



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

‘Τριπαραγωγή Ενέργειας Μικρο-Κλίμακας’

της Γεωργίας Πέτρου

Επιβλέπων: Ειρήνη Κορωνάκη, Επίκουρη Καθηγήτρια
Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2015

Πρόλογος

Στην παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζονται τα συστήματα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας και τα βασικότερα υποσυστήματα αυτών. Παρουσιάζονται οι κινητήριες μηχανές και οι θερμοκίνητοι ψύκτες, οι δυνατοί τρόποι λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος, οι διάφορες παράμετροι που σχετίζονται με αναλύσεις ενέργειας και εξέργεια και γίνεται αναφορά στα πειραματικά συστήματα που έχουν μελετηθεί ή/και κατασκευαστεί. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που μπορούν να συμπεριληφθούν, οδηγώντας στα λεγόμενα υβριδικά συστήματα. Και εδώ καταγράφονται τα πειραματικά υβριδικά συστήματα που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Τέλος, συγκροτείται ένα υποτυπώδες σύστημα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας για την περίπτωση μονοκατοικίας και συγκρίνονται τα υποσυστήματα του.

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια μου, κα. Κορωνάκη Ειρήνη, για την καθοδήγηση και κατανόηση της κατά την διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής, όπως και τον Στράτο Παπουτσή για την πολύτιμη βοήθεια στην ανάπτυξη του υπολογιστικού κώδικα.

Ακόμη, ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την υποστήριξη που παρέχει όλα αυτά τα χρόνια και στους φίλους μου που είναι πάντα δίπλα μου και συνεχίζουν, με τις επιλογές τους, να αποτελούν πρότυπα.

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανασκόπηση των τριπαραγωγών συστημάτων μικρο-κλίμακας και των συνιστωσών τους, καθώς και η διάρθρωση ενός υποτυπώδους τέτοιου συστήματος για την περίπτωση αυτόνομης μονοκατοικίας.

Στο *πρώτο κεφάλαιο* διευκρινίζεται ο όρος τριπαραγωγή ενέργειας μικρο-κλίμακας, αναλύονται γενικά χαρακτηριστικά περί της αρχιτεκτονικής τέτοιων συστημάτων και δίνονται στοιχεία περί της κατάστασης που επικρατεί σήμερα στην αγορά. Στο *δεύτερο κεφάλαιο* παρουσιάζεται αναλυτικά η βασικότερη συνιστώσα των τριπαραγωγών συστημάτων, δηλαδή οι μονάδες παραγωγής ισχύος, αναφερόμενες και ως κινητήριες μονάδες. Στο *τρίτο κεφάλαιο* παρουσιάζονται οι θερμοκίνητες μονάδες παραγωγής ψύξης που υπάρχουν, μαζί με τα κύρια χαρακτηριστικά τους. Αναφέρονται επιγραμματικά και οι σημερινές τάσεις στα συστήματα αυτά. Στο *τέταρτο κεφάλαιο* δίνονται οι τρόποι με τους οποίους είναι δυνατόν να λειτουργεί ένα τριπαραγωγό σύστημα. Στο *πέμπτο κεφάλαιο* επεξηγούνται οι διάφορες σκοπιές ανάλυσης που γίνονται για την διαστασιολόγηση της κινητήριας μονάδας και το καθορισμό της ποιότητας του συστήματος. Στο *έκτο κεφάλαιο* γίνεται καταγραφή των πειραματικών συστημάτων τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Στο *έβδομο κεφάλαιο* αναφέρονται οι βασικές ανανεώσιμες πηγές που μπορούν να συμπεριληφθούν σε συστήματα τριπαραγωγής και στο *όγδοο κεφάλαιο* καταγράφονται τα πειραματικά υβριδικά συστήματα που υπάρχουν στην βιβλιογραφία. Στο *ένατο κεφάλαιο* γίνεται η διάρθρωση ενός υποτυπώδους συστήματος για την κάλυψη αναγκών μονοκατοικίας και τα διάφορα υποσυστήματα συγκρίνονται μεταξύ τους. Τέλος, στο *δέκατο κεφάλαιο* παρατίθενται τα συμπεράσματα.

Abstract

The aim of this thesis is to review the micro-scale trigeneration systems, their components, and the structure of such a rudimentary system for the case study of an independent house.

The first chapter clarifies the term micro-scale trigeneration, analyzes general characteristics on the architecture of such systems and gives information on the current market state. In the second chapter, the most important component of trigeneration systems is elaborated, i.e. power generators, also referred as prime movers. The third chapter presents the thermally driven chillers, along with their main characteristics. The current trends in these systems are also outlined. In the fourth chapter are given the ways in which it is possible to operate a trigeneration system. The fifth chapter explains the various perspectives of analysis made for sizing the prime mover and the determination of the quality of the system. The sixth chapter records the experimental micro-trigeneration systems that show up in the literature. The seventh chapter sets out the key renewable energy sources that can be included in trigeneration systems and in the eighth chapter, the experimental hybrid systems that exist in the literature are outlined. The ninth chapter presents the structure of a rudimentary system to cover house needs and the various subsystems are compared. Finally, the tenth chapter cites the conclusions.

Περιεχόμενα

Πρόλογος	i
Περίληψη.....	ii
Abstract	iii
Κατάλογος Πινάκων, Εικόνων, Σχημάτων και Διαγραμμάτων	vi
1. Εισαγωγή	8
2. Μονάδες παραγωγής ισχύος.....	13
2.1. Μηχανές εσωτερικής καύσης	14
2.2. Μηχανές εξωτερικής καύσης.....	15
2.3. Μικρο-τουρμπίνες.....	15
2.4. Κυψέλες καυσίμου	16
3. Μονάδες παραγωγής ψύξης.....	18
3.1. Συστήματα απορρόφησης.....	19
3.1.1. <i>LiBr/νερό</i>	21
3.1.2. <i>Νερό/NH₃</i>	22
3.1.3. <i>Νερό/LiCl</i>	22
3.2. Συστήματα προσρόφησης.....	23
3.2.1. <i>Silica gel</i>	24
3.2.2. <i>Ζεόλιθος</i>	25
3.2.3. <i>Άνθρακας</i>	25
3.3. Συστήματα αφύγρανσης	26
3.3.1. <i>Συστήματα αφύγρανσης με υγρά αφυγραντικά υλικά</i>	27
3.3.2. <i>Συστήματα αφύγρανσης με στέρεα αφυγραντικά υλικά</i>	28
3.4. Συστήματα χημειορρόφησης	28
3.5. Συστήματα εγχυτήρα ατμού	29
3.6. Σημερινές τάσεις.....	30
4. Τρόποι και Στρατηγικές λειτουργίας.....	31
5. Ανάλυση των 3-E και Εξεργειακή Ανάλυση	34
5.1. Ανάλυση των 3-E	34
5.2. Εξεργειακή ανάλυση	35
5.3. Πολύ-κριτηριακή ανάλυση.....	38
6. Πειραματικά συστήματα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας	40
7. Συστήματα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας.....	43
7.1. Γενικά περί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	43

7.2.	Φωτοβολταϊκά	44
7.3.	Θερμικά ηλιακά συστήματα	45
7.4.	Βιομάζα-Βιοκαύσιμα	46
8.	Πειραματικά συστήματα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας με ΑΠΕ	48
9.	Μελέτη Περίπτωσης: Διάρθρωση υποτυπώδους συστήματος	50
9.1.	Αντικείμενο μελέτης	55
9.2.	Κινητήριες μηχανές	56
9.3.	Θερμοκίνητοι ψύκτες	57
9.4.	Λοιπός εξοπλισμός	58
9.5.	Σύγκριση πιθανών συνδυασμών υποσυστημάτων	59
9.5.1.	Σύγκριση των μηχανών <i>Stirling</i>	59
9.5.2.	Σύγκριση των μηχανών εσωτερικής καύσης	62
9.6.	Αξιολόγηση αποτελεσμάτων	65
9.6.1.	Μηχανές <i>Stirling</i>	66
9.6.2.	Μηχανές εσωτερικής καύσης	66
9.7.	Προτάσεις / Βελτιώσεις	67
10.	Συμπεράσματα	70
	Βιβλιογραφικές Αναφορές	71

Κατάλογος Πινάκων, Εικόνων, Σχημάτων και Διαγραμμάτων

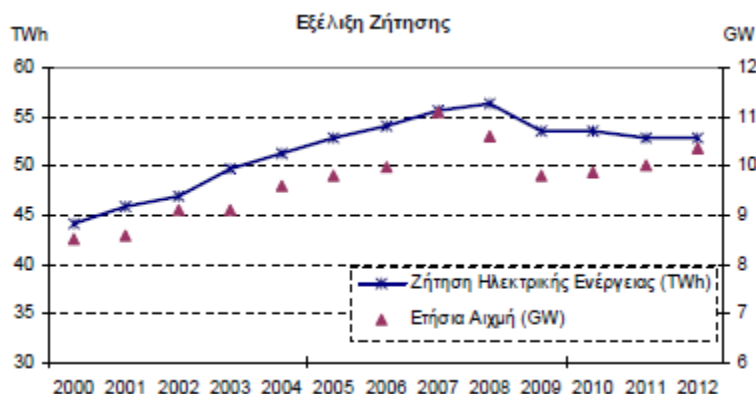
Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά κινητήριων μονάδων συστημάτων τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας.....	13
Πίνακας 2: Θερμοκρασίες απορριπτόμενης θερμότητας και κατάλληλες θερμοκίνητες τεχνολογίες.....	18
Πίνακας 3: Μερικά από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στην Ανάλυση 3-Ε και στην Εξεργειακή Ανάλυση.....	36
Πίνακας 4: Μελέτες που έχουν ασχοληθεί με αναλύσεις συστημάτων τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας ή/και ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων.....	38
Πίνακας 5: Συγγραφείς που μελέτησαν ή/και κατασκεύασαν πειραματικές διατάξεις.....	41
Πίνακας 6: Κυριότερες τεχνολογίες μετατροπής για συστήματα τροφοδοτούμενα με βιομάζα.....	47
Πίνακας 7: Συγγραφείς που μελέτησαν ή/και κατασκεύασαν πειραματικές διατάξεις με ΑΠΕ.....	48
Πίνακας 8: Μελέτες που έχουν ασχοληθεί με αναλύσεις συστημάτων τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας με ΑΠΕ ή/και ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων.....	49
Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά των προς σύγκριση κινητήριων μηχανών.....	57
Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά των προς σύγκριση θερμοκίνητων ψυκτών.....	58
Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά λοιπών στοιχείων διάταξης.....	59
Πίνακας 12: Μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση μικρο-τριπαραγωγού συστήματος σε κατοικία.....	68
Εικόνα 1: Εξέλιξη της συνολικής καθαρής ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας (συμπεριλαμβανομένης και της διεσπαρμένης παραγωγής) για την Ελλάδα κατά την περίοδο 2000-2012 (Πηγή: ΑΔΜΗΕ).....	8
Εικόνα 2: Ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.....	9
Εικόνα 3: Βασικός κύκλος συστήματος αφύγρανσης.....	27
Εικόνα 4: Βασικός κύκλος συστήματος εγχυτήρα.....	29
Εικόνα 5: Οι προς σύγκριση κινητήριες μηχανές.....	56
Εικόνα 6: (α) Ψύκτης Απορρόφησης , (b) Ψύκτης Προσρόφησης.....	57
Εικόνα 7: (α) Αερόψυκτος Ψύκτης , (b) Ηλεκτρικό Boiler.....	58
Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση τυπικής διάταξης συστήματος τριπαραγωγής.....	10
Σχήμα 2: Βασικός κύκλος απορρόφησης.....	20
Σχήμα 3: Βασικός κύκλος προσρόφησης.....	23
Σχήμα 4: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας.....	51
Σχήμα 6: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας για την πρώτη περίπτωση και δεύτερη περίπτωση.....	52
Σχήμα 7: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας για την τρίτη περίπτωση.....	52
Σχήμα 8: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας για την τέταρτη περίπτωση.....	53
Σχήμα 9: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας για την πέμπτη περίπτωση.....	54
Σχήμα 10: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας για την έκτη περίπτωση.....	54
Σχήμα 11: Σχέδιο της μονοκατοικίας που μελετάται για την τοποθέτηση συστήματος τριπαραγωγής.....	55

Διάγραμμα 1: Ωριαίες καταναλώσεις για τυπική μέρα χειμώνα και καλοκαιριού	55
Διάγραμμα 2: Σύγκριση των μηχανών Stirling ως προς την εισροή ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα.....	60
Διάγραμμα 3: Σύγκριση των μηχανών Stirling ως προς την εκροή ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα	60
Διάγραμμα 4: Σύγκριση των μηχανών Stirling ως προς την θερμότητα που απορρίπτει το σύστημα και την λειτουργία του boiler	61
Διάγραμμα 5: Σύγκριση των μηχανών Stirling ως προς το αρχικό κόστος εξοπλισμού του συστήματος.....	62
Διάγραμμα 6: Σύγκριση των μηχανών εσωτερικής καύσης ως προς την εισροή ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα.....	63
Διάγραμμα 7: Σύγκριση των μηχανών εσωτερικής καύσης ως προς την εκροή ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα.....	63
Διάγραμμα 8: Σύγκριση των μηχανών εσωτερικής καύσης ως προς την θερμότητα που απορρίπτει το σύστημα και την λειτουργία του boiler	64
Διάγραμμα 9: Σύγκριση των μηχανών εσωτερικής καύσης ως προς το αρχικό κόστος εξοπλισμού του συστήματος.....	65

Κεφάλαιο 1^ο

Εισαγωγή

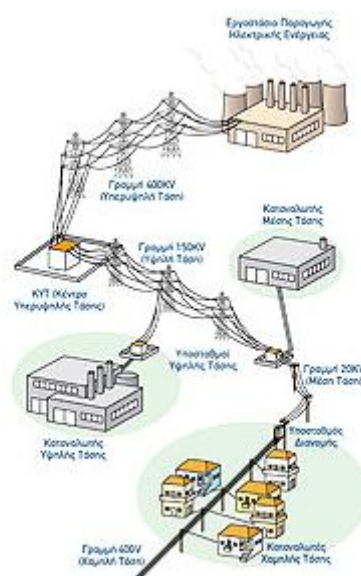
Λόγω της αύξησης της ζήτησης σε ενέργεια, της μείωσης της ποσότητας των συμβατικών καυσίμων αλλά και της συνεχούς τοποθέτησης των επιτρεπτών ορίων ρύπων και ρυπαντών σε χαμηλότερα επίπεδα, προκύπτει η ανάγκη για αναθεώρηση της χρήσης των μέχρι τώρα συστημάτων αξιοποίησης των δεδομένων ενεργειακών πόρων. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει ήδη, από το Δεκέμβριο του 2008, θέσει στα κράτη μέλη της τον τριπλό ενεργειακό στόχο '20-20-20', δηλαδή 20% μείωση στις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, 20% αύξηση του ποσοστού ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για την κάλυψη των αναγκών της Ευρώπης και 20% περισσότερη αποτελεσματικότητα στην χρήση ενέργειας σε όλη την ΕΕ έως το 2020. Για το λόγο αυτό, σε ευρωπαϊκό αλλά και παγκόσμιο επίπεδο γίνονται ενέργειες για την μετάβαση από τον παραδοσιακό, συγκεντρωτικό τρόπο παραγωγής ενέργειας με ορυκτά καύσιμα και πυρηνικά συστήματα σε έναν νέο, αποκεντρωμένο τρόπο με χρήση συστημάτων μικρής κλίμακας και ανανεώσιμων πηγών.



