁽¹¹⁾.

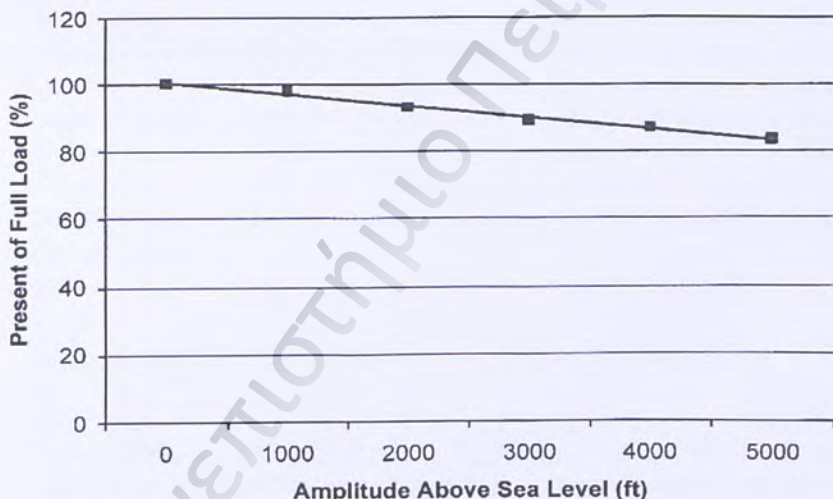


Εικόνα 8. Απόδοση σε μερικά φορτία για ένα σύστημα μικρο-τουρμπίνας με ονομαστική ισχύ 30 kW (H.I. Ononwiona et al, 2006)

Οι περιβάλλουσες συνθήκες επηρεάζουν τη συνολική παραγωγή και την απόδοση του συστήματος. Έτσι, η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης πέφτουν με την άνοδο της θερμοκρασίας εισόδου. Η μείωση στην ισχύ αποδίδεται στη μείωση του ρυθμού ροής του αέρα, εφόσον η πυκνότητα του αέρα μειώνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και η μείωση του βαθμού απόδοσης οφείλεται στην ανάγκη για μεγαλύτερη απόδοση σε ισχύ από τον συμπιεστή ώστε να συμπιέσει τον αέρα σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες. Για τους ίδιους λόγους, η ισχύς και ο βαθμός απόδοσης μειώνονται με την πτώση της πίεσης και με την αύξηση του υψομέτρου. Η εικόνα 9 παρουσιάζει τις διακυμάνσεις σε ισχύ και βαθμό απόδοσης συναρτήσει της περιβάλλουσας θερμοκρασίας ⁽¹²⁾ για ένα σύστημα μικρο-τουρμπίνας με ισχύ 30 kW της Capstone ενώ στην εικόνα 10 καταγράφεται η μεταβολή του φορτίου με την αλλαγή του υψομέτρου ⁽¹¹⁾.



Εικόνα 9. Επίδραση της περιβάλλουσας θερμοκρασίας στη λειτουργία ενός συστήματος μικρο-τουρμπίνας ισχύος 30 kW και κατασκευής της Capstone (<http://www.microturbine.com>)



Εικόνα 10. Επίδραση του υψομέτρου στη λειτουργία του συστήματος (H.I. Ononwiona et al, 2006)

2.2.2.3 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Η μοναδική πηγή ανάκτησης θερμότητας από ένα σύστημα συμπαραγωγής που βασίζεται στη λειτουργία μικρο-τουρμπίνας προέρχεται από τη θερμότητα των καυσαερίων. Κατά γενικό κανόνα, ένα ολοκληρωμένο σύστημα εναλλακτών θερμότητας εκμεταλλεύεται τη θερμότητα των καυσαερίων πριν αυτά απελευθερωθούν στην ατμόσφαιρα. Ανάλογα με το σκοπό της εφαρμογής, μπορεί να παραχθεί ατμός ή ζεστό νερό. Για παράδειγμα, ένα σύστημα συμπαραγωγής με μικρο-τουρμπίνα ισχύος 80 kW που διατίθεται από την Kohler παράγει ζεστό νερό σε θερμοκρασία 70-90°C και πίεση πάνω από 350kPa με δυνατότητα

αύξησης της πίεσης και της θερμοκρασίας της μονάδας με την προοπτική της διασύνδεσης με ένα ψύκτη απορρόφησης ⁽¹⁾.

Η χρήση του εναλλάκτη θερμότητας (βλ. εικόνα 7) αυξάνει την ηλεκτρική απόδοση του συστήματος, αλλά επίσης μειώνει τα ποσά ανακτώμενης θερμότητας των καυσαερίων. Για το λόγο αυτό, η χρήση ενός τέτοιου συστήματος μπορεί να είναι επιθυμητή ή όχι ανάλογα με το σκοπό της εφαρμογής.

2.2.2.4 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Λόγω της απλοϊκής τους κατασκευής και του ελάχιστου αριθμού των κινητών εξαρτημάτων τα συστήματα μικρο-τουρμπίνων μπορούν να εμφανίζουν μειωμένα κόστη συντήρησης σε σχέση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης. Από τη στιγμή που το λιπαντικό μέσο απομονώνεται από τα προϊόντα της καύσης, οι μικρο-τουρμπίνες δεν χρειάζονται συχνή αλλαγή λαδιών. Επίσης, αν χρησιμοποιείται έδραση σε στρώμα αέρα (air bearings) σε μηχανές με μονό άξονα, δεν χρειάζεται κάποιο λιπαντικό μέσο ή νερό, με αποτέλεσμα να μειώνονται οι ανάγκες συντήρησης ακόμα περισσότερο. Φυσιολογικά, προληπτική συντήρηση πραγματοποιείται μια φορά το χρόνο ενώ τα κόστη συντήρησης φτάνουν τα 0.004-0.006 €/kWh ⁽¹⁾. Πολλοί κατασκευαστές προτείνουν τυποποιημένα συστήματα με προσφορές συντήρησης στα 0.006 €/kWh τα οποία περιλαμβάνουν τακτικές επιθεωρήσεις στον καυστήρα, αλλαγή λαδιών και αντικατάσταση φίλτρων αέρα και λαδιού. Μια λεπτομερής επιθεώρηση είναι αναγκαία κάθε 20.000-40.000 ώρες ⁽¹⁾ και περιλαμβάνει την αντικατάσταση του κεντρικού άξονα και, αν κριθεί απαραίτητη, την αντικατάσταση του θαλάμου καύσης.

2.2.3 ΕΚΠΟΜΠΕΣ

Τα επίπεδα εκπομπών είναι γενικά χαμηλά. Οι μηχανές αυτές σχεδιάζονται έτσι ώστε να πετυχαίνουν χαμηλά επίπεδα εκπομπών σε πλήρες φορτίο αλλά, αρκετά υψηλότερα όταν λειτουργούν σε συνθήκες μερικού φορτίου. Οι κυριότεροι ρυπαντές των συστημάτων μικρο-τουρμπίνων είναι τα NO_x, το CO και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες. Τα ποσοστά του SO₂ είναι αμελητέα. Τα χαρακτηριστικά των εκπομπών για τα τρία συστήματα μικρο-τουρμπίνων του πίνακα 4 καταγράφονται στον επόμενο πίνακα (5) σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών ⁽¹⁾.

	Capstone 330 micro-turbine	Ingersoll Rand (IR) energy systems	Turbec T100
Ονομαστική ισχύς (kW)	30	70	100
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (%), HHV	23	25	27
NO _x , ppmv	9	9	15
NO _x , kg/MWh	0.23	0.23	0.36
CO, ppmv	40	9	15
CO, kg/MWh	0.66	0.14	0.22
THC, ppmv	≤ 9	≤ 9	≤ 10
THC, kg/MWh	≤ 0.09	≤ 0.08	≤ 0.09
CO ₂ , kg/MWh	868	798	768
Carbon, kg/MWh	237	218	209

Το NO_x παριστάνει ένα μίγμα NO και NO₂ σε ευμετάβλητη αναλογία. Στις μικρο-τουρμπίνες σχηματίζεται κυρίως από τη δέσμευση του οξυγόνου και του αζώτου κάτω από υψηλές θερμοκρασίες καύσης (thermal NO_x). Τα επίπεδα των εκπομπών επηρεάζονται από τη θερμοκρασία της φλόγας και το χρόνο παραμονής. Επίσης, μικρά επίπεδα εκπομπών προέρχονται από πρόωρες αντιδράσεις των στοιχείων του αζώτου στον αέρα της καύσης και από ρίζες υδρογονανθράκων του καυσίμου (prompt NO_x). Τέλος, ένα ποσοστό μπορεί να προκύψει από το καύσιμο όταν αυτό περιέχει άζωτο ως μέρος της δομής του υδρογονάνθρακα (fuel-bound NO_x). Ωστόσο η χημική σύσταση του φυσικού αερίου δεν περιλαμβάνει μεγάλα ποσοστά αζώτου και επομένως τα επίπεδα εκπομπών που προέρχονται από ένα τέτοιο μηχανισμό είναι αμελητέα⁽¹⁾.

Οι εκπομπές CO από τις μικρο-τουρμπίνες προκύπτουν από ατελή καύση των φυσικών καυσίμων. Ο ανεπαρκής χρόνος παραμονής σε υψηλές θερμοκρασίες και η αδυναμία απομάκρυνσης του CO από τον αέρα του θαλάμου καύσης είναι οι κυριότεροι λόγοι που μπορούν να οδηγήσουν σε εκπομπές CO. Συνήθως, οι εκπομπές ελέγχονται σε επίπεδα κάτω από 50ppm. Σε μερικά φορτία τα επίπεδα μπορεί να είναι αυξημένα λόγω ατελούς καύσης⁽¹⁾.

Όπως συμβαίνει και στις μηχανές εσωτερικής καύσης, το CO₂ δεν έχει άμεση επίπτωση στη δημόσια υγεία. Ωστόσο οι εκπομπές CO₂ πρέπει να ληφθούν υπόψη εξαιτίας της συμμετοχής του στη επιδείνωση του φαινομένου του θερμοκηπίου. Τα επίπεδα CO₂ των μικρο-τουρμπίνων επηρεάζονται από τη σύσταση σε άνθρακα του καυσίμου και από την απόδοση του συστήματος. Η χρήση του καυσίμου φυσικού αερίου σε συνδυασμό με έναν υψηλό συνολικό βαθμό απόδοσης μπορεί να οδηγήσει σε χαμηλά επίπεδα εκπομπών CO₂.

2.2.4 ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΗΘ ΑΠΟ ΜΙΚΡΟ-ΤΟΥΡΜΠΙΝΕΣ ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΚΟΣΤΗ

Τα συστήματα μικρο-τουρμπίνων ποικίλουν σε μεγέθη από 25-80 kW. Έρευνα συντελείται για την ανάπτυξη συστημάτων σε μεγέθη μικρότερα των 25 kW (1-10 kW) ⁽¹⁰⁾. Τα συστήματα αυτά λανσάρονται στην αγορά για να καλύψουν τα ηλεκτρικά και τα θερμικά φορτία σε βιομηχανικές, εμπορικές και οικιακές εφαρμογές. Παραδείγματα συστημάτων μικρο-τουρμπίνων που διατίθενται σε οικιακές και εμπορικές εφαρμογές συμπαραγωγής αναφέρονται στο μοντέλο ισχύος 30 kW της Capstone και στο μοντέλο της Honeywell Power Systems με ισχύ 75 kW ⁽⁷⁾. Επίσης, η εταιρία Elliot/Bowman έχει κατασκευάσει δύο μοντέλα ισχύος 45 και 80 kW, η Kohler Power Systems με μια μονάδα ισχύος 80 kW και η Turbec με το μοντέλο T100 ισχύος 105 kW ⁽¹¹⁾. Η εταιρία Northern Research & Engineering συμμετέχει στην ανάπτυξη αρκετών μηχανών με εγκατεστημένη ισχύ από 30-250 kW, ενώ στις εταιρίες που έχουν εκφράσει το ενδιαφέρον τους στην ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων συμπαραγωγής συμπεριλαμβάνονται οι Volvo, ABB, Toyota, Allison Engine Company, Williams International και Teledyne Continental Motors ⁽¹⁾.

Τα κόστη εγκατάστασης παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 6 για τρεις αντιπροσωπευτικές μονάδες συμπαραγωγής με την προϋπόθεση ότι το σύστημα παράγει ζεστό νερό.

Πίνακας 6. Εκτιμώμενα κόστη κεφαλαίου (H.I. Ononwiona et al, 2006)

	Capstone 330 micro-turbine	Ingersoll Rand (IR) energy systems	Turbec T100
Όνομαστική ισχύς (kW)	30	70	100
Κόστος εξοπλισμού(€)			
Σύστημα μικρο- τουρμπίνας/συμπιεστή	688	709	551
Σύστημα ανάκτησης θερμότητας	155	Συμπεριλαμβ.	Συμπεριλαμβ.
Σύστημα ελέγχου	123	98	83
Σύνολο εξοπλισμού	966	808	634
Κόστος εργασίας/υλικών (€)			
Αρχική μελέτη	287	232	156
Αμοιβή μηχανικού	106	101	77
Συμπληρωματικά κόστη	50	40	31
Συνολικό κόστος εγκατάστασης	1.733	1.399	1.075

2.3 ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING

Η τεχνολογία των μηχανών Stirling σε εφαρμογές συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας δεν είναι ακόμα απόλυτα ανεπτυγμένη. Ωστόσο, έχει πολύ καλή προοπτική και τα πλεονεκτήματά της εντοπίζονται στη υψηλή απόδοση, στη μεγαλύτερη ευελιξία επιλογής

καυσίμου, στις χαμηλές εκπομπές ρύπων, στη χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών αλλά και στην καλή συμπεριφορά σε συνθήκες μερικού φορτίου ⁽³⁾. Αντίθετα με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, η θερμότητα προέρχεται από εξωτερικές πηγές, επιτρέποντας τη χρήση ενός μεγάλου φάσματος ενεργειακών πηγών όπως είναι τα φυσικά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή ενέργεια, βιομάζα). Επειδή η καύση είναι εξωτερική και ο κύκλος λειτουργίας τους κλειστός, τα κινούμενα μέρη του κινητήρα δεν εκτίθενται στα προϊόντα της καύσης, με αποτέλεσμα να είναι περιορισμένες οι φθορές και να μειώνονται οι ανάγκες τακτικής συντήρησης ⁽³⁾. Απαιτούνται, όμως, πολύ αποτελεσματικές και δύσκολα επιτεύξιμες στεγανωτικές διατάξεις για την αποφυγή διαρροών, τόσο του αερίου υψηλής πίεσης προς το εξωτερικό του κυλίνδρου, όσο και του λιπαντικού προς το εσωτερικό του κυλίνδρου. Έτσι, η κατασκευή αποτελεσματικών διατάξεων στεγανοποίησης με ικανοποιητική διάρκεια ζωής είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν.

2.3.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Οι μηχανές Stirling αναπτύσσονται τα τελευταία χρόνια με τη μορφή μηχανών εξωτερικής καύσης με αναγέννηση, των οποίων ο κύκλος μοιάζει αρκετά με τον ιδανικό κύκλο Carnot ⁽¹⁾.

Ο ιδανικός κύκλος Otto που αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα αποτελείται εξ' ολοκλήρου από εσωτερικά αντιστρεπτές διεργασίες και συνεπώς είναι εσωτερικά αντιστρεπτός κύκλος. Παρόλα αυτά, ο κύκλος δεν είναι ολικά αντιστρεπτός, αφού εμπλέκει μεταφορά θερμότητας μέσω μιας πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια των μη ισο-θερμοκρασιακών διεργασιών προσθήκης και απόρριψης θερμότητας, οι οποίες είναι μη αντιστρεπτές.

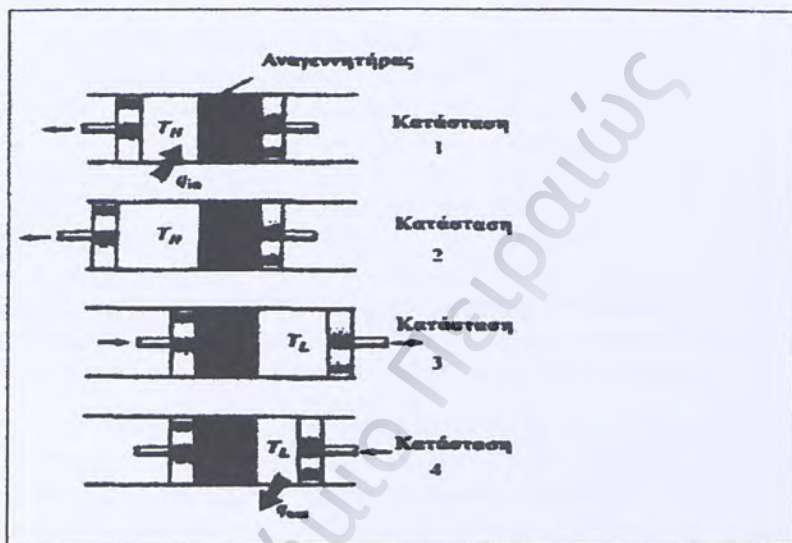
Οι ισόθερμες διεργασίες προσθήκης και απόρριψης θερμότητας, που πραγματοποιούνται σε θερμοκρασίες T_H και T_L αντίστοιχα, εμφανίζονται και σε έναν ακόμη κύκλο που είναι γνωστός ως κύκλος του Stirling. Η προθέρμανση (αναγέννηση) είναι μια διεργασία με τη βοήθεια της οποίας, στη διάρκεια ενός τμήματος του κύκλου, πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας σε μια συσκευή αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (που ονομάζεται προθερμαντήρας ή αναγεννητήρας) και κατά τη διάρκεια ενός άλλου τμήματος του κύκλου επαναφοράς της θερμικής αυτής ενέργειας στο ρευστό λειτουργίας.

Ο κύκλος Stirling αποτελείται από τις εξής τέσσερις ολικά αντιστρεπτές διεργασίες :

- (1-2): Ισόθερμη εκτόνωση ($T =$ σταθερή, προσθήκη θερμότητας από εξωτερική πηγή)
- (2-3): Ισόθερμη προθέρμανση ($u =$ σταθερή, εσωτερική μεταφορά θερμότητας από το ρευστό λειτουργίας στον προθερμαντήρα)
- (3-4): Ισόθερμη συμπίεση ($T =$ σταθερή, απόρριψη θερμότητας σε εξωτερική δεξαμενή)

- (4-1): Ισόχωρη αναγέννηση ($u = \text{σταθερή}$, εσωτερική μεταφορά θερμότητας από τον προθερμαντήρα πίσω στο ρευστό λειτουργίας).

Η πραγματοποίηση του κύκλου Stirling απαιτεί πολλές κατασκευαστικές καινοτομίες. Οι πραγματικές μηχανές Stirling, όπως και η πρωτότυπη που σχεδιάστηκε από τον Robert Stirling, είναι πολύπλοκες και έχουν μεγάλο βάρος. Η πραγματοποίηση του κύκλου Stirling μέσα σε ένα κλειστό σύστημα είναι δυνατόν να περιγραφεί χωρίς πολύπλοκες λεπτομέρειες, με τη βοήθεια της υποθετικής μηχανής του παρακάτω σχήματος ⁽¹³⁾.



Εικόνα 12. Αποτύπωση κύκλου Stirling (Dr.Tsirikoglou T., 2006)

Καθώς το αέριο εκτονώνεται ισόθερμα, το αριστερό έμβολο κινείται προς τα έξω (βλέπε κατάσταση 1) παράγοντας έργο, ενώ η πίεση του αερίου μειώνεται. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας (2-3), τα δύο έμβολα κινούνται με την ίδια ταχύτητα προς τα δεξιά (ώστε ο όγκος να διατηρείται σταθερός) έως ότου περάσει όλη η ποσότητα του αερίου αναγκαστικά στο δεξιό θάλαμο. Καθώς το αέριο διέρχεται δια μέσου του προθερμαντήρα, μεταφέρεται θερμότητα από το αέριο στον προθερμαντήρα και η θερμοκρασία του αέρα μειώνεται από T_H σε T_L . Για να είναι αντιστρεπτή αυτή η διεργασία μεταφοράς θερμότητας, η διαφορά θερμοκρασίας ανάμεσα στο αέριο και στον αναγεννητήρα δε θα πρέπει σε κανένα σημείο να υπερβαίνει μια διαφορική ποσότητα dT . Έτσι όταν αποκατασταθεί η κατάσταση 3, η θερμοκρασία του αναγεννητήρα θα είναι T_H στο αριστερό και T_L στο δεξιό άκρο. Κατά τη διάρκεια της διεργασίας (3-4), το δεξιό έμβολο κινείται προς τα μέσα συμπιέζοντας το αέριο. Καθώς η πίεση αυξάνεται, πραγματοποιείται μεταφορά θερμότητας από το αέριο σε μια δεξαμενή θερμοκρασίας T_L , με αποτέλεσμα η θερμοκρασία του αερίου να παραμένει σταθερή. Τελικά, κατά τη διάρκεια της διεργασίας (4-1) τα δύο έμβολα κινούνται με την ίδια ταχύτητα προς τα αριστερά (ώστε ο όγκος να διατηρείται σταθερός), «σπρώχνοντας» τη συνολική ποσότητα του αερίου μέσα στον αριστερό θάλαμο. Η θερμοκρασία του αερίου, καθώς αυτό διέρχεται δια μέσου του προθερμαντήρα, αυξάνεται από T_L σε T_H , ανακτώντας

τη θερμική ενέργεια που είχε αποθηκευτεί σε αυτόν κατά τη διάρκεια της διεργασίας (2-3). Με τον τρόπο αυτό ο κύκλος ολοκληρώνεται.

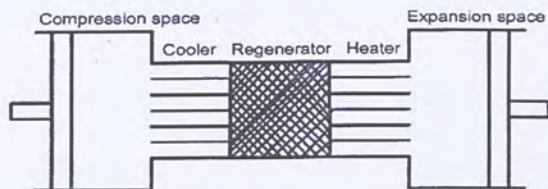
Αξίζει να παρατηρηθεί ότι η δεύτερη ισόχωρη ($u = \text{σταθ.}$) διεργασία πραγματοποιείται σε μικρότερο όγκο από την πρώτη. Επιπλέον, η καθαρή μεταφορά θερμότητας στον προθερμαντήρα κατά τη διάρκεια ενός κύκλου είναι αμελητέα. Αυτό σημαίνει πως η ποσότητα της θερμικής ενέργειας που αποθηκεύτηκε στον προθερμαντήρα κατά τη διεργασία (2-3), ισούται με την ποσότητα της θερμικής ενέργειας που επανέκτησε το αέριο κατά τη διεργασία (4-1).

Ο κύκλος Stirling είναι δύσκολο να επιτευχθεί στην πράξη, γιατί σε αυτόν εμπλέκεται μεταφορά θερμότητας κατά μήκος μιας διαφορικής θερμοκρασιακής διαφοράς, σε όλα τα εξαρτήματα και στον προθερμαντήρα. Κάτι τέτοιο απαιτεί την ύπαρξη πολύ μεγάλων επιφανειών για τη μεταφορά θερμότητας ή την πάροδο άπειρου χρόνου για την εκτέλεση της διεργασίας. Στην πράξη δεν μπορεί να συμβεί τίποτα από όλα αυτά. Όλες οι διεργασίες μεταφοράς θερμότητας θα πραγματοποιηθούν κατά μήκος μιας πεπερασμένης διαφοράς θερμοκρασίας, ο προθερμαντήρας θα έχει απόδοση μικρότερη από 100% και οι απώλειες πίεσης σε αυτόν θα είναι σημαντικές. Εξαιτίας αυτών των περιορισμών, ο κύκλος Stirling αποτέλεσε για καιρό αντικείμενο αποκλειστικά θεωρητικού ενδιαφέροντος. Παρόλα αυτά, το ενδιαφέρον για τις μηχανές που λειτουργούν σύμφωνα με αυτόν τον κύκλο αρχίζει να αυξάνεται λόγω των δυνατοτήτων που παρέχουν για υψηλότερες αποδόσεις.

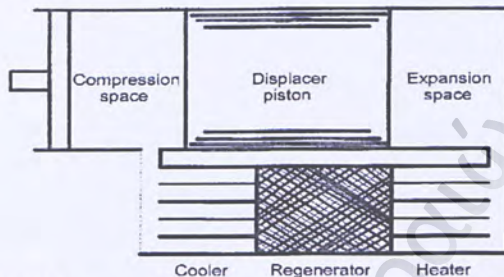
Τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των μηχανών αυτών εντοπίζονται στην μεγάλη ευελιξία επιλογής καυσίμου, στη χαμηλή στάθμη θορύβου, στις μηδενικές φθορές, στην ελάχιστη συντήρηση, στην μεγάλη διάρκεια ζωής, στη ευκολία διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο, στη συνεχόμενη λειτουργία και στην εν δυνάμει υψηλή συνολική απόδοση⁽¹⁾. Σήμερα, οι μηχανές ελευθέρων εμβόλων έχουν ισχύ έως μερικές δεκάδες kWatts και είναι κατάλληλες για οικιακές και μικρής κλίμακας εμπορικές εφαρμογές.

2.3.2 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ

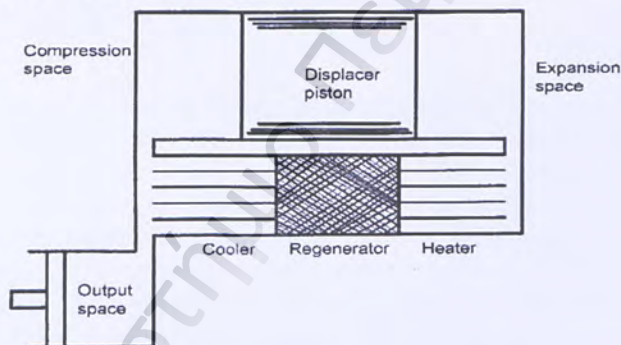
Οι μηχανές Stirling ταξινομούνται με βάση το μηχανισμό λειτουργίας τους σε: διατάξεις Alpha, Beta, και Gamma όπως φαίνεται στην εικόνα 11. Ο σχηματισμός Alpha περιλαμβάνει δύο έμβολα σε χωριστούς κυλίνδρους που συνδέονται στη σειρά μέσω του αναγεννητήρα. Οι σχηματισμοί Beta και Gamma χρησιμοποιούν ένα έμβολο εκτόπισης (displacer). Η διαφορά τους βρίσκεται στο ότι ο σχηματισμός Beta περιλαμβάνει το έμβολο ισχύος και το σύστημα εκτόπισης στον ίδιο κύλινδρο ενώ ο σχηματισμός Gamma χρησιμοποιεί διαφορετικούς κυλίνδρους⁽³⁾.



(a) Alpha engine



(b) Beta engine



(c) Gamma engine

Εικόνα 11. Ταξινόμηση των διατάξεων Stirling (Frangopoulos CA., 2001)

2.3.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Μια καλά σχεδιασμένη μηχανή Stirling εμφανίζει δύο παλμούς ισχύος ανά περιστροφή (συστήματα διπλής ενέργειας) και συνεχόμενη καύση. Οι παράγοντες αυτοί επιδρούν στην ομαλή λειτουργία της μηχανής, βοηθώντας στη μείωση της στάθμης θορύβου και κραδασμών, και του επιπέδου των εκπομπών σε σχέση με τις παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης⁽³⁾. Επιπλέον η διεργασία της εξωτερικής καύσης δίνει ευελιξία στην επιλογή του καυσίμου με μεγαλύτερους χρόνους ανάσχεσης στο θάλαμο καύσης. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα καλύτερο έλεγχο και μεγαλύτερη απόδοση στη διεργασία της καύσης.

Ο κύκλος Stirling έχει το πλεονέκτημα της επίτευξης υψηλότερων αποδόσεων σε σχέση με αυτές των κύκλων Rankine και Joule, καθώς προσομοιάζει αρκετά με τον κύκλο Carnot. Προς το παρόν, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι περίπου 40%, με μια προοπτική αύξησης μέχρι και 50%. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής από μια μηχανή Stirling κυμαίνεται μεταξύ 65-85% με ένα λόγο ισχύος/θερμότητας μεταξύ 1.2 και 1.7. Η μηχανή Stirling εμφανίζει καλή συμπεριφορά σε συνθήκες μερικού φορτίου. Υπολογίζεται ότι ενώ η απόδοση του συστήματος σε πλήρη λειτουργία μπορεί να είναι 35-50%, η απόδοση σε ποσοστό 50% του πλήρους φορτίου αναμένεται να είναι 34-39%⁽³⁾.

Από τη στιγμή που η τεχνολογία βρίσκεται ακόμη στο στάδιο της ανάπτυξης, δεν υπάρχουν στατιστικά δεδομένα σχετικά με την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα των μηχανών αυτών. Ωστόσο, θεωρείται ότι τα επίπεδα αξιοπιστίας των μηχανών Stirling είναι συγκρίσιμα με των μηχανών Diesel, με μια μέση ετήσια διαθεσιμότητα της τάξεως του 85-90%⁽³⁾.

2.3.3.2 ΑΝΑΚΤΗΣΗ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

Οι πηγές της θερμότητας που μπορεί ανακτηθεί σε μια μηχανή Stirling που λειτουργεί με καύσιμο φυσικό αέριο αναφέρονται στο σύστημα ψύξης, στον εναλλάκτη θερμότητας των καυσαερίων και σε μικρότερο βαθμό στο λιπαντικό μέσο και στα τοιχώματα του κυλίνδρου. Σε μια μηχανή Stirling φυσικού αερίου που κατασκευάστηκε από τη Solo Company, το εργαζόμενο αέριο φεύγει από τον προθερμαντήρα σε θερμοκρασία 200-300°C πριν οδηγηθεί στον εναλλάκτη θερμότητας όπου μειώνεται περίπου κατά 30°C πάνω από την θερμοκρασία εισόδου του νερού ψύξης. Ανάλογα με τη στάθμη της θερμοκρασίας εισόδου και την αναμενόμενη συμπύκνωση, το σύστημα μπορεί να ανακτήσει από τη διεργασία επιπλέον 2-4 kW θερμικής ισχύος. Η μονάδα συμπαραγωγής Solo Stirling 161 CHO έχει θερμική ισχύ 8-26 kW και ηλεκτρική ισχύ 2-9.5 kW. Ενώ ο βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης φτάνει το 22-24%, η συνολική απόδοση μπορεί να ξεπεράσει το 92% ανάλογα με την ποσότητα της θερμότητας που ανακτάται⁽¹⁾.

2.3.3.3 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Σε αντίθεση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης, οι μηχανές Stirling έχουν αποτελεσματικές διατάξεις στεγανοποίησης του θαλάμου που μειώνουν τις φθορές και τις απαιτήσεις συντήρησης. Οι μηχανές με εγκατεστημένη ισχύ κάτω των 20 kW έχουν διαστήματα τακτικής συντήρησης από 5.000-8.000 ώρες συνεχούς λειτουργίας, τα οποία είναι αρκετά αυξημένα συγκριτικά με τα αντίστοιχα διαστήματα μιας μηχανής Otto ίσου μεγέθους. Το αποτέλεσμα αυτό έχει ως συνέπεια τη μείωση του λειτουργικού κόστους⁽¹⁾. Οι μηχανές Stirling ελευθέρων εμβόλων τείνουν να εξαλείψουν τους μηχανικούς συνδέσμους, τις τριβές και τις φθορές και να προσδώσουν καλύτερη στεγάνωση στο κέλυφος, έχοντας με

τον τρόπο αυτό ελάχιστες απαιτήσεις μηχανικής συντήρησης για μια συνολική διάρκεια λειτουργίας περίπου 10 ετών.

2.3.4 ΕΚΠΟΜΠΕΣ

Οι εκπομπές που προέρχονται από τους καυστήρες των μηχανών Stirling μπορεί να είναι έως και 10 φορές μειωμένες σε σχέση με τα επίπεδα των βενζινοκινητήρων Otto με καταλυτικό μετατροπέα και συγκρίσιμες με τις εκπομπές των καυστήρων αερίου τελευταίας τεχνολογίας. Η μηχανή Solo Stirling που κατασκευάστηκε από την ομώνυμη γερμανική εταιρία, χρησιμοποιεί προθερμαινόμενο αέρα υψηλής αξίας για να πραγματοποιήσει καύση υψηλής απόδοσης παράλληλα με χαμηλές εκπομπές καυσαερίων ⁽¹⁾. Τα καυσαέρια του συστήματος ανακυκλοφορίας, ο προθερμαινόμενος αέρας και το καύσιμο αέριο συνδυάζονται για να περιορίσουν την ανώτατη θερμοκρασία εντός των ορίων οξειδωσης κάτω από τους 1.400°C. Έτσι, επιτυγχάνεται η μείωση των εκπομπών από τα οξειδία του αζώτου που παράγονται από τη διεργασία της καύσης υπό την παρουσία οξυγόνου. Επιπλέον, η συνεχής καύση παράγει μειωμένα επίπεδα εκπομπών σε σχέση με μια συμβατική μονάδα συμπαραγωγής από καύση. Η μηχανή Stirling παράγει 80-120 mg/m³ NO_x, 40-60 mg/m³ CO και ανιχνεύσιμες ποσότητες υδρογονανθράκων και αιθάλης. Η απόδοση και τα χαρακτηριστικά των εκπομπών ενός αντιπροσωπευτικού αριθμού μηχανών Stirling που διατίθενται στο εμπόριο για συμπαραγωγή μικρής κλίμακας δίνονται αναλυτικά στον πίνακα 7 ⁽¹⁾.

Πίνακας 7. Χαρακτηριστικά εκπομπών από μηχανές Stirling (H.I. Onowwiona et al, 2006)

	Solo	DTE energy	DTE energy
Ηλεκτρική ισχύς (kW)	2-9	20	25
Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης (%)	22-24	29.6	29.6
Συνολικός βαθμός απόδοσης (%)	≥ 90	82	82
NO _x (gm/bhph)	0.08-0.12	0.15-0.288	0.15-0.288
CO (gm/bhph)	0.04-0.06	0.32	0.32

2.3.5 ΕΜΠΟΡΙΚΑ ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΗΘ ΑΠΟ ΜΗΧΑΝΕΣ STIRLING ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΚΟΣΤΗ

Ιστορικά, έχουν αναπτυχθεί μηχανές Stirling με εγκατεστημένη ισχύ από 1Watt μέχρι και 1MWatt, ωστόσο, το βέλτιστο μέγεθος αναφορικά με άλλες υπάρχουσες τεχνολογίες που είναι κατάλληλες σε παρόμοιες εφαρμογές αποτελεί πρόβλημα αν ληφθεί υπόψη η οικονομική κατάσταση των μηχανών αυτών. Οι μηχανές Stirling ελευθέρων εμβόλων

παρουσιάζονται ελκυστικές έναντι άλλων ανταγωνιστικών τεχνολογιών σε μεγέθη μικρότερα των 20 kW, δηλαδή σε εμπορικές και οικιακές εφαρμογές.