Εικόνα 1: Εξέλιξη της συνολικής καθαρής ζήτησης Ηλεκτρικής Ενέργειας (συμπεριλαμβανομένης και της διεσπαρμένης παραγωγής) για την Ελλάδα κατά την περίοδο 2000-2012 (Πηγή: ΑΔΜΗΕ)

Ακόμα και τώρα, σε κάθε εφαρμογή είτε πρόκειται για κτήριο γραφείων είτε για βιομηχανία οι ανάγκες σε ενέργεια καλύπτονται με παρόμοιους τρόπους. Αναλυτικά, ρεύμα εισάγεται από το δίκτυο για την κάλυψη των ηλεκτρικών αναγκών, οι ανάγκες σε θέρμανση και ζεστό νερό χρήσης καλύπτονται από συστήματα κεντρικής θέρμανσης (λέβητες πετρελαίου ή φυσικού αερίου) ενώ οι ανάγκες σε κλιματισμό και ψύξη από κλιματιστικές μονάδες (συστήματα κυρίως μηχανικής συμπίεσης ατμού), που όμως για την λειτουργία τους απαιτούν επίσης ηλεκτρικό ρεύμα από το δίκτυο. Το ρεύμα λοιπόν του δικτύου παράγεται στους σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας που βρίσκονται σε διάφορα σημεία της χώρας. Οι σταθμοί αυτοί είναι κυρίως θερμοηλεκτρικού και υδροηλεκτρικοί. Στην Ελλάδα, το κυριότερο καύσιμο είναι ο λιγνίτης. Η ηλεκτρική

ενέργεια μεταφέρεται μέσω γραμμών υψηλής τάσης και διανέμεται στους τελικούς χρήστες με γραμμές χαμηλής τάσης. Κατά την διαδικασία αυτή περίπου το 65% της αρχικής ενέργειας του καυσίμου χάνεται λόγω της θερμότητας που απελευθερώνεται κατά την διαδικασία παραγωγής της ενέργειας, αλλά και λόγω των απωλειών μεταφοράς και διανομής (Allen, et al., 2008). Εφόσον οι απώλειες μπορούν να μειωθούν μέχρι ενός ορίου, γίνεται προσπάθεια εκμετάλλευσης της απορριπτόμενης θερμότητας. Σε εργοστάσια και βιομηχανικές εφαρμογές μεγάλης δυναμικότητας είναι ήδη δοκιμασμένη τεχνολογία τα συστήματα συμπαραγωγής ισχύος και θέρμανσης, με πλεονεκτήματα σε τεχνικό, οικονομικό και περιβαλλοντικό επίπεδο. Όμως παρουσιάζουν το μειονέκτημα της δραματικής μείωσης της απόδοσης σε θερμά και εύκρατα κλίματα με καλοκαίρια μεγάλης διάρκειας όπου η ζήτηση για ψύξη είναι μεγαλύτερη αυτής για θέρμανση (Jradi, et al., 2014). Έτσι, ως εξέλιξη αυτών έχουν αναπτυχθεί, σχετικά πρόσφατα, συστήματα τριπαραγωγής. Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής, θερμικής και ψυκτικής ισχύος από μία μόνο πηγή ενέργειας, με χρήση κατάλληλων τεχνολογιών και μέσω ανακόμισης της θερμότητας που πάντα δημιουργείται κατά την παραγωγή ηλεκτρισμού και που μέχρι σήμερα απορριπτόταν στο περιβάλλον.



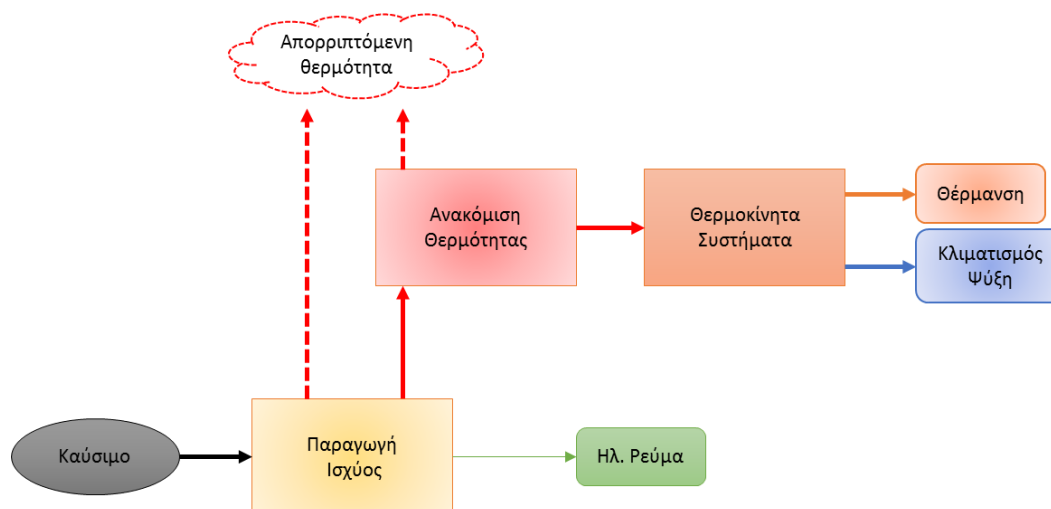
Εικόνα 2: Ελληνικό σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Στον αντίποδα, τα λεγόμενα «Έξυπνα Δίκτυα» (Smart Grids), μπορούν να ενσωματώσουν με έξυπνο τρόπο τη συμπεριφορά και τις ενέργειες όλων των χρηστών που συνδέονται σε αυτά (παραγωγούς, καταναλωτές και αυτούς που κάνουν και τα δύο), για την επίτευξη αποτελεσματικού, βιώσιμου, οικονομικού και ασφαλούς εφοδιασμού ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτό συνεπάγεται ότι καλύπτουν ολόκληρη την ‘αλυσίδα’ ηλεκτρισμού από την παραγωγή έως την κατανάλωση, με αμφίδρομες ροές τόσο της ενέργειας (εισαγωγές και εξαγωγές ενέργειας, εύκολη πρόσβαση στο δίκτυο) όσο και πληροφοριών (σε πραγματικό χρόνο αλληλεπιδράσεις με την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας). Ένας από τους κύριους τρόπους εξάπλωσης των «Έξυπνων

Δικτύων» είναι η εγκατάσταση σε μεγάλη κλίμακα αποκεντρωμένων συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής ενέργειας από οικιακούς καταναλωτές και μικρομεσαίες επιχειρήσεις. Στα αποκεντρωμένα συστήματα, η παραγωγή ενέργειας (μικρότερης δυναμικότητας σε σχέση με τα προαναφερθέντα) γίνεται κοντά στον τελικό χρήστη με τη χρήση ηλεκτροκίνητων μονάδων ή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και με την κάλυψη της ζήτησης να συμπληρώνει η απευθείας αγορά ηλεκτρικού ρεύματος από το δίκτυο ή η λειτουργία παράλληλα άλλων μονάδων παραγωγής ισχύος (π.χ. μηχανές εσωτερικής καύσης) και θέρμανσης (π.χ. καύση καυσίμου σε μπόιλερ).

Σήμερα, μελετώνται ολοκληρωμένα συστήματα ενέργειας που συνδυάζουν τεχνολογικά εξελιγμένες μονάδες παραγωγής ισχύος (επιτόπια ή διανεμημένα συστήματα) με θερμοκίνητες τεχνολογίες, προκειμένου να καλυφθούν ανάγκες εμπορικές, οικιακές, αυτοκινήτων και μικρών τμημάτων βιομηχανίας, με χρήση ορυκτών καυσίμων ή ορισμένων κατάλληλων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (βιομάζα, βιοαέριο, ηλιακή ενέργεια κ.ά.). Η δυναμικότητα (σε ηλεκτρική ενέργεια) των συγκεντρωτικών συστημάτων συνήθως ξεπερνά το 1 MW, ενώ των αποκεντρωμένων συστημάτων κυμαίνεται από 1kW έως 50MW, με τα πρώτα να καλύπτουν οικιακές ανάγκες και να τελευταία να συναντώνται κυρίως σε νοσοκομεία, πανεπιστήμια κ.τ.λ. Δεν υπάρχει κάποιο σαφές όριο μεταξύ μεγάλων ή μικρών συστημάτων, επομένως χονδρικά καθορίζονται μικρής κλίμακας τα κάτω του 1MW, μίνι κλίμακας τα κάτω των 500 kW και μικρο-κλίμακας κάτω των 15-20 kW ή και κάτω των 30 ή 50 kW (σπανιότερα) (Wu, et al., 2006). Εξαιρέση αποτελούν οι ΗΠΑ, που θέτουν το πάνω όριο των συστημάτων μικρο-κλίμακας στα 5 kW (Aprile, et al., 2009).

Η αρχιτεκτονική ενός συστήματος τριπαραγωγής εξαρτάται από το μέγεθος του ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου, εάν αυτά μπορούν να συνδυαστούν ή όχι και από τον τρόπο λειτουργίας. Τα κύρια μέρη κάθε συστήματος ανεξάρτητα από το μέγεθος του, είναι η μονάδα παραγωγής ισχύος (κινητήρια μονάδα), η μονάδα ανακόμισης θερμότητας, οι θερμοκίνητες μονάδες παραγωγής θέρμανσης και ψύξης και τα συστήματα ελέγχου/διαχείρισης.



Σχήμα 1: Σχηματική απεικόνιση τυπικής διάταξης συστήματος τριπαραγωγής

Πρέπει να επισημανθεί ότι παραγωγή ψύξης σε τριπαραγωγά συστήματα μπορεί να επιτευχθεί και από ηλεκτροκίνητες ψυκτικές μονάδες, περίπτωση που δεν ενδιαφέρει εδώ. Ανάλογα με την δυναμικότητα που είναι επιθυμητό να επιτυγχάνει το τελικό σύστημα, επιλέγεται η κατάλληλη κινητήρια μονάδα αρχικά και δευτερευόντως η θερμοκίνητη μονάδα που αποδίδει καλύτερα στον εύρος θερμοκρασιών τις απορριπτόμενης θερμότητας της. Στα συστήματα μικρο-κλίμακας έχουν μέχρι στιγμής εισαχθεί μόνο θερμοκίνητα ψυκτικά συστήματα, ενώ η θέρμανση γίνεται απευθείας από την ανακόμιση με εναλλάκτες και αντλίες θερμότητας. Τα θερμοκίνητα συστήματα θέρμανσης σε αυτήν τη περίπτωση θεωρούνται αντιοικονομικά. Με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου συστήματος, οι χρησιμοποιούμενες μονάδες παρουσιάζονται παρακάτω αναλυτικά. Ωστόσο, εκτός του ολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος, για την εξεύρεση του καλύτερου συνδυασμού μεταξύ των υποσυστημάτων πρέπει να λαμβάνεται υπόψιν και το προφίλ του τελικού χρήστη (d'Accadia, et al., 2003).

Ειδικά τα συστήματα μικρο-κλίμακας έχουν συγκεντρώσει το ενδιαφέρον παγκοσμίως, με πληθώρα μελετών έρευνας και ανάπτυξης να προσανατολίζονται σε αυτά. Στην εξέλιξη τους συντέλεσε η διαθεσιμότητα των θερμοκίνητων μονάδων παραγωγής ψύξης σε μικρότερο μέγεθος και η αυξημένη ζήτηση σε κλιματισμό και ψύξη κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, εξαιτίας των υψηλότερων θερμικών φορτίων και των υψηλότερων απαιτήσεων θερμικής άνεσης (Angrisani, et al., 2013), (Sonar, et al., 2014). Πρέπει να γίνει σαφές ότι το σύστημα μπορεί να δουλεύει σε μερικά φορτία και να πουλά ή να αποθηκεύει την επιπλέον ενέργεια, σε μπαταρίες ή πυκνωτές, εάν το πλεόνασμα είναι ηλεκτρικό ρεύμα και σε συσκευές θερμικής αποθήκευσης ή υλικά αλλαγής φάσης, εάν είναι θερμότητα. Προκύπτει επομένως ως βασικότερο πλεονέκτημα, η χρήση μιας μόνο αρχικής πηγής ενέργειας, τη στιγμή που απαιτείται και με πάνω από το 80% αυτής να μετατρέπεται σε χρήσιμη ενέργεια, οδηγώντας σε μια μείωση της κατανάλωσης κατά 40% σε οικιακές εφαρμογές. Συνεπώς, γίνεται καλύτερη αξιοποίηση του καυσίμου και αυξάνεται ο βαθμός απόδοσης του όλου συστήματος, μειώνεται η ποσότητα του αρχικού καυσίμου σε σχέση με την περίπτωση της μεμονωμένης παραγωγής, και συνακόλουθα μειώνονται και οι εκπομπές ρύπων και ρυπαντών, όπως αυτές των αερίων του θερμοκηπίου. Με τα συστήματα κοντά στον τελικό χρήστη, μειώνονται σημαντικά οι απώλειες μεταφοράς, το κόστος λειτουργίας ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η αξιοπιστία του δικτύου. Ακόμα, το αρχικό κόστος αποσβένεται γρηγορότερα (περίοδος αποπληρωμής κατά μέσο όρο 2.97 χρόνια) λόγω των πολλών ωρών λειτουργίας ετησίως του συστήματος, ενώ η δυνατότητα λειτουργίας με εναλλακτικά καύσιμα τα κάνει ιδιαίτερα ελκυστικά. Όλα τα παραπάνω είναι αυτά που αντισταθμίζουν την αρνητική επιρροή του μικρού μεγέθους στην απόδοση, του υψηλού αρχικού κόστους και της συγκέντρωσης των ρυπαντών κοντά στο τελικό χρήστη, όπου και τα επιτρεπτά όρια είναι χαμηλότερα (Angrisani, et al., 2012), (Borga, et al., 2013), (Angrisani, et al., 2013), (Sonar, et al., 2014), (Mingxi, et al., 2014).

Λόγω της πρόσφατης εξέλιξης τους, τα ήδη λειτουργούντα συστήματα είναι περιορισμένα σε αριθμό. Στην Γερμανία υπάρχουν εγκατεστημένες κάποιες εκατοντάδες μονάδες σε μικρά εμπορικά κτήρια και σε κατοικίες, και ακολουθούν η Αγγλία, η Τσεχία και η Πορτογαλία. Για την εξάπλωση τους, από τεχνολογικής πλευράς είναι αναγκαίο να χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος και ευκολία χρήσης (d'Accadia, et al., 2003). Με την τεχνολογική πρόοδο προς αυτή την κατεύθυνση και

τις 'πράσινες' πολιτικές που υιοθετούνται παγκοσμίως, η είσοδος στην παγκόσμια αγορά αναμένεται δυναμική (Aprile, et al., 2009).

Κεφάλαιο 2^ο

Μονάδες παραγωγής ισχύος

Τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν την απόδοση ενός συνδυαστικού συστήματος είναι η ολική απόδοση, η ηλεκτρική απόδοση, η ισχύς, ο λόγος ισχύος προς θερμότητα και ο χρόνος εκκίνησης. Η συνολική απόδοση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία, οι τύποι των καυσίμων, το σημείο λειτουργίας, το μέγεθος της μονάδας, καθώς και από την δυνητική παραγωγή θερμότητας. Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά είναι στενά συνδεδεμένα με την κινητήρια μηχανή του συστήματος. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι τεχνολογίες συμπαραγωγής και τριπαραγωγής μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με την κινητήρια μηχανή τους.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά κινητήριων μονάδων συστημάτων τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας

	Μηχανές Diesel	Μηχανές Otto	Μικρο-τουρμπίνες	Μηχανές Stirling	Κυψέλες καυσίμου
Εύρος δυναμικότητας (kW)	5-200	3-200	15-300	1-50	2-200
Χρησιμοποιούμενο καύσιμο	Αέριο, προπάνιο, αεριοποιημένα αέρια, βιοαέριο	Αέριο, βιοαέριο, προπάνιο, υγρά καύσιμα	Αέριο, προπάνιο, αεριοποιημένα αέρια, βιοαέριο, αλκοόλες	Οποιοδήποτε	Υδρογόνο, κυψέλες με υδράνθρακες
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης στο πλήρες φορτίο (%)	25-35	23-43	15-30	10-25	37-60
Ολικός βαθμός απόδοσης (%)	69-90	70-92	60-85	70-90	75-90
Θερμοκρασία απόρριψης (°C)	85-100*	85-100*	85-100	60-80	60-80
Κόστος επένδυσης (\$/kW)	800-1.500	800-1.500	900-1.500	1.300-2.000	2.500-3.500
Κόστος συντήρησης και λειτουργίας (\$/kW)	1.2-2.0	1.2-2.0	0.5-1.5	1.5-2.5	1.0-3.0

*Συνήθως θερμοκρασίες από 370-540 °C, απορριπτόμενη θερμότητα χαμηλότερων θερμοκρασιών (ψυκτικό νερό τις 80-95 °C και έλαια ψύξης τις 70 °C) (Wu, et al., 2006), (Badea, 2015)

Ως κινητήριες μονάδες τριπαραγωγής χρησιμοποιούνται μηχανές εσωτερικής καύσης (Otto, Diesel), μηχανές εξωτερικής καύσης (Stirling), κυψέλες καυσίμου (PAFC, PEMFC, SOFC), αεροστρόβιλοι, ατμοστρόβιλοι (κύκλοι Rankine οργανικοί ή μη) και μικρό-τουρμπίνες, καθώς και συνδυασμοί αυτών μεταξύ τους ή με ανανεώσιμες πηγές (ηλιακά, αιολικά, γεωθερμικά συστήματα) (Fahad, et al., 2010). Για την περίπτωση τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας είναι δυνατή η χρήση μηχανών εσωτερικής και εξωτερικής καύσης, μικρο-τουρμπινών και κυψελών καυσίμου. Η

χρήση ατμοστροβίλων και αεριοστροβίλων είναι καταλληλότερη σε μεγαλύτερες κλίμακες, λόγω της μεγάλης δυναμικότητας και μεγέθους αυτών των μονάδων και της χαμηλής απόδοσης τους στα μερικά φορτία (Ebrahimi, et al., 2012). Στον

Πίνακας 1 παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των κινητήριων μονάδων της περίπτωσης που εξετάζεται εδώ.