Ένας μεγάλος αριθμός κατασκευαστών σχετίζονται με την ανάπτυξη μηχανών που είναι κατάλληλες για εφαρμογές συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας. Ο όμιλος των εταιριών Epatec και BG έχει αναπτύξει μια μονάδα συμπαραγωγής 1 kW βασισμένη στη γραμμική τεχνολογία των ελευθέρων εμβόλων. Ο βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης του συστήματος δηλώθηκε στο 16% ⁽¹⁾. Η Whisper Tech παρουσίασε άλλη μια μονάδα 1 kW με χαμηλό βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης στο 12% ⁽¹⁾. Η Νορβηγική εταιρία Sigma ανέπτυξε μια μονάδα με ηλεκτρική ισχύ 3 kW και θερμική 9 kW κατάλληλη για μικρές κατοικίες. Η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος είναι μεγαλύτερη από 25% ⁽¹⁾. Όπως αναφέρθηκε στον παραπάνω πίνακα, η Γερμανική εταιρία Solo ανέπτυξε μια μονάδα συμπαραγωγής από φυσικό αέριο με ηλεκτρική ισχύ 2-9 kW, θερμική ισχύ 8-24 kW και συνολικό βαθμό απόδοσης της τάξεως του 92-96% ⁽¹⁾. Στο χώρο της αγοράς βρίσκεται και η Sunpower Inc με μια μηχανή Stirling ελευθέρων εμβόλων που καίει βιομάζα με παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος 7 kW ⁽¹⁾. Η DTE Energy Technologies έχει παρουσιάσει μια μηχανή Stirling εξωτερικής καύσης με εγκατεστημένη ισχύ 55 kW. Η μηχανή μπορεί να λειτουργήσει με διαφορετικές πηγές καυσίμου έχοντας ένα τυπικό βαθμό απόδοσης πάνω από 30%. Ένα μεγάλο πλεονέκτημα έναντι αντίστοιχων παραδοσιακών παλινδρομικών μηχανών είναι ότι η μηχανή Stirling εμφανίζει 50% λιγότερα κινητά εξαρτήματα ⁽¹⁾.

Οι μηχανές Stirling αποτελούν μια αναδυόμενη τεχνολογία με περιορισμένο, προς το παρόν, αριθμό επιδείξεων. Ωστόσο, μια πρακτική δοκιμή από τη Solo έδειξε ότι το σύστημα λειτουργεί χωρίς σφάλματα για συνεχή λειτουργία άνω των 5.000 ωρών, με συνολικό κόστος στα 8.860 € από τα οποία τα 7.100 € είναι για το κόστος της μηχανής και τα υπόλοιπα εκτιμώνται για βοηθητικές υπηρεσίες και τεχνική διασύνδεση. Επιπρόσθετα, το κόστος συντήρησης της μονάδας εκτιμάται στα 0.009 €/kWh ⁽¹⁾. Προς το παρόν, το κόστος επένδυσης σε μια τέτοια τεχνολογία είναι περίπου διπλάσιο από μια μονάδα συμπαραγωγής που βασίζεται στην τεχνολογία μηχανών εσωτερικής καύσης αλλά το κόστος συντήρησης είναι αισθητά μειωμένο. Τα κόστη συντήρησης αναμένεται να φτάσουν στα 0.004 €/kWh όταν η τεχνολογία των μηχανών Stirling ωριμάσει φτάνοντας στη μαζική παραγωγή ⁽¹⁾.

2.4 ΚΥΨΕΛΕΣ ΚΑΥΣΙΜΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΟΞΕΙΔΙΟΥ (SOLID OXIDE FUEL CELLS)

Στα πλαίσια της αναζήτησης νέων μεθόδων παραγωγής ενέργειας υψηλής απόδοσης και φιλικής προς το περιβάλλον, ένα μεγάλο μέρος ερευνητικών δραστηριοτήτων σε διεθνή κλίμακα έχει στραφεί στην ανάπτυξη της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου, SOFCs (Solid Oxide Fuel Cells). Λόγω της φιλικότητάς τους προς το περιβάλλον τα SOFCs μπορεί να εισαχθούν για χρήση και σε αστικές περιοχές, όπου παράλληλα με την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, είναι δυνατόν να αξιοποιηθεί και η εκλυόμενη θερμική για θέρμανση εσωτερικών χώρων, αυξάνοντας συνολικά την αποτελεσματικότητά τους. Τα

πλεονεκτήματα της συμπαραγωγής από κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου αναφέρονται στη χαμηλή στάθμη θορύβου, στις μικρές απαιτήσεις συντήρησης, στην εξαιρετική συμπεριφορά σε συνθήκες μερικού φορτίου, στα χαμηλά επίπεδα εκπομπών και στις υψηλές αποδόσεις (85-90%) ανεξάρτητα από το μέγεθος της κυψέλης⁽¹⁾. Ωστόσο, τα υψηλά κόστη και η σχετικά χαμηλή διάρκεια ζωής αποτελούν φρένο στην προώθηση τέτοιων συστημάτων.

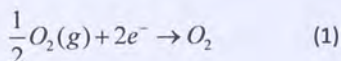
Μια κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) είναι μια ηλεκτροχημική συσκευή που μετατρέπει τη χημική ενέργεια μιας αντίδρασης απευθείας σε ηλεκτρική. Η βασική δομή της κυψέλης καυσίμου αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη σε επαφή με δύο ηλεκτρόδια (εικόνα 13) την άνοδο και την κάθοδο. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας οφείλεται στις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια.

Αντίθετα από τις υπόλοιπες τεχνολογίες κυψελών καυσίμου, τα SOFCs αποτελούνται εξ' ολοκλήρου από στερεού τύπου, συνήθως κεραμικά, υλικά. Η σύνθεσή τους επιτρέπει στα SOFCs να λειτουργήσουν σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από άλλου τύπου κυψέλες καυσίμου. Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (>800 °C) επιτρέπει την εσωτερική αναμόρφωση του καυσίμου, προάγει ταχύτερες κινητικές με μη πολύτιμα υλικά, και παράγει υψηλής ποιότητας θερμότητα ως παραπροϊόν για συμπαραγωγή ή για άλλες χρήσεις. Η υψηλή θερμοκρασία στα SOFCs, όμως, θέτει αυστηρές προϋποθέσεις στα υλικά που μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Η ανάπτυξη κατάλληλων υλικών χαμηλού κόστους και η κατασκευή οικονομικά βιώσιμων κεραμικών δομών είναι αυτή τη στιγμή οι κύριες τεχνικές προκλήσεις των SOFCs.

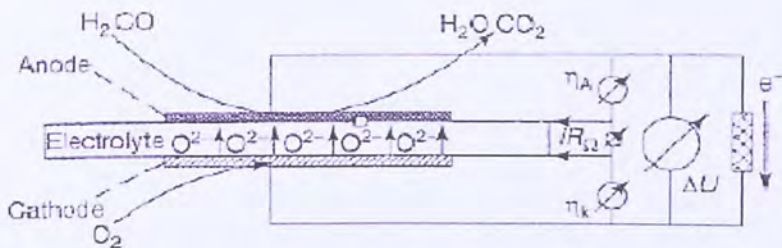
2.4.1 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Μια κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) χαρακτηρίζεται από την χρήση κεραμικού οξειδίου ως στερεού ηλεκτρολύτη, συνήθως YSZ (Yttria stabilized Zirconia), λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες (700-1100°C) και χρησιμοποιεί αέριο καύσιμο και οξειδωτικό μέσο⁽¹⁴⁾. Ο μηχανισμός λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου SOFC είναι ο ακόλουθος: οξυγόνο διασπάται στο ηλεκτρόδιο της καθόδου σε κατιόντα O²⁻, τα οποία μεταφέρονται μέσω του ιοντικού αγωγού-στερεού ηλεκτρολύτη προκειμένου να φτάσουν στο ηλεκτρόδιο της ανόδου όπου αντιδρούν με το καύσιμο (υδρογόνο), παράγοντας νερό και απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια.

Η αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη φαίνεται στην εικόνα 13. Το θετικό ηλεκτρόδιο (κάθοδος) λειτουργεί ως ηλεκτροκαταλύτης για την ηλεκτροκαταλυτική αναγωγή του αερίου O₂(g) σε O²⁻:



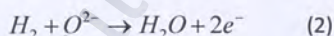
Ως ηλεκτρόδια καθόδου χρησιμοποιούνται κατάλληλοι ηλεκτροκαταλύτες (Pt, Ag κ.α.) για την αντίδραση (1)⁽¹⁴⁾.



Εικόνα 13. Αρχή λειτουργίας μιας κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου (W. Vielstich et al, 2007)

Οι πλέον αποτελεσματικοί ηλεκτροκαταλύτες που χρησιμοποιούνται σήμερα σε εφαρμογές κυψελών καυσίμου είναι περοβσκίτες (δομή οξειδίων με χημική φόρμουλα ABO_3)⁽²⁸⁾ του τύπου $La_{1-x}Sr_xMnO_3$ όπως $(La_{0.85}Sr_{0.15})_0.9MnO_3$ (LSM) ή $La_{0.65}Sr_{0.4}Co_{0.2}Fe_{0.8}MnO_3$ (LSCF). Τα υλικά αυτά είναι μικτοί αγωγοί, εμφανίζουν δηλαδή ταυτόχρονα ιοντική (O^{2-}) και ηλεκτρονική αγωγιμότητα. Η ιδιότητα αυτή ουσιαστικά επεκτείνει την ηλεκτροκαταλυτικά ενεργό περιοχή σε όλη την επιφάνεια του ηλεκτροδίου που βρίσκεται εκτεθειμένη στην αέρια φάση και όχι μόνο στο όριο των τριών φάσεων (ηλεκτρολύτης-μέταλλο-αέρια φάση)⁽¹⁴⁾.

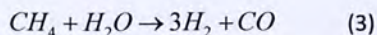
Το αρνητικό ηλεκτρόδιο (άνοδος) ηλεκτροκαταλύει την αντίδραση (2) των ιόντων O^{2-} με το καύσιμο (π.χ. H_2):



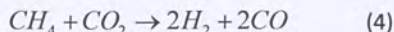
Σύμφωνα με τις νεότερες τάσεις⁽¹⁴⁾, η άνοδος των SOFC αποτελείται από κεραμομεταλλικό μίγμα (cermet) νικελίου-ζιρκονίας (Ni-stabilized ZrO_2 -cermet). Το νικέλιο είναι καλός ηλεκτροκαταλύτης για την παραπάνω αντίδραση και το Ni-ZrO₂-cermet χρησιμοποιείται για τη δημιουργία μεγάλου μήκους ορίου των τριών φάσεων (tri phase boundary ή εν συντομία trb), ηλεκτρολύτη-μετάλλου-αέριας φάσης, όπου κυρίως λαμβάνει χώρα η ηλεκτροκαταλυτική αντίδραση στις κυψέλες στερεού ηλεκτρολύτη.

Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου μετατρέπει το H_2 σε H_2O και παράγει απευθείας ηλεκτρική ενέργεια χωρίς ενδιάμεσο κύκλο μετατροπής της χημικής ενέργειας της αντίδρασης σε θερμική ή μηχανική ενέργεια. Συνεπώς, η θερμοδυναμική απόδοσή των SOFCs υπερτερεί της παραγωγής ενέργειας από θερμικές μηχανές οι οποίες υπόκεινται σε περιορισμούς τύπου Carnot. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα των κυψελών καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη είναι ότι λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους ($700-1100^\circ C$) έχουν την δυνατότητα "εσωτερικής αναμόρφωσης" του καυσίμου που επιτρέπει την χρήση καυσίμων όπως CH_4 χωρίς προηγούμενη επεξεργασία (prereforming).

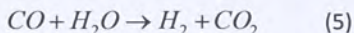
Η χρήση του νικελίου ως ενεργού φάσης του cermet Ni/YSZ στα ηλεκτρόδια ανόδου κυψελών καυσίμου προσφέρει εκτός από την ενεργότητά του ως ηλεκτροκαταλύτη για την αντίδραση μεταφοράς φορτίου, αξιοσημείωτη καταλυτική ενεργότητα για την αντίδραση αναμόρφωσης του μεθανίου από ατμό ή CO_2 :



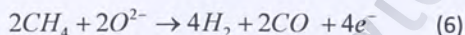
και



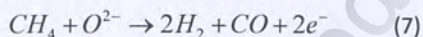
όπως και για την αντίδραση water-gas-shift:



Οι αντιδράσεις φτάνουν αμέσως σε ισορροπία στο περιβάλλον της ανόδου των περισσότερων κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC) και τελικά οξειδώνεται ηλεκτροχημικά κυρίως H_2 και λιγότερο CH_4 έχοντας σαν αποτέλεσμα μικρότερες απώλειες λόγω πόλωσης. Αν στην αντίδραση (2) διπλασιάσουμε τους στοιχειομετρικούς συντελεστές και αθροίσουμε τις αντιδράσεις (3) και (5) έχουμε :



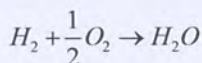
ή



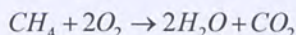
Έτσι σε μια κυψέλη καυσίμου SOFC με άνοδο Ni/YSZ cermet λαμβάνει χώρα κυρίως μερική οξείδωση και παραγωγή αερίου σύνθεσης αντί για CO_2 και H_2O που αποτελούν τα προϊόντα της πλήρους οξείδωσης, κάτι που συμβαίνει μόνο όταν υπάρχει σχεδόν πλήρης μετατροπή του μεθανίου ⁽¹⁵⁾.

2.4.1.1 ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΘΕΩΡΗΣΗ

Το μέγιστο έργο που μπορούμε να λάβουμε από μια ισόθερμη, αδιάλειπτη, αντιστρεπτή διεργασία είναι ίσο με την αρνητική διαφορά της ελεύθερης ενέργειας Gibbs ($-\Delta G$), μεταξύ των προϊόντων και των αντιδρώντων μιας αντίδρασης ⁽¹⁵⁾. Έτσι για μια αντίδραση οξείδωσης που λαμβάνει χώρα σε μια κυψέλη καυσίμου π.χ.



ή



το χρήσιμο ηλεκτρικό έργο που μπορούμε να λάβουμε τείνει στο $-\Delta G$ όταν η λειτουργία της κυψέλης τείνει να είναι αντιστρεπτή. Το έργο αυτό είναι $-\Delta G = n \times F U$, όπου U είναι το δυναμικό που αναπτύσσεται στην κυψέλη κατά την διάρκεια της διεργασίας ανταλλαγής φορτίου. Όταν η ανταλλαγή αυτή είναι πολύ αργή (δηλαδή αντιστρεπτή), τότε το κύκλωμα δεν διαρρέεται από ρεύμα ($i \rightarrow 0$) και η τάση λειτουργίας της κυψέλης, U , προσεγγίζει την τιμή της αντιστρεπτής τάσης, U_{rev} , η οποία δίνεται συνεπώς από την σχέση:

$$U_{rev} = \frac{-\Delta G}{nF}$$

όπου n ο αριθμός των ηλεκτρονίων που λαμβάνουν μέρος στην συνολική αντίδραση της οξειδωσης και F είναι η σταθερά του Faraday.

Η ιδανική θερμοδυναμική απόδοση, ε_{th} , μιας κυψέλης καυσίμου ορίζεται ως ο λόγος του παραγόμενου έργου, W , προς το μέγιστο δυνατό έργο που μπορεί να παραχθεί από την συγκεκριμένη διεργασία/αντίδραση, $-\Delta H_0$, δηλαδή το θερμικό περιεχόμενο του καυσίμου, ή αλλιώς την θερμότητα που παράγεται από την χημική αντίδραση. Έτσι:

$$\varepsilon_{th} = \frac{W}{-\Delta H^0} = \frac{U}{U_{th}} = \frac{\Delta G}{\Delta H^0} \times \frac{U}{U_{rev}}$$

όπου U_{TH} είναι το “θερμοουδέτερο” (thermoneutral) δυναμικό, που αντιστοιχεί σε αδιαβατική ($Q=0$) λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, και το οποίο ορίζεται ως:

$$U_{th} = \frac{-\Delta H^0}{nF}$$

Η διαφορά της ενέργειας Gibbs, ΔG , και της ενθαλπίας, ΔH , μια χημικής αντίδρασης δίνεται από την μεταβολή της εντροπίας του συστήματος, ΔS , δηλαδή:

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

Καθώς για τις περισσότερες αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα σε μια κυψέλη καυσίμου είναι $\Delta S < 0$, ένα μέρος της ενέργειας που παράγεται από την διεργασία, ίσο με $T\Delta S$, εκλύεται ως θερμότητα στο περιβάλλον. Συνεπώς η ιδανική μέγιστη απόδοση μιας κυψέλης καυσίμου είναι ίση με:

$$\xi = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{U_{rev}}{U_{th}}$$

Για παράδειγμα στην περίπτωση όπου η αντίδραση που λαμβάνει χώρα είναι $H_2 + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow H_2O$, η ιδανική απόδοση είναι ίση με 0.83 ($U_{rev} = 1.23V$, $U_{th} = 1.48V$).

Με βάση τα παραπάνω είναι πρακτικά πιο χρήσιμο να ορίζουμε την “αποτελεσματική” θερμοδυναμική απόδοση, ε :

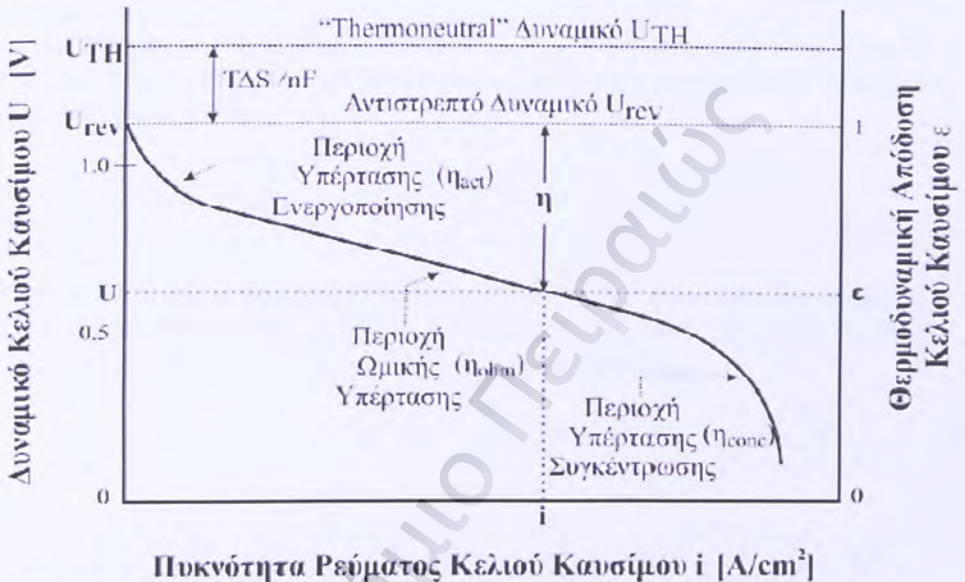
$$\varepsilon = \frac{W}{-\Delta G} = \frac{U}{U_{rev}}$$

η οποία εξ’ ορισμού μπορεί να λάβει την μέγιστη τιμή ίση με 1 ή 100%, για $U = U_{rev}$

Όταν η εξωτερική αντίσταση της κυψέλης καυσίμου είναι πεπερασμένη και παράγεται ηλεκτρική ενέργεια τότε το δυναμικό λειτουργίας της κυψέλης, U , μειώνεται σε σχέση με το αντιστρεπτό δυναμικό U_{rev} , η πραγματική δηλαδή τάση που παράγει η κυψέλη είναι μικρότερη από την αντιστρεπτή. Η διαφορά της πραγματικής αυτής τάσης από την αντιστρεπτή τάση ονομάζεται υπέρταση, η

$$n = U_{rev} - U$$

Η παραγόμενη ισχύς και η θερμοδυναμική απόδοση των SOFCs εξαρτάται σημαντικά από την ελαχιστοποίηση των απωλειών λόγω υπέρτασης στην άνοδο και την κάθοδο ⁽¹⁴⁾. Έτσι η σημαντική υπέρταση που εμφανίζεται λόγω ανεπαρκούς ηλεκτροκατάλυσης στην άνοδο και στην κάθοδο, αποτελεί ένα από τα κυριότερα εμπόδια στην εφαρμογή και εμπορική εκμετάλλευση της τεχνολογίας των κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου.



Εικόνα 14. Τυπική καμπύλη τάσης – έντασης μιας κυψέλης καυσίμου, στην οποία φαίνονται οι τρεις τύποι υπέρτασης (Μπαλομένου S. 2005)

Η υπέρταση της κυψέλης, η , αποτελεί την συνιστώσα τριών επιμέρους υπερτάσεων: της ωμικής υπέρτασης, της υπέρτασης συγκέντρωσης και της υπέρτασης ενεργοποίησης (εικόνα 14).

Προκειμένου να μειωθεί η ωμική υπέρταση είναι απαραίτητη η χρήση λεπτού, πολύ αγώγιμου ηλεκτρολύτη καθώς και αγώγιμων ηλεκτροδίων σε πολύ καλή ηλεκτρική και μηχανική επαφή με τον ηλεκτρολύτη ώστε να μειώνεται στο ελάχιστο η αντίσταση επαφής. Η υπέρταση συγκέντρωσης, η_{conc} , της κυψέλης αποτελεί το άθροισμα των υπερτάσεων συγκέντρωσης στην άνοδο και την κάθοδο. Καθώς το αντιδρών αέριο καταναλώνεται στο ηλεκτρόδιο κατά την ηλεκτροχημική αντίδραση, εμφανίζεται μείωση της τάσης της κυψέλης εξαιτίας της αδυναμίας διατήρησης σταθερής της συγκέντρωσης του αερίου μίγματος, δημιουργείται, δηλαδή, μια βαθμίδα συγκέντρωσης. Η υπέρταση συγκέντρωσης οφείλεται κυρίως στην αργή μεταφορά μάζας από την αέρια φάση στο όριο των τριών φάσεων (trb) αλλά και σε αργή διάχυση των αντιδρώντων/προϊόντων προς/από της ενεργές θέσεις αντίδρασης. Υπέρταση συγκέντρωσης εμφανίζεται σε υψηλές τιμές πυκνότητας ρεύματος, γιατί τότε είναι δυσκολότερο να υπάρχει ικανοποιητική ροή του αντιδρώντος αερίου στο όριο των τριών φάσεων, όπου λαμβάνει χώρα η ηλεκτροχημική αντίδραση. Η υπέρταση συγκέντρωσης μπορεί να ελαχιστοποιηθεί με κατάλληλο σχεδιασμό των τμημάτων της

άνοδου και της καθόδου μιας κυψέλης και με την χρήση πορωδών ηλεκτροδίων. Γενικά, στα SOFC, λόγω των υψηλών τιμών αέριας και επιφανειακής διαχυτότητας στις θερμοκρασίες λειτουργίας τους, η υπέρταση συγκέντρωσης δεν αποτελεί σημαντικό πρόβλημα. Η υπέρταση ενεργοποίησης, η_{act} , αποτελεί το άθροισμα των υπερτάσεων ενεργοποίησης στην άνοδο, $\eta_{act,a}$, και την κάθοδο, $\eta_{act,c}$, της κυψέλης καυσίμου και οφείλεται στον αργό ρυθμό των ηλεκτροκαταλυτικών αντιδράσεων (αντιδράσεις μεταφοράς φορτίου) που λαμβάνουν χώρα στα ηλεκτρόδια. Η υπέρταση ενεργοποίησης γίνεται σημαντική σε χαμηλές και ενδιάμεσες τιμές πυκνότητας ρεύματος μιας κυψέλης καυσίμου.

Οι πιο σύγχρονες μονάδες SOFC παράγουν ισχύ της τάξης των 0.2-1 W/cm², και το δυναμικό, U , μειώνεται κατά προσέγγιση γραμμικά με την πυκνότητα ρεύματος, i , με κλίση R'_{cell} , μεγέθους 0.5 Ωcm².

2.4.2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΚΥΨΕΛΗΣ

Η βασική δομή μιας κυψέλης καυσίμου αποτελείται από έναν ηλεκτρολύτη σε επαφή με δύο ηλεκτρόδια την άνοδο και την κάθοδο (εικόνα 13). Τα συστατικά στοιχεία μιας κυψέλης καυσίμου SOFC περιγράφονται σε συντομία στις επόμενες παραγράφους.

2.4.2.1 ΗΛΕΚΤΡΟΛΥΤΗΣ

Το στοιχείο που δίνει όνομα στο SOFC είναι ο στερεός ηλεκτρολύτης. Η λειτουργία του ηλεκτρολύτη είναι να χωρίζει τις δύο αέριες φάσεις και να μεταφέρει τα ιόντα οξυγόνου χωρίς σημαντικές απώλειες από την κάθοδο στην άνοδο. Ο ηλεκτρολύτης θα πρέπει για το λόγο αυτό να έχει επαρκή αγωγιμότητα και να είναι χημικά σταθερός σε μεγάλες μεταβολές της μερικής πίεσης του οξυγόνου από αναγωγικές σε οξειδωτικές συνθήκες.

Η μεταφορά των ιόντων του οξυγόνου στον ηλεκτρολύτη προκύπτει μέσω κενών στο πλέγμα του οξυγόνου. Η συγκέντρωση των κενών αυτών και η κινητικότητα τους καθορίζουν την αγωγιμότητα του ηλεκτρολύτη. Τα υλικά που αναπτύχθηκαν μέχρι και το 1993 συνοψίζονται από τον Minh⁽¹⁶⁾. Ανάμεσα σε ένα πλήθος κατάλληλων αγωγών για τα ιόντα οξυγόνου, το σταθεροποιημένο οξειδίο του ζirkονίου στην αγώγιμη κυβική φάση με ποσοστό ύττριου ή σκάνδιου > 10% είναι ο πλέον κοινά χρησιμοποιούμενος ηλεκτρολύτης. Αν και υψηλότερης αγωγιμότητας υλικά υπάρχουν, το σταθεροποιημένο οξειδίο του ζirkονίου αποτελεί την καλύτερη συμβιβαστική λύση ανάμεσα στην υψηλή αγωγιμότητα των ιόντων οξυγόνου και τις δευτερεύουσες απαιτήσεις ομοιομορφίας με τα υπόλοιπα στοιχεία του SOFC όπως η χημική σταθερότητα και η αντοχή. Η αγωγιμότητα παίρνει τιμές > 0,1 Scm⁻¹ στους 950 – 1000 °C και 0,03 – 0,003 Scm⁻¹ σε μειωμένες θερμοκρασίες της τάξης των 600 – 800 °C (η εξάρτηση της θερμοκρασίας ανταποκρίνεται σε μια ενεργοποίηση ενθαλπίας της τάξης των 0,8 – 1 eV).

Προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε τις απώλειες τάσης στον ηλεκτρολύτη κάτω από τη λειτουργία της κυψέλης καυσίμου, το στρώμα του ηλεκτρολύτη θα πρέπει να είναι όσο πιο λεπτό γίνεται. Η λεπτότητα του ηλεκτρολύτη εξαρτάται από το σχεδιασμό της κυψέλης και τη μηχανική σταθερότητα του ηλεκτρολύτη. Στην περίπτωση ενός επίπεδου στρώματος ηλεκτρολύτη που υποστηρίζει τα ηλεκτρόδια, ένα ελάχιστο πάχος της τάξης των 100 – 150 μm απαιτείται για σταθεροποιημένο οξειδίο του ζirkονίου με 8% ύτριο. Η μηχανική σταθερότητα μπορεί να αυξηθεί μειώνοντας το περιεχόμενο ύτριο ή προσθέτοντας αλουμίνα, αλλά και τα δύο σε βάρος της ιοντικής αγωγιμότητας.

2.4.2.2 ΗΛΕΚΤΡΟΔΙΑ

Σε ότι αφορά τα ηλεκτρόδια των κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου, οι συνολικές αντιδράσεις που προαναφέρθηκαν είναι τοπικά κατανεμημένες στις διεπιφάνειες ηλεκτροδίου/ηλεκτρολύτη στους θαλάμους αέρα και καυσίμου. Η αντίδραση που λαμβάνει χώρα στο ηλεκτρόδιο μεταξύ των αερίων, ένας αγωγός ηλεκτρονίων και τα ιόντα οξυγόνου που παρέχονται από τον ηλεκτρολύτη λαμβάνουν χώρα σε θέσεις όπου και οι τρεις φάσεις βρίσκονται σε στενή επαφή μεταξύ τους. Υψηλή ηλεκτρική ισχύς παράγεται από υψηλά ποσοστά μετατροπής (ποσοστά ηλεκτροχημικής αντίδρασης) που οδηγούν σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος σε χαμηλά δυναμικά. Αυτό απαιτεί υψηλής ενεργητικότητας ηλεκτρόδια (υψηλή ηλεκτρο-καταλυτική δραστηριότητα) ή υψηλούς αριθμούς σημείων επαφής των τριών φάσεων (trb) που καθορίζονται από τη δομή του ηλεκτροδίου.

Μείγματα ηλεκτρονικά αγώγιμων υλικών για ηλεκτρόδια σε συνδυασμό με έναν αγωγό ιόντων οξυγόνου (π.χ. ο ηλεκτρολύτης) οδηγούν σε πιθανές θέσεις αντίδρασης στο σύνολο του όγκου του πορώδους ηλεκτροδίου. Για το λόγο αυτό, η ζώνη αντίδρασης επεκτείνεται στον όγκο του πορώδους ηλεκτροδίου μακριά από την διεπιφάνεια ηλεκτροδίου/ηλεκτρολύτη, το οποίο αποτελεί πλεονέκτημα για το ποσοστό της ηλεκτροχημικής μετατροπής. Σε περιπτώσεις μείγματος ιόντων οξυγόνου και ηλεκτρικά αγώγιμων υλικών ηλεκτροδίων, τόσο τα ιόντα οξυγόνου όσο και τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται και για το λόγο αυτό η θέση της αντίδρασης μπορεί να είναι ολόκληρη η επιφάνεια του αγωγού, η οποία είναι εκτεθειμένη στην αέρια φάση έχοντας σαν αποτέλεσμα μια παρόμοια επέκταση της ζώνης αντίδρασης.

Στους πόρους, τα αέρια αντιδρώντα και τα προϊόντα πρέπει να μεταφερθούν από και προς το TRB. Προκειμένου να ελαχιστοποιήσουμε τις απώλειες εξαιτίας της αέριας μεταφοράς, απαιτείται μια διάταξη ανοικτών πόρων.

Οι προαναφερθείσες απαιτήσεις καθορίζονται από την διάταξη του ηλεκτροδίου. Επιπρόσθετα, το υλικό από το οποίο κατασκευάζεται το ηλεκτρόδιο θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από υψηλή ηλεκτρο-καταλυτική δραστηριότητα αναφορικά με τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις. Στη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου, οι ηλεκτροχημικές κινητικές μπορεί να θεωρηθούν γρήγορες και, για το λόγο αυτό, κατώτερα υλικά και οξείδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν σαν υλικά για ηλεκτρόδια. Παρόλα αυτά, η επιλογή των υλικών περιορίζεται από δευτερογενείς απαιτήσεις. Τα υλικά

θα πρέπει να είναι χημικά συμβατά με τον ηλεκτρολύτη και τα παρακείμενα στρώματα σε συνθήκες λειτουργίας αλλά και κατά τη διάρκεια της κατασκευής. Το υλικό θα πρέπει να ταιριάζει με τους συντελεστές θερμικής διαστολής και – για πρακτικούς λόγους – να είναι σταθερό από άποψης διάστασης και διάταξης σε αναγωγικές και οξειδωτικές συνθήκες.

2.4.2.3 Άνοδος

Στην άνοδο, το καύσιμο θα οξειδωθεί με την παρουσία ιόντων οξυγόνου από τον ηλεκτρολύτη. Κατά τη διάρκεια της αναγωγικής δραστηριότητας του καυσίμου στο ηλεκτρόδιο, τα μέταλλα παραμένουν σταθερά κάτω από ένα μεγάλο εύρος λειτουργικών συνθηκών. Διάφορα υλικά και κράματα μετάλλων έχουν ερευνηθεί και το νικέλιο επιλέχθηκε εξαιτίας της μεγάλης ηλεκτροχημικής δραστηριότητάς του σε ότι αφορά την αντίδραση οξείδωσης του υδρογόνου, τα κόστη και τη χημική συμβατότητά του. Προκειμένου να ρυθμίσουμε τον συντελεστή θερμικής διαστολής μιας ανόδου αποτελούμενη από νικέλιο, το νικέλιο αναμειγνύεται με το υλικό του ηλεκτρολύτη, ένα μείγμα που αποκαλείται κεραμικό μείγμα οξειδίου του ζirkονίου σταθεροποιημένο με μείγμα νικελίου και υτρίου (YSZ). Στο εν λόγω κεραμικό μείγμα, ο κεραμικός ηλεκτρολύτης σχηματίζει ένα πλέγμα που παρεμποδίζει τη συσσώρευση του νικελίου και με τον τρόπο αυτό διατηρεί τους πόρους και την μικροδομή της ανόδου. Για περιεκτικότητες νικελίου γύρω στο 40% το κεραμικό μείγμα παρουσιάζει συμπεριφορά ηλεκτρονικού αγωγού ($500 - 1800 \text{ Scm}^{-1}$) και δείχνει ένα συντελεστή θερμικής διαστολής κοντά σε εκείνον του YSZ.

Το κεραμικό μείγμα νικελίου – YSZ αποτέλεσε την αιχμή της ανάπτυξης υλικών ανόδου αναφορικά με την επίτευξη υψηλής απόδοσης για την οξείδωση του υδρογόνου ⁽¹⁷⁾. Η ηλεκτροχημική δραστηριότητα των ηλεκτροδίων νικελίου – YSZ προσεγγίζει τιμές $R_f \approx 0.15 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ στους $850 \text{ }^\circ\text{C}$ και $R_f < 0.1 \text{ } \Omega\text{cm}^2$ στους $950\text{-}1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Οι διαδικασίες της οξείδωσης του υδρογόνου σε κεραμικά μείγματα νικελίου - YSZ έχουν ερευνηθεί τόσο για τεχνικά ηλεκτρόδια όσο και για ολοκληρωμένα συστήματα. Τα αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι η αντίδραση πράγματι περιορίζεται από το μέγεθος της περιοχής TPB ^{(18), (19)}. Τα πιθανά βήματα αναφορικά με την οξείδωση του υδρογόνου στην περιοχή TPB είναι η απορρόφηση, η επιφανειακή διάχυση και η μεταφορά φορτίου στην επιφάνεια τόσο του νικελίου όσο και του YSZ. Διαφορετικά πρωτότυπα αξιώνουν διαφορετικά βήματα και τα αποτελέσματα που προέκυψαν δείχνουν ότι δεν μπορεί να εξαχθεί κάποιο ασφαλές συμπέρασμα. Οι διαφορές προκύπτουν από τις αποκλίσεις στις μικροδομές και την μη καθαρότητα των στοιχείων στα οποία βασίζονταν διάφορα πρόδρομα υλικά και τεχνολογίες κατασκευής και τα οποία επιδρούσαν στην απόδοση του ηλεκτροδίου. Αναφορικά με ηλεκτρόδια υψηλής απόδοσης με συγκεκριμένες χωρικές αντιστάσεις κάτω από $0.1 \text{ } \Omega\text{cm}^2$, επιπρόσθετοι περιορισμοί παρουσιάζονται εξαιτίας της αέριας φάσης ⁽²⁰⁾.

Τα ηλεκτρόδια κεραμικού μίγματος νικελίου – YSZ παρουσιάζουν καλή απόδοση μόνο για το υδρογόνο, αλλά εμφανίζουν σοβαρά προβλήματα όταν η κυψέλη λειτουργεί με καθαρό ή αναμορφωμένο καύσιμο υδρογονάνθρακα. Το νικέλιο παρουσιάζει υψηλή

δραστηριότητα για το σχηματισμό κοκ, το οποίο όμως καταστρέφει τόσο την ηλεκτροκαταλυτική αγωγιμότητα όσο και την μικροδομή. Προκειμένου να εμποδίσουμε το σχηματισμό κοκ, υψηλό περιεχόμενο ζεστού νερού απαιτείται στο καύσιμο, το οποίο όμως με τη σειρά του μειώνει την ισορροπία του δυναμικού και έτσι την μέγιστη τάση της κυψέλης, οδηγώντας σε μείωση της παραγόμενης ισχύος.

Για την οξείδωση του μονοξειδίου του άνθρακα, παρατηρήθηκαν συνθήκες ασταθούς αντίδρασης και συσχετίστηκαν με την απόθεση ιζήματος άνθρακα στο νικέλιο ακόμα και σε συνθήκες όπου ο σχηματισμός του άνθρακα δεν είναι θερμοδυναμικά σταθερός⁽²¹⁾.

Τα ορυκτά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο, η βενζίνη και το πετρέλαιο περιέχουν θείο είτε στη φυσική τους μορφή είτε προστιθέμενο για αναζήτηση διαρροών. Ίχνη θείου πάνω από 50 ppm μπορεί να οδηγήσουν σε σοβαρή μείωση της απόδοσης της ανόδου εξαιτίας της αδρανοποίησης του καταλύτη.

Ένας πρόσθετος περιορισμός στην τεχνική εφαρμογή των κεραμικών μιγμάτων νικελίου – YSZ είναι η οξειδοαναγωγή του νικελίου που εμπλέκει μεταβολές στις φάσεις και τις διαστάσεις. Μόνο λίγοι ερευνητές έχουν αναφέρει σταθερό οξειδοαναγωγικό κεραμικό μείγμα νικελίου – YSZ (ως προς τη δομή). Ακόμα όμως και για αυτά, οι οξειδοαναγωγικοί κύκλοι είναι περιορισμένοι. Τόσο η ιζηματοποίηση του άνθρακα όσο και η οξειδοαναγωγή σχηματίζουν οριακές συνθήκες για το λειτουργικό εύρος του κεραμικού μείγματος Ni - YSZ.

2.4.2.4 ΚΑΘΟΔΟΣ

Στην κάθοδο, το αέριο οξυγόνο ανάγεται σε ιόντα οξυγόνου τα οποία ενσωματώνονται στον ηλεκτρολύτη.

Το περιβάλλον της καθόδου είναι αρκετά οξειδωτικό και αποκλείει τη χρήση μετάλλων σαν υλικά ηλεκτροδίων. Η αιχμή του δόρατος αναφορικά με την κάθοδο στην τεχνολογία κυψελών καυσίμου στερεού οξειδίου είναι ένα ηλεκτρονικά αγώγιμο κεραμικό οξείδιο βασισμένο στο LaMnO_3 στο οποίο το λανθάνιο αντικαθίσταται μερικώς από το στρόντιο και προκύπτει το $(\text{La, Sr})\text{MnO}_3$ (LSM). Αυτά τα υλικά αποτελούν αγωγούς p-τύπου για τους οποίους οι ηλεκτρικές ιδιότητες καθορίζονται από το ποσοστό La/Sr.

Η ακριβής σύνθεση των υλικών αυτών επηρεάζει επίσης τις χημικές ιδιότητες της καθόδου. Η χημική συμβατότητα με τον ηλεκτρολύτη YSZ είναι ιδιαίτερα σημαντική. Ο σχηματισμός των $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ και SrO εξαιτίας των αντιδράσεων στερεής κατάστασης αδρανοποιεί την απόδοση της καθόδου και για το λόγο αυτό θα πρέπει να αποφεύγεται. Αυτή η ανεπιθύμητη αντίδραση λαμβάνει χώρα σε συνδυασμό με μια ποσότητα μαγγανίου (1-10%) σε θερμοκρασίες κάτω των 1300 °C⁽²²⁾.

Παρόμοια με το κεραμικό μείγμα νικελίου – YSZ, το LSM μπορεί να κατασκευαστεί σαν σύνθεση με τον ηλεκτρολύτη YSZ σαν δεύτερη στερεή φάση. Σε αυτές τις συνθέσεις η ζώνη αντίδρασης μπορεί να επεκταθεί στους πόρους της καθόδου⁽²³⁾. Στην περιοχή των 950 °C η αντίσταση έχει τιμή ίση με 0.04 Ωcm^2 και 0.23 Ωcm^2 στους 750 °C.

Η ηλεκτρονική αγωγιμότητα του LSM είναι περίπου 200 Scm^{-1} για περιεχόμενο στρόντιο της τάξης του 15%. Η αγωγιμότητα σχετίζεται, σε χαμηλό βαθμό, με τα κεραμικά μείγματα Ni - YSZ. Προκειμένου να διασφαλίσουμε τη βέλτιστη συλλογή ρεύματος στην κάθοδο, τα πολλαπλά στρώματα ηλεκτροδίων παρουσιάζουν πλεονεκτήματα. Δύο στρώματα καθόδων συχνά προτιμώνται από τα οποία εκείνο που βρίσκεται πιο κοντά στο στερεό ηλεκτρολύτη βελτιστοποιείται για την ηλεκτροχημική απόδοση, ενώ το ανώτερο στρώμα βελτιστοποιείται για την ηλεκτρονική αγωγιμότητα και το πορώδες.

Το κόστος των υλικών αποτελούν ένα σημαντικό ζήτημα για την κάθοδο. Τα κόστη του μαγγανίτη λανθανίου εξαρτώνται ισχυρά από την καθαρότητα του σπάνιου στοιχείου λανθανίου, από τη στιγμή που ο διαχωρισμός των σπάνιων αυτών στοιχείων είναι αρκετά ακριβός. Τα κόστη των υλικών για την κάθοδο μπορούν να μειωθούν σημαντικά αν μείγματα λανθανιδών χρησιμοποιηθούν αντί για καθαρό λανθάνιο.

2.4.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ

Σε αντίθεση με τις παλινδρομικές μηχανές, τα δεδομένα λειτουργίας των SOFCs προέρχονται από έναν περιορισμένο αριθμό επιδείξεων. Ωστόσο, υπάρχουν ισχυρές ενδείξεις ότι τα SOFCs παρέχουν υψηλότερες αποδόσεις, περιβαλλοντικά οφέλη και καλή αντιστοιχία λόγω θερμικού/ηλεκτρικού φορτίου (T/E) για εφαρμογές συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας⁽¹⁾.

Τα SOFC λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας τους πλεονεκτούν σε σχέση με τους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου για δύο κυρίως λόγους. Πρώτον, γιατί είναι δυνατή η άμεση χρήση υδρογονανθράκων, για παράδειγμα φυσικό αέριο, το οποίο μπορεί να εύκολα αναμορφωθεί χωρίς την χρήση καταλυτών ευγενών μετάλλων. Δεύτερον, η αποβαλλόμενη θερμότητα είναι υψηλής θερμοκρασίας και είναι σε θέση να χρησιμοποιηθεί σε μια μονάδα συμπαραγωγής, με ή χωρίς αεριοστρόβιλο, αυξάνοντας έτσι την συνολική απόδοση μέχρι και 80%.

2.4.3.1 ΑΠΟΔΟΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η βελτιστοποίηση του βαθμού απόδοσης και των χαρακτηριστικών λειτουργίας των SOFCs αποτελεί μια πρόκληση για τους κατασκευαστές διότι οι κυψέλες καυσίμου αποτελούνται από ένα συνδυασμό χημικών, ηλεκτροχημικών και ηλεκτρονικών υποσυστημάτων⁽¹⁾.

Ο Riensche et al⁽²⁵⁾ ανέλυσε την απόδοση ενός συστήματος συμπαραγωγής από κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου με θερμοκρασία λειτουργίας $950 \text{ }^\circ\text{C}$ η οποία τροφοδοτείται από σωληναγωγό με καύσιμο φυσικό αέριο. Στην ανάλυση προτιμήθηκε ένας επίπεδος τύπος διάταξης κυψέλης ο οποίος περιορίζει τις θερμοκρασιακές διαφορές της συστοιχίας κάτω από τους 100 K. Για το σκοπό της ανάλυσης λήφθηκαν υπόψη αρκετές λειτουργικές

παράμετροι όπως το δυναμικό λειτουργίας της κυψέλης, ο βαθμός της εσωτερικής αναμόρφωσης, το θερμοκρασιακό εύρος και η πτώση της πίεσης. Διαπιστώθηκε ότι όσο υψηλότερος είναι ο βαθμός της εσωτερικής αναμόρφωσης τόσο υψηλότερος είναι και ο βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης του συστήματος. Παρόμοια επίδραση παρατηρήθηκε για μεγάλα εύρη θερμότητας στη κυψέλη. Ο κύριος λόγος των αποτελεσμάτων που προέκυψαν αναφορικά με τις δύο παραμέτρους που εξετάστηκαν αποδίδεται στη μείωση των ποσοτήτων ροής αέρα που τροφοδοτεί τη συστοιχία. Έτσι, η εσωτερική αναμόρφωση χρησιμεύει σαν πτώση θερμότητας για την θερμότητα που παράγεται κατά τη λειτουργία, ενώ το μεγαλύτερο θερμοκρασιακό εύρος επιτρέπει στο αέριο να εισάγεται στην κυψέλη σε χαμηλότερες θερμοκρασίες. Σαν αποτέλεσμα η παροχή αέρα και το ποσοστό προθέρμανσής του μειώνεται σημαντικά, δρώντας πλεονεκτικά για την απόδοση του συστήματος⁽²⁵⁾.

Όπως και κάθε τύπος κυψέλης, οι κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη μπορούν να λειτουργήσουν σε ποικίλα μεγέθη τάσεως. Μια αύξηση της τάσης της κυψέλης μπορεί να προκαλέσει μια συνεχόμενη αύξηση στην απόδοση όπως άλλωστε αναμένεται για αυξανόμενα ποσοστά της πραγματική τάσης της κυψέλης και της διαφοράς δυναμικού. Ωστόσο, την ίδια στιγμή η πυκνότητα ρεύματος και επομένως η παραγωγή ενέργειας της κυψέλης και της συστοιχίας μειώνεται. Σαν συνέπεια, μεγαλύτερες επιφάνειες ενεργότητας συνεπάγονται μεγαλύτερες συστοιχίες που κατασκευάζονται με σκοπό να πετύχουν ένα συγκεκριμένο στόχο παραγωγής (εν προκειμένω 200 kW). Κάτι τέτοιο όμως μπορεί να αυξήσει τα κόστη κατασκευής και υλικών.

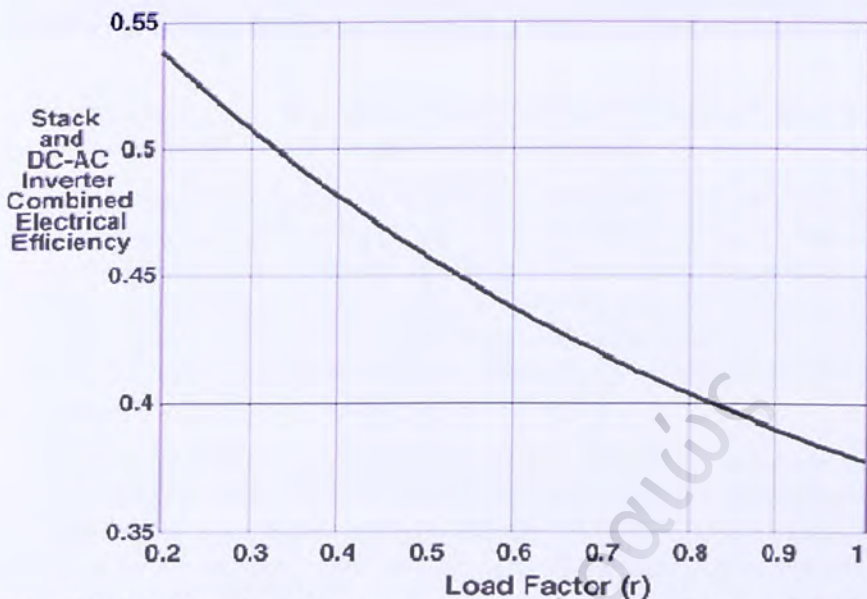
2.4.3.2 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΣΕ ΜΕΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Το προφίλ ηλεκτρικής απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής από SOFC είναι δυνατόν να προσεγγιστεί από την ακόλουθη εξίσωση (1) που περιγράφηκε στηριζόμενη σε μοντέλο που αναπτύχθηκε από το τμήμα Χημικών Μηχανικών του Imperial College London⁽²⁷⁾. Το προφίλ αυτό φανερώνει μια τυπικά υψηλή απόδοση του συστήματος σε μερικό φορτίο.

$$Electrical_{eff} = -0.0607r^3 + 0.253r^2 - 0.453r + 0.6593 \quad (1),$$

όπου r είναι ο συντελεστής φορτίου (λόγος της μέσης ισχύος προς τη μέγιστη ισχύ σε φορτίο στο ίδιο χρονικό διάστημα).

Ο αναστροφέας του συστήματος, που μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη επιθυμητής συχνότητας, εμφανίζει κατά προσέγγιση απώλειες 7% σε χαμηλούς συντελεστές φορτίου και απώλειες 3% επί της εκτιμώμενης εγκατεστημένης ισχύος. Ο συνδυασμός των προφίλ απόδοσης του αντιστροφέα και της συστοιχίας διαμορφώνει την ηλεκτρική απόδοση του συστήματος που παριστάνεται στο διάγραμμα της εικόνας 15.



Εικόνα 15. Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης του συστήματος κυψέλης – αναστροφέα σε μερικό φορτίο (Adam Hawkes et al, 2005)

Μαζί με το προφίλ ηλεκτρικής απόδοσης του συστήματος αποδεικνύεται ότι ο συνολικός βαθμός απόδοσης της συστοιχίας είναι παρόμοιος με τον βαθμό απόδοσης ενός σύγχρονου λέβητα ανταγωνιστικής τεχνολογίας (περίπου 90%) και δίνεται από την εξίσωση (2).

$$Overall_{eff} = 0.05r + 0.9 \quad (2),$$

που υποδηλώνει ότι το μοντέλο εμφανίζει ένα ολοκληρωμένο σύστημα ανάκτησης θερμότητας, με 90% συνολικό βαθμό απόδοσης σε ελάχιστο φορτίο και 95% σε πλήρες φορτίο.

Όπως προκύπτει από το διάγραμμα, οι κυψέλες καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη δείχνουν εξαιρετική συμπεριφορά σε συνθήκες μερικού φορτίου. Η απόδοση της συστοιχίας της κυψέλης καυσίμου βελτιώνεται σε χαμηλότερα φορτία, προκαλώντας μια αύξηση στο συνολικό βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης του συστήματος ο οποίος διατηρείται σταθερός στο 1/3 με 1/4 της υπολογιζόμενης εγκατεστημένης ισχύος ⁽²⁵⁾.

Οι μετρήσεις των αποτελεσμάτων των κυψελών γίνονται σε συνθήκες ISO θερμοκρασίας 77 °F και πίεσης 1bar ⁽¹⁾. Μια ενδεχόμενη αύξηση της περιβάλλουσας θερμοκρασίας ή του υψομέτρου μπορεί να υποβιάσει την παραγωγή και τον βαθμό απόδοσης του συστήματος. Βοηθητικοί εξοπλισμοί, όπως συμπιεστές ή ανεμιστήρες διαχείρισης αέρα, βοηθούν αντισταθμιστικά στην υποβάθμιση της λειτουργίας του συστήματος. Η υποβάθμιση αυτή είναι μεγαλύτερη σε συστήματα υπό πίεση που λειτουργούν με υπερπλήρωση ή μικρούς συμπιεστές αέρα ⁽¹⁾.

Στα SOFCs, όπως και στους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου, η απορριπτόμενη θερμότητα προέρχεται από την συστοιχία και τον αναμορφωτή.

Η μεταφορά θερμότητας εκτός της συστοιχίας πραγματοποιείται μέσα από το ρεύμα αέρα. Η μεταβιβάσιμη ποσότητα θερμότητας εξαρτάται από το ποσοστό ροής του αέρα και από τη διαφορά θερμοκρασίας εισόδου και εξόδου μεταξύ κυψέλης και συστοιχίας. Όσο μικρότερα είναι τα θερμοκρασιακά εύρη που επιτρέπονται στην κυψέλη τόσο μεγαλύτερα ποσοστά ροής απαιτούνται για να καταλάβουν μια συγκεκριμένη ποσότητα θερμότητας. Τα απαιτούμενα ποσοστά ροής καθορίζουν το σχεδιασμό των περιφερειακών συστημάτων όπως των ανεμιστήρων, των συμπιεστών και των φίλτρων ⁽¹⁴⁾.

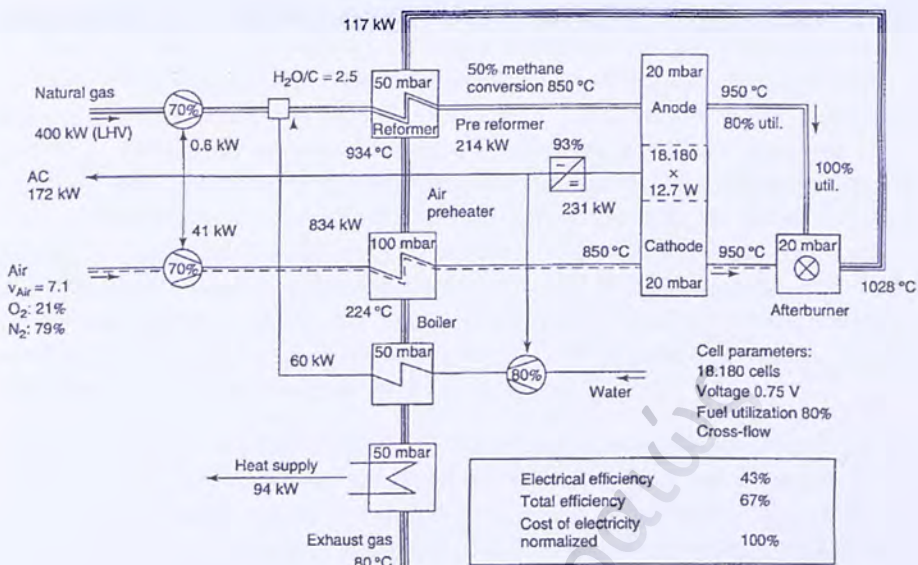
Η ποσότητα της θερμότητας που απελευθερώνεται από τη συστοιχία της κυψέλης καυσίμου μπορεί, καταρχήν, να ελαττωθεί λόγω της χρήσης άμεσου ή έμμεσου εσωτερικού αναμορφωτή σαν μια πρόσθετη πτώση θερμότητας. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να μειώσει τη ροή και επομένως την προσπάθεια για μεταφορά αέρα μέσα στο σύστημα.

Μια κυψέλη καυσίμου SOFC που λειτουργεί σε θερμοκρασίες κοντά στους 1.000 °C μετά από προθέρμανση παράγει καυσαέρια σε θερμοκρασίες που φτάνουν τους 815 °C. Τα αέρια αυτά είναι ικανά να παράγουν πέρα από ζεστό νερό και ατμό σε θερμοκρασίες άνω των 540 °C. Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα μιας έρευνας που διεξήχθη από τη Siemens Westinghouse για μονάδες SOFC ισχύος 50 - 2.000 kW σύμφωνα με την οποία η απορριπτόμενη θερμότητα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να παράγει ατμό πίεσης 8 atm (100 psig) ⁽²⁴⁾.

Η απορριπτόμενη θερμότητα παράγεται μέσα από μη ιδανικές ηλεκτροχημικές διεργασίες και μπορεί να μετατραπεί σε ωφέλιμη θερμότητα κάτω από διάφορα θερμοκρασιακά επίπεδα. Το διάγραμμα ροής ενός συστήματος συμπαραγωγής από SOFC με ισχύ 200 kW παριστάνεται στην εικόνα 16 ⁽²⁶⁾ με τα χαρακτηριστικά λειτουργίας του να συνοψίζονται στον πίνακα 8.

Πίνακας 8. Επιλεγμένα στοιχεία λειτουργίας ενός ΣΗΘ από SOFC με ισχύ 200 kW (Rienschel et al. 1998)

Βαθμός αναμόρφωσης μεθανίου (%)	50
Θερμοκρασία εισόδου καυσίμου (°C)	850
Θερμοκρασία εισόδου αέρα (°C)	850
Αύξηση θερμοκρασίας αέρα στη συστοιχία (K)	100
Συντελεστής χρησιμοποίησης καυσίμου (%)	80
Τάση (V)	0.75



Εικόνα 16. Βασική διάταξη ΣΗΘ από SOFC (Riensch et al. 1998 with permission from Elsevier Science)

Το καύσιμο φυσικό αέριο (400 kW LHV) συμπιέζεται για να ξεπεράσει τις απώλειες πίεσης στο κύκλωμα. Πριν εισαχθεί στον αναμορφωτή αναμιγνύεται με ατμό που παράγεται από ένα θερμικά διασυνδεδεμένο λέβητα. Ο αναμορφωτής θερμαίνεται επιπρόσθετα από το ζεστό αέριο που εξέρχεται από τον μετακαυστήρα. Το αέριο ρεύμα έχει 41 kW ενεργειακή απαίτηση για συμπίεση. Στη συνέχεια, ο αέρας προθερμαίνεται μέχρι τους 850 °C. Στη συστοιχία της κυψέλης καυσίμου παράγεται συνολικά συνεχές ρεύμα ισχύος 231 kW. Μετά την παρακράτηση των ενεργειακών απωλειών του αντιστροφέα και της ενεργειακής απαίτησης του συμπιεστή παραμένει εναλλασσόμενο ρεύμα ισχύος 172 kW. Έτσι, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης του συστήματος φτάνει το 43%. Αν ληφθεί υπόψη ότι παράγεται πρόσθετη ωφέλιμη θερμότητα 94 kW, επιτυγχάνεται μια συνολική απόδοση της τάξεως του 67%. Οι δύο αποδόσεις μπορούν να βελτιστοποιηθούν:

- με παραλλαγή των παραμέτρων του συστήματος ή
- με παραλλαγή των διατάξεων

Στο σύστημα που περιγράφηκε, η παραγωγή του ατμού έγινε εξωτερικά και η θερμική διασύνδεση πραγματοποιήθηκε με ανταλλαγή θερμότητας για το καύσιμο, για την προθέρμανση του αέρα και για την παραγωγή ατμού. Εναλλακτικά, η ανακύκλωση του αέρα που προέρχεται από την έξοδο της συστοιχίας μπορεί να οδηγήσει σε μια καλύτερη θερμική διαχείριση. Μια πρώτη δυνατότητα προκύπτει από την ανακύκλωση των αερίων της καθόδου. Σε αυτή την περίπτωση, μπορεί να επιτευχθεί ένας ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης 46-49% και ένας συνολικός βαθμός 77-78%. Στη συνέχεια, παρότι ο ατμός παράγεται εξωτερικά της κυψέλης, το νερό που παράγεται από την ηλεκτροχημική αντίδραση της ανόδου μπορεί να χρησιμοποιηθεί εφόσον ένα μέρος των εξερχόμενων θερμών αερίων της ανόδου ανακυκλωθεί στην είσοδο του αναμορφωτή. Η ανακύκλωση

μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε με ανεμιστήρες διαχείρισης του θερμού αέρα και αντλίες ακροφυσίου ή μετά τη συμπύκνωση του ατμού. Η ανακύκλωση των αερίων της ανόδου προϋποθέτει την ύπαρξη ενός εσωτερικού κυκλώματος διακίνησης του ατμού. Συνεπώς, η συγκέντρωση του ατμού στα καυσαέρια και οι αναμενόμενες απώλειες θερμότητας μειώνονται. Για χαμηλότερα ποσοστά αέρα (εσωτερική αναμόρφωση ή ανακύκλωση των αερίων της καθόδου) η αύξηση της θερμοκρασίας στο μετακαυστήρα είναι υψηλότερη. Όλα αυτά συνεπάγονται μια αύξηση στην απόδοση του συστήματος που φτάνει στο 81%. Επιπλέον, αν είναι εφικτή η εσωτερική αναμόρφωση, μετά τη συμπύκνωση του ατμού, σε ποσοστό 100% η αναλογία του αέρα μειώνεται ουσιαστικά. Το αποτέλεσμα αυτό οδηγεί σε μεγάλη θερμοκρασιακή αύξηση του μετακαυστήρα ώστε να μειωθεί η ποσότητα της μη ωφέλιμης θερμότητας και να αυξηθεί η συνολική απόδοση του συστήματος. Με την τελευταία διόρθωση η απόδοση μπορεί να φτάσει το 93% ⁽¹⁴⁾.

Τα SOFCs παράγουν θερμότητα σε υψηλές θερμοκρασίες που είναι κατάλληλες για την παραγωγή πρόσθετης ηλεκτρικής ενέργειας αν συνδυαστούν με μια τουρμπίνα ατμού δημιουργώντας έτσι, ένα υβριδικό σύστημα. Έτσι, η Southern California Edison δοκίμασε ένα πεπαισμένο SOFC/γεννήτρια τουρμπίνας ατμού (MTG) ως την πρώτη υβριδική λύση στον κόσμο το 2000. Επίσης, από το φθινόπωρο του 2001 έχουν ανακοινωθεί σχέδια για μια εγκατάσταση P-SOFC/MTG στην Ευρώπη και 2 εγκαταστάσεις P-SOFC/MTG των 1000 kW στο κέντρο περιβαλλοντικής έρευνας της υπηρεσίας προστασίας περιβάλλοντος και της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Ωστόσο, οι κατασκευαστές έχουν αναπτύξει κυρίως SOFCs για εφαρμογές οικιακής συμπαραγωγής (όπως στην περίπτωση του μοντέλου της Sulzer Hexis με θερμική ισχύ 35 kW και ηλεκτρική 1 kW) και συμπαραγωγής στον εμπορικό τομέα ⁽³⁾.

2.4.3.4 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ

Τα SOFCs έχουν το πλεονέκτημα του πολύ χαμηλού κόστους συντήρησης καθώς εμφανίζουν λιγότερα κινητά εξαρτήματα συγκριτικά με τις μηχανές εσωτερικής καύσης και τις μικρο-τουρμπίνες. Παρόλα αυτά, η συντήρηση βοηθητικών εξαρτημάτων, όπως αντλιών και ανεμιστήρων που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία του συστήματος, μπορεί να αυξήσει τα κόστη συντήρησης και τα διαστήματα που η μονάδα βρίσκεται εκτός διαθεσιμότητας ⁽¹⁾.

Οι κρίσιμότερες αντικαταστάσεις έχουν να κάνουν κυρίως με τον καταλύτη του αναμορφωτή και την αντικατάσταση της συστοιχίας. Η αντικατάσταση της συστοιχίας προβλέπεται κάθε 4-8 χρόνια και ο καταλύτης του αναμορφωτή κάθε 5 χρόνια. Στις τακτικές επιθεωρήσεις αναλαμβάνονται κυρίως οι αντικαταστάσεις βοηθητικών εξαρτημάτων όπως των φίλτρων καυσίμου, του αναφλεκτήρα του αναμορφωτή, τις κλίνες καθαρισμού του νερού, το στεγανοποιητικό παρέμβυσμα, τις βαλβίδες, τα ηλεκτρονικά στοιχεία και την κλίση αποθείωσης. Η περιοδική αντικατάσταση των φίλτρων πραγματοποιείται κάθε 2000-4000 ώρες ⁽¹⁾. Το κόστος αντικατάστασης μιας συστοιχίας SOFC ισχύος 100 kW φτάνει τα 0.0085 €/kWh ⁽¹⁾.

2.4.4 ΕΚΠΟΜΠΕΣ

Τα SOFCs, όπως και όλοι οι τύποι κυψελών, δεν περιλαμβάνουν διεργασίες καύσης κατά τη λειτουργία τους, και επομένως παράγουν πολύ χαμηλότερα επίπεδα εκπομπών από τις μηχανές εσωτερικής καύσης και τις μικρο-τουρμπίνες. Την κυριότερη πηγή εκπομπών αποτελεί το σύστημα αναμόρφωσης του καυσίμου διότι απαιτείται θερμότητα για τη διεργασία της αναμόρφωσης η οποία προέρχεται από το αέριο της ανόδου, σύστασης 8-15% υδρογόνου, το οποίο καίγεται σε ένα καταλυτικό στοιχείο καυστήρα ⁽¹⁾. Εφόσον η θερμοκρασία της καύσης κρατηθεί σε επίπεδα κάτω των 1000°C μπορεί να αποτραπεί ο σχηματισμός οξειδίων του αζώτου (NO_x). Επιπρόσθετα, η θερμοκρασία είναι επαρκώς υψηλή για την οξείδωση του CO και των άκαυστων υδρογονανθράκων. Μια κλίση απορρόφησης βοηθά στην απομάκρυνση άλλων ρυπαντικών ουσιών όπως των SO_x ⁽¹⁾.

2.4.5 ΔΙΑΘΕΣΙΜΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΟ SOFCs ΚΑΙ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΑ ΚΟΣΤΗ

Έχουν αναπτυχθεί τρεις τύποι διατάξεων κυψελών SOFC: ο αυλωτός, ο επίπεδος και ο μονολιθικός. Η Westinghouse έχει αναπτύξει την τεχνολογία αυλωτής διάταξης στις ΗΠΑ για περισσότερα από 20 χρόνια, επενδύοντας περισσότερα από 200.000 €, με βραχυπρόθεσμο στόχο την διάθεση στην αγορά μονάδων ισχύος 250 kW με κόστος 1.000-1.500 €/kW. Ως μακροπρόθεσμο στόχο έχει θέσει την δημιουργία μεγάλων μονάδων συμπαραγωγής με συνδυασμό των βασικών μονάδων (250 kW) και αεροστρόβιλων συνολικής ηλεκτρικής ισχύος 3 MW με απόδοση 70-75%. Παρόμοια τεχνολογία αναπτύσσεται και στην Ιαπωνία υπό την αιγίδα της NEDO (New Energy Development Organization). Η επίπεδη γεωμετρία, παρά τα προβλήματα κλιμάκωσης, πλεονεκτεί σε σχέση με την αυλωτή καθώς επιτυγχάνει μεγαλύτερες πυκνότητες ισχύος. Πολλές εταιρίες στις ΗΠΑ, όπως η Ztec και η Sofco, κινούνται σε αυτήν την κατεύθυνση δημιουργώντας μονάδες ηλεκτρικής ισχύος 250 kW με στόχο να μειώσουν το κόστος στα 500 €/kW. Αντίστοιχη έρευνα γίνεται στην Ιαπωνία από την Mitsubishi. Στην Ευρώπη η Sulzer Hexis δημιούργησε το σύστημα “HXS 1000 Premiere” κατάλληλο για οικιακή χρήση που τροφοδοτείται με φυσικό αέριο και καλύπτει όλες τις βασικές ανάγκες σε θέρμανση και ηλεκτρισμό ενός σπιτιού παράγοντας 1 kW ηλεκτρική ενέργεια και 3 kW θερμική. Στον ίδιο τομέα στην Ευρώπη δραστηριοποιούνται και άλλες εταιρίες όπως είναι η ECN (Ολλανδία), και η Rolls Royce (Μεγάλη Βρετανία). Η μονολιθική διάταξη είναι η πιο συνεπτυγμένη και με τις μεγαλύτερες πυκνότητες ισχύος. Η έρευνα βρίσκεται ακόμη σε πρώιμο στάδιο και η εταιρία που κυρίως ασχολείται εμπορικά είναι η Honeywell στις ΗΠΑ ⁽¹⁴⁾.

Τα κεφαλαιουχικά κόστη των συστημάτων συμπαραγωγής από SOFCs περιλαμβάνουν ⁽¹⁾ :

- Υποσυστήματα της κυψέλης όπως τη συστοιχία και τις πολλαπλές τροφοδοσίας.
- Υποσυστήματα επεξεργασίας όπως συστήματα ελέγχου της τροφοδοσίας, ο αναμορφωτής, ο καυστήρας, οι κλίνες αποθείωσης και τα βοηθητικά εξαρτήματα.
- Ηλεκτρονικά υποσυστήματα όπως ρυθμιστές τάσης, εναλλάκτες, μεταγωγείς και συστήματα ελέγχου.

- Υποσυστήματα θερμικής διαχείρισης όπως το σύστημα ψύξης της συστοιχίας, ανάκτησης θερμότητας και οι εναλλάκτες και τέλος,
- Βοηθητικά υποσυστήματα όπως ανεμιστήρες, συστήματα καθαρισμού του νερού και συστήματα ασφαλείας και εξαερισμού.