Όπως είναι φανερό, κάθε μια από τις παραπάνω μονάδες παραγωγής ισχύος παρέχει συγκεκριμένης ενεργειακής στάθμης θερμότητα ως απορριπτόμενη. Συνεπώς, για να είναι επιτυχημένο ένα σύστημα τριπαραγωγής, θα πρέπει να συνδυάζει κατάλληλα κάθε μονάδα παραγωγής ισχύος, με αυτή τη μονάδα παραγωγής ψύξης και θέρμανσης που λειτουργεί αποδοτικότερα με αυτή τη θερμότητα. Ενδεικτικά, αναφέρονται στην βιβλιογραφία κάποιοι βέλτιστοι συνδυασμοί, όπως αεριοστροβίλος ή μικρο-τουρμπίνα ή SOFC με συστήματα απορρόφησης, PAFC με συστήματα απορρόφησης ή αφύγρανσης, PEMFC με συστήματα προσρόφησης ή αφύγρανσης και μηχανές εσωτερικής ή εξωτερικής καύσης με συστήματα απορρόφησης, προσρόφησης ή αφύγρανσης (Deng, et al., 2011). Ακόμη, πρέπει να σημειωθεί ότι οι μονάδες ανακόμισης θερμότητας είναι γενικά σχεδιασμένες για θερμοκρασίες 150^ο-175^ο C, για την αποφυγή διάβρωσης και συμπύκνωσης στους σωλήνες εξάτμισης. Συνεπώς, όταν πρόκειται για ανακόμιση από τα καυσαέρια των κινητήριων μονάδων, δεν αξιοποιείται όλο το ενεργειακό περιεχόμενο τους.

2.1. Μηχανές εσωτερικής καύσης

Υπάρχουν δυο ειδών, οι μηχανές ανάφλεξης με σπινθήρα (Otto), και ανάφλεξης με συμπίεση, όπου το μίγμα καυσίμου-αέρα φέρεται σε υψηλή πίεση πριν από την είσοδο σε κυλίνδρους (Diesel). Οι μηχανές εσωτερικής καύσης θεωρούνται αρκετά ώριμη τεχνολογία, με γρήγορη εκκίνηση, καλή λειτουργία σε μερικό φορτίο, αυξημένη αξιοπιστία, μεγάλη συγκέντρωση ισχύος, μεγάλη διάρκεια ζωής και ικανότητα προσαρμογής στην ζήτηση. Ακόμα, είναι η χαμηλότερου αρχικού κόστους τεχνολογία που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τριπαραγωγή. Κατά κανόνα γίνεται σύζευξη αυτών με γεννήτρια και εναλλάκτες, για την ανακόμιση της θερμότητας των καυσαερίων, του λαδιού και του ψυκτικού. Ενδεικτικά, η θερμότητα από το ψυκτικό μπορεί να παράγει ζεστό νερό 90^ο C, που αντιπροσωπεύει περίπου το 30% της ενέργειας του αρχικού καυσίμου, ενώ η θερμότητα από τα καυσαέρια μπορεί να παράγει ατμό χαμηλής πίεσης και ζεστό νερό 110^ο C. Τελικώς, η θερμότητα ανακόμισης από το ψυκτικό και τα καυσαέρια μπορεί να φτάσει και το 70-80%. Τα μειονεκτήματα τους είναι ο θόρυβος και οι δονήσεις, τα πολλά κινούμενα μέρη που απαιτούν συχνότερη συντήρηση, αυξάνοντας το κόστος λειτουργίας, οι εκπομπές ρύπων λόγω των καυσίμων που χρησιμοποιούν, αλλά κυρίως η αδυναμία πλήρους εκμεταλλεύσεως των θερμοτήτων διαφορετικής ενεργειακής στάθμης που απορρίπτουν από τις θερμοκίνητες μονάδες θέρμανσης/ψύξης. Αυτά τα μειονεκτήματα δεν αποτελούν σημαντικό πρόβλημα στην μικρο-τριπαραγωγή, γι' αυτό και οι μηχανές με αέριο είναι αυτές που επικρατούν στην αγορά, ειδικά σε εφαρμογές που απαιτούν ζεστό νερό ή ατμό χαμηλής πίεσης. Ήδη κατασκευαστές από Γερμανία, Ιαπωνία και Τσεχία έχουν προσανατολίσει την γραμμή παραγωγής στην κατεύθυνση των μηχανών μικρού μεγέθους, ξεκινώντας από 1 kW με

βαθμούς απόδοσης περίπου 85%. Πρέπει να τονιστεί ότι στην επικράτηση τους έχουν συμβάλλει και οι πολιτικές προώθησης του φυσικού κυρίως αερίου, με τους κατασκευαστές να προσφέρουν πλήρη συντήρηση και σημαντικές εκπτώσεις (Gluesenkamp, et al., 2011), (Angrisani, et al., 2012), (Angrisani, et al., 2013), (Sonar, et al., 2014), (Badea, 2015).

2.2. Μηχανές εξωτερικής καύσης

Οι μηχανές εξωτερικής καύσης, γνωστές και ως Stirling, βρίσκονται σε πολύ πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Χρηζουν της προσοχής, καθώς λειτουργούν με οποιοδήποτε καύσιμο, χωρίς θόρυβο και δονήσεις και με ελάχιστα κινούμενα μέρη. Ακόμη, παρουσιάζουν χαμηλές εκπομπές, υψηλό συνολικό βαθμό απόδοσης και καλή απόδοση στα μερικά φορτία. Όμως, το κόστος τους είναι υψηλό, παρουσιάζουν μεγάλο χρόνο εκκίνησης και δυσκολία στον έλεγχο της ισχύος (λόγω της παρουσίας πολλών εναλλακτών και των υψηλών πιέσεων λειτουργίας). Παρ' όλο που δεν έχουν εξαπλωθεί στην αγορά, έχουν τραβήξει το ενδιαφέρον κατασκευαστών, καθώς το μικρό μέγεθος τις κάνει ιδανικές ως κινητήριες μονάδες σε μικρές, οικιακές ή φορητές εφαρμογές. Ήδη στην Ολλανδία και τη Νέα Ζηλανδία έχουν κατασκευαστεί μηχανές μικρής ηλεκτρικής ισχύος της τάξεως των 2 έως 9.5 kW που λειτουργούν με φυσικό αέριο ή υγραέριο, ενώ στην Γερμανία και την Δανία προσανατολίζονται σε μηχανές ηλίου ή βιοαερίου (Aprile, et al., 2009), (Angrisani, et al., 2013).

2.3. Μικρο-τουρμπίνες

Οι μικρο-τουρμπίνες έχουν εμπορευματοποιηθεί σχετικά πρόσφατα και είναι πρακτικά η επέκταση τις τεχνολογίας αεριοστρόβιλων και ατμοστρόβιλων σε μικρότερη κλίμακα. Έχουν ένα μόνο κινούμενο μέρος, συνεπώς χαμηλά επίπεδα θορύβου και απαιτήσεις συντήρησης, οι εκπομπές ρύπων είναι σημαντικά λιγότερες σε σχέση με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ισχύος, ενώ πρόκειται για συμπαγείς, μικρού βάρους μονάδες με γρήγορη απόκριση και μεγάλη διάρκεια ζωής. Όμως το αρχικό κόστος είναι ακόμη υψηλό, ενώ παρουσιάζουν χαμηλό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης και μεγάλη ευαισθησία στις αλλαγές των συνθηκών περιβάλλοντος (θερμοκρασία αέρα, υψόμετρο). Στα θετικά, η απορριπτόμενη θερμότητα των μικρο-τουρμπίνων, που υπολογίζεται περίπου στο 60% της ενέργειας του καυσίμου, μπορεί να παράγει ατμό χαμηλής πίεσης ή ζεστό νερό μιας θερμοκρασίας (σε αντίθεση με το εύρος θερμοκρασιών απόρριψης των μηχανών εσωτερικής καύσης) για απευθείας χρήση σε αποκεντρωμένα συστήματα και η απόδοση τους αρκεί για οικιακές εφαρμογές. Επίσης μπορούν να λειτουργήσουν με διάφορα καύσιμα όπως υδρογόνο, φυσικό αέριο, προπάνιο, ανακυκλωμένα καύσιμα και βιοκαύσιμα. Στην συνδυασμένη παραγωγή χρησιμοποιούνται λόγω της ασφάλειας, της αξιοπιστίας και του εύρους λειτουργίας τους. Οι έρευνες προσανατολίζονται σε μικρο-τουρμπίνες από 1 έως 10 kW, ενώ οι μέχρι τώρα διαθέσιμες είναι περίπου 25 kW (Gluesenkamp, et al., 2011), (Sonar, et al., 2014). Εκτιμάται ότι μια μικρο-τουρμπίνα 3 kW ηλεκτρικών και 15 kW θερμικών αρκεί για να αντικαταστήσει τους λέβητες των μικρών επιχειρήσεων και νοικοκυριών.

2.4. Κυψέλες καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβες, αξιόπιστες, συμπαγείς μονάδες παραγωγής ισχύος, χωρίς κινούμενα μέρη, που παράλληλα με ρεύμα παράγουν και θερμότητα ως παραπροϊόν. Είναι φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες, αφού χρησιμοποιούν κυρίως υδρογόνο και οξυγόνο για την λειτουργία τους, παρουσιάζουν υψηλούς βαθμούς απόδοσης για ποικίλα φορτία, απαιτούν ελάχιστη συντήρηση και το σημαντικότερο, προσφέρουν την δυνατότητα τις μεταφοράς. Υπάρχουν πειραματικά διαφόρων ειδών κυψέλες καυσίμου, αλλά κυρίως οι φωσφορικού οξέος, μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίου και στερεού οξειδίου (PAFC, PEMFC, SOFC) προτιμώνται για τριπαραγωγή μικρο-κλίμακας (Angrisani, et al., 2013). Οι πιο αναπτυγμένες εμπορικά είναι οι PAFC και PEMFC, με 5.000 κυψέλες PEMFC να έχουν εγκατασταθεί το 2009 μόνο στην Ιαπωνία. Όμως και συστήματα άλλων ειδών αρχίζουν να εγκαθίστανται. Οι SOFC, συγκεκριμένα, συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των μηχανών εσωτερικής καύσης και των μικρο-τουρμπίνων, έχοντας υψηλό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης (μεγαλύτερο των μηχανών εσωτερικής καύσης στην μικρο-κλίμακα) και απορρίπτοντας την θερμότητα τους σε ένα ενιαίο ρεύμα καυσαερίων υψηλής θερμοκρασίας (μεγαλύτερη των μικρο-τουρμπίνων) (Gluesenkamp, et al., 2011). Πρέπει να αναφερθεί όμως ότι οι SOFC, παρ' όλο που επιτυγχάνουν υψηλές αποδόσεις, όταν χρησιμοποιούνται για μικρές εφαρμογές μπορεί να παρουσιάσουν αστοχίες στεγανοποίησης όταν υπόκεινται σε μεταβολές θερμοκρασίας ή άλλου είδους. Για το λόγο αυτό, έχει πρόσφατα προταθεί μια καινούρια διαμόρφωση αυτού του είδους των κυψελών, οι λεγόμενες κυψέλες καυσίμου αμέσου φλόγας (DFFC). Με αυτές, απλοποιείται η κυψέλη και εξαλείφεται το προαναφερθέν πρόβλημα, αν και η ηλεκτρική απόδοση εμφανίζεται μειωμένη (Wang, et al., 2014). Το υψηλό αρχικό κόστος τους και η περιορισμένη διάρκεια ζωής τους είναι που δρουν ανασταλτικά στην εξάπλωσή τους. Σήμερα, οι έρευνες ασχολούνται με την εξεύρεση φθηνότερων υλικών κατασκευής ενώ και εδώ προωθούνται ευνοϊκές για την εξάπλωση πολιτικές, όπως εγγυήσεις, χαμηλότοκα δάνεια και μείωση φόρων για την αγορά και εγκατάστασή τους. Στην αγορά η διαθεσιμότητα τους είναι ακόμα πολύ περιορισμένη (Badea, 2015).

Με τα σημερινά δεδομένα, καταλληλότερη τεχνολογία για μικρές εμπορικές εφαρμογές θεωρούνται οι μηχανές εσωτερικής καύσης, ενώ για κατοικίες οι μηχανές εξωτερικής καύσης. Μελλοντικά, αναμένεται να επικρατήσουν οι μηχανές Stirling, τουλάχιστον μέχρι την επαρκή ανάπτυξη των κυψελών καυσίμου (Aprile, et al., 2009).

Για την επιλογή της μονάδας που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να ληφθούν υπόψη ορισμένες παράμετροι. Κυριότερες είναι η δυνατότητα της μονάδας για κάλυψη της ζήτησης, για συνδυασμό με άλλες κινητήριες μονάδες, η ευελιξία στην χρήση διαφορετικών καυσίμων, η καταλληλόλητα χρήσης ως προς ορισμένους περιορισμούς θορύβου, ρύπων κ.τ.λ., καθώς και το είδος της χρήσης της μονάδας, δηλαδή αν θα χρησιμοποιηθεί σαν μονάδα αιχμής, βάσης κ.τ.λ. Συνήθης είναι η *ανάλυση των 3-E*, που αναλύεται παρακάτω. Άλλες παράμετροι είναι κλιματολογικές, γεωγραφικές ακόμα και πολιτικές. Τελευταία, σημαντικό έδαφος κερδίζει και η εξεργειακή ανάλυση συστημάτων, που επίσης αναλύεται παρακάτω. Συχνός είναι ο συνδυασμός κάποιας από της παραπάνω μονάδες παραγωγής ισχύος με ατμοστρόβιλο (οργανικός κύκλος Rankine). Στον οργανικό κύκλο Rankine, το εργαζόμενο μέσο έχει θερμοκρασία

ατμοποίησης χαμηλότερη από του νερού. Έτσι, η θερμότητα που απορρίπτεται από την πρώτη μονάδα χρησιμοποιείται στον ατμοστρόβιλο για επιπλέον παραγωγή ηλεκτρισμού, και η απορριπτόμενη θερμότητα του ατμοστροβίλου είναι που τροφοδοτεί τα λοιπά συστήματα.

Στην προσπάθεια προσδιορισμού της καλύτερης μονάδας παραγωγής ισχύος, διάφορα μαθηματικά μοντέλα και αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί ανά τον κόσμο. Αντιπροσωπευτικότερο παράδειγμα, οι δύο παραμετρικοί αλγόριθμοι ασαφούς λογικής που αναπτύχθηκαν για την επιλογή κινητήριας μονάδας σε σύστημα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας για κατοικία σε πέντε διαφορετικά κλίματα. Στην διαδικασία της απόφασης λαμβάνονται τα τέσσερα βασικά κριτήρια (τεχνολογικό, οικονομικό, περιβαλλοντικό, κοινωνικό), καθώς και δεκαέξι υπό-κριτήρια. Πρέπει να τονιστεί ότι και οι δυο αλγόριθμοι κατέληξαν στο ίδιο αποτέλεσμα και για τα πέντε διαφορετικά κλίματα, ενώ η κατάταξη από καλύτερη σε χειρότερη των κινητήριων μονάδων είναι οι μηχανές εσωτερικής καύσης, η μηχανή Stirling, η περίπτωση της ξεχωριστής παραγωγής και οι μικρο-τουρμπίνες. Οι κυψέλες καυσίμου δεν συμπεριλήφθηκαν ως αντικοινωνικές (Ebrahimi, et al., 2012).

Μετά την επιλογή της κατάλληλης μονάδας, επόμενο σημαντικό βήμα είναι η διαστασιολόγηση αυτής. Το μέγεθος καθορίζει την ποσότητα καυσίμου που θα χρησιμοποιηθεί, την ολική απόδοση, την περιβαλλοντική μόλυνση, καθώς και οικονομικές παραμέτρους και παραμέτρους λειτουργίας για την ικανοποίηση των αναγκών. Και εδώ διάφορα μοντέλα και συναρτήσεις έχουν αναπτυχθεί. Για παράδειγμα, η πολύ-κριτηριακή συνάρτηση διαστασιολόγησης (MCSF) για την εύρεση του βέλτιστου μεγέθους και της στρατηγικής λειτουργίας της κινητήριας μονάδας, επίσης για κατοικία σε πέντε διαφορετικά κλίματα. Λαμβάνει υπόψιν το λόγο εξοικονόμησης καυσίμου (FESR), την εξεργειακή αποδοτικότητα ως θερμοδυναμικές παραμέτρους, την καθαρή παρούσα αξία, την περίοδο αποπληρωμής, το εσωτερικό συντελεστή απόδοσης (IRR) ως οικονομικές παραμέτρους και την μείωση των CO₂, CO, NO_x ως περιβαλλοντικές παραμέτρους (Masood, et al., 2013).

Κεφάλαιο 3^ο

Μονάδες παραγωγής ψύξης

Με τις θερμοκίνητες μονάδες παραγωγής ψύξης παρέχεται ψύξη ή/και αφύγρανση, χρησιμοποιώντας το καυσαέριο ή κυρίως τη θερμότητα που παραλαμβάνουν τα ψυκτικά των κινητήριων μονάδων. Ως μονάδες παραγωγής ψύξης έχουν αναπτυχθεί κλειστά και ανοιχτά συστήματα. Τα κλειστά περιλαμβάνουν τα συστήματα φυσιορόφησης (απορρόφηση και προσρόφηση). Η διαφορά τους έγκειται στην φάση του υλικού ρόφησης που χρησιμοποιείται και στην διάταξη του κυκλώματος, ενώ ανάλογα με τον αριθμό των διεργασιών που απαιτούνται για την δημιουργία του ψυκτικού ατμού χωρίζονται σε μονής, διπλής και τριπλής δράσης (Deng, et al., 2011). Λόγω του ότι αντικαθιστούν τη μηχανική συμπίεση ατμού, αναφέρονται στην βιβλιογραφία και ως συστήματα οργανικού κύκλου Brayton (Dutta, et al., 2014). Τα ανοιχτά περιλαμβάνουν τα αφυγραντικά συστήματα και τα συστήματα χημειορόφησης. Ακόμη, υπάρχουν τα θερμο-μηχανικά συστήματα (συστήματα εγχυτήρα).

Στα μικρο-συστήματα, εκτεταμένη εφαρμογή έχουν οι ψύκτες απορρόφησης και προσρόφησης και οι αφυγραντές ισχύος από 2 έως 30 kW. Αυτές οι μονάδες, λόγω των εργαζόμενων ζευγών που χρησιμοποιούν, έχουν συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών που μπορούν να λειτουργούν αποτελεσματικά, τη στιγμή που η απορριπτόμενη θερμότητα των μονάδων παραγωγής ισχύος είναι διαφόρων ενεργειακών επιπέδων. Είναι, λοιπόν, εμφανές ότι δεν μπορεί κάθε θερμοκίνητη ψυκτική μονάδα να συνδυαστεί με οποιαδήποτε κινητήρια. Οι καλύτεροι συνδυασμοί εμφανίζονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Θερμοκρασίες απορριπτόμενης θερμότητας και κατάλληλες θερμοκίνητες τεχνολογίες

	Θερμοκρασία (°C)	Κατάλληλη τεχνολογία
Κυψέλες καυσίμου στερεού οξειδίου (SOFC)	~480	Τριπλής/Διπλής δράσης απορρόφηση
Μικρο-τουρμπίνα	~320	Τριπλής/Διπλής δράσης απορρόφηση
Κυψέλες καυσίμου φωσφορικού οξέος (PAFC)	~120	Διπλής/Μονής δράσης απορρόφηση
Μηχανές Stirling	~90	Μονής δράσης απορρόφηση, προσρόφηση ή αφύγρανση
Μηχανές εσωτερικής καύσης (Diesel, Otto)	~80	Μονής δράσης απορρόφηση, προσρόφηση ή αφύγρανση
Κυψέλες καυσίμου PEM	~60	Μονής δράσης απορρόφηση, προσρόφηση ή αφύγρανση

(Wu, et al., 2006)

Πρέπει να τονιστεί ότι οι ψυκτικές μονάδες λειτουργούν κάτω από ποικίλες συνθήκες εισόδου και επομένως το ψυκτικό αποτέλεσμα αλλάζει με κάθε διαφορετική είσοδο. Αυτό συμβαίνει κυρίως γιατί ποικίλλει η ζήτηση σε ηλεκτρισμό, με συνακόλουθο αποτέλεσμα η απορριπτόμενη θερμότητα να ποικίλλει εξίσου. Αλλά ακόμα και για σταθερή ζήτηση σε ηλεκτρισμό, η θερμότητα που διατίθεται στις θερμοκίνητες μονάδες μειώνεται με την αύξηση της ζήτησης σε θέρμανση, με φυσικό ακόλουθο την μείωση της ψυκτικής ισχύος. Ακόμη, με την τρέχουσα απόδοση του δικτύου, εκτιμάται πως αυτά τα συστήματα θα μπορούν να ανταγωνιστούν τα υπάρχοντα μεμονωμένα συστήματα ψύξης και κλιματισμού, όταν η ηλεκτρική τους απόδοση ξεπεράσει το 25% (Huangfu, et al., 2006), (Aprile, et al., 2009).

Για την ικανοποίηση επιπρόσθετων ψυκτικών αναγκών, έχουν αναπτυχθεί και διατάξεις που μαζί με/αντί της απορριπτόμενης θερμότητας χρησιμοποιούν και μέρος των υπόλοιπων εξόδων της κινητήριας μονάδας. Υπάρχει το μηχανοκίνητο σύστημα τροφοδοτούμενο απευθείας από τη κινητήρια μονάδα και το ηλεκτροκίνητο τροφοδοτούμενο απευθείας από τη γεννήτρια. Και τα δυο ανήκουν στις κατηγορίες των αντλιών θερμότητας (Angrisani, et al., 2013).

Ακόμη, πρέπει να αναφερθεί και η λεγόμενη ‘υβριδική ψύξη’ (ξεχωριστό αισθητό και λανθάνον ψυκτικό αποτέλεσμα). Αυτή επιτυγχάνεται και χωρίς συστήματα αφύγρανσης, καθώς ένα μικρό σύστημα μηχανικής συμπίεσης ατμού μπορεί να διαχειριστεί το λανθάνον φορτίο και να προσδώσει την θερμότητα του συμπυκνωτή της στην θερμοκίνητη ψυκτική μονάδα, επιτρέποντας της να λειτουργήσει σε υψηλότερη θερμοκρασία ατμοποιητή. Επομένως, φαίνεται ότι με αυτόν τον τρόπο αυξάνονται τα όρια λειτουργίας και η απόδοση της θερμοκίνητης μονάδας (Gluesenkamp, et al., 2011).

3.1. Συστήματα απορρόφησης

Οι ψύκτες απορρόφησης χρησιμοποιούν ζεύγη δυο ουσιών για την επίτευξη της ψύξης, με το υλικό ρόφησης να είναι σε υγρή φάση. Βασική απαίτηση είναι οι δύο ουσίες να έχουν ένα ικανοποιητικό περιθώριο αναμειξιμότητας για το εύρος των θερμοκρασιών λειτουργίας του κύκλου και καλές ιδιότητες μεταφοράς θερμότητας-μάζας. Ακόμη, το μείγμα πρέπει να είναι χημικά ευσταθές, μη τοξικό, μη εκρηκτικό, μη διαβρωτικό, περιβαλλοντικά φιλικό και χαμηλού κόστους. Οι συνήθεις συνδυασμοί απορροφητικού υλικού-ψυκτικού είναι νερό/ NH_3 , LiBr /νερό και CaCl_2 /νερό. Τα δυο πρώτα ζεύγη είναι ευσταθή σε μεγάλο εύρος πιέσεων και θερμοκρασιών, δεν συνεισφέρουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου και στην επέκταση της τρύπας του όζοντος. Δυνατή είναι και η χρήση οργανικών ενώσεων όταν οι θερμοκρασίες είναι χαμηλές, για την αποφυγή καταστροφικής αποσύνθεσης. Έρευνες γίνονται για νέα ζεύγη, όπως $\text{NH}_3/\text{LiNO}_3$ ή για τη χρήση υδρανθράκικων, φθορανθράκικων ή αλκοολοειδών ψυκτικών υλικών, όπως τα R-21, R-22 και νέων απορροφητικών υλικών όπως τα DMETEG, DMF (Srikhirin, et al., 2001), (Sun, et al., 2012), (Pang, et al., 2013).

απορρίπτεται στο συμπυκνωτή, οδηγείται σαν είσοδος στον ατμοποιητή για παραγωγή επιπρόσθετης ψυκτικής ισχύος. Τα ημίσειας δράσης ονομάζονται έτσι λόγω του COP που είναι σχεδόν ο μισός των μονής δράσης, μπορούν όμως να λειτουργούν με αρκετά χαμηλής θερμοκρασίας θερμότητα. Τα μονής δράσης είναι τα απλούστερα και πιο χρησιμοποιούμενα. Τα διπλής και τριπλής είναι λόγω της περιορισμένης παραγωγής τους ακριβότερα, αλλά έχουν αυξημένο COP της τάξεως του 1.2 και 1.7 αντίστοιχα, σε αντίθεση με τα συνήθη σύστημα μονής δράσης με COP της τάξεως του 0.7. Απαιτούν όμως και αισθητά υψηλότερης ενεργειακής στάθμης θερμοκρασία. Τυπικές τιμές θερμοκρασίας αναγεννητή είναι 55-75° C για ημίσειας, 85° C για μονής, 130° C για διπλής και 220° C για τριπλής δράσης (Deng, et al., 2011), (Sarbu, et al., 2013). Πρέπει να διευκρινιστεί ότι η βελτίωση του COP δεν έχει άμεση σχέση με την αύξηση του αριθμού των δράσεων. Διατάξεις πολλαπλών δράσεων έχουν αυξημένο συνολικό COP, αλλά και μεγάλη πολυπλοκότητα. Έρευνες συνεχίζουν να γίνονται τόσο επάνω στην διάταξη των στοιχείων όσο και στον τρόπο με τον οποίο το απορροφητικό υλικό και το ψυκτικό έρχονται σε επαφή και αντιδρούν, καθώς οι δύο αυτές παράμετροι επηρεάζουν την αποδοτικότητα της εγκατάστασης. Στους συνήθεις τύπους απορροφητών ένα υγρό φιλμ του απορροφητικού πέφτει επάνω σε ψυχόμενους οριζόντιους σωλήνες ή ψυχόμενους δίσκους ή ψυχόμενα περιστρεφόμενα τύμπανα, ενώ εξετάζονται και απορροφητές που λειτουργούν με ψεκάσμο του απορροφητικού υλικού. Τελευταία, μελετώνται και κύκλοι πολλαπλών σταδίων, όπου τα επιμέρους στάδια μπορούν να λειτουργούν με το ίδιο ή διαφορετικά εργαζόμενα ζεύγη (Srikhirin, et al., 2001), (Best, et al., 2014), (Pang, et al., 2013).

Οι ψύκτες απορρόφησης εμφανίζουν καλή συμπεριφορά στα μερικά φορτία και απαιτούν λίγη συντήρηση. Όμως όταν η απορριπτόμενη θερμότητα δεν είναι αρκετή για την τροφοδοσία τους, δεν είναι πάντα οικονομικά βιώσιμη η επιπρόσθετη καύση καυσίμου με σκοπό να καλυφθεί αυτό το κενό. Προτιμότερη θεωρείται σε αυτή την περίπτωση η χρήση ηλεκτροκίνητου ψύκτη, λόγω του υψηλότερου COP αυτού (2-2.5) έναντι του ψύκτη απορρόφησης (0.7-1.2). Επομένως, οι ψύκτες απορρόφησης θα πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο όταν είναι διαθέσιμη επαρκής απορριπτόμενη θερμότητα και η ζήτηση σε ψύξη είναι μεγαλύτερη της ζήτησης σε θέρμανση (Kavvadias, et al., 2009).

3.1.1. LiBr/νερό

Τα συστήματα με αυτό το εργαζόμενο ζεύγος έχουν περιορισμό στην θερμοκρασία του ατμοποιητή, καθώς σε θερμοκρασίες κοντά στο μηδέν, το νερό μετατρέπεται σε πάγο. Έτσι εφαρμόζεται για θερμοκρασίες ατμοποιητή άνω των 5 °C (μέχρι περίπου 10 °C). Αλλά και στον απορροφητή όπου η συγκέντρωση είναι υψηλή, η θερμοκρασία πρέπει να είναι τέτοια (περίπου 40 °C) ώστε να αποφεύγεται η στερεοποίηση (κρυστάλλωση) του LiBr. Αν και το LiBr δεν είναι πτητικό (λειτουργία κύκλου χωρίς ανορθωτή), είναι διαβρωτικό για κάποια μέταλλα και ακριβό. Όσον αφορά το νερό, απαιτεί μεγάλο ποσό λανθάνουσας θερμότητας, που το καθιστά αποδοτικό ως ψυκτικό, απαιτεί όμως και συνθήκες κενού για την ολοκλήρωση του κύκλου του. Για την βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας- μάζας, την αναστολή της διαβρωτικής δράσης και την αποφυγή της κρυστάλλωσης, μελετάται η χρήση

πρόσθετων ουσιών στο LiBr, με επικρατέστερα τα ανόργανα άλατα ZnBr₂ και LiNO₃ (Srikhirin, et al., 2001), (Deng, et al., 2011), (Sarbu, et al., 2013), (Aman, et al., 2014).

Οι ψύκτες απορρόφησης *LiBr/νερού* είναι μια αρκετά ώριμη τεχνολογία, ιδιαίτερα για εφαρμογές μεγάλης δυναμικότητας. Τελευταία, κατασκευαστές έχουν αναπτύξει μικρές μονάδες μονής και διπλής δράσης, μικρής χωρητικότητας, κατάλληλες για τριπαραγωγή μικρο-κλίμακας, με ψυκτικές ισχύεις από 4.5 έως 30 kW. Οι θερμοκρασίες που απαιτούν οι μονής δράσης είναι 75-80 °C, με υψηλότερο COP 0.7-0.8, ενώ οι διπλής δράσης απαιτούν θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 180 °C, εμφανίζοντας COP της τάξεως του 1.2-1.3. Χρησιμοποιούνται ευρέως για κλιματισμό (Angrisani, et al., 2012), (Sonar, et al., 2014), (Wang, et al., 2014).

3.1.2. *Νερό/NH₃*

Με αυτό το εργαζόμενο μέσο δεν υπάρχουν περιορισμοί θερμοκρασίας ούτε στον ατμοποιητή ούτε στον απορροφητή. Γι' αυτό είναι επικρατέστερο σε εφαρμογές με χαμηλότερες θερμοκρασίες αφού το σημείο πήξης της αμμωνίας είναι -77.7 °C. Όμως, λόγω της πτητικότητας των δυο ουσιών, για την ολοκλήρωση του κύκλου απαιτείται και ένας ανορθωτής για αφαίρεση του νερού που κανονικά εξατμίζεται με την αμμωνία. Διαφορετικά, το νερό θα συσσωρευόταν στον ατμοποιητή και θα σταματούσε την εκπλήρωση του κύκλου. Παρ' όλο που είναι τοξικό και διαβρωτικό, κυρίως για το χαλκό, θεωρείται σε γενικές γραμμές φιλικό προς το περιβάλλον και χαμηλού κόστους όταν αποφεύγεται η χρήση σε εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας. Έχει μελετηθεί πρόσφατα η προσθήκη NaOH, που δείχνει μια μικρή αύξηση στον COP (Sun, et al., 2012).