Το υποσύστημα της κυψέλης αντιστοιχεί στο 25-40% του συνολικού κόστους εγκατάστασης, το υποσύστημα επεξεργασίας στο 25-30%, τα ηλεκτρονικά στο 10% και το υποσύστημα θερμικής διαχείρισης στο 10-20% ⁽¹⁾.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Κεφάλαιο 3^ο

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΑΡΧΟΥΣΑΣ ΚΑΙ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

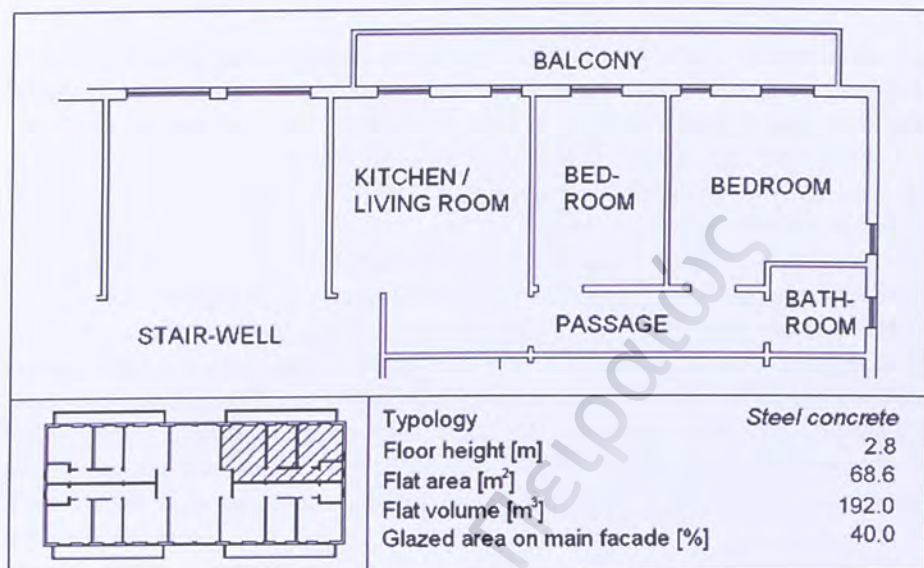
Το 3^ο κεφάλαιο επικεντρώνεται στην αποτύπωση δύο τυπικών συστημάτων μικρο-συμπαγωγής με σκοπό την κάλυψη των ηλεκτρικών και των θερμικών φορτίων μιας δεδομένης κατοικίας. Η συνήθης πρακτική που ακολουθείται στην συντριπτική πλειοψηφία των κατοικιών στην Ελλάδα στηρίζεται στην κάλυψη των θερμικών αναγκών από ένα συμβατικό σύστημα λέβητα-καυστήρα και στην αγορά ηλεκτρισμού για την κάλυψη των αντίστοιχων αναγκών από το δίκτυο της Δ.Ε.Η. Στο κεφάλαιο αυτό μελετάται η αντικατάσταση ενός παρόμοιου συμβατικού συστήματος (με καύσιμο φυσικό αέριο) από τα δύο εναλλακτικά συστήματα συμπαγωγής πολύ μικρής κλίμακας (<15 kW) τα οποία σε επόμενα κεφάλαια ελέγχονται ως προς τη λειτουργική τους συμπεριφορά και ως προς τις περιβαλλοντικές τους επιδόσεις. Τα εναλλακτικά συστήματα που εξετάζονται για τις ανάγκες της συγκεκριμένης εργασίας αφορούν καταρχήν την αντικατάσταση του συστήματος βάσης (συμβατικό σύστημα) από μια μικρής ισχύος παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης ενώ στη συνέχεια ελέγχεται η περίπτωση αντικατάστασης του αρχικού συστήματος από μια κυψέλη καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη.

3.1 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΥΠΟ ΜΕΛΕΤΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

Η συλλογή των διαθέσιμων στοιχείων των ενεργειακών καταναλώσεων που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διπλωματική εργασία ελήφθησαν από δημοσίευση του Πανεπιστημίου του Παλέρμο του τμήματος Ενέργειας και Περιβαλλοντικών Ερευνών⁽²⁹⁾ στο οποίο περιγράφεται μια μελέτη περίπτωσης ενός συγκροτήματος κατοικιών από πέντε πανομοιότυπα κτήρια, πέντε ορόφων καθένας από τους οποίους διαθέτει τέσσερα διαμερίσματα. Η συνολική επιφάνεια κάθε διαμερίσματος είναι 70 m². Στην εικόνα 17 παρουσιάζεται η κάτοψη του αναφερόμενου διαμερίσματος.

Η κατοικία εντοπίζεται σε μια μικρή αστική περιοχή που οριοθετείται γεωγραφικά στον ευρύτερο χώρο της Ν. Ιταλίας με έδρα το Παλέρμο. Από γεωγραφικής και κλιματολογικής πλευράς η περιοχή είναι αρκετά αντιπροσωπευτική σε σχέση με τα σύγχρονα δεδομένα των Ελληνικών αστικών και μεσοαστικών κέντρων ως προς τις ανάγκες θέρμανσης και ψύξης του κτηρίου. Έτσι, το καταγεγραμμένο ενεργειακό ισοζύγιο του διαμερίσματος μπορεί να θεωρηθεί ιδανικό για τις ανάγκες και το σκοπό της εργασίας. Επίσης, ο όγκος των

υπολογισμένων ενεργειακών μεγεθών είναι απολύτως επαρκής στα πλαίσια της έρευνας που πρόκειται να διεξαχθεί από τη παρούσα διπλωματική εργασία. Για τους λόγους αυτούς, η επιλογή της κατοικίας, της οποίας τα ενεργειακά δεδομένα εξετάζονται, κρίνεται κατάλληλη για τις ανάγκες της έρευνας και της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων της.



Εικόνα 17. Κάτοψη διαμερίσματος ⁽²⁹⁾

Στην προαναφερόμενη εργασία υπολογίστηκαν οι ωριαίες τιμές των ηλεκτρικών, θερμικών και ψυκτικών φορτίων της εξεταζόμενης κατοικίας. Ο υπολογισμός των φορτίων αυτών έγινε με προσομοίωση, για τη χρονική διάρκεια ενός ολόκληρου έτους, που βασίστηκε στο λογισμικό πρόγραμμα TRNSYS. Η εκτίμηση των ηλεκτρικών καταναλώσεων που προέκυψαν από τις οικιακές συσκευές και τις διατάξεις φωτισμού οδήγησαν σε αρκετές υποθέσεις που αναφέρονται στην ποσότητα και τη χρήση των συσκευών αυτών. Για τον υπολογισμό της ενεργειακής ζήτησης θεωρήθηκε ότι τα ψυκτικά φορτία καλύπτονται από μια ψυκτική εγκατάσταση και η απαιτούμενη θερμότητα επιτυγχάνεται με λέβητα φυσικού αερίου (ένα για κάθε διαμέρισμα). Η συνολικά παραγόμενη ισχύς που προέκυψε από τα δεδομένα της προσομοίωσης είναι αποτέλεσμα της ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια για ψύξη και του απαιτούμενου θερμικού φορτίου που καλύφθηκε από την κατανάλωση φυσικού αερίου. Η συνολική ενεργειακή κατανάλωση περιλαμβάνει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τις ηλεκτρικές συσκευές και τον ψύκτη και τη συνολική ποσότητα φυσικού αερίου που καταναλώνεται λόγω του λέβητα. Τα στοιχεία των ετήσιων φορτίων που λήφθηκαν ως δεδομένα για την παρούσα διπλωματική εργασία βρίσκονται στο Παράρτημα 1.

3.2 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗΣ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗΣ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗΣ

3.2.1 Α΄ ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΗ ΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Η πρώτη προτεινόμενη εναλλακτική εγκατάσταση αφορά την αντικατάσταση του συμβατικού συστήματος από μια παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης, με κατάλληλα τεχνικά χαρακτηριστικά, έτσι ώστε να μπορεί να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις του συστήματος για τη δεδομένη κατοικία. Όπως αναφέρθηκε και στην αρχή του κεφαλαίου, ο συμβατικός τρόπος κάλυψης των ηλεκτρικών και των θερμικών φορτίων ενός καταναλωτή καθίσταται η αγορά ηλεκτρισμού από το εθνικό δίκτυο και η καύση κάποιου καυσίμου (όπως για παράδειγμα του φυσικού αερίου) σε λέβητα για την παραγωγή θερμότητας. Στο ήδη υπάρχον σύστημα είναι εγκατεστημένος ένας λέβητας φυσικού αερίου που παράγει θερμότητα για την κάλυψη των θερμικών αναγκών του διαμερίσματος ενώ η ηλεκτρική ενέργεια προμηθεύεται ξεχωριστά από το εθνικό ηλεκτρικό δίκτυο. Όμως η ολική κατανάλωση καυσίμου είναι πιθανό να μειώνεται σημαντικά εάν εφαρμοστεί κάποια τεχνολογία συμπαραγωγής. Με την τοποθέτηση ενός συστήματος συμπαραγωγής από μια μηχανή εσωτερικής καύσης στη θέση του αρχικού συστήματος είναι δυνατή η συνδυασμένη παραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του χρήστη.

Μεταξύ των διαθέσιμων τεχνολογιών συμπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας, τα συστήματα με παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης εμφανίζονται ως τα πιο ενδιαφέροντα σχετικά με την ωριμότητα που χαρακτηρίζει την συγκεκριμένη τεχνολογία και τα διαθέσιμα ολοκληρωμένα συστήματα που εφαρμόζονται ήδη στην αγορά.

3.2.1.1 ΕΠΙΛΟΓΗ ΚΑΤΑΛΛΗΛΑ ΔΙΑΣΤΑΣΙΟΛΟΓΗΜΕΝΗΣ Μ.Ε.Κ.

Σε πρώτη φάση εξετάζονται οι περιπτώσεις δύο συστημάτων μηχανών εσωτερικής καύσης που μπορούν ενδεχομένως να εφαρμοστούν σε συστήματα συμπαραγωγής του οικιακού τομέα αλλά ωστόσο εμφανίζουν διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά (κατά κύριο λόγο διαφορετική δυναμικότητα). Η επιλογή της καταλληλότερης από τις δύο διαθέσιμες μηχανές έγινε με βάση τις απαιτήσεις της δεδομένης κατοικίας και κατά πόσο μπορεί κάθε μηχανή να ανταποκριθεί σε αυτές τις απαιτήσεις.

Και οι δύο μηχανές εσωτερικής καύσης που καλούνται να αντικαταστήσουν το συμβατικό σύστημα είναι αερόψυκτες και τροποποιημένες ώστε να χρησιμοποιούν καύσιμο φυσικό αέριο. Η πρώτη εξεταζόμενη μηχανή (ICE 1) διαθέτει πιο αποδοτικό σύστημα ανάκτησης θερμότητας από τη δεύτερη. Έτσι, η θερμότητα ανακτάται από τα καυσαέρια καθώς επίσης και από τον αέρα που ψύχει τη μηχανή και από τη γεννήτρια ενώ, στην περίπτωση της δεύτερης μηχανής (ICE 2) η θερμότητα ανακτάται μόνο από τα καυσαέρια. Τα δύο πρωτότυπα μηχανής εσωτερικής καύσης που μελετώνται, έχουν περιγραφεί από τον R. Possidente et al⁽³¹⁾ και είναι σχεδιασμένα για λόγους έρευνας (για το λόγο αυτό δεν είναι

βελτιστοποιημένα για χρήση συμπαραγωγής). Και τα δύο μοντέλα έχουν υποβληθεί σε συνεχή πειραματικές δοκιμές σε ειδικό εργαστήριο. Στο εργαστήριο πραγματοποιήθηκε μέτρηση των κύριων θερμοδυναμικών ιδιοτήτων με στόχο τον υπολογισμό των ρυθμών ροής μάζας και ενέργειας.

Τα δύο συστήματα ελέγχθηκαν για ένα μεγάλο φάσμα λειτουργικών συνθηκών με διάφορες τιμές θερμικής και ηλεκτρικής ισχύος. Η ICE 1 μπορεί να καλύψει την απαίτηση σε ηλεκτρική ισχύ μέχρι και 3 kW_{el}, ενώ η ICE 2 έχει ονομαστική ηλεκτρική ισχύ 1,7 kW_{el}. Η πρόσθετη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών του διαμερίσματος σε ηλεκτρισμό και ψύξη προμηθεύεται από το δίκτυο ηλεκτρισμού.

Η θερμική απόδοση ισχύος της δεύτερης μηχανής φτάνει τα 4 kW_{th}, ενώ για την πρώτη η αντίστοιχη τιμή είναι αρκετά υψηλότερη (10,96 kW_{th}). Η ICE 1 μπορεί να αποδίδει αρκετά υψηλά ποσά θερμικής ισχύος χάρη στο αρκετά πιο αποδοτικό σύστημα ανάκτησης θερμότητας που διαθέτει.

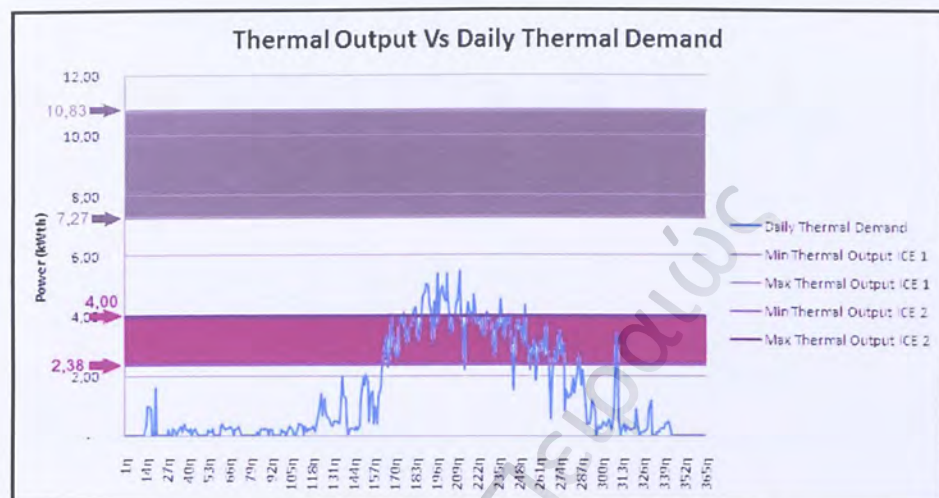
Οι σημαντικότερες τεχνικές παράμετροι των δύο εναλλακτικών συστημάτων που μόλις περιγράφηκαν παρατίθενται στον πίνακα 9.

Πίνακας 9. Παράμετροι εναλλακτικού συστήματος από τις δύο εξεταζόμενες MEK

Παράμετροι	ICE 1	ICE 2
Μέγεθος μηχανής (cm ³)	359	226
Αριθμός κυλίνδρων	1	1
Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς (kW _{el}) ⁽³¹⁾	3.00	1,70
Μέγιστη θερμική ισχύς (kW _{th}) ⁽³¹⁾	10.96	4,00
Ονομαστική ισχύς (kW) ⁽³¹⁾	18.30	10,20
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, N _{el} (%)	15.73	16,50
Θερμικός βαθμός απόδοσης, N _{th} (%)	57.51	38,80
Συνολικός βαθμός απόδοσης, N _{tot} (%)	73.24	55,30

Το κάτω όριο της αποδιδόμενης θερμικής ισχύος της πρώτης εξεταζόμενης μηχανής βρέθηκε στα 7,27 kW_{th}, σε αντίθεση με την περίπτωση της δεύτερης εξεταζόμενης μηχανής της οποίας το τεχνικό ελάχιστο της αποδιδόμενης θερμικής ισχύος είναι 2,38 kW_{th}. Είναι εμφανές, όπως προκύπτει και από το διάγραμμα της εικόνας 18, ότι η ICE 1 δεν μπορεί να ανταποκριθεί στις θερμικές απαιτήσεις του υπο μελέτη διαμερίσματος ακόμα κι αν τεθεί σε λειτουργία στα τεχνικά της ελάχιστα. Παρότι η πρώτη μηχανή εμφανίζει αρκετά υψηλότερο θερμικό βαθμό απόδοσης από τη δεύτερη, η ICE 1 εμφανίζεται υπερδιαστασιολογημένη για τα δεδομένα των αναγκών της παρούσας εργασίας, σε σχέση πάντα με τις ανάγκες του διαμερίσματος που έχει επιλεγεί ως σημείο αναφοράς. Για τους παραπάνω λόγους, επιλέγεται η περίπτωση της αντικατάστασης του συμβατικού συστήματος από την ICE 2 που από πλευράς διαστασιολόγησης εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά από την ICE 1. Αξίζει να αναφερθεί ότι για την παραγωγή του επιπλέον απαιτούμενου ποσού θερμότητας

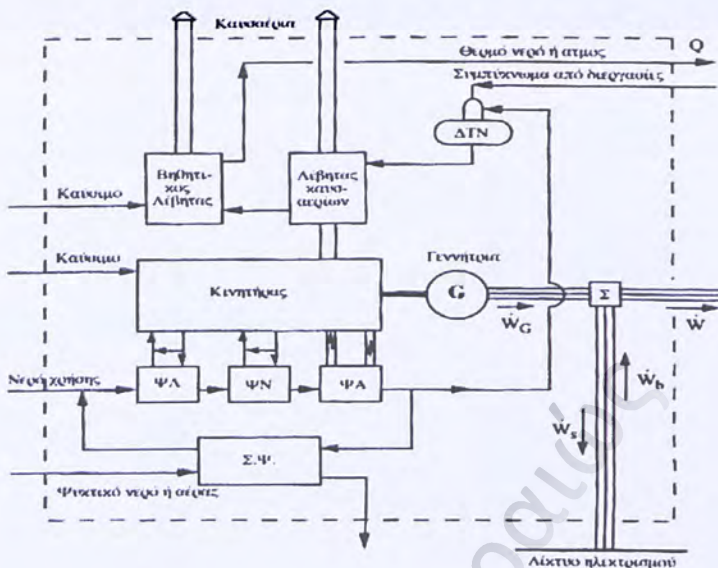
που δεν μπορεί να καλυφθεί από την επιλεγμένη μηχανή εσωτερικής καύσης είναι δυνατή η παράλληλη λειτουργία του συμπαραγωγικού συστήματος με ένα βοηθητικό λέβητα φυσικού αερίου (Supplementary Boiler).



Εικόνα 18. Σύγκριση τεχνικών μεγίστων και ελαχίστων ICE1 και 2 με βάση τη ζήτηση θερμικής ισχύος του διαμερίσματος

3.2.1.2 ΑΠΟΤΥΠΩΣΗ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ Μ.Ε.Κ. ΓΙΑ ΟΙΚΙΑΚΗ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗ

Σε ένα σύστημα συμπαραγωγής από μια μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) ο κινητήρας κινεί την ηλεκτρογεννήτρια παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια. Από την άλλη μεριά, τέσσερις εναλλάκτες ανακτούν θερμότητα από ρευστά που έχουν σχέση με τη λειτουργία της μηχανής: το ψυγείο λαδιού, το ψυγείο νερού (του κλειστού κυκλώματος του κινητήρα), το ψυγείο αέρα υπερπλήρωσης και τον εναλλάκτη ανακομιδής θερμότητας από τα καυσαέρια του κινητήρα (λέβητας καυσαερίων). Με τη θερμότητα αυτή θερμαίνεται το νερό που προορίζεται για διάφορες χρήσεις, όπως για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης και τις ανάγκες θέρμανσης του κτηρίου. Για να αυξηθεί ο βαθμός πληρότητας των κυλίνδρων ο αέρας ψύχεται σε ειδικό ψυγείο προσφέροντας θερμότητα στο νερό χρήσης. Ένα γενικό διάγραμμα ροής που μπορεί να παραστήσει τα λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος συμπαραγωγής περιγράφεται μέσω του σχήματος 19, χωρίς αυτό απαραίτητα να αποτελεί και τη μόνη δυνατή διάταξη.



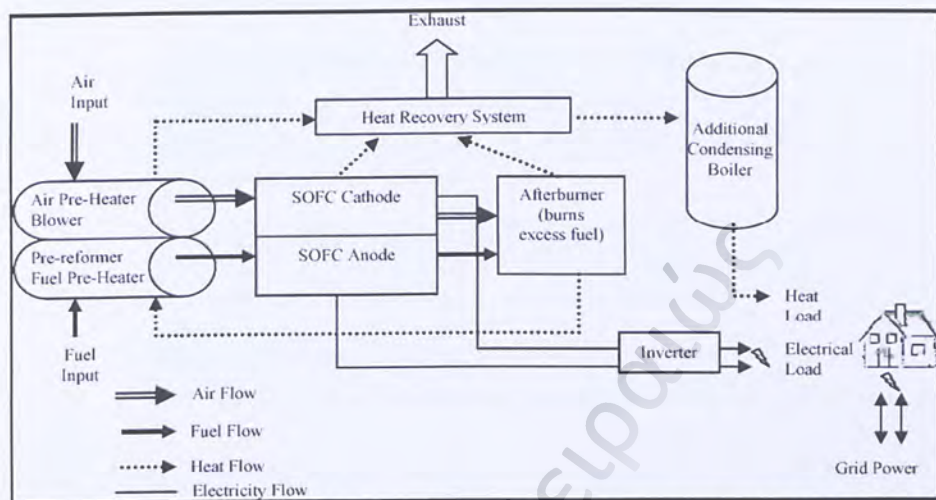
Εικόνα 19. Ενδεικτικό διάγραμμα ροής προτεινόμενης εγκατάστασης συμπαραγωγής από ΜΕΚ ⁽³⁰⁾

Διακρίνονται δύο περιπτώσεις από πλευράς θερμοκρασίας εξόδου του αέρα από το ψυγείο ⁽³⁰⁾: χαμηλή θερμοκρασία (περίπου 45°C), ή υψηλή θερμοκρασία (περίπου 90°C). Η χαμηλή θερμοκρασία συντελεί σε υψηλότερο βαθμό πληρότητας και επομένως υψηλότερη συγκέντρωση ισχύος. Όμως η ανακτώμενη θερμότητα βρίσκεται περιορισμένη χρήση, διότι το νερό στην έξοδο του ψυγείου έχει χαμηλή θερμοκρασία (30-35°C). Η λύση αυτή μπορεί να επιλεγεί όταν υπάρχει ανάγκη προθέρμανσης νερού που έρχεται στο σύστημα με θερμοκρασία 20-25°C. Εάν το νερό έρχεται στο σύστημα με θερμοκρασία 60-70°C, όπως συμβαίνει και στη περίπτωση συστημάτων κεντρικής θέρμανσης, τότε η λύση της υψηλής θερμοκρασίας είναι προτιμότερη από πλευράς εκμετάλλευσης της ενέργειας του καυσίμου, καθώς αυξάνει τον ολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος κατά 3-5%. Η θερμοκρασιακή στάθμη επηρεάζει τη σχετική ως προς τη ροή του νερού τοποθέτηση των τριών ψυγείων (λαδιού, νερού και αέρα).

Με ανάκτηση θερμότητας από τα τρία ψυγεία το νερό θερμαίνεται μέχρι τους 75-80°C. Κατόπιν έρχεται στον εναλλάκτη ανακομιδής θερμότητας των καυσαερίων, όπου θερμαίνεται μέχρι τους 85-90°C ή και ατμοποιείται.

Στη συνέχεια δίνεται ολοκληρωμένα μια περιγραφική απεικόνιση της διάταξης ενός τέτοιου συστήματος μικρο-συμπαραγωγής, για τις ανάγκες της υπό μελέτης κατοικίας, το οποίο περιλαμβάνει ένα τυπικό κινητήρα εσωτερικής καύσης, ένα σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, ένα σύστημα αποθήκευσης θερμότητας σε συνδυασμό με ένα βοηθητικό καυστήρα για την παραγωγή της επιπλέον απαιτούμενης θερμότητας και τέλος, ένα αναστροφέα μετατροπής της συνεχούς τάσης σε εναλλασσόμενη επιθυμητής συχνότητας ⁽³²⁾.

αέρας παρέχεται από έναν ανεμιστήρα και προθερμαίνεται πριν εισαχθεί στη συστοιχία. Το διάγραμμα ροής του περιγραφόμενου συστήματος παρουσιάζεται στην εικόνα 21.



Εικόνα 21. Διάγραμμα ροής προτεινόμενης εγκατάστασης συμπαραγωγής από SOFC⁽³⁴⁾

Για τη διευκόλυνση του χρήστη, το ολοκληρωμένο σύστημα πρέπει να ικανοποιεί, λίγο έως αρκετά στιγμιαία, τη ζήτηση σε θερμότητα διατηρώντας ένα υψηλό βαθμό αξιοπιστίας. Η θερμική απόδοση ισχύος της μονάδας SOFC ξεπερνά τα 5,3 kW_{th}. Εφόσον, η παραγόμενη θερμική ισχύς δεν μπορεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες θέρμανσης και ζεστού νερού χρήσης, είναι δυνατή η κάλυψη του επιπλέον φορτίου με την προσθήκη ενός συμπληρωματικού καυστήρα ή μιας δεξαμενής αποθήκευσης ζεστού νερού. Συνεπώς, η μικρότερη δυνατή διάταξη που μπορεί να προσδώσει στο σύστημα έναν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας περιλαμβάνει τη συστοιχία κυψελών καυσίμου σε συνδυασμό με ένα βοηθητικό καυστήρα, χωρίς ωστόσο να είναι πάντα απαραίτητη η χρήση του τελευταίου.

Για την κάλυψη των απαιτήσεων της κατοικίας σε ηλεκτρισμό, το πρόσθετο ηλεκτρικό φορτίο που δεν καλύπτεται από την κυψέλη μπορεί να αγοραστεί από το εθνικό δίκτυο ηλεκτρισμού. Στις περισσότερες των περιπτώσεων, η αξιοπιστία της τροφοδοσίας σε ηλεκτρισμό εντός της οικίας δεν επηρεάζεται από τη μικρο-συμπαραγωγική μονάδα. Εξάιρεση αποτελεί η ειδική περίπτωση στην οποία η μονάδα στηρίζει ένα σύστημα συνεχούς τροφοδοσίας (UPS), το οποίο μπορεί να λειτουργεί αυτόνομα για μια ορισμένη χρονική διάρκεια⁽³³⁾. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα πρέπει να καλύψει ένα συγκεκριμένο επίπεδο ηλεκτρικής ζήτησης για μια ελάχιστη χρονική περίοδο, ανάλογα με το μέγεθος του συστήματος αποθήκευσης ηλεκτρισμού.

Η κυψέλη καυσίμου λειτουργεί αδιάκοπα σε υψηλές θερμοκρασίες για μεγάλα χρονικά διαστήματα. Με εξαίρεση κάποιες προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας για λόγους συντήρησης, η μονάδα μπορεί να παράγει συνεχώς ένα ελάχιστο ποσό θερμικής και

ηλεκτρικής ισχύος περίπου στα 0.5 kW. Η μέγιστη ηλεκτρική ισχύς που μπορεί να παράγει το σύστημα δεν μπορεί να ξεπεράσει τα 2.0 kW_{el}.

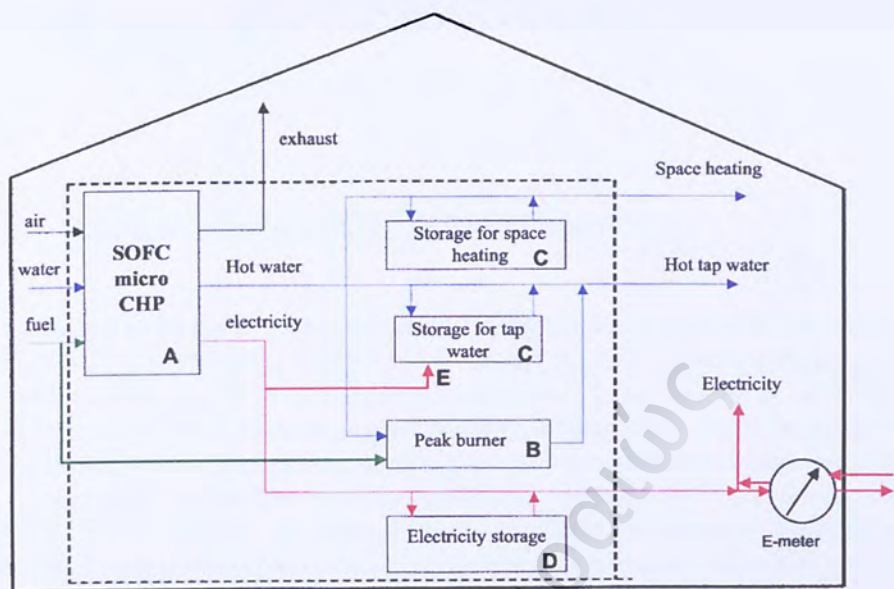
Οι σημαντικότερες λειτουργικές παράμετροι της κυψέλης καυσίμου που επιλέχθηκε για τις ανάγκες συμπαραγωγής απεικονίζονται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 10. Παράμετροι εναλλακτικού συστήματος από ΜΕΚ

Παράμετροι	SOFC
Μέγιστη ηλεκτρική ισχύς (kW _{el}) ⁽³¹⁾	2.00
Μέγιστη θερμική ισχύς (kW _{th}) ⁽³¹⁾	5,40
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, N _{el} (%)	24,80
Θερμικός βαθμός απόδοσης, N _{th} (%)	66,20
Συνολικός βαθμός απόδοσης, N _{tot} (%)	91,00

Για τον περιορισμό των φαινομένων ενεργειακής υποβάθμισης και άλλων ανεπιθύμητων συνεπειών, ο ρυθμός μεταβολής του ηλεκτρικού φορτίου πρέπει να παραμένει όσο το δυνατό σε χαμηλότερα επίπεδα. Μια διαμόρφωση της τάξεως 1:4 μπορεί να προκαλέσει αστάθεια στη θερμοκρασία της συστοιχίας. Έτσι, προτείνεται ένας ρυθμός μεταβολής 1-2 A/min ή ισοδύναμα 23-46 W/min. Η τιμή αυτή βασίζεται σε εμπειρικά δεδομένα⁽³³⁾.

Τα διάφορα συστατικά στοιχεία που συνθέτουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα συμπαραγωγής από μια κυψέλη SOFC, επιλέγοντας ως σημείο αναφοράς την εξεταζόμενη κατοικία, απεικονίζονται στην εικόνα 22.



Εικόνα 22. Απεικόνιση συστήματος οικιακής συμπαραγωγής από SOFC (FlameSOFC internal report)

A	Μονάδα συμπαραγωγής SOFC
B	Βοηθητικός καυστήρας
C	Μονάδα αποθήκευσης θερμότητας (200 lt ημερήσια θερμική απαίτηση)
D	Σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρισμού: μπαταρία με σύστημα ελέγχου και εναλλάκτη
E	Πηνίο για τη μετατροπή της περίσσειας ηλεκτρισμού σε θερμότητα

Πίνακας 11. Βασικά συστατικά συμπαραγωγικού συστήματος από SOFC

Κεφάλαιο 4^ο

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

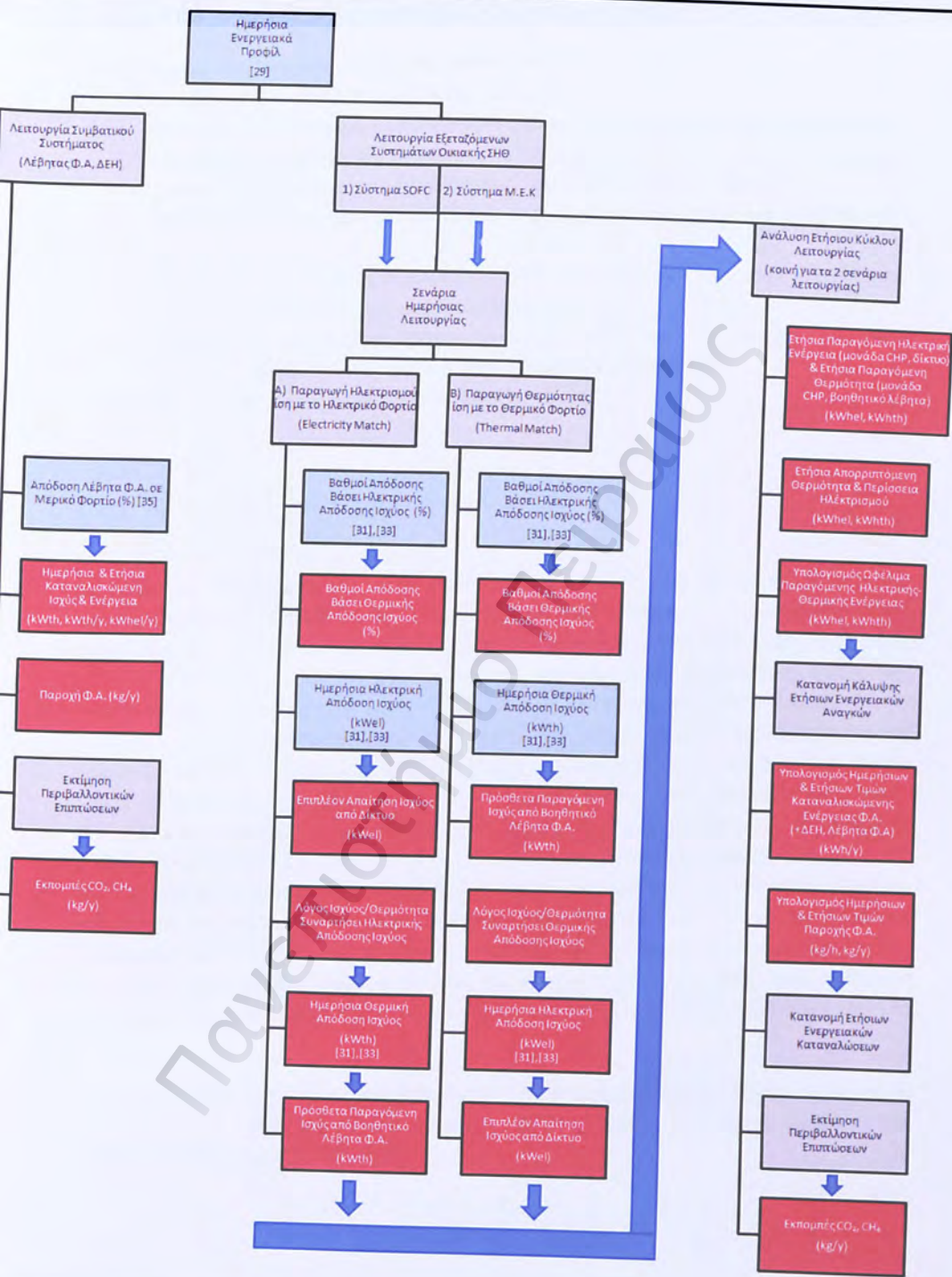
Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για την ενεργειακή και περιβαλλοντική αποτίμηση της πιθανής αντικατάστασης του συμβατικού συστήματος λέβητα φ.α. από δύο συστήματα οικιακής μικρο-συμπαγωγής με σκοπό την ενεργειακή κάλυψη των οικιακών φορτίων θέρμανσης και ηλεκτρισμού. Τα δύο συστήματα που εξετάζονται, όπως έγινε κατανοητό και στο προηγούμενο κεφάλαιο, αναφέρονται σε ένα μικρής ισχύος εμβολοφόρο κινητήρα εσωτερικής καύσης και σε μια παρόμοιου μεγέθους ισχύος κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου. Ελέγχεται η λειτουργική συμπεριφορά κάθε μονάδας βασισμένη στις ενεργειακές ανάγκες της εν λόγω κατοικίας και αξιολογείται συγκριτικά σε σχέση με τη λειτουργία του συμβατικού συστήματος. Τα βήματα της μεθοδολογίας περιγράφονται αναλυτικά στις επόμενες παραγράφους με συζήτηση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν, ενώ στο τέλος της ανάλυσης παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η μείωση των βασικών εκπομπών από την εφαρμογή κάθε συστήματος.

Τα δεδομένα της μεθοδολογίας που αναφέρονται στις ενεργειακές απαιτήσεις του διαμερίσματος εμφανίζονται αναλυτικά στο παράρτημα Α, ενώ στο παράρτημα Β παρατίθεται η ονοματολογία βασικών ενεργειακών όρων που παρουσιάζονται στο κεφάλαιο αυτό.