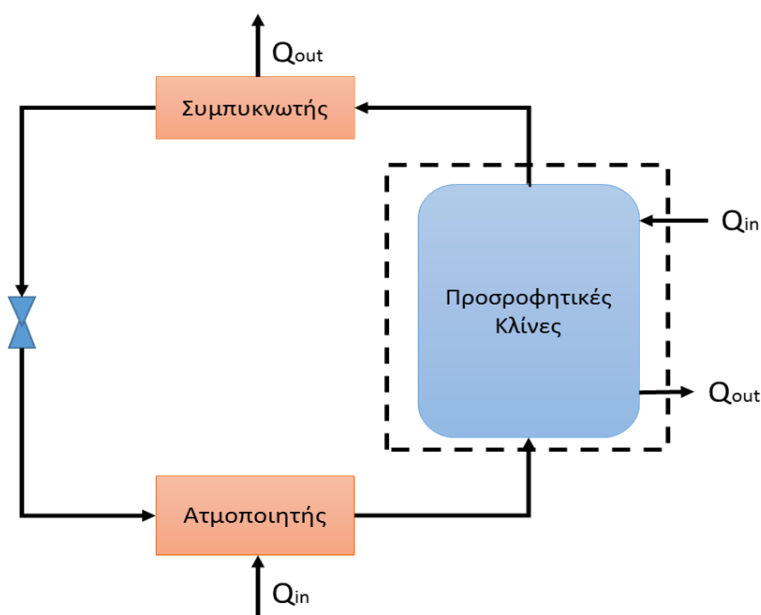
Οι ψύκτες απορρόφησης *Νερού/NH₃* συναντώνται κυρίως σε μεγάλες και μικρές εφαρμογές ψύξης (Sonar, et al., 2014). Μπορούν να επιτύχουν χαμηλότερες θερμοκρασίες από τους προηγούμενους (< 0 °C), και να λειτουργήσουν με υψηλότερες θερμοκρασίες (>160 °C). Απαιτούν όμως και μεγαλύτερες πιέσεις, ενώ ο COP είναι συγκριτικά χαμηλότερος (0.6-0.7). Μικρής δυναμικότητας μονάδες που χρησιμοποιούν ζεστό νερό από την κινητήρια μονάδα (αντί των καυσαερίων) είναι διαθέσιμες ή υπό ανάπτυξη, κυρίως ψυκτικής ισχύος από 8 έως και 17 kW (Angrisani, et al., 2012).

3.1.3. *Νερό/LiCl*

Οι ψύκτες *Νερού/LiCl* χρησιμοποιούν το φαινόμενο της κρυστάλλωσης για την αύξηση της ενεργειακής πυκνότητας και μέσω της συσσώρευσης κρυστάλλων άλατος λειτουργούν ως αποθήκες θερμότητας. Λειτουργούν διακοπτόμενα και για συνεχόμενη λειτουργία απαιτούν προσθήκη δύο δοχείων στο σύστημα. Η ψυκτική ισχύς τους κυμαίνεται από 2 έως 10 kW και η εταιρία ClimateWell AB είναι ο μόνος πάροχος (Angrisani, et al., 2012).

3.2. Συστήματα προσρόφησης

Οι ψύκτες προσρόφησης χρησιμοποιούν ζεύγη δυο ουσιών για την επίτευξη της ψύξης, με το υλικό ρόφησης να είναι σε στερεή φάση. Βασικές απαιτήσεις για το εργαζόμενο ζεύγος είναι μικρό μέγεθος μορίων, μεγάλη λανθάνουσα θερμότητα ατμοποίησης, χαμηλή θερμοκρασία εξάτμισης και πίεση κορεσμού και θερμική σταθερότητα για τις θερμοκρασίες λειτουργίας του κύκλου. Ακόμη, πρέπει είναι μη τοξικό, μη διαβρωτικό, μη εύφλεκτο, χαμηλού κόστους, εύκολα διαθέσιμο και με μεγάλη διάρκεια ζωής (Askalanya, et al., 2012). Οι συνήθεις συνδυασμοί προσροφητικού υλικού-ψυκτικού είναι Silica gel/νερό, ζεόλιθος/νερό, άνθρακας/ NH_3 , με το πρώτο να εμφανίζεται καταλληλότερο για εφαρμογές μικρο-κλίμακας (Sonar, et al., 2014). Υπάρχουν ακόμα τα εργαζόμενα ζεύγη Silica gel/ CH_3OH , ζεόλιθος/ NH_3 , ενεργός άνθρακας/ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$, ενεργός άνθρακας/ CH_3OH , CaCl_2 / NH_3 , CaCl_2 / CH_3OH (Wang, et al., 2009), (Solmus, et al., 2010), (Deng, et al., 2011), (Grisel, et al., 2010), (Best, et al., 2014). Μεγαλύτερη προσροφητική ικανότητα συνεπάγεται αύξηση του συντελεστή απόδοσης (COP) και υψηλότερος ρυθμός προσρόφησης συνεπάγεται μεγαλύτερη ειδική ψυκτική ισχύ. Συνεπώς, ερευνώνται σύνθετα προσροφητικά υλικά με τις παραπάνω ιδιότητες. Παραδείγματα τέτοιων πειραματικών υλικών είναι ενεργός άνθρακας εμποτισμένος σε Silica gel και μετά σε CaCl_2 , CaCl_2 με διευρυνμένο γραφίτη, ζεόλιθος 13X με CaCl_2 (Tso, et al., 2012). Όσον αφορά τα ψυκτικά, μπορεί να γίνει χρήση οξυγόνου ή υδρογόνου γενικώς και R134a, R22, R407c, μόνο σε συνδυασμό με άνθρακα (Wang, et al., 2009).



Σχήμα 3: Βασικός κύκλος προσρόφησης

Η λειτουργία τους είναι όμοια με των συστημάτων απορρόφησης, με την διαφορά ότι το σύστημα αποτελείται από δύο προσροφητικές κλίνες αντί για απορροφητή, δεν υπάρχει αντλία διαλύματος και υπάρχει μια μόνο βαλβίδα εκτόνωσης (Sarbu, et al.,

2013). Εδώ το ψυκτικό σε αέρια φάση που εξέρχεται από τον ατμοποιητή (λειτουργία σε κενό μόνο όταν το ψυκτικό είναι νερό) παραμένει στους στερεούς κόκκους του ροφητικού κατά την διαδικασία της ρόφησης και δεν υπάρχει εναλλάκτης, καθώς οι κλίνες χρησιμοποιούνται και για τη διαδικασία της ρόφησης και τη διαδικασία της εκρόφησης αλλά με διαφορετική χρονική σειρά. Έτσι, τα συστήματα αυτά είναι απλούστερα των προηγούμενων, χωρίς κινούμενα μέρη και πιο συμπαγή (Bao, et al., 2014). Δεν υπάρχει περιορισμός στην θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας εφ' όσον δεν υπάρχει κίνδυνος κρυστάλλωσης του ροφητικού υλικού. Ακόμη δεν υπάρχει κίνδυνος διάβρωσης ή απόσταξης. Οι κύκλοι προσρόφησης επιτυγχάνουν COP 0.5-0.6 για θερμοκρασίες λειτουργίας 75 έως 85 °C, ενώ η θερμοκρασία αναγέννησης μπορεί να φτάσει και τους 500 °C σε κάποιες περιπτώσεις (Wang, et al., 2009), (Sarbu, et al., 2013).

Οι ψύκτες αυτού του τύπου έχουν μεγάλο όγκο και βάρος λόγω της χαμηλής απόδοσης του προσροφητικού στη μεταφορά θερμότητας και μάζας, ενώ είναι υψηλού κόστους λόγω των δυσκολιών συντήρησης και των περιορισμένων παραγόμενων μονάδων. Απαιτούν ιδιαίτερη προσοχή στο υδραυλικό τους σύστημα λόγω της περιοδικής λειτουργίας τους. Επίσης, χαρακτηρίζονται από κύκλο προσρόφησης/εκρόφησης μεγάλης διάρκειας (ως συνέπεια της χρήσης των ίδιων κλινών και για τις δύο διαδικασίες του κύκλου του προσροφητικού) και χαμηλό COP (Deng, et al., 2011), (Tso, et al., 2012). Από την άλλη πλευρά, είναι φιλικά προς το περιβάλλον, δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη και άρα είναι αθόρυβα, με λίγες απαιτήσεις συντήρησης, ενώ η απλότητα κατασκευής και η μηχανική αντοχή τους επιτρέπει τη χρήση σε περιβάλλοντα με κραδασμούς. Το γεγονός ότι χρειάζονται χαμηλότερες θερμοκρασίες αναγέννησης είναι το κύριο πλεονέκτημα τους και ο λόγος που παρουσιάζουν καλύτερη απόδοση όταν συνδυάζονται με ηλιακά συστήματα. Σήμερα, έρευνες γίνονται για την λειτουργία προσροφητών με τρεις, τέσσερις και πέντε κλίνες ή/και διαμόρφωση του προσροφητή σε σωληνοειδή μορφή (Pang, et al., 2013). Στην περίπτωση χρήσης αυτών των συστημάτων σε περιπτώσεις τριπαραγωγής, παρατηρείται μείωση της συνολικής απαιτούμενης ενέργειας κατά 15-20% (Grisel, et al., 2010).

Οι ψύκτες προσρόφησης τεχνολογικά εμφανίζουν λιγότερη ανάπτυξη από τους απορρόφησης. Προσομοιώσεις της λειτουργίας ανοιχτού κύκλου προσροφητών σε τριπαραγωγή μικρο-κλίμακας καταδεικνύουν υψηλότερο COP (Sonar, et al., 2014). Μικρότερης δυναμικότητας ψύκτες, κατάλληλοι για τα συστήματα που μελετώνται εδώ, έχουν αναπτυχθεί επιτυγχάνοντας ψυκτική ισχύ από 7 έως και 15 kW. Όπως προκύπτει από τη βιβλιογραφία, είναι αυτοί που κυρίως χρησιμοποιούνται στις πειραματικές μελέτες, ενώ έρευνες γίνονται για την βελτίωση των υλικών και υποσυστημάτων τους (Angrisani, et al., 2012).

3.2.1. Silica gel

Το Silica gel μπορεί να προσροφήσει μέτριες ποσότητες υδρατμού σε οποιαδήποτε πίεση λόγω των υδρόφιλων ιδιοτήτων του και να λειτουργήσει με θερμότητα χαμηλής ενεργειακής στάθμης (συνήθως κάτω από 90 °C), αν και οι επιδόσεις του σε μεταφορά θερμότητας και μάζας δεν είναι οι καλύτερες δυνατές

(Wang, et al., 2009), (Tso, et al., 2012), (Wang, et al., 2014). Σήμερα, τα διαθέσιμα στην αγορά συστήματα χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο και Silica gel ως ροφητικό υλικό.

Για την βελτίωση της μεταφοράς θερμότητας και μάζας, εκτός της λέπτυνσης του στρώματος Silica gel του απορροφητή, έχει μελετηθεί η ενίσχυση του Silica gel με γραφίτη ή νιτρικό ασβέστιο και η σύνθεση του απορροφητικού από Silica gel, γραφίτη και CaCl_2 . Στην ενίσχυση του με LiCl επιτεύχθηκε και ο μέγιστος COP, ίσος με 1.43. Εναλλακτικά, έχει εξεταστεί προσροφητής με επικάλυψη Silica gel πάνω σε μεταλλικές επιφάνειες (Wang, et al., 2014).

Υπάρχουν συστήματα προσροφητών μονής και διπλής κλίνης Silica gel, με τα πρώτα να μην προτιμώνται λόγω της διακοπόμενης λειτουργίας τους. Ακόμα, υπάρχουν τα διαδοχικά συστήματα, που αποτελούνται από δυο προσροφητές ζεόλιθου για το στάδιο υψηλής θερμοκρασίας και ένα προσροφητή Silica gel για το στάδιο χαμηλής θερμοκρασίας, με αρκετά υψηλό COP (1.35). Έρευνες έχουν γίνει και για συστήματα τριών κλινών Silica gel, καθώς και για πολυπλοκότερα συστήματα πολλαπλών κλινών/πολλαπλών σταδίων τόσο στους προσροφητές όσο και στους αναγεννητές. Τέλος, είχε προταθεί και η προσθήκη αντλίας για την ευχερέστερη μεταφορά υδρατμού μεταξύ προσροφητή και ατμοποιητή/συμπυκνωτή. Πολλοί έχουν ασχοληθεί και με την ανάπτυξη μοντέλων προσομοίωσης της λειτουργίας των διαφόρων συστημάτων, ενώ η κατασκευή προτύπων έχει περιοριστεί σε μονής και διπλής κλίνης προσροφητές και μονού ή διπλού σταδίου κύκλους (Wang, et al., 2014).

Τα συστήματα προσρόφησης με Silica gel ως ροφητικό υλικό, επιδέχονται πολλών βελτιώσεων μέχρις ότου μπορούν να γίνουν ανταγωνιστικά για χρήση σε πληθώρα εφαρμογών. Πρέπει να ξεπεραστούν τα προβλήματα όγκου, κόστους, αξιοπιστίας και απόδοσης.

3.2.2. Ζεόλιθος

Ο ζεόλιθος έχει μεγάλη ικανότητα προσρόφησης (μεγαλύτερη από το Silica gel) σε χαμηλές θερμοκρασίες, αλλά απαιτεί υψηλές θερμοκρασίες (πάνω από 100 °C) για την αναγέννηση του, καθώς εκεί παρουσιάζει σταθερότητα. Ακόμη δεν μπορεί να συγκρατήσει και να αποδώσει μεγάλες ποσότητες ψυκτικού υλικού, όταν το εύρος υγρασίας/ πίεσης είναι στενό (Tso, et al., 2012). Υπάρχουν φυσικοί και τεχνητοί ζεόλιθοι, με τους δεύτερους να είναι ακριβότερους αλλά και με μεγαλύτερο ειδικό βάρος και ικανότητα μεταφοράς θερμότητας. Συνήθως εφαρμόζεται σε συστήματα κλιματισμού με θερμοκρασίες πηγής (για την αναγέννηση) μεταξύ 200 °C και 300 °C (Wang, et al., 2009).

3.2.3. Άνθρακας

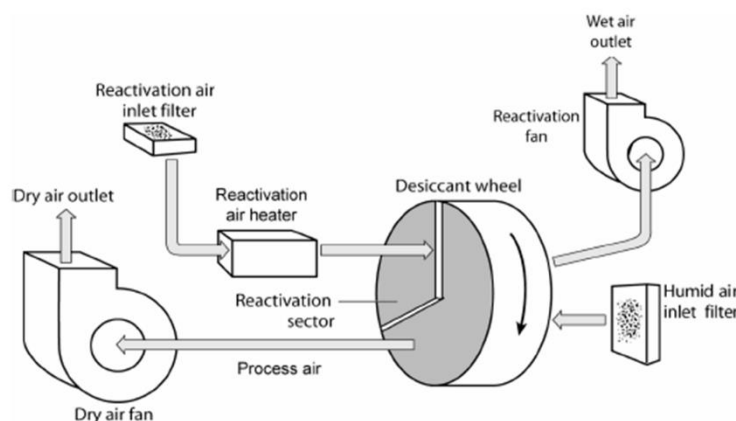
Ο ενεργός άνθρακας έχει μεγάλη εσωτερική επιφάνεια λόγω του υψηλού πορώδους, υψηλή επιφανειακή αντιδραστικότητα και συνακόλουθα μεγάλη ικανότητα ρόφησης χημικών από υγρά και αέρια, ενώ η θερμότητα που παράγει κατά την

προσρόφηση είναι η μικρότερη από κάθε άλλο προσροφητικό. Στην βιβλιογραφία αναφέρεται ότι έχει υψηλή θερμική αγωγιμότητα, γεγονός που οδηγεί σε αποδοτικότερη μεταφορά θερμότητας και μάζας και ότι είναι πολύ αποτελεσματικός στην ρόφηση ατμού, όχι όμως για το εύρος των πιέσεων στο οποίο λειτουργούν τα περισσότερα ψυκτικά συστήματα. Γι' αυτό και μελετάται η ανάμειξή του με άλλα ροφητικά, όπως και αναφέρεται ανωτέρω. Ο μέγιστος COP βρέθηκε 0.8 για ζεύγος άνθρακα και μεθανόλης, που όμως απαιτεί υπό-ατμοσφαιρικές συνθήκες, ενώ ερευνώνται και νέοι συνδυασμοί ζευγών, όπως για παράδειγμα με υδρογόνο, άζωτο και CO₂. Όταν συνδυάζεται με αμμωνία η απόδοση είναι μικρότερη, υπάρχουν θέματα τοξικότητας και ασυμβατότητας με το χαλκό, αλλά η απαίτηση για λειτουργία με υψηλότερες πιέσεις, οδηγεί σε καλύτερη μετάδοση μάζας, κύκλο μικρότερης διάρκειας, ενώ μπορεί να δεχτεί και θερμότητα πάνω από 200 °C (Wang, et al., 2009), (Askalanya, et al., 2012), (Tso, et al., 2012).