4.1 ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τα βήματα της μεθοδολογίας, τα στοιχεία που λαμβάνονται ως δεδομένα καθώς και όλα τα υπολογισμένα μεγέθη απεικονίζονται στο διάγραμμα ροής της εικόνας 26. Τα γαλάζια κελιά θεωρούνται δεδομένα, τα κόκκινα κελιά αποτελούν τα υπολογισμένα μεγέθη ενώ τα γκριζα κελιά είναι περιγραφικά.

Αρχικά υπολογίζεται η ενεργειακή αποδοτικότητα του συμβατικού συστήματος με βάση τις ενεργειακές ανάγκες του κτηρίου. Εν συνεχεία εξετάζεται η ενεργειακή συμπεριφορά των συστημάτων αντικατάστασης για δύο διαφορετικά σενάρια λειτουργίας σε ημερήσια βάση. Τα στοιχεία αυτά οδηγούν στην τελική ανάλυση του ετήσιου κύκλου λειτουργίας, με άλλα λόγια, στην κατανομή κάλυψης των ετήσιων ενεργειακών αναγκών και στην κατανομή των ετήσιων ενεργειακών καταναλώσεων κάθε συστήματος για κάθε προεπιλεγμένο σενάριο.



Εικόνα 26. Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας

Η ανάλυση της μεθοδολογίας περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

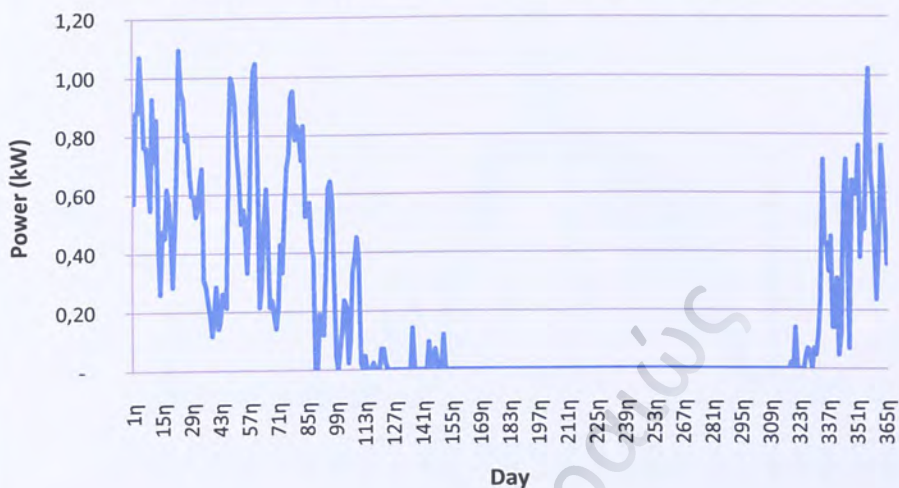
- a) Καταγραφή των ημερήσιων ενεργειακών προφίλ
- b) Διάκριση των σεναρίων ημερήσιας λειτουργίας
- c) Υπολογισμός των βαθμών απόδοσης σε μερικό ηλεκτρικό φορτίο για κάθε σύστημα
- d) Υπολογισμός των βαθμών απόδοσης σε μερικό θερμικό φορτίο για κάθε σύστημα (συμπεριλαμβανομένου του λέβητα Φ.Α. του συμβατικού συστήματος)
- e) Υπολογισμός της ημερήσιας απόδοσης ισχύος κάθε συστήματος για κάθε σενάριο λειτουργίας
- f) Υπολογισμός της ετήσια παραγόμενης κάλυψης ενέργειας για κάθε εξεταζόμενη περίπτωση συστήματος και σεναρίου λειτουργίας
- g) Υπολογισμός της ετήσια καταναλισκόμενης ενέργειας και παροχής Φ.Α. που απαιτείται από κάθε σύστημα και για κάθε σενάριο λειτουργίας
- h) Υπολογισμός των ετήσιων εκπομπών CO₂ και CH₄.

4.1.1 ΚΑΤΑΓΡΑΦΗ ΗΜΕΡΗΣΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΠΡΟΦΙΛ

Οι τιμές των ενεργειακών καταναλώσεων που προέκυψαν από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του Beccali et al ⁽²⁹⁾ προσαρμόστηκαν, μετά από κανονικοποίηση των δεδομένων, για μια αντίστοιχη κατοικία 100 m². Από τις εξεταζόμενες διαθέσιμες τιμές έγινε η αποτύπωση των ημερήσιων προφίλ καταναλώσεων (θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρισμού). Στο ημερήσιο προφίλ ηλεκτρικών καταναλώσεων, παράλληλα με τα ηλεκτρικά φορτία που προκύπτουν από τις ηλεκτρικές συσκευές, αθροίζονται και τα ημερήσια ψυκτικά φορτία. Το ψυκτικό φορτίο του διαμερίσματος αντιπροσωπεύει τις μέγιστες ημερήσιες καταναλώσεις σε ψυκτική ισχύ για το χρονικό διάστημα ενός έτους. Θεωρείται ότι η ποσότητα του ηλεκτρικού ρεύματος (kW_{el}) που χρειάζεται να καταναλώσει η ψυκτική συσκευή για να πετύχει την απαιτούμενη απόδοση είναι περίπου ίση με το 1/3 της απαιτούμενης ψυκτικής ισχύος (kW). Επομένως το ψυκτικό προφίλ καταναλώσεων καθώς και το προφίλ των ηλεκτρικών καταναλώσεων, που προκύπτει από το άθροισμα των ηλεκτρικών φορτίων που απαιτούνται για τη λειτουργία των ηλεκτρικών συσκευών και του συστήματος ψύξης, καταγράφεται θεωρώντας μια αναλογία ενεργειακής αποδοτικότητας για ψύξη (λόγος ψυκτικής ισχύος της μονάδας προς τις ηλεκτρικές καταναλώσεις της) ίση με 3.

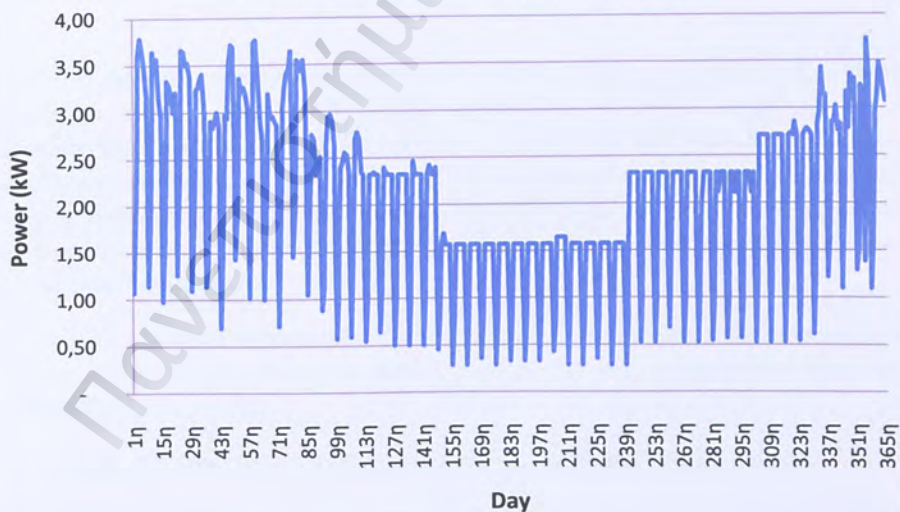
Τα αποτελέσματα της κανονικοποίησης παρουσιάζονται στα ακόλουθα διαγράμματα (όπου οι θερμοί μήνες αντιστοιχούν στις ημέρες 1 – 155 και 330 - 365, ενώ οι ψυχροί μήνες αντιστοιχούν στις ημέρες 155 - 330

Daily Refrigeration Power (kWel)

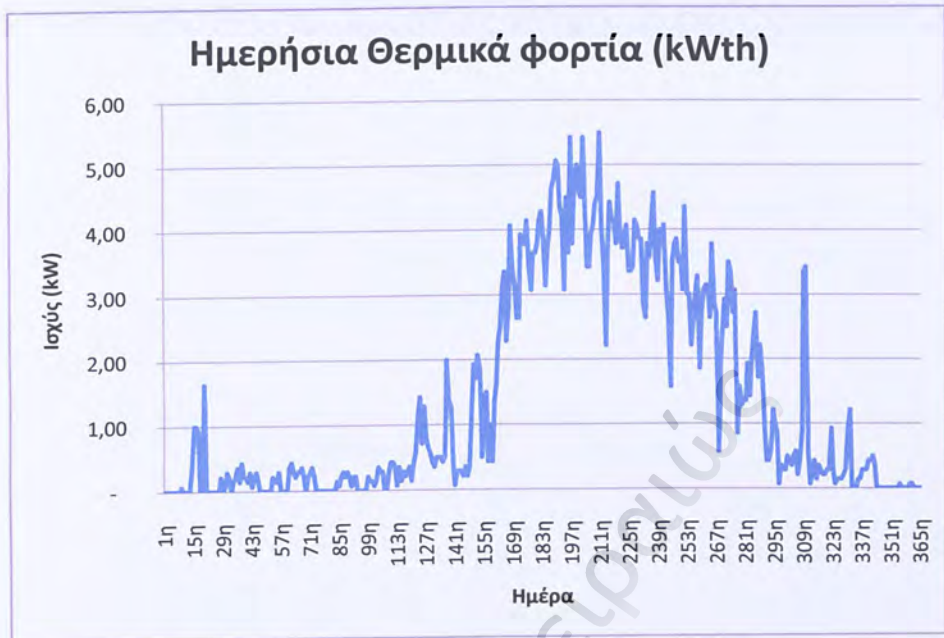


Εικόνα 23. Ημερήσιο προφίλ ψυκτικών καταναλώσεων ενός έτους

Daily Electrical Power (kWel)



Εικόνα 24. Ημερήσιο προφίλ κατανάλωσης μέγιστων ηλεκτρικών και ψυκτικών φορτίων ενός έτους



Εικόνα 25. Ημερήσιο προφίλ θερμικών καταναλώσεων ενός έτους

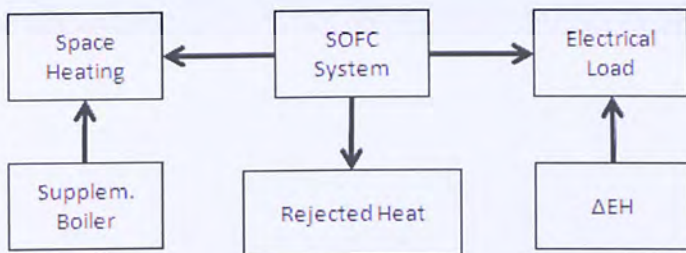
4.1.2 ΑΝΑΛΥΣΗ ΣΕΝΑΡΙΩΝ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Με κίνητρο την ρεαλιστική προσομοίωση της ετήσιας λειτουργίας, εξετάστηκαν δυο τρόποι λειτουργίας, μοντελοποιώντας τα μερικά φορτία που καλούνται να καλύψουν τα συμπαραγωγικά συστήματα. Πιο συγκεκριμένα, εξετάζονται δύο διαφορετικά σενάρια ρύθμισης της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος του συστήματος σε κάθε χρονική στιγμή (σε ημερήσια βάση) σύμφωνα με τις ενεργειακές ανάγκες του χρήστη. Για το λόγο αυτό, λαμβάνονται υπόψη τα ημερήσια μερικά φορτία που προέκυψαν από τις απαιτήσεις ισχύος του πρότυπου διαμερίσματος.

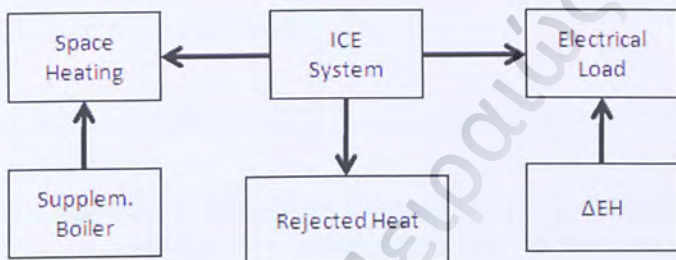
Τα εξεταζόμενα σενάρια ημερήσια λειτουργίας των δύο συμπαραγωγικών συστημάτων που καλούνται να αντικαταστήσουν το συμβατικό σύστημα χωριστής παραγωγής σε θερμότητα και ηλεκτρισμό είναι τα εξής :

Ι. Παραγωγή ηλεκτρισμού ίσης με το ηλεκτρικό φορτίο («Electricity Match»).

Αν η ηλεκτρική απόδοση ισχύος της μηχανής είναι μικρότερη από το φορτίο, το έλλειμμα συμπληρώνεται από το δίκτυο. Βοηθητικός λέβητας φυσικού αερίου (supplementary boiler) συμπληρώνει τις πρόσθετες ανάγκες σε θερμότητα, εάν χρειαστεί. Αν το κάτω όριο της θερμικής απόδοσης ισχύος της μηχανής (τεχνικό ελάχιστο) είναι μεγαλύτερο από τη θερμική απαίτηση τότε λαμβάνεται μια περίσσεια ισχύος η οποία σε περίπτωση που δεν μπορεί να εκμεταλλευθεί απορρίπτεται ως θερμότητα στο περιβάλλον.



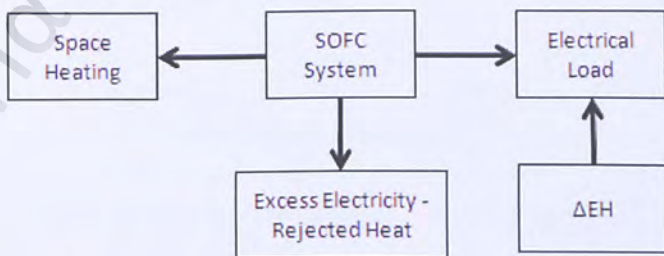
Εικόνα 26. Διάγραμμα ροής οικιακής ΣΗΘ από SOFC (σενάριο Electricity Match)



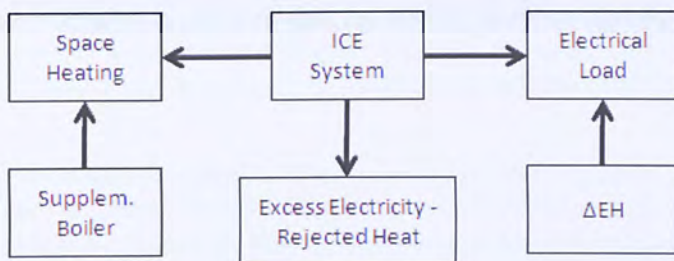
Εικόνα 27. Διάγραμμα ροής οικιακής ΣΗΘ από ΜΕΚ (σενάριο Electricity Match)

II. Παραγωγή θερμότητας ίσης με το θερμικό φορτίο («Heat Match»).

- Αν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι μικρότερη από το φορτίο (λόγω μικρής διαστασιολόγησης του συμπαραγωγικού συστήματος), το έλλειμμα συμπληρώνεται από το δίκτυο. Αν, απ' την άλλη, παράγεται ηλεκτρική ενέργεια περισσότερη από το φορτίο, η περίσσεια μπορεί υπό κατάλληλες και ευνοϊκές συνθήκες να πωληθεί στο εθνικό δίκτυο. Ένας βοηθητικός λέβητας φυσικού αερίου καλύπτει το υπόλοιπο της θερμικής απαίτησης ισχύος εφόσον τα συστήματα, ή κάποιο εξ αυτών, δεν μπορεί να καλύψει πλήρως τις ανάγκες σε θερμότητα.



Εικόνα 28. Διάγραμμα ροής οικιακής ΣΗΘ από SOFC (σενάριο Thermal Match)

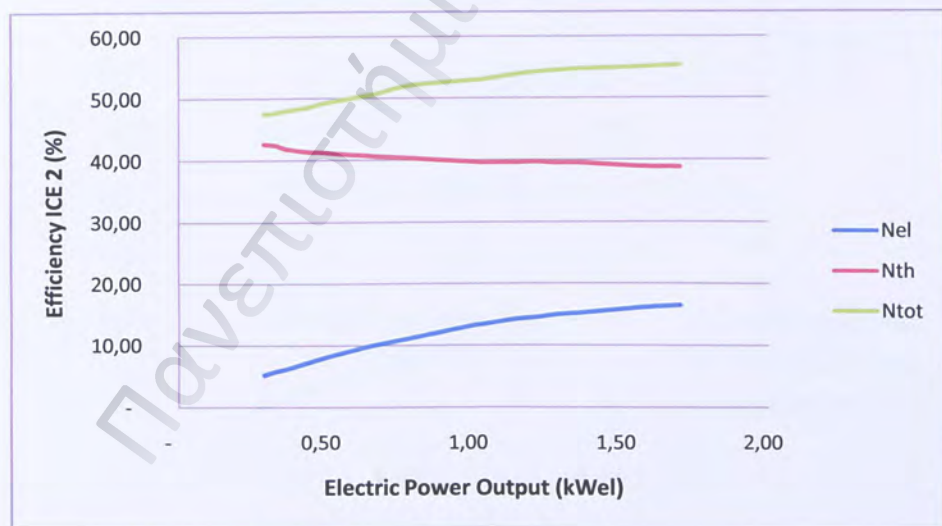


Εικόνα 29. Διάγραμμα ροής οικιακής ΣΗΘ από MEK (σενάριο Thermal Match)

4.1.3 ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΕ ΜΕΡΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

4.1.3.1 ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΕΣΩΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΕ ΜΕΡΙΚΟ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Μετά από κανονικοποίηση των δεδομένων που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές της Μ.Ε.Κ.⁽³¹⁾ με τα δεδομένα των καταναλώσεων της εξεταζόμενης κατοικίας παρουσιάζεται ο ηλεκτρικός, ο θερμικός και ο συνολικός βαθμός απόδοσης βάσει της ηλεκτρικής απόδοσης ισχύος της μηχανής (εικόνα 30)⁽³¹⁾.



Εικόνα 30. Βαθμοί απόδοσης MEK σε διάφορες τιμές ηλεκτρικής ισχύος⁽³¹⁾

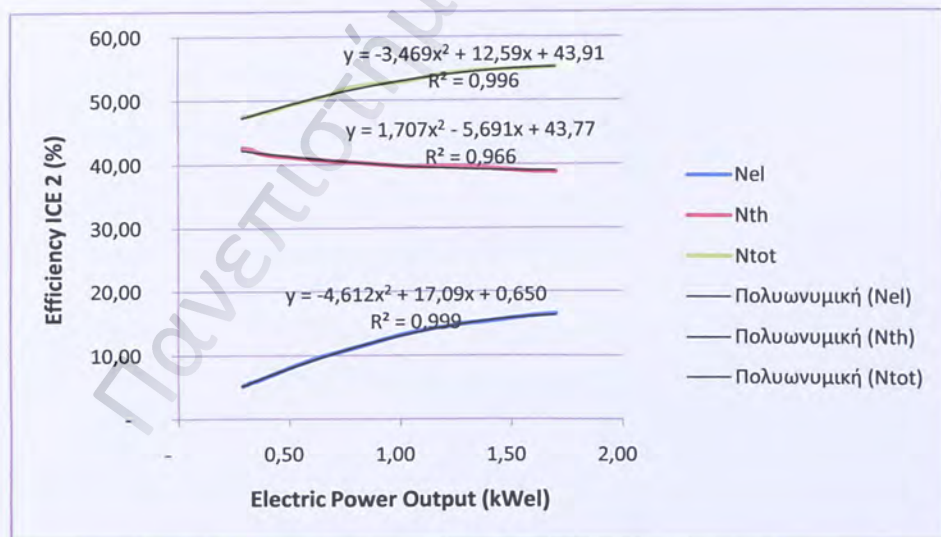
Από το διάγραμμα της εικόνας 30 γίνεται αντιληπτό πως ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης ($N_{MEK_{el}}$) βελτιώνεται αυξανόμενης της ηλεκτρικής ισχύος, επισημαίνοντας την ανάγκη

λειτουργίας της μηχανής σε μέγιστη ισχύ για όσο το δυνατόν μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα. Σε ιδανικές συνθήκες (κοντά στα 1.7 kW_{el}) ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης φτάνει το 16.50 %, μια τιμή που θεωρείται ικανοποιητική δεδομένου του μεγέθους της μηχανής.

Αντίθετα με τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, ο θερμικός βαθμός (N_{MEK_{th}}) μειώνεται αυξανόμενης της ηλεκτρικής απόδοσης ισχύος. Αυτή η πτώση του θερμικού βαθμού απόδοσης οφείλεται στη μείωση του ωφέλιμου ποσού θερμότητας που δεσμεύεται από τα καυσαέρια λόγω αύξησης της ηλεκτρικής απόδοσης. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται σε σχετικά χαμηλές τιμές (38.80 % < N_{MEK_{th}} < 42.60 %). Η χαμηλές τιμές μπορούν να αιτιολογηθούν, καθώς η εξεταζόμενη μηχανή εσωτερικής καύσης δεν διαθέτει αρκετά αποδοτικό σύστημα ανάκτησης θερμότητας διότι είναι σχεδιασμένη για λόγους έρευνας⁽³¹⁾

Όπως ακριβώς συμβαίνει με τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης έτσι και στο συνολικό βαθμό (N_{MEK_{tot}}) παρατηρείται μια αύξηση ανάλογη με την παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Ωστόσο, λόγω του χαμηλού θερμικού βαθμού απόδοσης η μηχανή δεν μπορεί να φτάσει σε ικανοποιητικά επίπεδα συνολικής απόδοσης (47.50 % < N_{MEK_{tot}} < 55.30 %).

Με βάση τα διαγράμματα της εικόνας 26 υπολογίσθηκαν οι πολυωνυμικές εξισώσεις που ορίζουν τους βαθμούς απόδοσης του συστήματος στα διάφορα επίπεδα ηλεκτρικής ισχύος ($P_{MEK_{el}}$) σε ημερήσια βάση. Έτσι, με βάση τις εξισώσεις αυτές, μπορούν να υπολογισθούν οι ημερήσιοι βαθμοί απόδοσης της Μ.Ε.Κ. σε μερικά ηλεκτρικά φορτία. Οι εξισώσεις που αναλογούν σε κάθε βαθμό απόδοσης καταγράφονται στα διαγράμματα της εικόνας 31, όπου $x = P_{MEK_{el}}$, $y = N_{MEK}$ για τον εκάστοτε βαθμό απόδοσης.



Εικόνα 31. Πολυωνυμικές εξισώσεις βαθμού απόδοσης MEK συναρτήσει της ηλεκτρικής απόδοσης ισχύος

Σύμφωνα με τη θεώρηση των F. Nieuwenhout et al ⁽³³⁾, μια απλή γραμμική παρεμβολή μπορεί να ορίσει το βαθμό απόδοσης της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου σε διάφορα επίπεδα ισχύος P_{SOFCel} ⁽³³⁾.

- Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης

$$N_{SOFCel} [\%] = 31.7 - 3.8 * P_{SOFCel} [kW] \quad \text{όταν } 0.5 < P_{SOFCel} < 1.0 [kW_{el}],$$

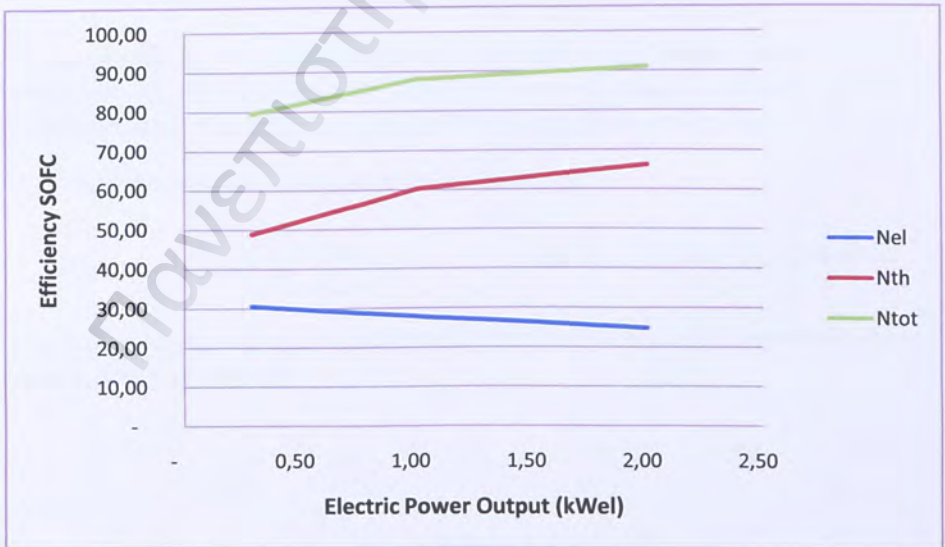
$$N_{SOFCel} [\%] = 30.8 - 3.0 * P_{SOFCel} [kW] \quad \text{όταν } 1.0 < P_{SOFCel} < 2.0 [kW_{el}]$$

- Συνολικός βαθμός απόδοσης

$$N_{SOFCtot} [\%] = 76.1 - 11.9 * P_{SOFCel} [kW] \quad \text{όταν } 0.5 < P_{SOFCel} < 1.0 [kW_{el}],$$

$$N_{SOFCtot} [\%] = 85.0 - 3.0 * P_{SOFCel} [kW] \quad \text{όταν } 1.0 < P_{SOFCel} < 2.0 [kW_{el}]$$

Χρησιμοποιώντας τους γνωστούς τύπους που ορίστηκαν προηγουμένως και με βάση τις ηλεκτρικές και θερμικές καταναλώσεις του διαμερίσματος υπολογίζονται ο ηλεκτρικός, ο θερμικός και ο συνολικός βαθμός απόδοσης σε συνάρτηση με τα μερικά φορτία. Το διάγραμμα που παριστάνει τους βαθμούς απόδοσης βάσει της ηλεκτρικής απόδοσης ισχύος του συστήματος παριστάνεται στην εικόνα 32.



Εικόνα 32. Βαθμοί απόδοσης SOFC σε διάφορες τιμές παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, όπως άλλωστε μπορεί να γίνει αντιληπτό από το διάγραμμα της εικόνας 32, παρουσιάζει μια πτωτική πορεία σε υψηλά ηλεκτρικά φορτία. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει τους ισχυρισμούς πως η κυψέλη καυσίμου στερεού ηλεκτρολύτη εμφανίζει μια πολύ καλή συμπεριφορά σε χαμηλότερα φορτία, επιβεβαιώνοντας την ωφέλεια από λειτουργία του συστήματος σε συνθήκες μικρότερες από το πλήρες φορτίο για σημαντικά χρονικά διαστήματα. Η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος κυμαίνεται μεταξύ 24,80 – 30,61 %.

Σε αντίθεση με το ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, ο θερμικός βαθμός αυξάνει όσο το σύστημα προσεγγίζει τη μέγιστη ισχύ. Η αύξηση του θερμικού βαθμού απόδοσης αποδίδεται στο γεγονός ότι λιγότερη σχετικά ενέργεια καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό, όποτε διατίθεται ως θερμότητα.

Επειδή η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε ηλεκτρική χωρίς την παρεμβολή θερμοδυναμικού κύκλου, ο βαθμός απόδοσης δεν περιορίζεται από εκείνον του κύκλου Carnot. Συνεπώς, τουλάχιστον σε θεωρητικό επίπεδο, ο βαθμός απόδοσης μπορεί να φτάσει σε υψηλότερες από την Μ.Ε.Κ. τιμές. Αυτή η διαπίστωση επιβεβαιώνεται στην περίπτωση του εξεταζόμενου συστήματος SOFC, σύμφωνα με το οποίο διαπιστώνεται ότι η συνολική απόδοση μπορεί να φτάσει σε ποσοστό 91,0 % για μέγιστη απόδοση ισχύος 2 kW.

4.1.4 ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΣΕ ΜΕΡΙΚΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

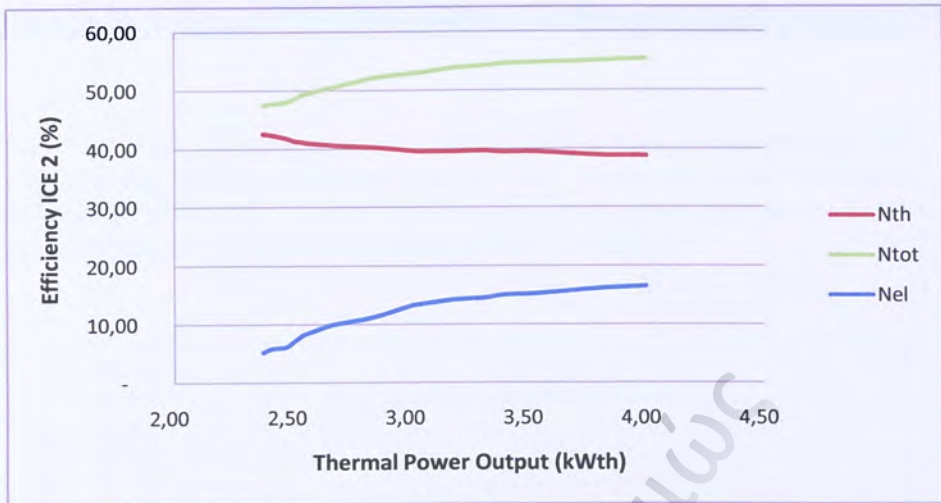
4.1.4.1 ΒΑΘΜΟΙ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΗΣ ΜΗΧΑΝΗΣ ΞΕΠΤΕΡΙΚΗΣ ΚΑΥΣΗΣ ΣΕ ΜΕΡΙΚΟ ΘΕΡΜΙΚΟ ΦΟΡΤΙΟ

Για τον προσδιορισμό των βαθμών απόδοσης της Μ.Ε.Κ. του συμπαραγωγικού συστήματος συναρτήσει της θερμικής απόδοσης ισχύος της μηχανής (Q_{MEKth}), απαιτείται πρώτα να υπολογισθεί η θερμική απόδοση ισχύος για διάφορες τιμές ηλεκτρικής ισχύος.

Η θερμική απόδοση ισχύος υπολογίζεται βάσει του τύπου :

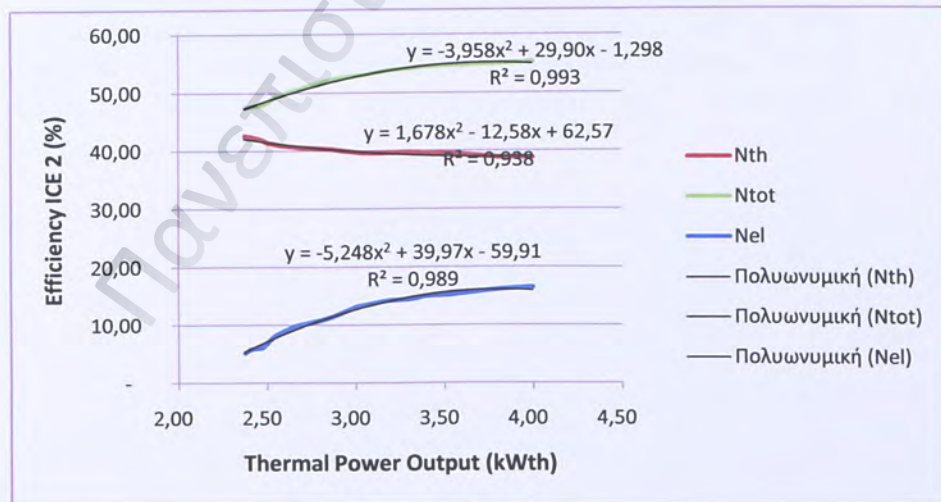
$$Q_{MEKth} = P_{el} * \frac{N_{MEKth}}{N_{MEKel}}, \quad \text{με } N_{MEKth} \text{ και } N_{MEKel} \text{ γνωστά}$$

Οι βαθμοί απόδοσης της μηχανής βάσει της θερμικής απόδοσης ισχύος παριστάνονται στα διαγράμματα της εικόνας 33.



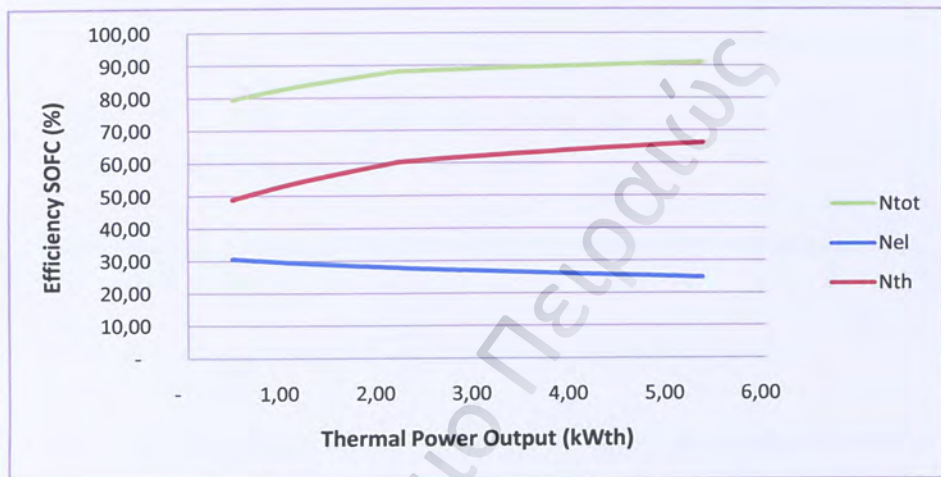
Εικόνα 33. Βαθμοί απόδοσης MEK συναρτήσει της παραγόμενης θερμικής ισχύος

Από τα παραπάνω διαγράμματα υπολογίζονται οι πολυωνυμικές εξισώσεις που ορίζουν τους βαθμούς απόδοσης του συστήματος στα διάφορα επίπεδα θερμικής ισχύος Q_{MEKth} σε ημερήσια βάση. Βάσει των εξισώσεων, μπορούν να προσδιοριστούν οι ημερήσιοι βαθμοί απόδοσης της Μ.Ε.Κ. σε μερικά θερμικά φορτία. Οι εξισώσεις που αναλογούν σε κάθε βαθμό απόδοσης καταγράφονται στα διαγράμματα της εικόνας 34, όπου $x = Q_{MEKth}$, $y = N_{MEK}$.



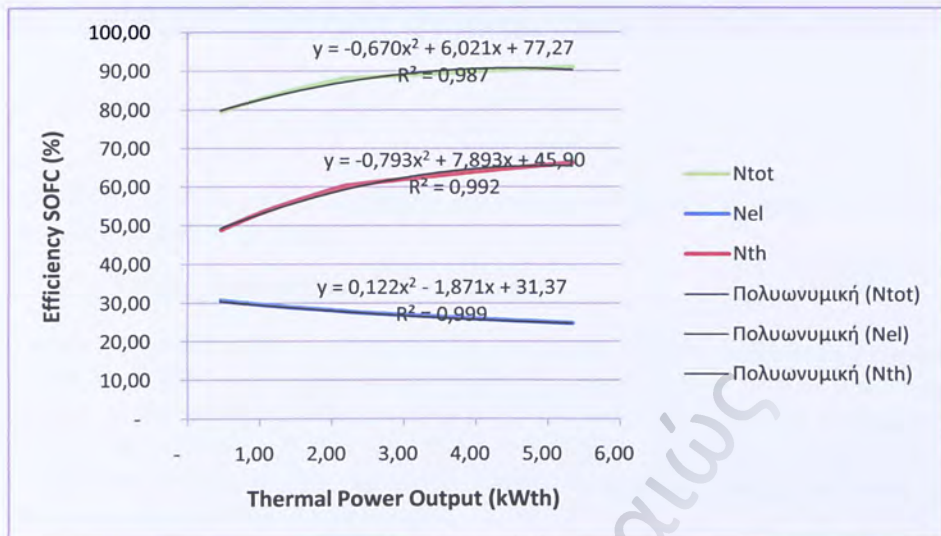
Εικόνα 34. Πολυωνυμικές εξισώσεις 2^{ου} βαθμού απόδοσης MEK συναρτήσει της θερμικής απόδοσης ισχύος

Η διαδικασία που περιγράφηκε για τον προσδιορισμό των βαθμών απόδοσης της MEK σε μερικό θερμικό φορτίο επαναλαμβάνεται με τα ίδια βήματα και για την περίπτωση της κυψέλης καυσίμου SOFC. Οι βαθμοί απόδοσης της κυψέλης καυσίμου βάσει της θερμικής απόδοσης ισχύος παριστάνονται στα διαγράμματα της εικόνας 35.



Εικόνα 35. Βαθμοί απόδοσης SOFC συναρτήσει της παραγόμενης θερμικής ισχύος

Οι πολυωνυμικές εξισώσεις που ορίζουν τους ημερήσιους βαθμούς απόδοσης του συστήματος SOFC ανάλογα με το επίπεδο της παραγόμενης ημερήσιας θερμικής ισχύος Q_{SOFCth} παρουσιάζονται στα διαγράμματα της εικόνας 36, όπου $x = Q_{SOFCth}$, $y = N_{SOFC}$.



Εικόνα 36. Πολυωνυμικές εξισώσεις 2^{ου} βαθμού απόδοσης SOFC συναρτήσει της θερμικής απόδοσης ισχύος

4.1.4.3 ΒΑΘΜΟΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΛΕΒΗΤΑ ΦΥΣΙΚΟΥ ΑΕΡΙΟΥ ΣΥΜΒΑΤΙΚΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

Η βασική νομοθετική ρύθμιση για τους λέβητες φυσικού αερίου είναι η Οδηγία 92/42/ΕΟΚ του Συμβουλίου. Σε αυτή καταγράφονται οι απαιτήσεις για το βαθμό απόδοσης των λεβήτων ζεστού νερού με καύση φυσικού αερίου, ονομαστικής ισχύος ίσης ή ανώτερης των 4 kW. Η τήρηση των απαιτήσεων της Οδηγίας είναι αναγκαία συνθήκη για την απονομή του σήματος CE καθώς και των σημάτων ενεργειακής απόδοσης

Η απαιτούμενη ωφέλιμη απόδοση παρουσιάζεται στον πίνακα 12.

Τύπος λέβητα	Φάσμα ισχύος (kW)	Απόδοση σε μερικό φορτίο	
		Μέση θερμοκρασία νερού στο λέβητα (°C)	Απαιτήση απόδοσης εκφρασμένης σε %
Συνήθεις λέβητες	4 έως 400	≥ 50	≥ 80+ 3logQ _{th}

Πίνακας 12. Απόδοση λεβήτων

Με βάση τη παραπάνω ρύθμιση που καθορίζει την απαίτηση του βαθμού απόδοσης σε μερικό φορτίο και λόγω έλλειψης διαθέσιμων στοιχείων για λέβητες μικρής εγκατεστημένης ισχύος υπολογίζεται η ημερήσια απόδοση του λέβητα Φ.Α. (N_B) του συμβατικού συστήματος εξισώνοντας τον τύπο του πίνακα 12.

4.1.5 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

4.1.5.1 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΜΕΚ

Η ημερήσια απόδοση ισχύος της μηχανής εσωτερικής καύσης είναι διαφορετική για κάθε σενάριο ημερήσιας λειτουργίας.

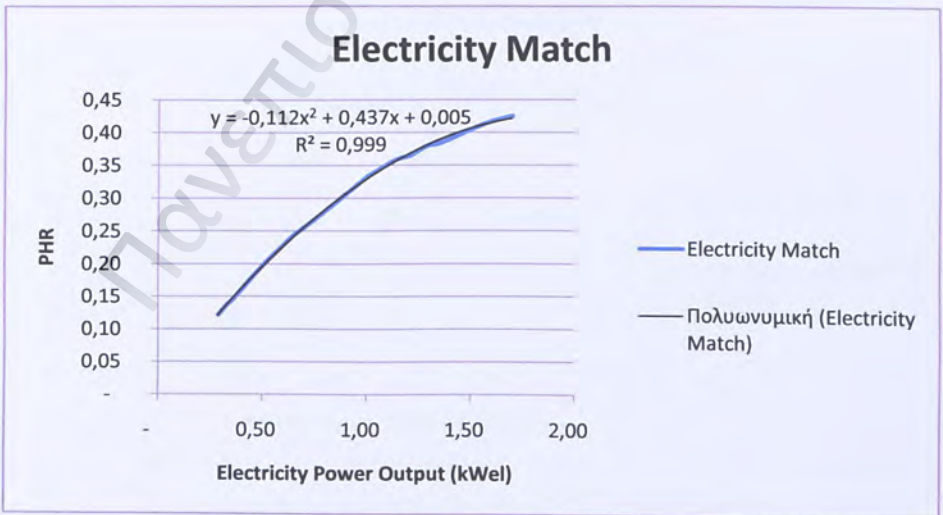
A. ΣΕΝΑΡΙΟ ELECTRICITY MATCH

Η μέγιστη ηλεκτρική απόδοση ισχύος της ΜΕΚ είναι 1.7 kW_{el}. Όταν η ημερήσια απαίτηση σε ηλεκτρική ισχύ είναι ίση ή μικρότερη των 1.7 kW_{el}, η μηχανή παράγει ημερήσια ηλεκτρική ισχύ ίση με την απαίτηση ισχύος του διαμερίσματος. Στην περίπτωση που η ημερήσια απαίτηση σε ηλεκτρική ισχύ είναι μεγαλύτερη της μέγιστης ηλεκτρικής απόδοσης ισχύος της ΜΕΚ, τότε η μηχανή παράγει ακριβώς 1.7 kW_{el} ενώ το υπόλοιπο ποσό της απαιτούμενης ηλεκτρικής ισχύος καλύπτεται από το δίκτυο.

Για τον υπολογισμό της ημερήσιας θερμικής απόδοσης ισχύος της μηχανής εσωτερικής καύσης απαιτείται πρώτα ο προσδιορισμός του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα (PHR) για διάφορες τιμές ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος της μηχανής. Σύμφωνα με τον τύπο :

$$PHR_{MEK} = \frac{P_{MEK_{el}}}{Q_{MEK_{th}}}, \quad \text{δίνεται το διάγραμμα του } PHR_{MEK} \text{ συναρτήσει της}$$

ηλεκτρικής απόδοσης ισχύος της μηχανής. Από το διάγραμμα προκύπτει μια παραβολή η εξίσωση της οποίας ορίζει τον ημερήσιο λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα της ΜΕΚ σε μερικό ηλεκτρικό φορτίο, όπου $x = P_{MEK_{th}}$, $y = PHR_{MEK}$



Εικόνα 37. Εξίσωση PHR_{MEK} βάσει της ηλεκτρικής απόδοσης ισχύος

Η ημερήσια θερμική απόδοση ισχύος της MEK ορίζεται ως :

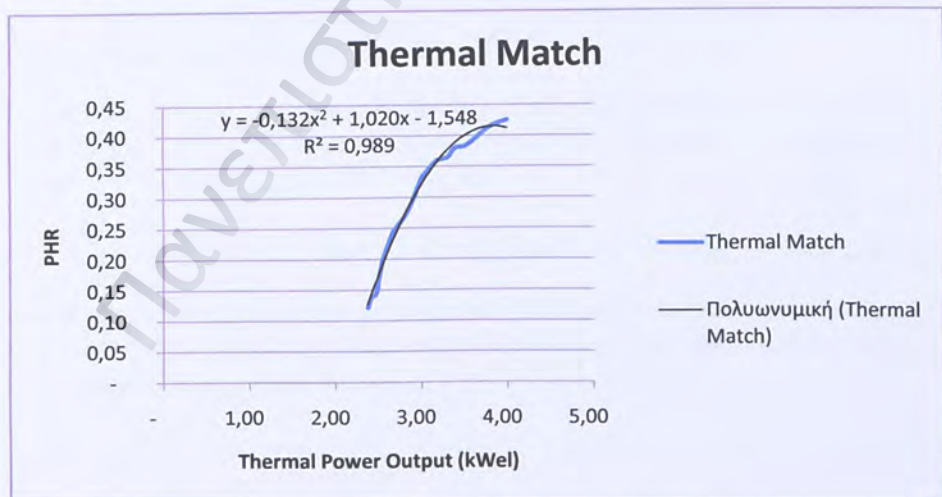
$$Q_{MEK_{th}} = \frac{P_{MEK_{el}}}{y} = \frac{P_{MEK_{el}}}{-0.112 * P_{MEK_{el}}^2 + 0.437 * P_{MEK_{el}} + 0.005}$$

Όταν η ημερήσια θερμική απόδοση ισχύος είναι μικρότερη της απαιτούμενης, για τις ανάγκες του διαμερίσματος, ημερήσιας θερμικής ισχύος τότε, το υπόλοιπο της ζήτησης σε θερμότητα καλύπτεται από ένα βοηθητικό λέβητα φυσικού αερίου. Στην περίπτωση που η ημερήσια θερμική απόδοση ισχύος είναι μεγαλύτερη της θερμικής απαίτησης, το πλεόνασμα της παραγόμενης θερμότητας απορρίπτεται στο περιβάλλον.

B. ΣΕΝΑΡΙΟ THERMAL MATCH

Γνωρίζοντας ότι το τεχνικό μέγιστο και ελάχιστο της θερμικής απόδοσης ισχύος της MEK είναι 4.00 kW_{th} και 2.38 kW_{th} αντίστοιχα, όταν οι ανάγκες σε θερμότητα είναι μεγαλύτερες από 4.00 kW_{th} είναι προφανές ότι η ημερήσια παραγόμενη θερμική ισχύς της μηχανής φτάνει μέχρι τα 4.00 kW_{th}. Το υπόλοιπο της απαιτούμενης θερμικής ισχύος καλύπτεται από τον βοηθητικό λέβητα Φ.Α. Από την άλλη, όταν η θερμική απαίτηση είναι μικρότερη των 2.38 kW_{th} η μηχανή δεν μπορεί να παράγει λιγότερη ισχύ από το τεχνικό της ελάχιστο. Σε αυτή την περίπτωση, τις ημέρες που η θερμική απαίτηση είναι μικρότερη των 2.38 kW_{th}, παράγεται μια επιπλέον ποσότητα θερμικής ισχύος η οποία αναγκαστικά απορρίπτεται στο περιβάλλον.

Από το λόγο PHR_{MEK} και το θερμικό φορτίο της μηχανής προκύπτει το διάγραμμα της εικόνας 38.



Εικόνα 38. Εξίσωση PHR_{MEK} βάσει της θερμικής απόδοσης ισχύος

Από την παραβολική εξίσωση του παραπάνω διαγράμματος, όπου $x = Q_{MEKth}$, $y = PHR_{MEK}$ υπολογίζεται η ημερήσια ηλεκτρική απόδοση ισχύος της MEK:

$$P_{MEKel} = Q_{MEKel} * y = Q_{MEKel} * (-0.132 * Q_{MEKel}^2 + 1.020 * Q_{MEKel} - 1.548)$$

Όταν η ημερήσια ηλεκτρική απόδοση ισχύος είναι μικρότερη της απαιτούμενης ημερήσιας ηλεκτρικής ισχύος, τότε η πρόσθετα απαιτούμενη ποσότητα διατίθεται από το εθνικό δίκτυο. Ορισμένες ημέρες του έτους η παραγόμενη από τη MEK ηλεκτρική ισχύς είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την κάλυψη των ημερήσιων αναγκών του διαμερίσματος. Συνεπώς, κάποιες ημέρες δημιουργείται ένα πλεόνασμα στη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ το οποίο, εάν δεν μπορεί να πωληθεί στο δίκτυο, θεωρείται ανεκμετάλλευτο.

4.1.5.2 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΗΜΕΡΗΣΙΑΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΙΣΧΥΟΣ SOFC

Όπως συμβαίνει στη MEK, έτσι και στην κυψέλη καυσίμου SOFC η ημερήσια απόδοση ισχύος είναι διαφορετική για κάθε σενάριο ημερήσιας λειτουργίας.

A. ΣΕΝΑΡΙΟ ELECTRICITY MATCH

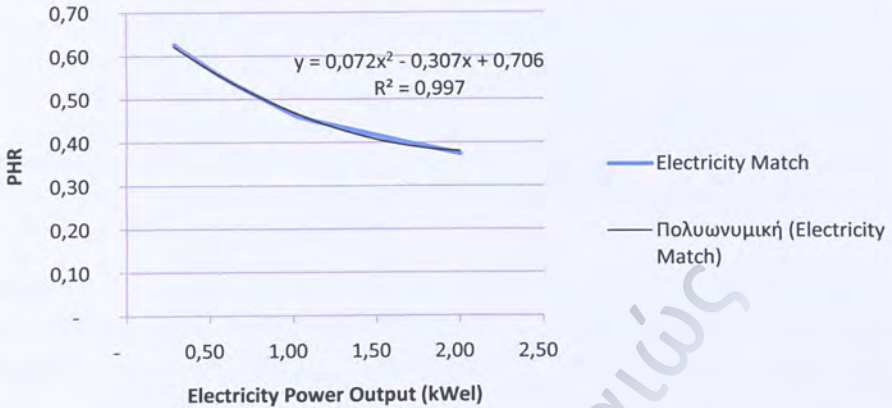
Η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου, που καλείται να αντικαταστήσει το συμβατικό σύστημα, εμφανίζει μέγιστη ηλεκτρική απόδοση ισχύος 2.00 kWel. Στο σενάριο λειτουργίας που περιγράφεται, η συμπαραγωγική μονάδα προσανατολίζεται στη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ίσης με το απαιτούμενο ηλεκτρικό φορτίο. Ωστόσο, κάποιες στιγμές, η ημερήσια απαίτηση ηλεκτρικής ισχύος είναι αρκετά υψηλότερη από τα 2.00 kWel της μέγιστης ισχύος που μπορεί να παράξει η κυψέλη καυσίμου. Σε αυτή την περίπτωση, η ΔΕΗ προσδίδει στο σύστημα την επιπλέον απαιτούμενη ηλεκτρική ισχύ.

Για τον προσδιορισμό της ημερήσιας θερμικής απόδοσης ισχύος της κυψέλης καυσίμου, υπολογίζεται ο λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα για διάφορες τιμές παραγόμενης ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος. Από τον τύπο :

$$PHR_{SOFC} = \frac{P_{SOFCel}}{Q_{SOFCth}}, \quad \text{δίνεται το διάγραμμα του } PHR_{SOFC} \text{ συναρτήσει της}$$

ηλεκτρικής απόδοσης ισχύος της μηχανής. Από το διάγραμμα προκύπτει μια υπερβολή η εξίσωση της οποίας ορίζει τον ημερήσιο λόγο ηλεκτρισμού προς θερμότητα της κυψέλης SOFC σε μερικό ηλεκτρικό φορτίο, όπου $x = P_{SOFCth}$, $y = PHR_{SOFC}$

Electricity Match



Εικόνα 39. Εξίσωση PHR_{SOFC} βάσει της ηλεκτρικής απόδοσης ισχύος

Επομένως, η ημερήσια θερμική απόδοση ισχύος της κυψέλης δίνεται από τον τύπο :

$$Q_{SOFCth} = \frac{P_{SOFCel}}{y} = \frac{P_{SOFCel}}{0.072 * P_{SOFCel}^2 - 0.307 * P_{SOFCel} + 0.706}$$

Η ημερήσια θερμική απόδοση ισχύος μπορεί να φτάσει τα 5.40 kW_{th} και θεωρητικά μπορεί να καλύψει πλήρως της θερμικές ανάγκες του διαμερίσματος. Ωστόσο, κάποιες ημέρες που οι ηλεκτρικές ανάγκες είναι μικρές, η παραγόμενη θερμική ισχύς της κυψέλης καυσίμου δεν επαρκεί για να καλύψει πλήρως τη ζητούμενη θερμότητα. Έτσι, η επιπλέον απαιτούμενη ποσότητα καλύπτεται με τη λειτουργία ενός συμπληρωματικού λέβητα φυσικού αερίου. Από την άλλη, κάποιες ημέρες που οι ηλεκτρικές ανάγκες είναι υψηλές, η ημερήσια θερμική απόδοση ισχύος είναι μεγαλύτερη της θερμικής απαίτησης του διαμερίσματος. Το πλεόνασμα της παραγόμενης θερμότητας απορρίπτεται στο περιβάλλον.

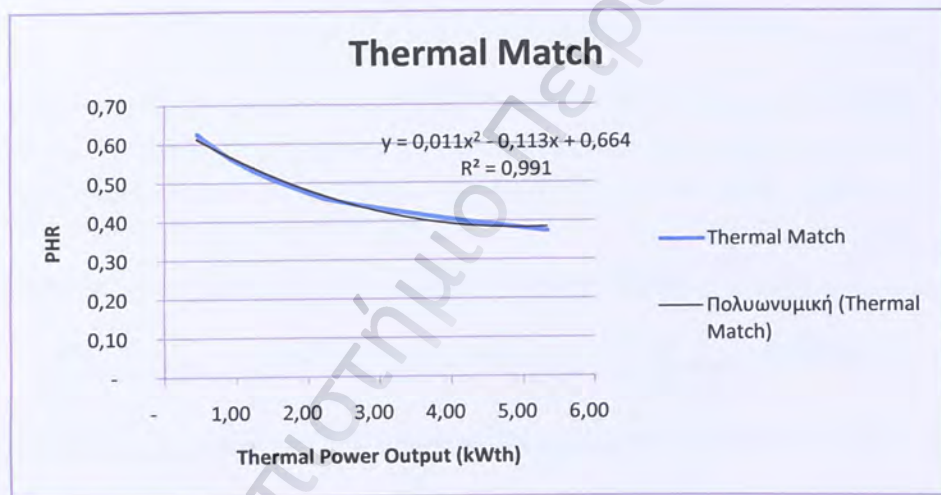
B. ΣΕΝΑΡΙΟ THERMAL MATCH

Σε αυτό το σενάριο λειτουργίας η υπο δοκιμή κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου πρέπει κάθε στιγμή να παράγει θερμική ισχύ ίση με το απαιτούμενο θερμικό φορτίο. Εφόσον, η κυψέλη μπορεί να προσδώσει μέγιστη θερμική απόδοση ισχύος στα 5.40 kW_{th} και γνωρίζοντας ότι οι θερμικές απαιτήσεις της κατοικίας δεν ξεπερνούν την ποσότητα αυτή, δεν θεωρείται αναγκαία η τροφοδοσία του συστήματος από κάποιο βοηθητικό λέβητα. Η συμπαραγωγική μονάδα έχει διαστασιολογηθεί με επιτυχία για αυτό το σενάριο λειτουργίας καθώς μπορεί κάθε στιγμή να καλύψει εξολοκλήρου τις απαιτούμενες θερμικές ανάγκες. Φαίνεται επομένως, ότι τουλάχιστον από ενεργειακής και οικονομικής σκοπιάς η κυψέλη καυσίμου SOFC αποκτά ένα ισχυρό πλεονέκτημα σε σύγκριση με την

άλλη εξεταζόμενη τεχνολογία οικιακής συμπαραγωγής αναφορικά με αυτό το σενάριο λειτουργίας.

Το τεχνικό ελάχιστο της θερμικής απόδοσης ισχύος της μονάδας SOFC δεν πέφτει κάτω από τα 0.46 kW_{th}. Η κυψέλη καυσίμου τίθεται εκτός λειτουργίας κάτω από αυτό το όριο. Ωστόσο, κάποιες ημέρες του έτους και κυρίως κατά τους καλοκαιρινούς μήνες, η κατοικία δεν χρειάζεται κάποια θερμική κάλυψη. Σε αυτή την περίπτωση, η μονάδα δεν διακόπτει τη λειτουργία της αλλά συνεχίζει να λειτουργεί στο τεχνικό της ελάχιστο. Εφόσον δεν υφίσταται στο σύστημα κάποιο μέσο αποθήκευσης θερμότητας, η πρόσθετα παραγόμενη ποσότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον.

Η ημερήσια ηλεκτρική απόδοση ισχύος της κυψέλης καυσίμου υπολογίζεται με βάση το λόγο PHR_{SOFC} συναρτήσεως του θερμικού φορτίου. Από το διάγραμμα του σχήματος 40 προκύπτει η εξίσωση PHR_{SOFC} βάσει της θερμικής απόδοσης ισχύος όπου $x = Q_{SOFCth}$, $y = PHR_{SOFC}$.



Εικόνα 40. Εξίσωση PHR_{SOFC} βάσει της θερμικής απόδοσης ισχύος

Συνεπώς, η ημερήσια ηλεκτρική απόδοση ισχύος της κυψέλης καυσίμου SOFC ορίζεται ως :

$$P_{SOFCel} = Q_{SOFCth} * y = Q_{SOFCth} * (0.011 * Q_{SOFCth}^2 - 0.113 * Q_{SOFCth} + 0.664)$$

Τις στιγμές που η ημερήσια ηλεκτρική απόδοση ισχύος είναι μικρότερη της απαιτούμενης ημερήσιας ηλεκτρικής ισχύος, τότε η πρόσθετα απαιτούμενη ποσότητα διατίθεται από το δίκτυο της ΔΕΗ. Ορισμένες ημέρες του έτους η παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την κάλυψη των ημερήσιων αναγκών του διαμερίσματος. Συνεπώς, τις ημέρες εκείνες δημιουργείται ένα πλεόνασμα στη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ το οποίο, εάν δεν μπορεί να πωληθεί στο δίκτυο, θεωρείται ανεκμετάλλευτο.

4.1.6 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΤΗΣΙΑ ΠΑΡΑΓΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Για τις εξεταζόμενες περιπτώσεις της μηχανής εσωτερικής καύσης και της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου και για κάθε σενάριο λειτουργίας (Electricity Match, Thermal Match) υπολογίζονται η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια του συμπαραγωγικού συστήματος, η ετήσια ποσότητα ενέργειας που προσφέρεται από το δίκτυο και από τον βοηθητικό λέβητα, τα ετήσια ποσά της απορριπτόμενης θερμότητας του συστήματος, η περίσσεια της ετήσια παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και τέλος η ωφέλιμα παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια του συστήματος.

Η ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια προκύπτει ως το άθροισμα της ημερήσιας ηλεκτρικής και θερμικής απόδοσης ισχύος επί τις ώρες λειτουργίας.

$$E_{el(MEK,SOFC)} = \sum P_{el(MEK,SOFC)} * 24hours$$
$$W_{th(MEK,SOFC)} = \sum Q_{th(MEK,SOFC)} * 24hours$$

Η ετήσια ποσότητα ενέργειας που προσφέρεται από το δίκτυο ($E_{el(\Delta E\text{H})}$) και από τον βοηθητικό λέβητα ($W_{th(S.B)}$) προκύπτει από το άθροισμα της επιπλέον απαιτούμενης ημερήσιας ποσότητας σε ηλεκτρισμό και θερμότητα για την πλήρη κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του διαμερίσματος.

Τα ετήσια ποσά απορριπτόμενης θερμότητας προκύπτουν ως εξής :

$$W_{th(rejected.MEK,SOFC)} = W_{th(MEK,SOFC)} + W_{th(S.B)} - \sum Q_{th(οικίας)} * 24hours ,$$

όπου $Q_{th(οικίας)}$ θεωρείται το μέγιστο ημερήσιο θερμικό φορτίο του διαμερίσματος.

Αντίστοιχα, η περίσσεια της ετήσια παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας δίνεται ως :

$$E_{el(excess.MEK,SOFC)} = E_{el(MEK,SOFC)} + E_{el(\Delta E\text{H})} - \sum P_{el(οικίας)} * 24hours ,$$

όπου $P_{el(οικίας)}$ θεωρείται το μέσο ημερήσιο ηλεκτρικό φορτίο του διαμερίσματος.

Αξίζει να τονιστεί ότι το πλεόνασμα στην ετήσια παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εμφανίζεται μόνο στο σενάριο λειτουργίας «Thermal Match».

Τέλος, η ωφέλιμα παραγόμενη ηλεκτρική και θερμική ενέργεια του συστήματος υπολογίζεται από τους τύπους :

$$E_{el(usable.MEK,SOFC)} = E_{el(MEK,SOFC)} - E_{el(excess.MEK,SOFC)}$$

$$W_{th(usable.MEK,SOFC)} = W_{th(MEK,SOFC)} - W_{th(rejected.MEK,SOFC)}$$

4.1.7 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΤΗΣΙΑ ΚΑΤΑΝΑΛΙΣΚΟΜΕΝΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΠΑΡΟΧΗΣ Φ.Α.

Ο υπολογισμός της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας από τη μηχανή εσωτερικής καύσης και την κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου γίνεται χωριστά για κάθε σενάριο λειτουργίας

A. ΣΕΝΑΡΙΟ ELECTRICITY MATCH

Η ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια για κάθε συμπαραγωγικό σύστημα στο πρώτο σενάριο λειτουργίας ορίζεται από τον τύπο :

$$EC_{(MEK,SOFC)} = \sum \frac{P_{el(MEK,SOFC)} * 100}{N_{el(MEK,SOFC)}} * 24hours$$

όπου $N_{el(MEK,SOFC)}$ ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης κάθε συστήματος συναρτήσει της ηλεκτρικής απόδοσης ισχύος.

B. ΣΕΝΑΡΙΟ THERMAL MATCH

Αντίστοιχα με το πρώτο σενάριο λειτουργίας, υπολογίζεται η ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια του συστήματος για το σενάριο Thermal Match.

$$EC_{(MEK,SOFC)} = \sum \frac{Q_{th(MEK,SOFC)} * 100}{N_{th(MEK,SOFC)}} * 24hours$$

όπου $N_{th(MEK,SOFC)}$ ο θερμικός βαθμός απόδοσης κάθε συστήματος συναρτήσει της θερμικής απόδοσης ισχύος που βρέθηκε στις παραγράφους 3.1.4.1 και 3.1.4.2.

Στη συνέχεια υπολογίζονται οι ετήσιες ποσότητες καταναλισκόμενης ενέργειας από τη ΔΕΗ, το βοηθητικό λέβητα και το λέβητα του συμβατικού συστήματος.

Για τον υπολογισμό της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας από τη ΔΕΗ θεωρείται ένας τυπικός βαθμός απόδοσης 38%⁽¹⁾. Συνεπώς,

$$EC_{(\Delta E H)} = \frac{E_{el(\Delta E H)}}{0.38}$$

Για τον υπολογισμό της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας από το βοηθητικό λέβητα φυσικού αερίου θεωρείται ένας μέσος βαθμός απόδοσης 80%. Έτσι,

$$EC_{(S.B)} = \frac{W_{th(S.B)}}{0.80}$$

Η ετήσια καταναλισκόμενη ενέργεια του λέβητα φυσικού αερίου του συμβατικού συστήματος προσδιορίζεται από τον τύπο :

$$EC_{(B)} = \sum \frac{Q_{th(οικιας)} * 100}{N_B} * 24hours,$$

όπου N_B η απόδοση του λέβητα σε μερικό θερμικό φορτίο

Αν ληφθεί η μέση τιμή της κατώτερης θερμογόνου δύναμης του φυσικού αερίου (H_u) ίση με 13.05 kWh/kg⁽³⁵⁾, η ετήσια παροχή φυσικού αερίου υπολογίζεται από το λόγο της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας προς την τιμή H_u . Συγκεκριμένα, ισχύει ότι :

$$m_{f(MEK,SOFC)} = \frac{EC_{(MEK,SOFC)}}{H_u}$$

$$m_{f(\Delta E H)} = \frac{EC_{(\Delta E H)}}{H_u}$$

$$m_{f(B)} = \frac{EC_{(B)}}{H_u}$$

4.1.8 ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΤΗΣΙΩΝ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΚΑΙ CH₄

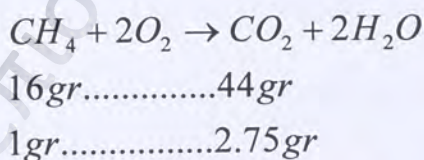
Προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση κάθε συστήματος συμπαραγωγής στην ποιότητα του αέρα του περιβάλλοντος, πρέπει να υπολογιστούν οι εκπομπές ρύπων του συστήματος συμπαραγωγής και οι εκπομπές του συμβατικού συστήματος χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, λαμβάνοντας υπόψη ότι το καύσιμο που χρησιμοποιεί καθένα από τα συστήματα αυτά είναι το φυσικό αέριο.

Οι κύριοι ρυπαντές για τους οποίους υπολογίζονται οι ετήσιες εκπομπές είναι το CO₂ και το CH₄, καθώς έχουν αναγνωριστεί ότι ευθύνονται σε μεγάλο βαθμό για το φαινόμενο του θερμοκηπίου. Οι εκπομπές των ρύπων αυτών υπολογίζονται για κάθε σύστημα και για κάθε σενάριο λειτουργίας.

Οι βασικοί συντελεστές των οποίων η λειτουργία προκαλεί τις εκπομπές θεωρούνται το ηλεκτρικό δίκτυο, ο λέβητας φυσικού αερίου, το σύστημα της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου (στο οποίο περιλαμβάνεται το σύστημα αναμόρφωσης του φυσικού αερίου) και η μηχανή εσωτερικής καύσης.

Επίσης, για την εκτίμηση των εκπομπών CO₂ και CH₄ λαμβάνονται υπόψη οι διαρροές του φυσικού αερίου και οι ενεργειακές απαιτήσεις των σταθμών συμπίεσης και πιο συγκεκριμένα, οι απώλειες CH₄ λόγω του δικτύου μεταφοράς εντός Ελλάδας και οι εκπομπές CO₂ λόγω της κίνησης των σταθμών συμπίεσης και αεριοποίησης. Για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών ισχύει η παραδοχή ότι η κύρια εισαγωγή φυσικού αερίου προέρχεται από τη Ρωσία και περιλαμβάνει αγωγό υψηλής πίεσης (70 bar) μήκους 512 km ⁽³⁶⁾. Σύμφωνα με τη θεώρηση του Roberto Dones et al οι διαρροές μεθανίου αποτελούν το 1.4% της συνολικά μεταφερόμενης ποσότητας από τη Ρωσία, για μια συνολική μέση απόσταση 6000 km ⁽³⁷⁾. Για τον αγωγό υψηλής πίεσης μήκους 512 km οι απώλειες λόγω μεταφοράς στην Ελλάδα αποτελούν περίπου το 0.12% της συνολικά μεταφερόμενης ποσότητας. Επίσης, η ενεργειακή συνεισφορά του αγωγού διασύνδεσης υψηλής πίεσης για την κίνηση των σταθμών συμπίεσης εκτιμάται στο 2% της συνολικά μεταφερόμενης ποσότητας φυσικού αερίου για κάθε απόσταση 1000 km ⁽³⁷⁾. Για την Ελλάδα το ποσοστό αυτό μειώνεται περίπου στο 1%.

Η χημική αντίδραση της καύσης του φυσικού αερίου καθώς και ο στοιχειομετρικός προσδιορισμός της μάζας του εκπεμπόμενου διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα μάζας του φυσικού αερίου (m_{CO₂}) έχει ως εξής :



Πρέπει να σημειωθεί ότι, ο υπολογισμός της μάζας του διοξειδίου του άνθρακα ανά μονάδα μάζας φυσικού αερίου, στηρίζεται στην παραδοχή ότι όλος ο άνθρακας που περιέχεται στο καύσιμο μετατρέπεται σε CO₂, κάτι που βρίσκεται πολύ κοντά στην πραγματικότητα εφόσον η καύση γίνεται με περίσσεια αέρα και τα συστήματα καύσης είναι σε καλή κατάσταση και σωστά ρυθμιζόμενα.

Οι συνολικές εκπομπές CO₂ (m_{CO₂}) από τη λειτουργία των μονάδων συμπαραγωγής και από τη λειτουργία των αεροσυμπιεστών αλλά και από την επιπλέον ποσότητα ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας που προέρχεται από τη ΔΕΗ και το συμπληρωματικό λέβητα υπολογίζονται για κάθε σενάριο λειτουργίας με βάση τους τύπους:

$$m_{CO_2(SOFC)} = \mu_{CO_2} * m_{f(SOFC)}$$

$$m_{CO_2(MEK)} = \mu_{CO_2} * m_{f(MEK)}$$

$$m_{CO_2(\Delta EH)} = \mu_{CO_2} * m_{f(\Delta EH)}$$

$$m_{CO_2(S.B)} = \mu_{CO_2} * m_{f(S.B)}$$

$$m_{CO_2(GasTurbines)} = 1\% * \mu_{CO_2} * [101.12\% * (m_{f(SOFC,MEK)} + m_{f(\Delta EH)} + m_{f(S.B)})]$$

Επίσης, οι εκπομπές CH₄ λόγω απωλειών κατά τη μεταφορά του φυσικού αερίου υπολογίζονται για κάθε σενάριο λειτουργίας των δύο συστημάτων συμπαραγωγής ως εξής :

$$m_{CH_4(transmission)} = 0.12\% * [101.12\% * (m_{f(SOFC,MEK)} + m_{f(\Delta EH)} + m_{f(S.B)})]$$

Από την άλλη, οι συνολικές εκπομπές CO₂ του συμβατικού συστήματος (ΔΕΗ, λέβητας φυσικού αερίου) και λόγω της λειτουργίας των αεροσυμπιεστών υπολογίζονται στη συνέχεια :

$$m_{CO_2(\Delta EH)} = \mu_{CO_2} * m_{f(\Delta EH)}$$

$$m_{CO_2(B)} = \mu_{CO_2} * m_{f(B)}$$

$$m_{CO_2(GasTurbines)} = 1\% * \mu_{CO_2} * [101.12\% * (m_{f(\Delta EH)} + m_{f(S.B)})]$$

Τέλος, οι εκπομπές CH₄ λόγω απωλειών κατά τη μεταφορά του φυσικού αερίου δίνονται από τον παρακάτω τύπο :

$$m_{CH_4(transmission)} = 0.12\% * [101.12\% * (m_{f(\Delta EH)} + m_{f(S.B)})]$$

4.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ – ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ

Από τους υπολογισμούς της ετήσιας παραγόμενης ενέργειας, της ετήσιας καταναλισκόμενης ενέργειας και της ετήσιας παροχής φυσικού αερίου η εργασία καταλήγει στην τελική ανάλυση του ετήσιου κύκλου λειτουργίας κάθε συστήματος. Η ανάλυση αυτή περιλαμβάνει την κατανομή κάλυψης των ετήσιων ενεργειακών αναγκών και την κατανομή των ετήσιων ενεργειακών καταναλώσεων. Στο τέλος, παρουσιάζονται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις και η εκτιμώμενη μείωση των εκπομπών από την αντικατάσταση κάθε συστήματος.