3.3. Συστήματα αφύγρανσης

Τα συστήματα αφύγρανσης είναι ιδανικά σε περιβάλλοντα με υψηλή υγρασία, χρησιμοποιούνται κυρίως για κλιματισμό (18 °C -26 °C ψυχρός, αφυγρασμένος αέρας εξόδου, (Deng, et al., 2011)), ενώ δεν χρειάζονται ηλεκτρική ενέργεια για τη λειτουργία τους. Πρόκειται για ανοιχτού κύκλου συστήματα που χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο σε άμεση επαφή με τον αέρα του περιβάλλοντος. Η συνηθέστερη διάταξη περιλαμβάνει έναν αφυγραντικό τροχό στον οποίο η υγρασία κατακρατάται από το αφυγραντικό υλικό για την εξισορρόπηση του λανθάνοντος φορτίου του χώρου προς ψύξη/κλιματισμό, ακολουθούμενο από ψύκτη. Αναλυτικά, ο ζεστός και υγρός αέρας περιβάλλοντος, έρχεται σε επαφή με έναν αφυγραντικό τροχό, ο οποίος απορροφά/προσροφά μέρος του υδρατμού που αυτός μεταφέρει. Αυτό συμβαίνει λόγω της ικανότητας αυτών των υλικών να απορροφούν /προσροφούν υδρατμό, όταν η πίεση ατμών του υδρατμού του αέρα είναι διαφορετική από αυτή του υλικού. Η θερμοκρασία του αυξάνεται καθώς η αφύγρανση με αυτό τον τρόπο είναι εξώθερμη διαδικασία. Στην συνέχεια ο αέρας ψύχεται και υγραίνεται μέχρι να επιτευχθούν οι επιθυμητές συνθήκες με την βοήθεια εξατμιστικών ψυκτών και εισάγεται στο χώρο του οποίου επιθυμείται η ψύξη. Εάν συνδυαστούν με την συνήθη συμπίεση ατμού, οδηγούν σε μεγαλύτερη απόδοση, με αύξηση της θερμοκρασίας του ατμοποιητή στην κύκλο συμπίεσης. Στα συστήματα αυτά θερμότητα απαιτείται για την αναγέννηση του αφυγραντικού τροχού. Για την εξασφάλιση συνεχούς λειτουργία, απαιτείται αναγέννηση του τροχού από θερμό ρεύμα αέρα 60-95 °C, επιτυγχάνοντας χαμηλό COP (0.5-0.8). Επομένως, τα συστήματα αφύγρανσης λειτουργούν με θερμική ενέργεια, δεν χρησιμοποιούν ψυκτικά που συμβάλλουν στην λέπτυνση του στρώματος όζοντος της ατμόσφαιρας και βελτιώνουν την ποιότητα του τελικού αέρα προς χρήση, με μειωμένα ποσοστά υγρασίας και έλεγχο θερμοκρασίας. Λόγω των πλεονεκτημάτων τους, η τεχνολογία αυτή εξαπλώνεται στον οικιακό και τριτογενή τομέα και σε κτήρια γραφείων. Παρ' όλα αυτά στην Ευρώπη σπάνια εφαρμόζονται, λόγω παραγόντων όπως το υψηλό αρχικό κόστος και η έλλειψη γνώσης αναφορικά με την απόδοση και το λόγο κόστους/οφέλους. Ανασταλτικός παράγοντας για την εξάπλωση τους είναι και η δυσκολία στην κατασκευή ενός αξιόπιστου και ακριβούς προτύπου για τον

αφυγραντικό τροχό, λόγω των πολύπλοκων διεργασιών της μεταφοράς θερμότητας και μάζας, καθώς και του υψηλού αριθμού των ανεξάρτητων μεταβλητών που επηρεάζουν την απόδοση του, όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, οι ρυθμοί ροής, ταχύτητα περιστροφής και αποξηραντικό υλικό.



Εικόνα 3: Βασικός κύκλος συστήματος αφύγρανσης

Υπάρχουν συστήματα με υγρά και στέρεα αφυγραντικά υλικά (LiCl, silica gel, CaCl₂, ζεόλιθος,...). Αξίζει να διευκρινιστεί ότι τα συστήματα με υγρά αφυγραντικά υλικά έχουν μεγαλύτερη ευελιξία, δυνατότητα μετακίνησης, ευκολία χειρισμού, απαιτούν χαμηλότερη θερμοκρασία αναγέννησης και δημιουργούν χαμηλότερη πτώση πίεσης στο ρεύμα του αέρα. Όμως παρουσιάζουν προβλήματα διαρροής του αφυγραντικού, το οποίο είναι συνήθως διαβρωτικό διάλυμα και μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του αέρα. Στον αντίποδα, τα συστήματα με στέρεα αφυγραντικά υλικά είναι διαθέσιμα από περισσότερους κατασκευαστές (Angrisani, et al., 2012), (Jradi, et al., 2013), (Angrisani, et al., 2014), (Sonar, et al., 2014), (Jradi, et al., 2014).

3.3.1. Συστήματα αφύγρανσης με υγρά αφυγραντικά υλικά

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό, ενώ το αφυγραντικό μέσο είναι κυρίως υδατικό διάλυμα άλατος (LiCl, LiBr, CaCl₂). Εκτός του αφυγραντή, αναγεννητή και εξατμιστικού ψύκτη, περιλαμβάνουν και έναν εναλλάκτη διαλύματος/διαλύματος και δύο εναλλάκτες νερού/διαλύματος. Τα υγρά αφυγραντικά υλικά έχουν την ιδιότητα να απορροφούν υγρασία από την ατμόσφαιρα, όταν η τάση ατμών στην επιφάνειά τους είναι μικρότερη της τάσης ατμών του νερού στον αέρα (απαίτηση υψηλής συγκέντρωσης/χαμηλής θερμοκρασίας) και να αποβάλλουν υγρασία στην ατμόσφαιρα όταν η τάση ατμών στην επιφάνειά τους είναι μεγαλύτερη της τάσης ατμών του νερού στον αέρα (απαίτηση χαμηλής συγκέντρωσης/υψηλής θερμοκρασίας). Εδώ εκτός από τη θερμότητα για την αναγέννηση (60 °C-90 °C ζεστό νερό ή 80 °C-110 °C ζεστός αέρας (Deng, et al., 2011), (Dutta, et al., 2014)) απαιτείται και θερμότητα για την θέρμανση του διαλύματος πριν αυτό εισέλθει στον αναγεννητή.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα συμπίεσης ατμών, δυνατότητα χημικής αποθήκευσης ενέργειας χωρίς απώλειες θερμότητας στο περιβάλλον και αυστηρός έλεγχος υγρασίας και θερμοκρασίας, που τα καθιστά κατάλληλα για χρήση σε νοσοκομεία, εργαστήρια, φαρμακοβιομηχανίες, σούπερ-μάρκετ, μουσεία, δωμάτια υπολογιστών. Ακόμη, υπερτερούν των συστημάτων με στέρεα αφυγραντικά υλικά, καθώς επιτυγχάνουν μεγαλύτερη αφύγρανση σε ίδιες συνθήκες λειτουργίας, προσφέρουν την δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας μέσω της αποθήκευσης υψηλής συγκέντρωσης διαλυμάτων (Sarbu, et al., 2013), (Best, et al., 2014) και πιθανά μπορούν να απομακρύνουν ρύπους και βακτήρια (Deng, et al., 2011). Παρ' όλα αυτά, παρουσιάζουν προβλήματα κρυστάλλωσης, διάβρωσης και μεταφοράς του αφυγραντικού στο ρεύμα αέρα, ενώ το κόστος και η πολυπλοκότητα τους δεν είναι αμελητέα.

3.3.2. Συστήματα αφύγρανσης με στέρεα αφυγραντικά υλικά

Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούν ως αφυγραντικό μέσο LiCl, Silica gel, CaCl₂, Silica gel/CaCl₂ μοριακά πλέγματα ή ζεόλιθους και οξειδία αλουμινίου. Το LiCl έχει καλύτερη ικανότητα απομάκρυνσης υγρασίας και απαιτεί θερμοκρασίες αναγέννησης μεταξύ 80 °C και 150 °C, ενώ το Silica gel είναι σταθερότερο αυτού και απαιτεί θερμοκρασίες αναγέννησης μεταξύ 60 °C και 120 °C. Τελευταία μελετώνται και στέρεα αφυγραντικά με βάση Silica gel και βάση σηπιολίθου (αλογόνο) για την αντιμετώπιση της περιορισμένης αφυγραντικής ικανότητας του Silica gel και των προβλημάτων κρυστάλλωσης και διάβρωσης των αλογονοξειδών. Τα κύρια μειονεκτήματα τους είναι το υψηλό κόστος και βάρος, η απαίτηση ηλεκτροκίνητων ανεμιστήρων και η απαίτηση για αραίωση των καυσαερίων που χρησιμοποιούνται (όταν από αυτά λαμβάνεται η απαιτούμενη θερμότητα), καθώς αυτά είναι πολύ υψηλής θερμοκρασίας και δε μπορούν να χρησιμοποιηθούν απευθείας (Deng, et al., 2011).

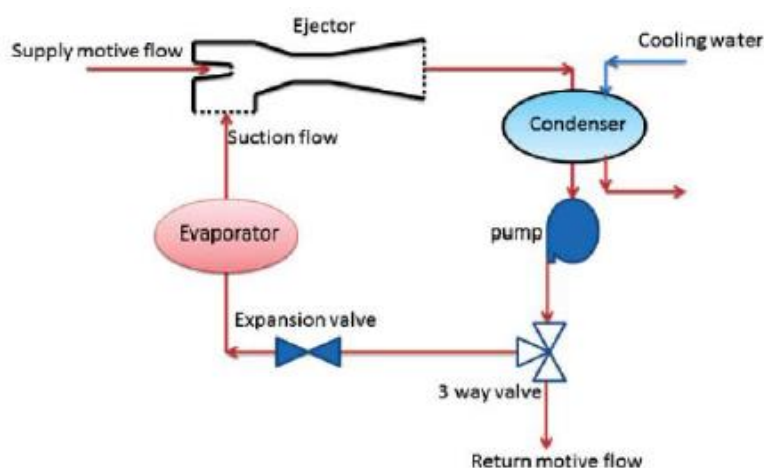
3.4. Συστήματα χημειορόφησης

Η ουσιαστική διαφορά από τα παραπάνω συστήματα προσρόφησης είναι ότι στην χημειορόφηση γίνεται αντίδραση μεταξύ των επιφανειακών μορίων του προσροφητικού και του ψυκτικού, με συνακόλουθη μεταφορά ηλεκτρονίων, αναδιάταξη ατόμων και διάλυση ή σχηματισμό χημικών δεσμών, ενώ η προσρόφηση που αναφέρεται παραπάνω γίνεται φυσικά, δηλαδή με σχηματισμό δυνάμεων van de Waals μεταξύ των μορίων του ζεύγους (για αυτό και συχνά αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως φυσιορόφηση). Γι' αυτό και τα μοντέλα στην πρώτη περίπτωση είναι διπαραμετρικά (θερμοκρασία και πίεση), ενώ στην δεύτερη μονοπαραμετρικά (θερμοκρασία ή πίεση). Εδώ, την θέση της προσρόφησης- αναγέννησης παίρνει η αποσύνθεση-σύνθεση (Wang, et al., 2009). Ένα ιδανικό σύστημα ρόφησης θα ήταν αυτό που το προσροφητικό μέσο θα μπορούσε να συγκρατήσει μεγάλες ποσότητες ψυκτικού και η πίεση ατμοποίησης του ψυκτικού θα ήταν σταθερή. Απορροφητικά που πλησιάζουν από πλευράς χημείας το ψυκτικό θα μπορούσαν να προσεγγίσουν την ιδανική διαδικασία. Αμμωνιακά και υβρίδια μετάλλων ανόργανων αλάτων είναι υλικά που μπορούν να αναστρέψουν τους δεσμούς τους και να απελευθερώσουν μεγάλες

ποσότητες ψυκτικού (αμμωνίας ή νερού) με την όλη διαδικασία προσρόφησης να πραγματοποιείται σε ένα σημείο πίεσης και θερμοκρασίας. Σε αυτά τα υλικά, το νερό ή η αμμωνία σχηματίζουν ομοιοπολικούς δεσμούς. Οι ενώσεις που δημιουργούνται ονομάζονται πολυσύνθετες ενώσεις και είναι αυτές που χρησιμοποιούνται στα συστήματα χημειορόφησης. Οι πολυσύνθετες ενώσεις μπορούν να δημιουργηθούν με κάθε ψυκτικό που έχει ελεύθερα ηλεκτρόνια, αλλά το νερό και η αμμωνία είναι τα πιο χρηστικά. Τα κυριότερα εργαζόμενα ζεύγη είναι υβρίδια μετάλλου/H, χλωρίδια μετάλλου/αμμωνία και οξειδία μετάλλου/O₂. Όταν γίνεται χρήση αμμωνίας ως ψυκτικού ή οξειδίων μετάλλου ως προσροφητικού, υπάρχει κίνδυνος διόγκωσης και συσσωμάτωσης, που επηρεάζει την απόδοση της μεταφοράς θερμότητας/μάζας. Γι' αυτό, ερευνώνται πρόσθετα που θα αποτρέπουν τέτοια φαινόμενα, όπως ο διογκωμένος γραφίτης ή το Silica gel (Wang, et al., 2009), (Deng, et al., 2011). Με τα συστήματα αυτά επιτυγχάνεται μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος από τα συμβατικά συστήματα. Πρέπει να τονιστεί ότι η εφαρμογή τους σήμερα είναι εξαιρετικά περιορισμένη.

3.5. Συστήματα εγχυτήρα ατμού

Τα συστήματα αυτά αποτελούνται από έναν ατμοποιητή, έναν αναγεννητή, έναν συμπυκνωτή, μια στραγγαλιστική βαλβίδα, μια αντλία και έναν εγχυτήρα. Αρχικά, το ψυκτικό εξέρχεται από τον αναγεννητή σε υπέρθερμη κατάσταση και εισέρχεται στον εγχυτήρα για την πτώση του σε ενδιάμεση πίεση. Στην συνέχεια εισέρχεται στον συμπυκνωτή όπου μειώνεται η θερμοκρασία του μέχρι κορεσμού.



Εικόνα 4: Βασικός κύκλος συστήματος εγχυτήρα

Το ψυκτικό εξερχόμενο χωρίζεται σε δυο ρεύματα. Το ένα εισέρχεται ξανά στην αναγεννητή με την βοήθεια αντλίας, όπου λαμβάνει θερμότητα μέχρι υπερθέρμανσης και το άλλο πέρα από τη στραγγαλιστική βαλβίδα και τελικά εισέρχεται στον ατμοποιητή, προσφέροντας την ωφέλιμη ψυκτική ισχύ. Εξερχόμενο το ρεύμα αυτό από τον ατμοποιητή, εισάγεται στον εγχυτήρα, όπου γίνεται ανάμειξη με το ρεύμα εξόδου του αναγεννητή (Best, et al., 2014). Εργαζόμενα μέσα που έχουν ερευνηθεί

είναι νερό, R-11, R-12, προπάνιο, βουτάνιο και NH_3 . Έχουν υψηλό COP, έως 2.8, αλλά απαιτούν θερμότητα υψηλότερης ενεργειακής στάθμης ($120\text{ }^\circ\text{C}$ - $180\text{ }^\circ\text{C}$ ατμός ή $70\text{ }^\circ\text{C}$ - $130\text{ }^\circ\text{C}$ ζεστό νερό) σε σύγκριση με τα παραπάνω αναφερόμενα συστήματα. Σε σύγκριση με τα συμβατικά συστήματα συμπίεσης ατμού, η διαφορά των πιέσεων λειτουργίας είναι μικρότερη για δεδομένες θερμοκρασίες του κύκλου. Προτάσεις έχουν γίνει και για λειτουργία με χαμηλότερες θερμοκρασίες, ακόμα και $65\text{ }^\circ\text{C}$ (Sonar, et al., 2014), με την προϋπόθεση της λειτουργίας σε υποπίεση. Η θερμοκρασία του ατμοποιητή είναι $30\text{ }^\circ\text{C}$ - $37\text{ }^\circ\text{C}$, όταν χρησιμοποιούνται κυρίως για κλιματισμό και $5\text{ }^\circ\text{C}$ - $15\text{ }^\circ\text{C}$, όταν χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ψυχρού νερού (Srikhirin, et al., 2001), (Dutta, et al., 2014), (Sarbu, et al., 2013).

3.6. Σημερινές τάσεις

Όλα τα συστήματα που αναφέρονται παραπάνω βρίσκονται ακόμα υπό εξέλιξη και συνεχώς δημοσιεύονται μελέτες με βελτιώσεις που μπορούν να γίνουν ή δοκιμάζονται ήδη. Παρακολουθώντας αυτές τις δημοσιεύσεις είναι εμφανές ότι οι σημερινές τάσεις στα συστήματα τριπαραγωγής είναι:

- Αερόψυκτοι ψύκτες Li/Br
- Δυαδικά νανορευστά σε συστήματα απορρόφησης
- Προσθήκη υδροξειδίου του νατρίου σε ψύκτες $\text{Νερό}/\text{NH}_3$ για αύξηση του COP
- Μικρές αερόψυκτες μονάδες απορρόφησης $\text{Νερό}/\text{NH}_3$ για τριπαραγωγή μικρο-κλίμακας
- Συστήματα χημειορρόφησης

Κεφάλαιο 4^ο

Τρόποι και Στρατηγικές λειτουργίας

Για την ικανοποίηση των, μεταβλητών κάθε φορά, αναγκών του χρήστη, κάθε σύστημα πρέπει να μπορεί να λειτουργήσει με διάφορες στρατηγικές ενεργειακής διαχείρισης (Ebrahimi, et al., 2014), (Badea, 2015). Αυτές οι στρατηγικές χρησιμοποιούνται συνήθως για την καλύτερη διαστασιολόγηση της κινητήριας μηχανής σε συστήματα τριπαραγωγής. Φυσικά, ο τρόπος λειτουργίας εξαρτάται κάθε φορά από το είδος της εξόδου που είναι περισσότερο επιθυμητή. Έτσι προκύπτουν:

- *Λειτουργία με έμφαση στη θερμική έξοδο:* Η μονάδα λειτουργεί με σκοπό να παράγει κάθε στιγμή ακριβώς όση θερμότητα απαιτείται. Εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι περισσότερη του φορτίου πωλείται στο δίκτυο ή αποθηκεύεται, εάν υπολείπεται, αγοράζεται από το δίκτυο ή λαμβάνεται από πιθανό απόθεμα συσκευών αποθήκευσης. Εφόσον οι θερμικές ανάγκες μεταβάλλονται, μπορεί η θερμότητα που ανακτάται σε από την κινητήρια μηχανή κάποιες περιπτώσεις να υπερβαίνει αυτήν που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών. Η πλεονάζουσα θερμότητα μπορεί να αποθηκευτεί σε δεξαμενές θερμικής αποθήκευσης ή να απορριφθεί στο περιβάλλον. Στην πραγματικότητα, κύρια προτεραιότητα είναι η παραγωγή θερμότητας και το ρεύμα θεωρείται παραπροϊόν.
- *Λειτουργία με έμφαση στο βασικό θερμικό φορτίο:* Η μονάδα διαστασιολογείται για να παρέχει την ελάχιστη θερμότητα που απαιτείται (θερμότητα βάσης) και χρησιμοποιούνται συμπληρωματικοί λέβητες για την κάλυψη θερμικών φορτίων αιχμής. Η εγκατεστημένη κινητήρια μονάδα λειτουργεί συνεχώς στο πλήρες φορτίο. Εάν οι απαιτήσεις σε ηλεκτρισμό ξεπεράσουν το ποσό που μπορεί να δώσει η κινητήρια μονάδα, τότε γίνεται αγορά από το δίκτυο.
- *Λειτουργία με έμφαση στην ηλεκτρική έξοδο:* Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι κάθε στιγμή ακριβώς όση απαιτείται. Εάν η έξοδος της μονάδας σε θερμότητα δεν είναι επαρκής, συμπληρώνεται από λέβητες ή ανανεώσιμα συστήματα, π.χ. ηλιακούς συλλέκτες. Εάν είναι μεγαλύτερη, τότε αποθηκεύεται ή απορρίπτεται στο περιβάλλον. Σε περιπτώσεις που οι κινητήρια μηχανή λειτουργεί σε μερικό φορτίο, δεν παράγεται πλεονάζον ρεύμα. Όταν όμως λειτουργεί σε πλήρες φορτίο, λόγω της μεταβολής της ζήτησης, μπορεί παράγεται περισσότερο ρεύμα από αυτό που απαιτείται. Σε αυτή την περίπτωση το επιπλέον ρεύμα πωλείται, αποθηκεύεται ή χρησιμοποιείται σε βοηθητικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης.

- *Λειτουργία με έμφαση στο βασικό ηλεκτρικό φορτίο:* Η μονάδα διαστασιολογείται για την κάλυψη της ελάχιστης ηλεκτρικής ζήτησης, με βάση υπάρχουσες καμπύλες ζήτησης και χρησιμοποιούνται συμπληρωματικά συστήματα παραγωγής ρεύματος ή το δίκτυο για την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων αιχμής. Το απαιτούμενο θερμικό φορτίο στην περίπτωση αυτή μπορεί να καλύπτεται από την κινητήρια μονάδα ή να συμπληρώνεται από επιπρόσθετα συστήματα.
- *Συνδυαστική λειτουργία:* Σε ορισμένες χρονικές περιόδους ακολουθείται λειτουργία με έμφαση στην θερμική έξοδο και σε άλλες με έμφαση στην ηλεκτρική έξοδο. Η επιλογή λαμβάνει υπόψιν διάφορους παράγοντες όπως το είδος της ζήτησης, την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και του καυσίμου τη δεδομένη χρονική στιγμή.
- *Αυτόνομη λειτουργία:* Κάθε χρονική στιγμή το σύστημα τριπαραγωγής καλύπτει κάθε ζήτηση σε θερμότητα και ηλεκτρισμό χωρίς καμία σύνδεση στο δίκτυο. Στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να υπάρχουν συστήματα αποθήκευσης, ώστε εάν κάποια από τις μονάδες σταματήσει να λειτουργεί λόγω βλάβης, οι υπόλοιπες να μπορούν να καλύψουν οποιαδήποτε ζήτηση. Για το λόγο αυτό, συστήματα με αυτόνομη λειτουργία παρουσιάζουν αυξημένο υψηλό αρχικό κόστος.

Στην τριπαραγωγή ενέργειας δεν μπορούν να εφαρμοστούν γενικοί κανόνες όσον αφορά την στρατηγική λειτουργίας που θα ακολουθηθεί. Κάθε σύστημα έχει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, καθώς ο σχεδιασμός του προσαρμόζεται στις ανάγκες του τελικού χρήστη, ο οποίος επηρεάζει τον τρόπο λειτουργίας και αντίστροφα. Για παράδειγμα, η λειτουργία με έμφαση στην θερμική έξοδο θεωρείται καταλληλότερη για τον βιομηχανικό και κτιριακό τομέα, καθώς επιτυγχάνει το μεγαλύτερο ποσοστό χρησιμοποίησης του αρχικού καυσίμου (μεγαλύτερος δείκτης PES, βλ. Πίνακας 3), ενώ στον τομέα κοινής ωφέλειας η στρατηγική λειτουργίας εξαρτάται από το συνολικό φορτίο του δικτύου, την διαθεσιμότητα των εργοστασίων παραγωγής ενέργειας κ. ά.

Συνεπώς, στην λήψη αποφάσεων για τον τρόπο λειτουργίας είναι προφανής η ανάγκη για χρήση συστηματικών διαδικασιών βελτιστοποίησης, βασισμένων στο μαθηματικό προγραμματισμό. Εφαρμόζοντας αλγορίθμους βελτιστοποίησης, το μέγεθος της κινητήριας μηχανής σε λειτουργία με έμφαση στην ηλεκτρική έξοδο μπορεί να είναι μικρότερο από την μέγιστη ζήτηση και τα συστήματα αποθήκευσης ρεύματος να ικανοποιούν την αιχμή ζήτησης. Έτσι, μειώνεται η κατανάλωση καυσίμου και τα επίπεδα ρύπανσης, αλλά το κόστος πιθανά ανεβαίνει. Στην αγορά υπάρχουν διαθέσιμα συστήματα ελέγχου με μικρο-επεξεργαστές που μπορούν να μεταβάλλουν τον τρόπο λειτουργίας του συστήματος ανάλογα με τις εκάστοτε ανάγκες και να παρακολουθούν την απόδοση του συστήματος, καταγράφοντας το προφίλ ζήτησης του χρήστη, την ποσότητα της επιπλέον θερμότητας που απελευθερώνεται ή του επιπλέον ρεύματος που στέλνεται στο δίκτυο κ. ά. Με αυτές τις ενδείξεις ο μικρο-επεξεργαστής καθορίζει τον οικονομικότερο τρόπο λειτουργίας ή ακόμα και το εάν η μονάδα πρέπει

να σταματήσει να λειτουργεί, βοηθά στον προγραμματισμό της συντήρησης και παράγει τεχνικές και οικονομικές αναφορές για την απόδοση του εν λόγω συστήματος.

Κεφάλαιο 5^ο

Ανάλυση των 3-Ε και Εξεργειακή Ανάλυση

Πέραν των στρατηγικών ενεργειακής διαχείρισης, η διαστασιολόγηση των κινητήριων μηχανών και η ποιότητα του συνολικού συστήματος καθορίζονται από πλήθος άλλων παραμέτρων. Πρόκειται δηλαδή για ενεργειακές και εξεργειακές αναλύσεις.

5.1. Ανάλυση των 3-Ε

Η ανάλυση των 3-Ε είναι η μελέτη των ενεργειακών, οικονομικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Energy, Economic, Environmental implications) κάθε εναλλακτικού συστήματος παραγωγής ενέργειας, με σκοπό την σύγκριση του μέσω δεικτών με τα συμβατικά συστήματα. Εδώ ως εναλλακτικό λαμβάνεται το σύστημα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας, ενώ ως συμβατικό αυτό που βασίζεται στο ηλεκτρικό δίκτυο, σε μπόιλερ τροφοδοτούμενα με καύσιμο και σε ηλεκτροκίνητα ψυκτικά συστήματα για την ικανοποίηση ξεχωριστά των αναγκών σε ρεύμα, θέρμανση και ψύξη.

Η ενεργειακή ανάλυση είναι η συνηθέστερη μέθοδος για την εκτίμηση της απόδοσης ενός συνδυαστικού συστήματος, με σκοπό την σύγκριση διαφορετικών συστημάτων μεταξύ τους ή ενός συστήματος με κάποιο πρότυπο ή διαφορετικών προσεγγίσεων λειτουργίας. Ένα συνδυαστικό σύστημα θεωρείται ενεργειακά αποδοτικό, όταν χρησιμοποιείται εκεί που υπάρχει η ζήτηση σε ηλεκτρισμό, θέρμανση και ψύξη σχεδόν όλο το χρόνο και κυρίως αν είναι κατάλληλα διαστασιολογημένο και χρησιμοποιεί οποιαδήποτε απορριπτόμενη θερμότητα ως πηγή για τη λειτουργία. Για τον προσδιορισμό της ενεργειακής απόδοσης, πέραν των κλασικών πλέον δυο πρώτων νόμων της θερμοδυναμικής, έχουν αναπτυχθεί διάφορες μαθηματικές φόρμουλες, όπως ο παράγοντας χρησιμοποίησης ενέργειας (EUF), ο λόγος εξοικονόμησης πρωταρχικής ενέργειας (PESR) κ.ά. Η ενεργειακή απόδοση και των δυο συστημάτων εκτιμάται μέσω του Λόγου Πρωταρχικής Ενέργειας (Primary Energy Ratio, PER), που ορίζεται ως ο λόγος της χρήσιμης, για τον τελικό χρήστη, ενέργειας εξόδου (ηλεκτρική και θερμική), προς την αρχικά καταναλισκόμενη. Για την σύγκριση των συστημάτων ως προς την ικανότητα ικανοποίησης του τελικού χρήστη σε όρους κερδοφορίας, ορίζεται ο λόγος Εξοικονόμησης Πρωταρχικής Ενέργειας (Primary Energy Savings, PES), ως ο λόγος της διαφοράς των καταναλώσεων πρωταρχικής ενέργειας στα δυο συστήματα προς την καταναλισκόμενη στο συμβατικό σύστημα. Άλλες παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στην ενεργειακή-τεχνολογική μελέτη είναι ο συνολικός βαθμός απόδοσης, ο λόγος ισχύος προς θερμότητα, η λειτουργία σε μερικά φορτία και άλλα. Ανάλυση ορισμένων εκτίθενται στον Πίνακα 3.

Σχετικά με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο, μια απλοποιημένη προσέγγιση βασίζεται στην εκτίμηση των ισοδύναμων εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα των δύο συστημάτων (Trigeneration CO₂ Emission Reduction, TCO₂ER). Έτσι ορίζεται ο λόγος της διαφοράς των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα στα δυο συστήματα προς τις εκπομπές του συμβατικού. Πρέπει να τονιστεί ότι στην περίπτωση χρήσης βιοκαυσίμων ή βιομάζας από κάποιο σύστημα, το αντίστοιχο ποσό διοξειδίου του άνθρακα στην εξίσωση ισούται με μηδέν. Άλλα περιβαλλοντικά κριτήρια είναι οι εκπομπές μονοξειδίου του άνθρακα και οξειδίων του αζώτου σε kg/kWh και τα επίπεδα θορύβου.

Οι οικονομικές παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη για την εγκατάσταση και λειτουργία τέτοιων συστημάτων είναι ίδιες με αυτές κάθε επενδυτικού πλάνου, όπως η περίοδος αποπληρωμής, το κόστος συντήρησης και λειτουργίας, η διάρκεια ζωής, η καθαρή παρούσα αξία (NPV) κ.τ.λ. Πιο συχνά, ως ένδειξη της οικονομικότητας της επένδυσης ενός εναλλακτικού συστήματος σε σχέση με ένα συμβατικό χρησιμοποιείται κυρίως ο δείκτης της Απλής Περιόδου Αποπληρωμής (Simple Pay-Back period, SPB), που εκτιμά τα χρόνια που απαιτούνται για την ανάκτηση του υψηλού αρχικού κεφαλαίου του πρώτου σε σχέση με το δεύτερο.

Οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζονται σημαντικά από παραμέτρους ενεργειακής απόδοσης, όπως ο βαθμός απόδοσης (η) και ο συντελεστής ενεργειακής απόδοσης (COP), και από το χρησιμοποιούμενο καύσιμο. Στην παραπάνω ανάλυση κάποιες φορές γίνεται και μελέτη από κοινωνικής σκοπιάς, που περιλαμβάνει το αποτύπωμα του όλου συστήματος σε επιφάνεια (m²/kW), την ευκολία πρόσβασης και συντήρησης κ. ά. (Ebrahimi, et al., 2012), (Angrisani, et al., 2013), (Cho, et al., 2014), (Ebrahimi, et al., 2014).