4.2.1 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΚΑΛΥΨΗΣ ΕΤΗΣΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΑΝΑΓΚΩΝ

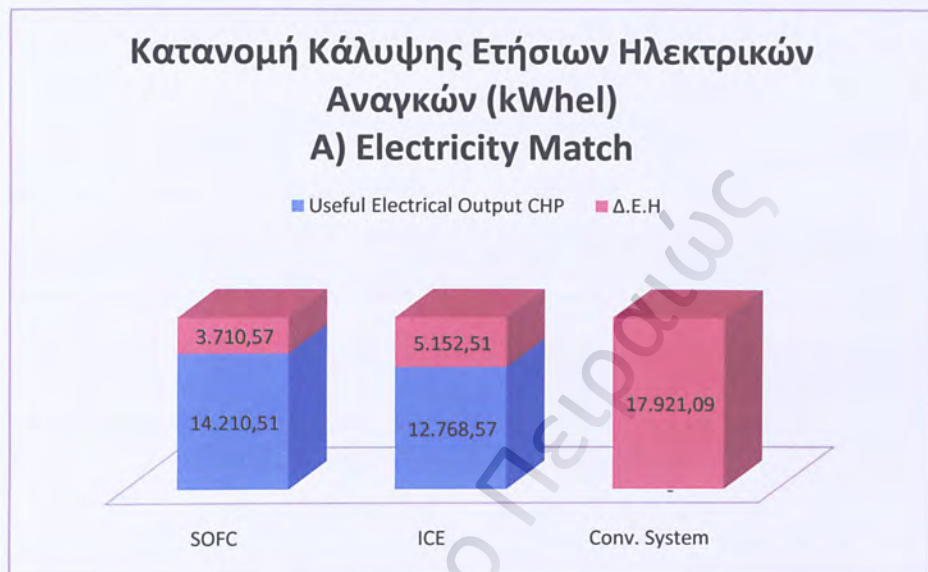
A. ΣΕΝΑΡΙΟ ELECTRICITY MATCH

	SOFC	M.E.K.	Συμβατικό σύστημα
Ωφέλιμη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWhel)	14.210,51	12.768,57	-
Δ.Ε.Η. (kWhel)	3.710,57	5.152,51	17.921,09
Σύνολο (Ετήσια απαίτηση ηλεκτρισμού) (kWhel)	17.921,09	17.921,09	17.921,09
Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας (kWhel)	-	-	-
Ωφέλιμη παραγόμενη θερμική ενέργεια (kWhth)	10.044,94	11.198,41	12.380,57
Συμπληρωματικός λέβητας φυσικού αερίου (kWhth)	2.335,63	1.182,16	-
Σύνολο (Ετήσια απαίτηση θερμότητας) (kWhth)	12.380,57	12.380,57	12.380,57
Απορροπτόμενη θερμότητα (kWhth)	26.000,24	21.082,57	-

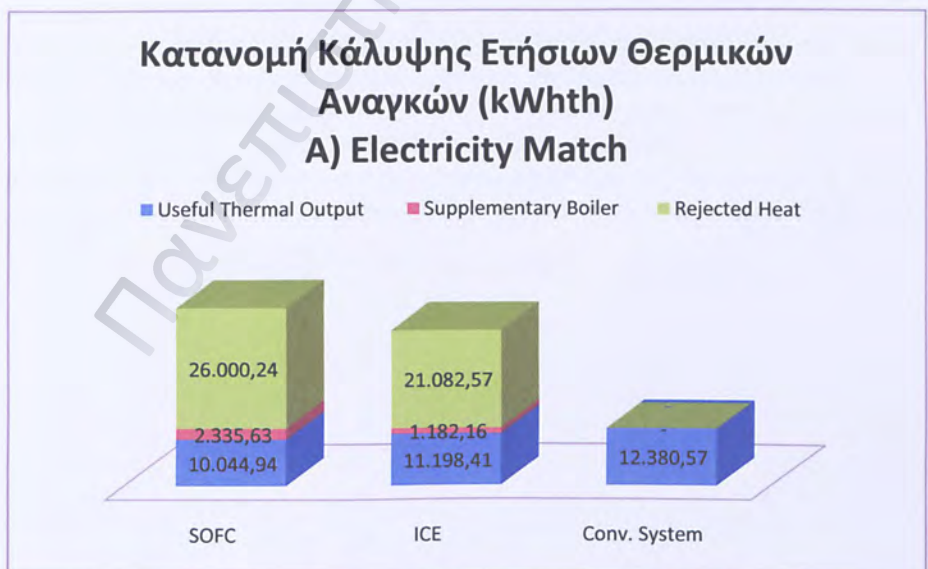
Πίνακας 13. Κάλυψη ετήσιων ενεργειακών αναγκών

Όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της παραγόμενης ενέργειας για την κάλυψη των ετήσιων ενεργειακών αναγκών, στο λειτουργικό σενάριο της παραγωγής ηλεκτρισμού ίσης με ηλεκτρικό φορτίο, το σύστημα της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου παράγει το 79.3% του συνολικά απαιτούμενου ηλεκτρικού φορτίου και το 81.2% του συνόλου των θερμικών αναγκών της κατοικίας. Από την άλλη η μηχανή εσωτερικής καύσης μπορεί να παράξει το 71.3% του συνολικού ηλεκτρικού φορτίου και το 90.5% του συνολικού θερμικού. Η διαφορά στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια οφείλεται στη μεγαλύτερη απόδοση ηλεκτρικής ισχύος της κυψέλης καυσίμου SOFC σε σχέση με τη μηχανή

εσωτερικής καύσης. Ωστόσο, η μικρότερη αναλογία ηλεκτρισμού/θερμότητα της ΜΕΚ έχει ως συνέπεια να παράγει μεγαλύτερα ποσά θερμότητας, για μια δεδομένη ημερήσια ηλεκτρική απαίτηση, σε σχέση με τη θερμότητα που παράγεται από την κυψέλη καυσίμου.



Εικόνα 41. Κατανομή κάλυψης ετήσιων ηλεκτρικών αναγκών



Εικόνα 42. Κατανομή κάλυψης ετήσιων θερμικών αναγκών

B. ΣΕΝΑΡΙΟ THERMAL MATCH

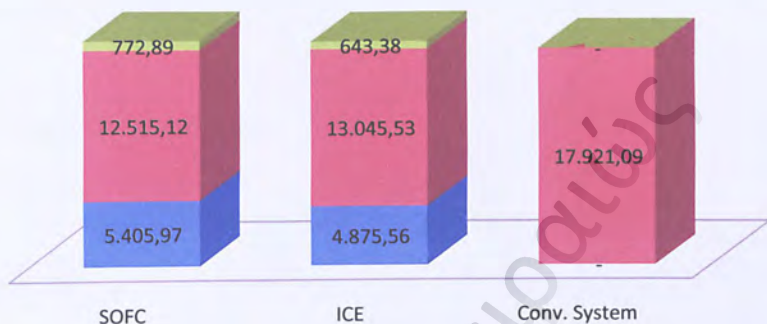
	SOFC	Μ.Ε.Κ.	Συμβατικό σύστημα
Ωφέλιμη παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια (kWhel)	5.405,97	4.875,56	-
Δ.Ε.Η. (kWhel)	12.515,12	13.045,53	17.921,09
Σύνολο (Ετήσια απαίτηση ηλεκτρισμού) (kWhel)	17.921,09	17.921,09	17.921,09
Περίσσεια ηλεκτρικής ενέργειας (kWhel)	772,89	643,38	-
Ωφέλιμη παραγόμενη θερμική ενέργεια (kWhth)	12.380,57	11977,71	12.380,57
Συμπληρωματικός λέβητας φυσικού αερίου (kWhth)	-	402,86	-
Σύνολο (Ετήσια απαίτηση θερμότητας) (kWhth)	12.380,57	12.380,57	12.380,57
Απορριπτόμενη θερμότητα (kWhth)	1.388,64	11.911,89	-

Πίνακας 14. Κάλυψη ετήσιων ενεργειακών αναγκών

Σε αυτό το σενάριο λειτουργίας, η κυψέλη καυσίμου SOFC παράγει μεγαλύτερα ποσά ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας για την κάλυψη των ηλεκτρικών και θερμικών απαιτήσεων της κατοικίας, συγκριτικά με τη ΜΕΚ. Πιο συγκεκριμένα, η κυψέλη καυσίμου παράγει το 30.2% της συνολικής ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια και καλύπτει εξολοκλήρου τις θερμικές ανάγκες χωρίς να είναι απαραίτητη η λειτουργία βοηθητικού λέβητα. Από την άλλη, η μηχανή εσωτερικής καύσης παράγει το 27.2% του συνολικού ηλεκτρικού φορτίου και το 96.8% του συνολικού θερμικού φορτίου. Με δεδομένο ότι η λειτουργία κάθε συστήματος καθορίζεται με βάση τις θερμικές ανάγκες της κατοικίας, η καλύτερη διαστασιολόγηση της κυψέλης καυσίμου σε σχέση με τη ΜΕΚ σε συνδυασμό με την υψηλότερη τιμή του λόγου ηλεκτρισμού/θερμότητα έχει ως αποτέλεσμα η κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου να ανταποκρίνεται καλύτερα στις ενεργειακές απαιτήσεις της κατοικίας.

Κατανομή Κάλυψης Ετήσιων Ηλεκτρικών Αναγκών (kWhel) B) Thermal Match

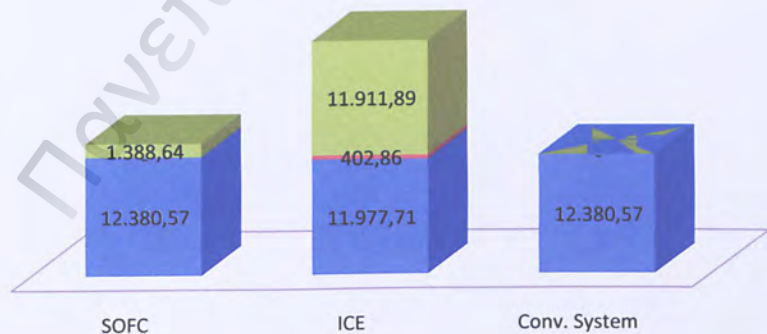
■ Useful Electrical Output CHP ■ Δ.Ε.Η ■ Excess Electricity Production



Εικόνα 43. Κατανομή κάλυψης ετήσιων ηλεκτρικών αναγκών

Κατανομή Κάλυψης Ετήσιων Θερμικών Αναγκών (kWhth) B) Thermal Match

■ Useful Thermal Output ■ Supplementary Boiler ■ Rejected Heat



Εικόνα 42. Κατανομή κάλυψης ετήσιων θερμικών αναγκών

4.2.2 ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΕΤΗΣΙΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΕΩΝ

Μπορεί η κατανομή κάλυψης των ετήσιων ενεργειακών αναγκών να αναδεικνύει τη τεχνολογία συμπαραγωγής και το σενάριο λειτουργίας του συστήματος που εμφανίζεται ως καταλληλότερο για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του επιλεγόμενου διαμερίσματος, ωστόσο, ο υπολογισμός των ετήσιων ενεργειακών καταναλώσεων αποβλέπει στην επιλογή της τεχνολογίας και του λειτουργικού σεναρίου που θεωρείται ως πιο ενεργειακά αποδοτικό.

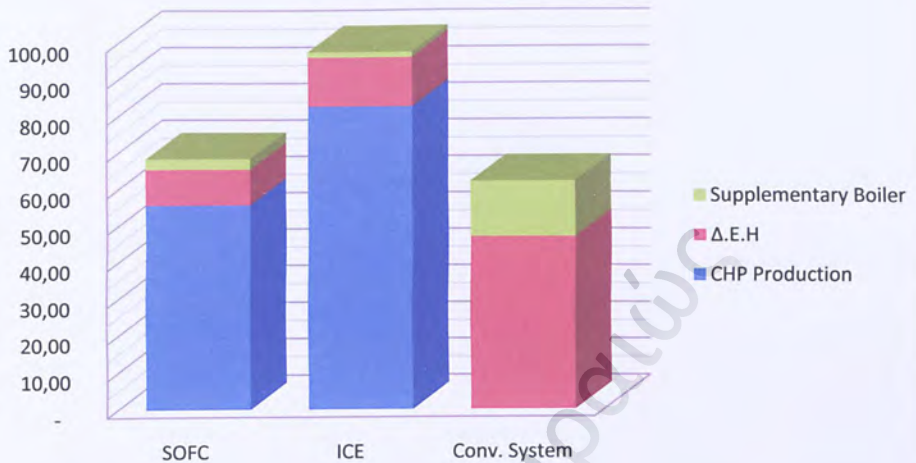
A. ΣΕΝΑΡΙΟ ELECTRICITY MATCH

(kWh)	SOFC	M.E.K	Συμβατικό σύστημα
Λειτουργία CHP	55.920,69	82.969,70	-
Δ.Ε.Η.	9.764,66	13.559,25	47.160,75
Λέβητας Φ.Α.	2.919,54	1.477,71	15.225,60
Σύνολο	68.604,89	97.906,66	62.386,35

Πίνακας 15. Ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις

Για το επιλεγόμενο σενάριο λειτουργίας, κανένα από τα δύο συστήματα συμπαραγωγής δεν θεωρείται ως ενεργειακά πιο αποδοτικό από το ήδη υπάρχον συμβατικό σύστημα χωριστής παραγωγής σε ηλεκτρισμό και θερμότητα. Μάλιστα, είναι εμφανές ότι, η μηχανή εσωτερικής καύσης, λόγω του αρκετά χαμηλού βαθμού απόδοσής της, χρειάζεται να καταναλώσει αρκετά μεγάλα ποσά φυσικού αερίου για τη λειτουργία της.

Κατανάλωση Φ.Α. (MWh) A) Electricity Match



Εικόνα 43. Κατανομή ετήσιων καταναλώσεων

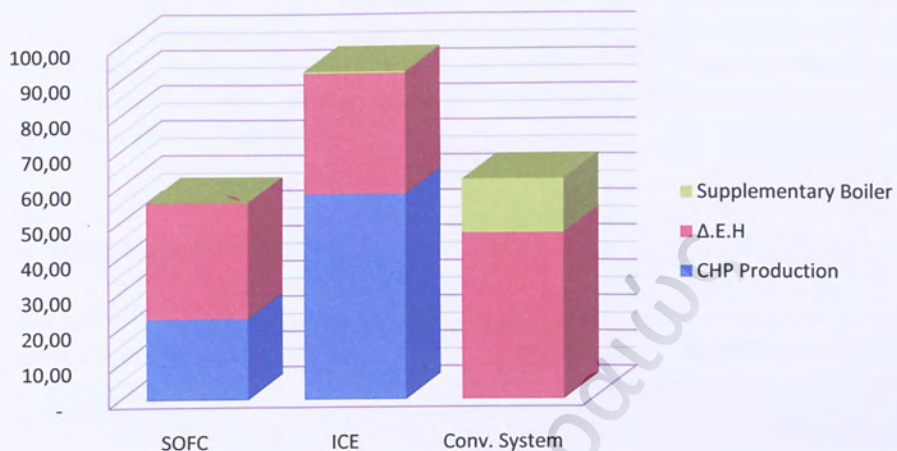
B. ΣΕΝΑΡΙΟ THERMAL MATCH

(kWh)	SOFC	Μ.Ε.Κ	Συμβατικό σύστημα
Λειτουργία CHP	22.933,08	58.254,10	-
Δ.Ε.Η.	32.934,53	34.330,34	47.160,75
Λέβητας Φ.Α.	-	503,57	15.225,60
Σύνολο	55.867,51	93.088,01	62.386,35

Πίνακας 16. Ετήσιες ενεργειακές καταναλώσεις

Στο σενάριο λειτουργίας Thermal Match, η μονάδα οικιακής συμπαραγωγής της κυψέλης καυσίμου στερεού οξειδίου παρουσιάζεται ως η καταλληλότερη από πλευράς ενεργειακής αξιοποίησης. Τα χαμηλά επίπεδα κατανάλωσης φυσικού αερίου της κυψέλης καυσίμου αποδίδονται κατά κύριο λόγο στον αρκετά υψηλό βαθμό απόδοσης του συστήματος σε συνδυασμό με τη βέλτιστη λειτουργική συμπεριφορά.

Κατανάλωση Φ.Α. (MWh) B) Thermal Match



Εικόνα 44. Κατανομή ετήσιων καταναλώσεων

4.2.3 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ

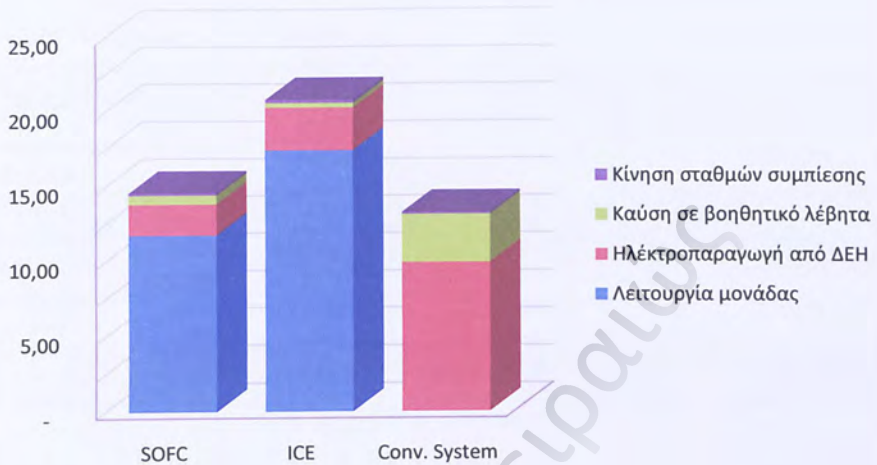
Σε αυτή την ενότητα υπολογίζονται οι εκπομπές CO₂ και CH₄ με στόχο να εκτιμηθούν, για κάθε ενεργειακό σύστημα, οι επιπτώσεις των κύριων ρύπων που επιδρούν άμεσα στο φαινόμενο του θερμοκηπίου. Η μελέτη περιορίζεται στο προσδιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τη διάρκεια της λειτουργίας των συστημάτων και της μεταφοράς του φυσικού αερίου.

A. ΣΕΝΑΡΙΟ ELECTRICITY MATCH

Εκπομπές CO ₂ (kg/γ)	SOFC	Μ.Ε.Κ.	Συμβατικό σύστημα
Λειτουργία μονάδας	11.784,05	17.462,96	-
Ηλεκτροπαραγωγή από Δ.Ε.Η.	2.507,69	2.857,31	9.938,09
Καύση σε συμπληρωματικό λέβητα Φ.Α.	615,23	311,39	3.208,46
Κίνηση σταθμών συμπίεσης	146,19	208,63	132,94
Σύνολο	14.603,16	20.840,30	13.297,49

Πίνακας 17. Εκτίμηση εκπομπών CO₂

Εκπομπές CO₂ (tn/y) A) Electricity Match

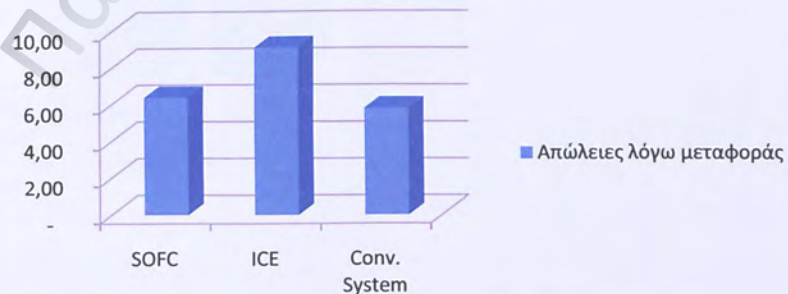


Εικόνα 45. Εκπομπές CO₂

Εκπομπές CH ₄ (kg/y)	SOFC	Μ.Ε.Κ.	Συμβατικό σύστημα
Απώλειες από δίκτυο μεταφοράς	6,38	9,10	5,80

Πίνακας 18. Εκπομπές CH₄

Εκπομπές CH₄ (kg/y) A) Electricity Match

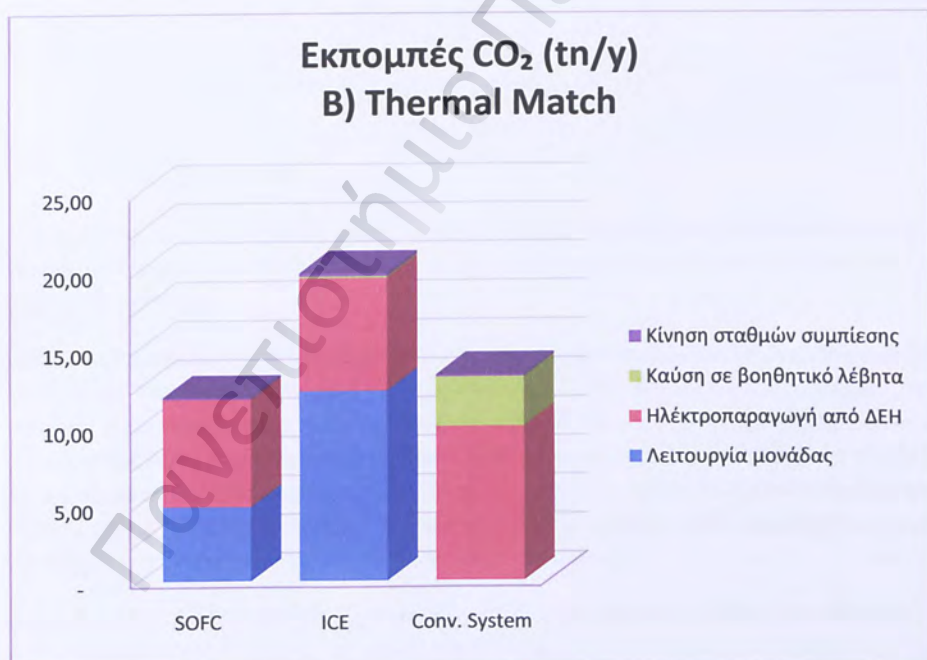


Εικόνα 46. Εκπομπές CH₄

B. ΣΕΝΑΡΙΟ THERMAL MATCH

Εκπομπές CO ₂ (kg/γ)	SOFC	Μ.Ε.Κ.	Συμβατικό σύστημα
Λειτουργία μονάδας	4.832,64	12.275,77	-
Ηλεκτροπαραγωγή από Δ.Ε.Η.	6.940,23	7.234,36	9.938,09
Καύση σε συμπληρωματικό λέβητα Φ.Α.	-	106,12	3.208,46
Κίνηση σταθμών συμπιέσης	119,05	198,36	132,94
Σύνολο	11.891,91	19.814,61	13.279,49

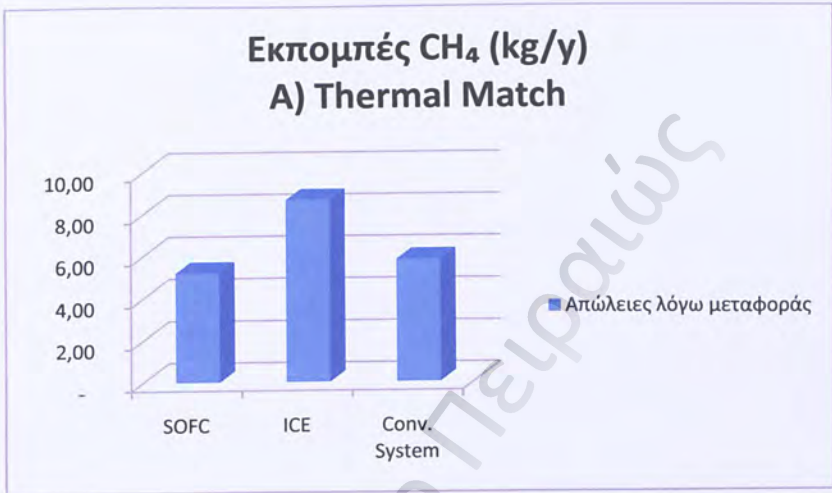
Πίνακας 19. Εκτίμηση εκπομπών CH₄



Εικόνα 47. Εκπομπές CO₂

Εκπομπές CH ₄ (kg/y)	SOFC	Μ.Ε.Κ.	Συμβατικό σύστημα
Απώλειες από δίκτυο μεταφοράς	5,19	8,66	5,80

Πίνακας 20. Εκπομπές CH₄



Εικόνα 48. Εκπομπές CH₄

Από τις δύο διαθέσιμες τεχνολογίες συμπαραγωγής, ο κινητήρας Otto εμφανίζει τις υψηλότερες εκπομπές ρύπων σε σχέση με τη κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου και το συμβατικό σύστημα.

Όπως γίνεται αντιληπτό από τα αποτελέσματα των εκπομπών CO₂ και CH₄ για το σενάριο λειτουργίας Thermal Match, χάρη στην αποδοτικότερη εκμετάλλευση του καυσίμου, το σύστημα συμπαραγωγής της κυψέλης SOFC συντελεί σε άμεση μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, όπως πολύ παραστατικά δείχνουν οι εικόνες 47 και 48. Επίσης, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου συνοδεύεται και από μια έμμεση μείωση ρύπων CO₂ και CH₄ από τον υπόλοιπο κύκλο καυσίμου που περιλαμβάνει την εξόρυξη, την επεξεργασία, τη μεταφορά και την αποθήκευση.

Η επίδραση της συμπαραγωγής του συστήματος SOFC από πλευράς ρύπων CO₂ εκφράζεται με τη διαφορά των εκπομπών σε σχέση με το συμβατικό σύστημα, που ορίζεται με τη σχέση:

$$\left| \Delta m_{CO_2(SOFC)} \right| = \left| m_{CO_2(SOFC)} - (m_{CO_2(\Delta E\eta)} + m_{CO_2(B)}) \right| \cong 1.4 \text{ tones / y}$$

Περίπου 1.4 τόνοι CO₂ ανά έτος αποφεύγονται με την αντικατάσταση του συμβατικού συστήματος από ένα σύστημα οικιακής συμπαραγωγής από κυψέλη καυσίμου στερεού οξειδίου που είναι σχεδιασμένο να λειτουργεί παράγοντας θερμική ενέργεια ίση με το θερμικό φορτίο της κατοικίας. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση καυσίμου δικαιολογεί τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος συμπαραγωγής στον οικιακό τομέα.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια την παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκε η ενεργειακή και περιβαλλοντική απόδοση ενός συστήματος χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών μιας κατοικίας και δύο υποψήφια τεχνολογίες οικιακής συμπαραγωγής που λειτουργούν με καύσιμο φυσικό αέριο. Τα τεχνικά στοιχεία των συμπαραγωγικών μονάδων ελήφθησαν από βιβλιογραφικές αναφορές σύμφωνα με τις οποίες έγιναν οι παραδοχές για τον υπολογισμό των ημερήσιων βαθμών απόδοσης σε μερικά φορτία με βάση την απαίτηση σε θερμική ή ηλεκτρική ισχύ της εξεταζόμενης κατοικίας. Στη συνέχεια αναλύθηκαν δυο διαφορετικά σενάρια λειτουργίας για κάθε σύστημα με σκοπό την ρεαλιστική προσομοίωση ενός ετήσιου κύκλου λειτουργίας. Η εργασία ολοκληρώθηκε με την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από κάθε σύστημα και να την επιλογή του συστήματος συμπαραγωγής που επιφέρει τη μεγαλύτερη μείωση των εκπομπών.

Είναι φανερό ότι ο τρόπος λειτουργίας αναδεικνύεται ως η πιο σημαντική παράμετρος βιωσιμότητας των συστημάτων οικιακής συμπαραγωγής καθώς εξαρτάται και συνάμα επηρεάζει το συνολικό σχεδιασμό του συστήματος. Η σωστή διαστασιολόγηση και ρύθμιση των κύριων μηχανημάτων αποκτά επομένως ιδιαίτερα κρίσιμη σημασία για το σκοπό αυτό.

Η λειτουργία του συμπαραγωγικού συστήματος σύμφωνα με το θερμικό φορτίο της κατοικίας όπως προκύπτει από τα αποτελέσματα της τεχνικο-περιβαλλοντικής μελέτης προσφέρει υψηλότερη ενεργειακή αποδοτικότητα και λιγότερους ρύπους, συγκρινόμενη με τη λειτουργία που καθορίζεται από το ηλεκτρικό φορτίο.

Επίσης, η κυψέλη καυσίμου SOFC, για το σενάριο παραγωγής θερμότητας ίσης με το θερμικό φορτίο, παρουσιάζεται ως πιο κατάλληλη τεχνολογία για συμπαραγωγή στον κτηριακό τομέα, σε συνδυασμό με φυσικό αέριο. Χάρη στην αποδοτικότερη εκμετάλλευση του καυσίμου και τη βέλτιστη λειτουργική συμπεριφορά της κυψέλης, οι εκπομπές CO₂ εμφανίζονται πολύ χαμηλότερες από των άλλων εξεταζόμενων διαθέσιμων συστημάτων. Συνεπώς, οι χαμηλές εκπομπές ρύπων μαζί με τη χαμηλή στάθμη θορύβου έχουν ως αποτέλεσμα η τεχνολογία SOFC να είναι η πιο κατάλληλη για εγκατάσταση και λειτουργία σε κατοικημένες περιοχές.

Οικονομικά στοιχεία δεν περιελήφθησαν στη παρούσα μελέτη λόγω της μη διαθεσιμότητας σε ανοικτή βιβλιογραφία. Βεβαίως, πρέπει να τονιστεί ότι, η εξοικονόμηση ενέργειας και η μείωση των ρύπων ίσως δεν είναι αρκετά κίνητρα για μια επένδυση σε σύστημα συμπαραγωγής εάν και η ίδια η επένδυση δεν είναι οικονομικά βιώσιμη.

Από τη γενική επισκόπηση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την παρούσα εργασία γίνεται αντιληπτό ότι, η επιλογή του είδους του συστήματος, η διαστασιολόγηση του και ο τρόπος λειτουργίας του σε κάθε χρονική στιγμή είναι θέματα που πρέπει να αντιμετωπίζονται με προσεκτική μελέτη και βελτιστοποίηση ιδιαίτερα όταν αφορά εφαρμογές της οικιακής συμπαραγωγής.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Βιβλιογραφία

1. Onovwiona H.I., Ugursal V.I., Residential cogeneration systems: review of the current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 10, pp 389-431, (2006)
2. Orlando JA. Cogeneration design guide. USA: ASHRAE, Inc, (1996)
3. Frangopoulos CA. EDUCOGEN, The European educational tools on cogeneration. European Commission. (2001)
4. Voorpools KR, D'haeseleer WD. The evaluation of small scale cogeneration for residential heating. *Int. J Energy Res* 26, pp 1175-90, (2002)
5. Singer Charles Joseph et al, A history of technology: The internal combustion engine. Clarendon Press, pp. 157-176, (1954-1978)
6. Hardenberg, Horst O., The Middle Ages of the internal combustion Engine. Society of Automotive Engineers (SAE), (1999)
7. Aspen Systems Corp. Combined heat and power. A federal manager's resource guide. USA: US Department of Energy, (2000). <http://www.eere.energy.gov>
8. <http://www.cumminspower.com>
9. <http://www.senertec.de>
10. Pilavachi PA. Mini and macro-gas turbines for combined heat and power. *Appl. Ther. Eng.* 2002, 22. 14 (2003)
11. <http://en.wikipedia.org/wiki/Recuperator>
12. <http://www.microturbine.com>
13. Τσιρίκογλου Θ., Σημειώσεις μαθήματος «Εφαρμογές Ρευστοδυναμικών μηχανών και Θερμοδυναμικής», Τμήμα Μηχανολογίας, Λάρισα (2006)
14. Vielstich W., Lamm A., and Gasteiger H.A., Handbook of Fuel Cells: Fundamentals, Technology and Applications, 1, John Wiley & Sons Ltd., England (2007)

15. Μπαλωμένου Σ. Νέοι ηλεκτροχημικά ενισχυόμενοι αντιδραστήρες και κυψέλες καυσίμου. Διδακτορική διατριβή, Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Πάτρα (2005)
16. Minh N.Q., *J. Am. Ceram. Soc.*, 76, 563 (1993)
17. Linderoth S., "Proceedings of the 4th European Solid Oxide Fuel Cell Forum, Luzern", McEvoy A.J. (Ed), *European Fuel Cell Forum, Oberrohrbach*, pp. 19, (2000)
18. Holtappels P., Vinke I.C., De Haart L.G.J. and Stimming U., *J. Electrochem. Soc.*, 146, 475 (1999)
19. Brown M., Primdahl S. and Mogensen M., *J. Electrochem. Soc.*, 146, 475 (1999)
20. Primdahl S. and Mogensen M., *J. Electrochem. Soc.*, 146, 2827 (1999)
21. Holtappels P., De Haart L.G.J, Mogensen M., Stimming U. and Vinke I.C., *J. Appl. Electrochem.*, 29 (5), 561 (1999)
22. Stochniol G, Syskakis E. and Naoumidis A., *J. Am. Ceram. Soc.*, 78, 929 (1995)
23. (a) Juhl M., Primdahl S., Manon C. and Mogensen M., *J. Power Sources*, 61, 173 (1996);
(b) Sasaki K. and Gauckler L.J., *Proc. Int. Symp. Struc. Func. Mater*, 3, 651 (1995)
24. Lundberg W.L., "Solid Oxide Fuel Cell Cogeneration System Conceptual Design," prepared by Westinghouse for Gas Research Institute, Report No. GRI-89-0162, (1989)
25. Reinsche E., Stimming U. and Unverzagt G., *J. Power Sources*, 73, 251 (1998)
26. Reinsche E., Meusinger J., Stimming U. and Unverzagt G., *J. Power Sources*, 71, 306 (1998)
27. Hawkes A., Leach M., Solid oxide fuel cell systems for residential micro-combined heat and power in the UK: Key economic drivers. ICEPT, Department Environmental Science and Technology, Imperial College London , *Journal of Power Sources* 149, pp 72-83, (2005)
28. <http://en.wikipedia.org/wiki/Perovskite>
29. Beccali M. Brunone S. Cellura M. Franzitta V., Energy, economic and environmental analysis on RET-hydrogen systems in residential buildings. Dipartimento di Ricerche Energetiche e Ambientali, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, Palermo, Italy, *Renewable Energy* 33, pp 366–382, (2008)
30. Φραγκόπουλος Χρίστος Αθ., Καρυδογιάννης Ηλίας Π., Καραλής Γιάννης Κ. Συμπαράγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας, Ευρωπαϊκό Πρόγραμμα SAVE της

31. Possidente R., Roselli C., Sasso M., Sibilio S. Experimental analysis of micro-cogeneration units based on reciprocating internal combustion engine. Dipartimento di Ingegneria, Universita degli Studi del Sannio, Roma, DISPAMA Seconda Universita` di Napoli Borgo San Lorenzo, Energy and Buildings 38, pp 1417–1422 (2006)
32. Ononwiona H.I., Ugursal V.I., Fung A.S., Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications, Applied Thermal Engineering 27, pp 848-861, (2007)
33. Nieuvenhout F., Ruijg G.J., Roossien B., Deliverable D3220 : Interconnection to large networks, Version 1, Fuel Flexible, Air-regulated, Modular and Electrically Integrated SOFC-System, (2007)
34. Hawkes Adam, Leach Matthew, Solid oxide fuel cell systems for residential micro-combined heat and power in the UK: Key economic drivers. ICEPT, Department Environmental Science and Technology, Imperial College London. Journal of Power Sources 149, pp 72-83. (2005)
35. Πασπαλάς Κων/νος Γ., Καυστήρες – Λέβητες,, Σύλλογος Μηχανολόγων-Ηλεκτρολόγων Β. Ελλάδας, ΤΕΕ-Τμήμα Κεντρικής Μακεδονίας, (2001)
36. <http://www.rae.gr>
37. Dones R., Heck T., Emmenegger M.F., Jungbluth N., Life cycle inventories for the nuclear and natural gas energy systems, and examples of uncertainty analysis, Ecoinvent: Energy Supply, (2005)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Α΄

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

Απαίτηση Ισχύος Διαμερίσματος

Ημέρα	Electricity		Thermal - Refriger.				Κανονικοποίηση ισχύος για διαμέρισμα 100 m ²			
	max (kW)	min (kW)	Average Electrical Power (kW)	min (kW)	max (kW)	Total Electrical Power (kWel)	Total Thermal Power (kWth)	Refrigeration Power (kWel)	Total Electrical Power (kWel)	Total Thermal Power (kWth)
1η	35	-	7	-24	0	15,00	0	0,57	1,07	-
2η	80	-	16	-37	0	28,33	0	0,88	2,02	-
3η	200	180	38	-37	-2	50,33	0	0,88	3,60	-
4η	200	180	38	-45	0	53,00	0	1,07	3,79	-
5η	200	180	38	-39	-9	51,00	0	0,93	3,64	-
6η	200	180	38	-32	0	48,67	0	0,76	3,48	-
7η	200	140	34	-32	-4	44,67	0	0,76	3,19	-
8η	35	-	7	-27	0	16,00	0	0,64	1,14	-
9η	80	-	16	-23	1	23,67	1	0,55	1,69	0,07
10η	200	180	38	-39	0	51,00	0	0,93	3,64	-
11η	200	180	38	-30	-5	48,00	0	0,71	3,43	-
12η	200	180	38	-36	-3	50,00	0	0,86	3,57	-
13η	200	180	38	-18	0	44,00	0	0,43	3,14	-
14η	200	180	38	-11	5	41,67	5	0,26	2,98	0,36
15η	35	-	7	-20	14	13,67	14	0,48	0,98	1,00
16η	80	-	16	-19	14	22,33	14	0,45	1,60	1,00
17η	200	180	38	-26	13	46,67	13	0,62	3,33	0,93
18η	200	180	38	-24	0	46,00	0	0,57	3,29	-
19η	200	180	38	-19	0	44,33	0	0,45	3,17	-
20η	200	180	38	-12	23	42,00	23	0,29	3,00	1,64
21η	200	180	38	-21	-2	45,00	0	0,50	3,21	-
22η	35	-	7	-32	-2	17,67	0	0,76	1,26	-
23η	80	-	16	-46	-23	31,33	0	1,10	2,24	-
24η	200	180	38	-40	-23	51,33	0	0,95	3,67	-
25η	200	180	38	-39	-4	51,00	0	0,93	3,64	-
26η	200	180	38	-33	0	49,00	0	0,79	3,50	-
27η	200	180	38	-34	-14	49,33	0	0,81	3,52	-
28η	200	180	38	-28	3	47,33	3	0,67	3,38	0,21
29η	35	-	7	-25	0	15,33	0	0,60	1,10	-
30η	80	-	16	-25	1	24,33	1	0,60	1,74	0,07
31η	200	180	38	-22	4	45,33	4	0,52	3,24	0,29
32η	200	180	38	-23	3	45,67	3	0,55	3,26	0,21
33η	200	180	38	-27	0	47,00	0	0,64	3,36	-
34η	200	180	38	-29	2	47,67	2	0,69	3,40	0,14
35η	200	180	38	-13	3	42,33	3	0,31	3,02	0,21
36η	60	-	12	-12	5	16,00	5	0,29	1,14	0,36
37η	80	-	16	-10	2	19,33	2	0,24	1,38	0,14
38η	200	180	38	-8	6	40,67	6	0,19	2,90	0,43
39η	200	180	38	-5	3	39,67	3	0,12	2,83	0,21
40η	200	180	38	-8	3	40,67	3	0,19	2,90	0,21
41η	200	180	38	-12	2	42,00	2	0,29	3,00	0,14
42η	200	180	38	-6	4	40,00	4	0,14	2,86	0,29
43η	37	-	7,4	-7	1	9,73	1	0,17	0,70	0,07
44η	80	-	16	-11	3	19,67	3	0,26	1,40	0,21
45η	200	180	38	-11	4	41,67	4	0,26	2,98	0,29
46η	200	180	38	-9	2	41,00	2	0,21	2,93	0,14
47η	200	180	38	-34	-3	49,33	0	0,81	3,52	-
48η	200	180	38	-42	-14	52,00	0	1,00	3,71	-
49η	200	180	38	-41	-14	51,67	0	0,98	3,69	-
50η	37	-	7,4	-38	-14	20,07	0	0,90	1,43	-
51η	80	-	16	-31	0	26,33	0	0,74	1,88	-
52η	200	180	38	-27	0	47,00	0	0,64	3,36	-
53η	200	180	38	-21	3	45,00	3	0,50	3,21	0,21
54η	200	180	38	-23	2	45,67	2	0,55	3,26	0,14
55η	200	180	38	-20	2	44,67	2	0,48	3,19	0,14
56η	200	180	38	-14	4	42,67	4	0,33	3,05	0,29
57η	35	-	7	-22	0	14,33	0	0,52	1,02	-
58η	80	-	16	-38	-1	28,67	0	0,90	2,05	-
59η	200	180	38	-43	-13	52,33	0	1,02	3,74	-
60η	200	180	38	-44	-15	52,67	0	1,05	3,76	-
61η	200	180	38	-29	5	47,67	5	0,69	3,40	0,36
62η	200	180	38	-9	6	41,00	6	0,21	2,93	0,43
63η	200	140	34	-12	4	38,00	4	0,29	2,71	0,29
64η	35	-	7	-21	3	14,00	3	0,50	1,00	0,21
65η	80	-	16	-26	4	24,67	4	0,62	1,76	0,29
66η	200	180	38	-20	4	44,67	4	0,48	3,19	0,29
67η	200	180	38	-9	5	41,00	5	0,21	2,93	0,36
68η	200	180	38	-10	3	41,33	3	0,24	2,95	0,21
69η	200	180	38	-8	0	40,67	0	0,19	2,90	-
70η	200	180	38	-6	3	40,00	3	0,14	2,86	0,21
71η	35	-	7	-9	4	10,00	4	0,21	0,71	0,29
72η	80	-	16	-18	5	22,00	5	0,43	1,57	0,36
73η	200	180	38	-14	3	42,67	3	0,33	3,05	0,21
74η	200	180	38	-24	0	46,00	0	0,57	3,29	-
75η	200	180	38	-29	-2	47,67	0	0,69	3,40	-
76η	200	180	38	-31	-4	48,33	0	0,74	3,45	-
77η	200	180	38	-39	-10	51,00	0	0,93	3,64	-
78η	35	-	7	-40	-5	20,33	0	0,95	1,45	-

Απαίτηση Ισχύος Διαμερίσματος

79η	80	-	16	-33	-10	27,00	0	0,79	1,93	-
80η	200	180	38	-35	-3	49,67	0	0,83	3,55	-
81η	200	180	38	-34	-3	49,33	0	0,81	3,52	-
82η	200	180	38	-30	-1	48,00	0	0,71	3,43	-
83η	200	180	38	-35	0	49,67	0	0,83	3,55	-
84η	200	180	38	-22	2	45,33	2	0,52	3,24	0,14
85η	35	-	7	-23	1	14,67	1	0,55	1,05	0,07
86η	80	-	16	-24	3	24,00	3	0,57	1,71	0,21
87η	170	155	32,5	-18	4	38,50	4	0,43	2,75	0,29
88η	170	155	32,5	-16	3	37,83	3	0,38	2,70	0,21
89η	170	155	32,5	0	4	32,50	4	-	2,32	0,29
90η	170	155	32,5	1	3	32,50	3	-	2,32	0,21
91η	170	155	32,5	-8	1	35,17	1	0,19	2,51	0,07
92η	50	-	10	-7	3	12,33	3	0,17	0,88	0,21
93η	70	-	14	-5	3	15,67	3	0,12	1,12	0,21
94η	170	155	32,5	-14	0	37,17	0	0,33	2,65	-
95η	170	155	32,5	-26	-1	41,17	0	0,62	2,94	-
96η	170	155	32,5	-27	0	41,50	0	0,64	2,96	-
97η	170	155	32,5	-24	0	40,50	0	0,57	2,89	-
98η	170	155	32,5	-14	0	37,17	0	0,33	2,65	-
99η	37	-	7,4	-2	3	8,07	3	0,05	0,58	0,21
100η	70	-	14	0	2	14,00	2	-	1,00	0,14
101η	170	155	32,5	-3	2	33,50	2	0,07	2,39	0,14
102η	170	155	32,5	-6	1	34,50	1	0,14	2,46	0,07
103η	170	155	32,5	-10	2	35,83	2	0,24	2,56	0,14
104η	170	155	32,5	-9	5	35,50	5	0,21	2,54	0,36
105η	170	155	32,5	-1	4	32,83	4	0,02	2,35	0,29
106η	35	-	7	-4	4	8,33	4	0,10	0,60	0,29
107η	70	-	14	-14	0	18,67	0	0,33	1,33	-
108η	170	155	32,5	-16	0	37,83	0	0,38	2,70	-
109η	170	155	32,5	-19	4	38,83	4	0,45	2,77	0,29
110η	170	155	32,5	-16	6	37,83	6	0,38	2,70	0,43
111η	170	155	32,5	-1	6	32,83	6	0,02	2,35	0,43
112η	170	155	32,5	0	5	32,50	5	-	2,32	0,36
113η	35	-	7	-2	1	7,67	1	0,05	0,55	0,07
114η	70	-	14	0	5	14,00	5	-	1,00	0,36
115η	170	155	32,5	0	2	32,50	2	-	2,32	0,14
116η	170	155	32,5	0	4	32,50	4	-	2,32	0,29
117η	170	155	32,5	-1	3	32,83	3	0,02	2,35	0,21
118η	170	155	32,5	0	4	32,50	4	-	2,32	0,29
119η	170	155	32,5	0	5	32,50	5	-	2,32	0,36
120η	45	-	9	0	2	9,00	2	-	0,64	0,14
121η	70	-	14	-3	6	15,00	6	0,07	1,07	0,43
122η	170	155	32,5	-3	8	33,50	8	0,07	2,39	0,57
123η	170	155	32,5	-1	16	32,83	16	0,02	2,35	1,14
124η	170	155	32,5	2	20	32,50	20	-	2,32	1,43
125η	170	155	32,5	0	10	32,50	10	-	2,32	0,71
126η	170	155	32,5	0	18	32,50	18	-	2,32	1,29
127η	35	-	7	0	11	7,00	11	-	0,50	0,79
128η	70	-	14	0	9	14,00	9	-	1,00	0,64
129η	170	155	32,5	0	8	32,50	8	-	2,32	0,57
130η	170	155	32,5	2	6	32,50	6	-	2,32	0,43
131η	170	155	32,5	0	5	32,50	5	-	2,32	0,36
132η	170	155	32,5	2	7	32,50	7	-	2,32	0,50
133η	170	155	32,5	2	7	32,50	7	-	2,32	0,50
134η	35	-	7	0	7	7,00	7	-	0,50	0,50
135η	70	-	14	0	6	14,00	6	-	1,00	0,43
136η	170	155	32,5	-6	7	34,50	7	0,14	2,46	0,50
137η	170	155	32,5	-4	4	32,50	28	-	2,32	2,00
138η	170	155	32,5	0	19	32,50	19	-	2,32	1,36
139η	170	155	32,5	0	18	32,50	18	-	2,32	1,29
140η	170	155	32,5	0	6	32,50	6	-	2,32	0,43
141η	35	-	7	0	1	7,00	1	-	0,50	0,07
142η	70	-	14	0	4	14,00	4	-	1,00	0,29
143η	170	155	32,5	0	4	32,50	4	-	2,32	0,29
144η	170	155	32,5	-4	4	33,83	4	0,10	2,42	0,29
145η	170	155	32,5	0	3	32,50	3	-	2,32	0,21
146η	170	155	32,5	0	5	32,50	5	-	2,32	0,36
147η	170	155	32,5	-3	3	33,50	3	0,07	2,39	0,21
148η	30	-	6	-1	5	6,33	5	0,02	0,45	0,36
149η	55	-	11	0	18	11,00	18	-	0,79	1,29
150η	115	105	22	0	27	22,00	27	-	1,57	1,93
151η	115	105	22	-5	24	23,67	24	0,12	1,69	1,71
152η	115	105	22	0	29	22,00	29	-	1,57	2,07
153η	115	105	22	0	26	22,00	26	-	1,57	1,86
154η	115	105	22	2	7	22,00	7	-	1,57	0,50
155η	20	-	4	3	19	4,00	19	-	0,29	1,36
156η	55	-	11	3	21	11,00	21	-	0,79	1,50
157η	115	105	22	0	6	22,00	6	-	1,57	0,43
158η	115	105	22	1	14	22,00	14	-	1,57	1,00

Απαίτηση Ισχύος Διαμερίσματος

159η	115	105	22	1	6	22,00	6	-	1,57	0,43
160η	115	105	22	3	19	22,00	19	-	1,57	1,36
161η	115	105	22	3	23	22,00	23	-	1,57	1,64
162η	20	-	4	0	32	4,00	32	-	0,29	2,29
163η	55	-	11	2	35	11,00	35	-	0,79	2,50
164η	115	105	22	2	43	22,00	43	-	1,57	3,07
165η	115	105	22	2	47	22,00	47	-	1,57	3,36
166η	115	105	22	0	32	22,00	32	-	1,57	2,29
167η	115	105	22	3	39	22,00	39	-	1,57	2,79
168η	115	105	22	2	57	22,00	57	-	1,57	4,07
169η	25	-	5	4	48	5,00	48	-	0,36	3,43
170η	55	-	11	6	44	11,00	44	-	0,79	3,14
171η	115	105	22	5	37	22,00	37	-	1,57	2,64
172η	115	105	22	4	37	22,00	37	-	1,57	2,64
173η	115	105	22	7	55	22,00	55	-	1,57	3,93
174η	115	105	22	5	54	22,00	54	-	1,57	3,86
175η	115	105	22	0	53	22,00	53	-	1,57	3,79
176η	20	-	4	3	58	4,00	58	-	0,29	4,14
177η	55	-	11	8	48	11,00	48	-	0,79	3,43
178η	115	105	22	4	43	22,00	43	-	1,57	3,07
179η	115	105	22	4	51	22,00	51	-	1,57	3,64
180η	115	105	22	5	51	22,00	51	-	1,57	3,64
181η	115	105	22	5	53	22,00	53	-	1,57	3,79
182η	115	105	22	4	58	22,00	58	-	1,57	4,14
183η	23	-	4,6	7	60	4,60	60	-	0,33	4,29
184η	55	-	11	2	54	11,00	54	-	0,79	3,86
185η	115	105	22	0	44	22,00	44	-	1,57	3,14
186η	115	105	22	2	52	22,00	52	-	1,57	3,71
187η	115	105	22	0	56	22,00	56	-	1,57	4,00
188η	115	105	22	3	65	22,00	65	-	1,57	4,64
189η	115	105	22	6	67	22,00	67	-	1,57	4,79
190η	23	-	4,6	19	71	4,60	71	-	0,33	5,07
191η	55	-	11	14	70	11,00	70	-	0,79	5,00
192η	115	105	22	7	61	22,00	61	-	1,57	4,36
193η	115	105	22	6	59	22,00	59	-	1,57	4,21
194η	115	105	22	4	43	22,00	43	-	1,57	3,07
195η	115	105	22	7	63	22,00	63	-	1,57	4,50
196η	115	105	22	17	51	22,00	51	-	1,57	3,64
197η	23	-	4,6	15	76	4,60	76	-	0,33	5,43
198η	55	-	11	16	53	11,00	53	-	0,79	3,79
199η	115	105	22	18	66	22,00	66	-	1,57	4,71
200η	115	105	22	18	70	22,00	70	-	1,57	5,00
201η	115	105	22	14	65	22,00	65	-	1,57	4,64
202η	115	105	22	13	63	22,00	63	-	1,57	4,50
203η	115	105	22	9	76	22,00	76	-	1,57	5,43
204η	30	-	6	20	63	6,00	63	-	0,43	4,50
205η	55	-	11	6	48	11,00	48	-	0,79	3,43
206η	115	115	23	1	48	23,00	48	-	1,64	3,43
207η	115	115	23	7	56	23,00	56	-	1,64	3,93
208η	115	115	23	0	57	23,00	57	-	1,64	4,07
209η	115	115	23	2	62	23,00	62	-	1,64	4,43
210η	115	115	23	3	63	23,00	63	-	1,64	4,50
211η	20	-	4	8	77	4,00	77	-	0,29	5,50
212η	55	-	11	10	57	11,00	57	-	0,79	4,07
213η	115	105	22	6	49	22,00	49	-	1,57	3,50
214η	115	105	22	1	31	22,00	31	-	1,57	2,21
215η	115	105	22	2	52	22,00	52	-	1,57	3,71
216η	115	105	22	8	62	22,00	62	-	1,57	4,43
217η	115	105	22	12	58	22,00	58	-	1,57	4,14
218η	20	-	4	11	58	4,00	58	-	0,29	4,14
219η	55	-	11	7	53	11,00	53	-	0,79	3,79
220η	115	105	22	11	66	22,00	66	-	1,57	4,71
221η	115	105	22	13	55	22,00	55	-	1,57	3,93
222η	115	105	22	11	52	22,00	52	-	1,57	3,71
223η	115	105	22	11	54	22,00	54	-	1,57	3,86
224η	115	105	22	12	57	22,00	57	-	1,57	4,07
225η	25	-	5	6	47	5,00	47	-	0,36	3,36
226η	55	-	11	6	47	11,00	47	-	0,79	3,36
227η	115	105	22	10	48	22,00	48	-	1,57	3,43
228η	115	105	22	11	58	22,00	58	-	1,57	4,14
229η	115	105	22	10	57	22,00	57	-	1,57	4,07
230η	115	105	22	6	54	22,00	54	-	1,57	3,86
231η	115	105	22	5	54	22,00	54	-	1,57	3,86
232η	20	-	4	5	40	4,00	40	-	0,29	2,86
233η	55	-	11	7	37	11,00	37	-	0,79	2,64
234η	115	105	22	7	53	22,00	53	-	1,57	3,79
235η	115	105	22	14	50	22,00	50	-	1,57	3,57
236η	115	105	22	12	57	22,00	57	-	1,57	4,07
237η	115	105	22	11	64	22,00	64	-	1,57	4,57
238η	115	105	22	6	50	22,00	50	-	1,57	3,57

Απαίτηση Ισχύος Διαμερίσματος

239η	20	-	4	5	45	4,00	45	-	0,29	3,21
240η	55	-	11	11	56	11,00	56	-	0,79	4,00
241η	170	155	32,5	6	53	32,50	53	-	2,32	3,79
242η	170	155	32,5	13	57	32,50	57	-	2,32	4,07
243η	170	155	32,5	8	43	32,50	43	-	2,32	3,07
244η	170	155	32,5	3	37	32,50	37	-	2,32	2,64
245η	170	155	32,5	1	22	32,50	22	-	2,32	1,57
246η	37	-	7,4	8	49	7,40	49	-	0,53	3,50
247η	70	-	14	12	53	14,00	53	-	1,00	3,79
248η	170	155	32,5	11	54	32,50	54	-	2,32	3,86
249η	170	155	32,5	8	49	32,50	49	-	2,32	3,50
250η	170	155	32,5	10	50	32,50	50	-	2,32	3,57
251η	170	155	32,5	7	43	32,50	43	-	2,32	3,07
252η	170	155	32,5	11	61	32,50	61	-	2,32	4,36
253η	37	-	7,4	5	42	7,40	42	-	0,53	3,00
254η	70	-	14	4	42	14,00	42	-	1,00	3,00
255η	170	155	32,5	5	31	32,50	31	-	2,32	2,21
256η	170	155	32,5	4	37	32,50	37	-	2,32	2,64
257η	170	155	32,5	4	42	32,50	42	-	2,32	3,00
258η	170	155	32,5	3	46	32,50	46	-	2,32	3,29
259η	170	155	32,5	1	26	32,50	26	-	2,32	1,86
260η	48	-	9,6	5	38	9,60	38	-	0,69	2,71
261η	90	-	18	1	43	18,00	43	-	1,29	3,07
262η	170	155	32,5	2	44	32,50	44	-	2,32	3,14
263η	170	155	32,5	3	44	32,50	44	-	2,32	3,14
264η	170	155	32,5	0	37	32,50	37	-	2,32	2,64
265η	170	155	32,5	0	53	32,50	53	-	2,32	3,79
266η	170	155	32,5	7	40	32,50	40	-	2,32	2,86
267η	37	-	7,4	5	38	7,40	38	-	0,53	2,71
268η	70	-	14	1	8	14,00	8	-	1,00	0,57
269η	170	155	32,5	3	27	32,50	27	-	2,32	1,93
270η	170	155	32,5	6	34	32,50	34	-	2,32	2,43
271η	170	155	32,5	9	41	32,50	41	-	2,32	2,93
272η	170	155	32,5	8	35	32,50	35	-	2,32	2,50
273η	170	155	32,5	6	49	32,50	49	-	2,32	3,50
274η	37	-	7,4	1	47	7,40	47	-	0,53	3,36
275η	70	-	14	2	38	14,00	38	-	1,00	2,71
276η	140	-	28	2	43	28,00	43	-	2,00	3,07
277η	170	155	32,5	0	12	32,50	12	-	2,32	0,86
278η	170	155	32,5	0	22	32,50	22	-	2,32	1,57
279η	170	155	32,5	0	18	32,50	18	-	2,32	1,29
280η	170	155	32,5	1	19	32,50	19	-	2,32	1,36
281η	38	-	7,6	0	19	7,60	19	-	0,54	1,36
282η	70	-	14	0	27	14,00	27	-	1,00	1,93
283η	170	155	32,5	0	20	32,50	20	-	2,32	1,43
284η	140	155	29,5	2	28	29,50	28	-	2,11	2,00
285η	170	155	32,5	3	33	32,50	33	-	2,32	2,36
286η	170	155	32,5	2	38	32,50	38	-	2,32	2,71
287η	170	155	32,5	3	24	32,50	24	-	2,32	1,71
288η	40	-	8	1	31	8,00	31	-	0,57	2,21
289η	70	-	14	1	26	14,00	26	-	1,00	1,86
290η	170	155	32,5	0	13	32,50	13	-	2,32	0,93
291η	170	155	32,5	0	6	32,50	6	-	2,32	0,43
292η	140	155	29,5	0	6	29,50	6	-	2,11	0,43
293η	170	155	32,5	0	8	32,50	8	-	2,32	0,57
294η	170	155	32,5	0	17	32,50	17	-	2,32	1,21
295η	40	-	8	0	14	8,00	14	-	0,57	1,00
296η	70	-	14	0	12	14,00	12	-	1,00	0,86
297η	170	155	32,5	0	1	32,50	1	-	2,32	0,07
298η	170	155	32,5	0	5	32,50	5	-	2,32	0,36
299η	170	155	32,5	0	4	32,50	4	-	2,32	0,29
300η	140	155	29,5	0	4	29,50	4	-	2,11	0,29
301η	170	155	32,5	0	7	32,50	7	-	2,32	0,50
302η	37	-	7,4	0	6	7,40	6	-	0,53	0,43
303η	80	-	16	0	5	16,00	5	-	1,14	0,36
304η	200	180	38	0	7	38,00	7	-	2,71	0,50
305η	200	180	38	0	8	38,00	8	-	2,71	0,57
306η	200	180	38	0	3	38,00	3	-	2,71	0,21
307η	200	180	38	0	6	38,00	6	-	2,71	0,43
308η	200	180	38	6	12	38,00	12	-	2,71	0,86
309η	37	-	7,4	0	47	7,40	47	-	0,53	3,36
310η	80	-	16	0	48	16,00	48	-	1,14	3,43
311η	200	180	38	0	8	38,00	8	-	2,71	0,57
312η	200	180	38	0	1	38,00	1	-	2,71	0,07
313η	200	180	38	0	4	38,00	4	-	2,71	0,29
314η	200	180	38	0	6	38,00	6	-	2,71	0,43
315η	200	180	38	0	2	38,00	2	-	2,71	0,14
316η	37	-	7,4	0	5	7,40	5	-	0,53	0,36
317η	80	-	16	0	4	16,00	4	-	1,14	0,29
318η	200	180	38	0	3	38,00	3	-	2,71	0,21

Απαίτηση Ισχύος Διαμερίσματος

319η	200	180	38	-1	3	38,33	3	0,02	2,74	0,21
320η	200	180	38	0	4	38,00	4	-	2,71	0,29
321η	200	180	38	-6	4	40,00	4	0,14	2,86	0,29
322η	200	180	38	0	13	38,00	13	-	2,71	0,93
323η	38	-	7,6	0	4	7,60	4	-	0,54	0,29
324η	80	-	16	0	1	16,00	1	-	1,14	0,07
325η	200	180	38	0	2	38,00	2	-	2,71	0,14
326η	200	180	38	-2	2	38,67	2	0,05	2,76	0,14
327η	200	180	38	-3	2	39,00	2	0,07	2,79	0,14
328η	200	180	38	-2	3	38,67	3	0,05	2,76	0,21
329η	200	180	38	0	4	38,00	4	-	2,71	0,29
330η	38	-	7,6	-3	13	8,60	13	0,07	0,61	0,93
331η	80	-	16	-2	17	16,67	17	0,05	1,19	1,21
332η	200	180	38	-5	0	39,67	0	0,12	2,83	-
333η	200	180	38	-10	0	41,33	0	0,24	2,95	-
334η	200	180	38	-30	-3	48,00	0	0,71	3,43	-
335η	200	180	38	-18	2	44,00	2	0,43	3,14	0,14
336η	200	180	38	-18	2	44,00	2	0,43	3,14	0,14
337η	62	-	12,4	-14	4	17,07	4	0,33	1,22	0,29
338η	80	-	16	-19	4	22,33	4	0,45	1,60	0,29
339η	200	180	38	-6	4	40,00	4	0,14	2,86	0,29
340η	200	180	38	-6	6	40,00	6	0,14	2,86	0,43
341η	200	180	38	-13	6	42,33	6	0,31	3,02	0,43
342η	200	180	38	-2	7	38,67	7	0,05	2,76	0,50
343η	200	180	38	-5	5	39,67	5	0,12	2,83	0,36
344η	37	-	7,4	-24	0	15,40	0	0,57	1,10	-
345η	80	-	16	-30	0	26,00	0	0,71	1,86	-
346η	200	180	38	-19	0	44,33	0	0,45	3,17	-
347η	200	180	38	-3	-3	39,00	0	0,07	2,79	-
348η	200	180	38	-27	0	47,00	0	0,64	3,36	-
349η	200	180	38	-25	0	46,33	0	0,60	3,31	-
350η	200	180	38	-25	0	46,33	0	0,60	3,31	-
351η	37	-	7,4	-32	0	18,07	0	0,76	1,29	-
352η	80	-	16	-16	0	21,33	0	0,38	1,52	-
353η	200	180	38	-22	0	45,33	0	0,52	3,24	-
354η	200	180	38	-20	0	44,67	0	0,48	3,19	-
355η	37	-	7,4	-36	1	19,40	1	0,86	1,39	0,07
356η	200	180	38	-43	-5	52,33	0	1,02	3,74	-
357η	200	180	38	-28	0	47,33	0	0,67	3,38	-
358η	35	-	7	-25	0	15,33	0	0,60	1,10	-
359η	80	-	16	-18	0	22,00	0	0,43	1,57	-
360η	200	180	38	-10	1	41,33	1	0,24	2,95	0,07
361η	200	180	38	-17	1	43,67	1	0,40	3,12	0,07
362η	200	180	38	-32	0	48,67	0	0,76	3,48	-
363η	200	180	38	-27	-2	47,00	0	0,64	3,36	-
364η	200	180	38	-21	-2	45,00	0	0,50	3,21	-
365η	200	180	38	-15	0	43,00	0	0,36	3,07	-
								max electrical load	max thermal load	
								3,79	5,50	
								min electrical load	min thermal load	
								0,29	-	
								17.921,09	12.380,57	

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Β'

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

- $P_{el(οικίας)}$: απαίτηση..ηλεκτρικής..ισχύος
 $Q_{th(οικίας)}$: απαίτηση..θερμικής..ισχύος
 $N_{MEK_{el}}$: ηλεκτρικός..βαθμός..απόδοσης..MEK
 $N_{MEK_{th}}$: θερμικός..βαθμός..απόδοσης..MEK
 $N_{MEK_{tot}}$: ηλεκτρικός..βαθμός..απόδοσης..MEK
 $N_{SOFC_{el}}$: ολικός..ενεργειακός..βαθμός..απόδοσης..MEK
 $N_{SOFC_{th}}$: ηλεκτρικός..βαθμός..απόδοσης..SOFC
 $N_{SOFC_{tot}}$: θερμικός..βαθμός..απόδοσης..SOFC
 $N_{SOFC_{tot}}$: ολικός..ενεργειακός..βαθμός..απόδοσης..SOFC
 N_B : ολικός..ενεργειακός..βαθμός..απόδοσης..συμβατικού..λέβητα..Φ.Α
 $Q_{MEK_{th}}$: θερμική..απόδοση..ισχύος..MEK
 $P_{MEK_{el}}$: ηλεκτρική..απόδοση..ισχύος..MEK
 $Q_{SOFC_{th}}$: θερμική..απόδοση..ισχύος..SOFC
 $P_{SOFC_{el}}$: ηλεκτρική..απόδοση..ισχύος..SOFC
 PHR_{MEK} : λόγος..ηλεκτρισμού / θερμότητα..MEK
 PHR_{SOFC} : λόγος..ηλεκτρισμού / θερμότητα..SOFC
 $E_{el(MEK)}$: παραγόμενη..ηλεκτρική..ενέργεια..MEK
 $W_{th(MEK)}$: παραγόμενη..θερμότητα..MEK
 $E_{el(SOFC)}$: παραγόμενη..ηλεκτρική..ενέργεια..SOFC
 $W_{th(SOFC)}$: παραγόμενη..θερμότητα..MEK
 $E_{el(ΔΕΗ)}$: παραγόμενη..ηλεκτρική..ενέργεια..από..ΔΕΗ
 $W_{th(S.B)}$: παραγόμενη..θερμότητα..συμπληρωματικού..λέβητα
 $W_{th(B)}$: παραγόμενη..θερμότητα..λέβητα..συμβατικού..συστήματος
 $W_{th(rejected, MEK)}$: απορριπτόμενη..θερμότητα..MEK
 $W_{th(rejected, SOFC)}$: απορριπτόμενη..θερμότητα..SOFC
 $E_{el(excess, MEK)}$: περίσσεια..ηλεκτρικής..ενέργειας..MEK
 $E_{el(excess, SOFC)}$: περίσσεια..ηλεκτρικής..ενέργειας..SOFC
 $E_{el(useful, MEK)}$: ωφέλιμη..ηλεκτρική..ενέργεια..MEK
 $E_{el(useful, SOFC)}$: ωφέλιμη..ηλεκτρική..ενέργεια..SOFC
 $W_{th(useful, MEK)}$: ωφέλιμη..θερμική..ενέργεια..MEK
 $W_{th(useful, SOFC)}$: ωφέλιμη..θερμική..ενέργεια..SOFC

$EC_{(MEK)}$: ενέργεια..που..καταναλώνεται..από..MEK
 $EC_{(SOFC)}$: ενέργεια..που..καταναλώνεται..από..SOFC
 $EC_{(\Delta E H)}$: ενέργεια..που..καταναλώνεται..από..ΔΕΗ
 $EC_{(S.B)}$: ενέργεια..που..καταναλώνεται..από..συμπληρωματικό..λέβητα
 $EC_{(B)}$: ενέργεια..που..καταναλώνεται..από..λέβητα..συμβατικού..συστήματος
 $m_{f(MEK)}$: παροχή..Φ.Α..από..MEK
 $m_{f(SOFC)}$: παροχή..Φ.Α..από..SOFC
 $m_{f(\Delta E H)}$: παροχή..Φ.Α..από..ΔΕΗ
 $m_{f(B)}$: παροχή..Φ.Α..από..λέβητα..συμβατικού..συστήματος
 H_u : κατώτερη..θερμογόνος..ικανότητα..Φ.Α..
 $m_{CO_2(MEK)}$: μάζα..εκπεμπόμενου..CO₂..από..MEK
 $m_{CO_2(SOFC)}$: μάζα..εκπεμπόμενου..CO₂..από..SOFC
 $m_{CO_2(\Delta E H)}$: μάζα..εκπεμπόμενου..CO₂..από..ΔΕΗ
 $m_{CO_2(S.B)}$: μάζα..εκπεμπόμενου..CO₂..από..συμπληρωματικό..λέβητα
 $m_{CO_2(B)}$: μάζα..εκπεμπόμενου..CO₂..από..λέβητα..συμβατικού..συστήματος
 $m_{CO_2(GasTurbines)}$: μάζα..εκπεμπόμενου..CO₂..λόγω..κίνησης..συμπιεστών
 μ_{CO_2} : μάζα..εκπεμπόμενου..CO₂..ανά..μονάδα..μάζας..Φ.Α..(kgCO₂ / kgΦ.Α)
 $m_{CH_4(transmission)}$: διαρροές..CH₄..λόγω..μεταφοράς
 $\Delta m_{CO_2(SOFC)}$: μείωση..εκπομπών..CO₂..λόγω..συμπαραγωγής..από..SOFC