5.2. Εξεργειακή ανάλυση

Η εξεργειακή ανάλυση προσφέρει όχι μόνο ένα μέτρο της ποσότητας ενέργειας που χρησιμοποιείται, αλλά και της ποιότητας της ενέργειας που παρέχεται και καταναλώνεται και την ποσότητα της διαθέσιμης ενέργειας που καταστρέφεται μέσα στο σύστημα. Θεωρείται ότι υπερτερεί της ενεργειακής ανάλυσης, γιατί δίνει το πραγματικό μέγεθος των απωλειών στη θέση που συμβαίνουν, μαζί με τις αιτίες τους, βοηθώντας έτσι στην βελτίωση όλου του συστήματος συνολικά και κάθε υποσυστήματος ξεχωριστά. Κυρίως χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της εξεργειακής απόδοσης ενός συστήματος και την σύγκριση με την ενεργειακή ή εξεργειακή απόδοση ενός άλλου, όπως και για τον προσδιορισμό της συνεισφοράς του κάθε υποσυστήματος στην συνολική καταστροφή εξέργειας. Η εξέργεια θεωρείται ότι μπορεί να χωριστεί σε τέσσερις παραμέτρους: τη φυσική, τη χημική, τη κινητική και τη δυναμική. Η φυσική εξέργεια ορίζεται ως το μέγιστο έργο που μπορεί να ληφθεί καθώς ένα σύστημα επιδρά με ένα περιβάλλον αναφοράς σε κατάσταση ισορροπίας. Η χημική εξέργεια σχετίζεται με την διαφοροποίηση της χημικής σύνθεσης ενός συστήματος από τη χημική ισορροπία ενός περιβάλλοντος αναφοράς και είναι σημαντική για την αξιολόγηση της καύσης. Οι δύο τελευταίες παράμετροι συνήθως αμελούνται, καθώς οι αλλαγές σε ταχύτητα και υπόμετρο είναι αμελητέες. Στην

βιβλιογραφία αναφέρεται ότι ένα καλά σχεδιασμένο σύστημα έχει σημαντικά λιγότερη καταστροφή εξέργειας και παρόλο που η εξεργειακή απόδοση ποικίλλει μεταξύ των συστημάτων, υπάρχουν κάποιες θεωρήσεις που θεωρούνται κομβικές. Για παράδειγμα, θεωρείται ότι ένα σύστημα που χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό και ατμό έχει αρνητικότερη επιρροή στην απόδοση και επομένως απαιτεί τρόπους για αποδοτικότερη μεταφορά θερμότητας/μάζας για την μείωση της καταστροφής εξέργειας, ενώ ένα σύστημα συμπαραγωγής που χρησιμοποιείται κυρίως για ψύξη είναι αποδοτικότερο εξεργειακά, από ένα τριπαραγωγής. Σε περιπτώσεις που η παραγωγή θέρμανσης και ψύξης γίνεται εξ' ίσου, ισχύει το αντίθετο. Στην ποσότητα της εξέργειας που καταστρέφεται παίζει ρόλο και ο επιλεγθείς θερμοδυναμικός κύκλος και ο τρόπος λειτουργίας του συστήματος. Αυτού του είδους η ανάλυση έχει προσελκύσει το ενδιαφέρον, γι' αυτό και διάφορες φόρμουλες, μοντέλα και μέθοδοι αναπτύσσονται και χρησιμοποιούνται. Στον Πίνακα 3 παρατίθενται κάποια από τα κριτήρια των εξεργειακών αναλύσεων (Ahmadi, et al., 2012), (Cho, et al., 2014).

Πίνακας 3: Μερικά από τα κριτήρια που χρησιμοποιούνται στην Ανάλυση 3-Ε και στην Εξεργειακή Ανάλυση

Όνομα	Τύπος	Επεξήγηση
Primary energy savings ratio	$PESR = \frac{F^{HVAC} - F}{F^{HVAC}}$	Για την εκτίμηση της εξοικονόμησης πρωταρχικής ενέργειας που επιτυγχάνεται με το CCHP σε σχέση με το σύστημα αναφοράς
Primary energy savings	$PES = \frac{EP_{CS} - EP_{AS}}{EP_{CS}}$	Για την σύγκριση της κερδοφορίας ενός εναλλακτικού συστήματος σε σχέση με κάποιο συμβατικό
Trigeneration primary energy saving	$TPES = \frac{F^{SP} - F_Z}{F^{SP}} = 1 - \frac{F_Z}{W_z/\eta_e^{SP} + Q_z/\eta_t^{SP} + R_z/\eta_c^{SP}}$	Βασισμένο σε μια μέθοδο που «συνθετικά περιγράφει τα χαρακτηριστικά εξοικονόμησης ενέργειας ενός συστήματος ακόμα και χωρίς θεώρηση των λεπτομερειών της δομής του»
Primary Resource Factor	PRF	Ορίστηκε από την EuroHeat&Power και αντιπροσωπεύει το περιεχόμενο των ορυκτών καυσίμων ανά μονάδα ενέργειας που παρέχεται στο σημείο χρήσης, με βάση κατώτερη θερμογόνο δύναμη
Brake specific fuel consumption	BSFC	Ορίζεται ως ο ρυθμός της κατανάλωσης καυσίμου ανά kW χρήσιμη ενέργειας εξόδου
Primary energy savings	$1 - \frac{1}{\frac{\eta_{el}^{eq}}{\eta_{el,s}} + \frac{\eta_{th}^{eq}}{\eta_{th,s}}}$	Εισάχθηκε από την Επιτροπή Ευρωπαϊκής Ένωσης για την εκτίμηση της ενεργειακής απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής
Fuel energy saving ratio	$FESR = \frac{F^{SP} - F_Y}{F^{SP}} = 1 - \frac{F_Y}{W_y/\eta_e^{SP} + Q_y/\eta_t^{SP}}$	Για την εκτίμηση της εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμου που επιτυγχάνεται σε συνδυαστικό σύστημα σε σχέση με την ξεχωριστή παραγωγή ισχύος, θέρμανσης...
Energy utilization factor	$EUF = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}_{steam} + \dot{E}_{ht} + \dot{E}_{cw}}{\dot{m}_{fuel} \cdot LHV_{fuel}}$	Ορίζεται ως ο συνδυασμός όλων των εξόδων που παράγονται από ένα σύστημα συμπαραγωγής για την ικανοποίηση των οιονδήποτε αναγκών
Efficiency	$\eta_{trigen} = \frac{E_{SH} + E_{SC} + E_{DHW} + E_{NET_DEMAND} + E_{EXPORT}}{PE_{trigen}}$	Υπολογίζει την απόδοση του μικρο-τριπαραγωγού συστήματος

‘Straight heat input or output’ exergy	$\eta_{exergy} = \frac{EX_e + EX_h + EX_c}{EX_f}$	Υπολογίζει τις αποδοτικότητες των συστημάτων CCHP και HVAC λαμβάνοντας υπόψη τις διαφορετικές θερμοδυναμικές τιμές των διαφόρων μορφών ενέργειας και τις ποσότητες που χρησιμοποιούνται
Exergy efficiency	$\psi_{tri} = \frac{\dot{W}_{net,GT} + \dot{W}_{net,ST} + \dot{E}X_{Heating} + \dot{E}X_{Cooling} + \dot{E}X_{Hotwater}}{\dot{E}X_f}$	Ορίζεται ως η παραγόμενη στην έξοδο εξέργεια διαιρούμενη με την εξέργεια εισόδου για όλο το σύστημα πολύ-παραγωγής
Exergy efficiency of trigeneration	$\eta_{ex,tri} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{m}_{hp} \cdot (ex_{hp,1} - ex_{hp,2}) + \dot{m}_{ev} \cdot (ex_{ev,1} - ex_{ev,2})}{\dot{E}X_{coll}}$	Ορίζεται ως η παραγόμενη στην έξοδο εξέργεια διαιρούμενη με την εξέργεια εισόδου για όλο το σύστημα τριπαραγωγής
CER	$CER = \frac{CE^{HVAC} - CE}{CE^{HVAC}}$	Ο λόγος των εκπομπών άνθρακα ενός συστήματος CCHP σε σχέση με ένα σύστημα HVAC
Trigeneration CO ₂ emission reduction	$TCO_2ER = \frac{(m_{CO_2})_{SP} - (m_{CO_2})_Z}{(m_{CO_2})_{SP}}$	Εισάχθηκε από τους Chicco και Mancarella ως δείκτης της μείωσης των εκπομπών CO ₂ σε σχέση με τα συμβατικές μεμονωμένες τεχνολογίες
Sustainability index	$SI = \frac{1}{D_p}$	Το αντίστροφο του λόγου της καταστροφής εξέργειας σε σχέση με την εξέργεια εισόδου που χρησιμοποιείται για τη συσχέτιση της εξέργειας με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο
Electric-to-gas cost ratio	$EGCR$	Αδιάστατη αναλογία για την θεώρηση διαφορετικών σεναρίων κόστους ενέργειας. Όταν για το δεδομένο σύστημα η τιμή προκύπτει μεγαλύτερη της οριακής, η επιχειρησιακή στρατηγική του μικρο-τριπαραγωγού συστήματος είναι ανεξάρτητη του κόστους ενέργειας
Thermal-to-electric ratio	$TER = \frac{Q_{heat}}{P_{AC}}$	Ο λόγος της θερμικής ισχύος προς την ηλεκτρική ισχύ εναλλασσόμενου ρεύματος
Specific gross margin	smg	Μέγεθος οριζόμενο διαφορετικά τόσο ανά μονάδα ψυκτικής και θερμικής ενέργειας, όσο και σε αποκεντρωμένα μικρο-τριπαραγωγά συστήματα και συστήματα με θερμοκίνητες μονάδες που λειτουργούν με τηλεθέρμανση
Total cost rate	$C_{tot} = \dot{C}_f + \dot{C}_{env} + \sum_k Z_k$	Περιλαμβάνει κόστη καυσίμου, περιβαλλοντικά κόστη (εκπομπών) και αρχικά κόστη για κάθε συνιστώσα
Simple Pay-Back Period	$SPB = EC / \sum_{k=1}^n F_k$	Απλοποιημένη προσέγγιση για την εκτίμηση της οικονομικής απόδοσης ενός εναλλακτικού συστήματος και ενός αναφοράς: αριθμός των απαιτούμενων χρόνων για την απόσβεση του αρχικού κόστους του εναλλακτικού συστήματος σε σχέση με το αναφοράς

Πηγές: (Kong, et al., 2009), (Aprile, et al., 2009), (Wang, et al., 2011), (Borga, et al., 2013), (Cho, et al., 2014), (Angrisani, et al., 2014), (Wang, et al., 2014)

5.3. Πολύ-κριτηριακή ανάλυση

Λόγω των πολλών πτυχών που έχει κάθε ανάλυση, βελτιστοποιώντας την μία μπορεί να μειωθούν τα πλεονεκτήματα άλλων. Ειδικά όταν λαμβάνεται υπόψιν ο περιβαλλοντικός και κοινωνικός αντίκτυπος, η εύρεση του βέλτιστου συστήματος που θα βρίσκει σύμφωνες όλες τις πλευρές είναι ανέφικτη. Εφόσον κανένα κριτήριο δεν θα πρέπει να παραληφθεί ή να αμεληθεί, η ανάλυση στην οποία υπόκειται κάθε σύστημα που μελετάται ή/και κατασκευάζεται πειραματικά, γίνεται ολοένα και συνθετότερη. Πέραν της ανάλυσης 3-E και της εξεργειακής ανάλυσης, πλέον χρησιμοποιούνται κριτήρια από διαφορετικές σκοπιές ανάλυσης, αλλά και δημιουργούνται μέθοδοι που εξ' ορισμού λαμβάνουν υπόψιν τους ποικίλους παραμέτρους. Για παράδειγμα, η θερμο-οικονομική, συνδυάζει το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής με οικονομικά κριτήρια έχοντας ως σκοπό την επίτευξη καλύτερης διαχείρισης παραγωγής με οικονομικά αποδοτικότερη λειτουργία. Η μέθοδος αυτή λαμβάνει την εξέργεια ως την επαρκέστερη θερμοδυναμική ιδιότητα που μπορεί να συσχετιστεί με το κόστος, καθώς αυτή περιέχει στοιχεία από το δεύτερο νόμο θερμοδυναμικής και συμπεριλαμβάνει την έννοια της ποιότητας ενέργειας. Οι πιο σύγχρονες τάσεις της θερμο-οικονομικής περιλαμβάνουν μεθόδους κοστολόγησης της ειδικής εξέργειας, μεθόδους μέσου κόστους και άλλα. Για την ευκολότερη χρήση και κατανόηση των παραπάνω, αναπτύχθηκε και μαθηματική φόρμουλα γραμμικού μοντέλου που λαμβάνει υπόψιν όλες αυτές τις μεθόδους (Deng, et al., 2008). Διάφορες μελέτες και έρευνες που έχουν γίνει σε πειραματικά κυρίως συστήματα εμφανίζονται στο παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4: Μελέτες που έχουν ασχοληθεί με αναλύσεις συστημάτων τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας ή/και ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων

Συγγραφείς	Είδος Έρευνας	Ανάλυση 3-E	Εξεργειακή Ανάλυση	Άλλες Αναλύσεις	Χρησιμοποιούμενοι Δείκτες/Μοντέλα
(Kong, et al., 2005)	Πειραματική Έρευνα	✓	-	-	PER
(Huangfu, et al., 2006)	Πειραματική Έρευνα	✓	-	-	PER
(Lin, et al., 2007)	Πειραματική Έρευνα /Κατασκευή Μοντέλου	✓	-	-	TCO ₂ ER, Μέτρηση εκπομπών
(Deng, et al., 2008)	Μελέτη Μοντέλου/ Μεθόδου Ανάλυσης	-	✓	✓	Ψ _{τρι} , Ανάπτυξη θερμο-οικονομικού μοντέλου, Ανάλυση κόστους εξέργειας
(Houwing, et al., 2008)	Ανάλυση/ Μελέτη Περίπτωσης	-	-	✓	Ανάλυση τεχνολογικών, περιβαλλοντικών, θεσμικών αβεβαιοτήτων για διανεμημένα συστήματα
(Li, et al., 2009)	Πειραματική Έρευνα	-	-	✓	Μέθοδος πεπερασμένων διαφορών για εξέταση συμπεριφοράς θερμοκίνητου ψύκτη
(Kong, et al., 2009)	Πειραματική Έρευνα	-	-	✓	Ανάπτυξη μη γραμμικού προγραμματιστικού μοντέλου

					βελτιστοποίησης της λειτουργίας για ελαχιστοποίηση κόστους
(Kong, et al., 2010)	Πειραματική Έρευνα	✓	-	-	PER, Υπολογισμός περιόδου απόσβεσης
(Angrisani, et al., 2010)	Πειραματική Έρευνα /Κατασκευή Μοντέλου	✓	-	-	TCO ₂ ER, PES
(Mago, et al., 2010)	Πειραματική Έρευνα	✓	-	✓	Primary energy consumption, CER, Σύγκριση διαφορετικών στρατηγικών λειτουργίας
(Khatri, et al., 2010)	Πειραματική Έρευνα /Κατασκευή Μοντέλου	✓	-	-	FESR, TCO ₂ ER, Μέτρηση εκπομπών
(Arosio, et al., 2011)	Ανάπτυξη Μοντέλου	-	-	✓	Ανάπτυξη γραμμικού προγραμματιστικού μοντέλου βελτιστοποίησης της πολιτικής λειτουργίας
(Ebrahimi, et al., 2012)	Πειραματική Έρευνα	✓	✓	-	Παραμετρική ανάλυση, FESR
(Angrisani, et al., 2012)	Πειραματική Έρευνα /Κατασκευή Μοντέλου	✓	-	-	PER, Ισοδύναμες εκπομπές CO ₂ , Κόστος Λειτουργίας
(Borga, et al., 2013)	Μελέτη Μοντέλου	✓	-	✓	ημtrigen, PES, TCO ₂ ER, NPV, Ανάλυση ευαισθησίας
(Goyal, et al., 2014)	Μελέτη/Κατασκευή Μοντέλου	✓	✓	-	SFC, TCO ₂ ER, Μέτρηση εκπομπών
(Wu, et al., 2014)	Πειραματική Έρευνα/Προσομοίωση	✓	-	-	PER
(Angrisani, et al., 2014)	Μελέτη/Κατασκευή Μοντέλου	✓	-	✓	FESR, PER, PES, SPB, TCO ₂ ER, Ανάλυση ευαισθησίας, Θερμοοικονομική ανάλυση
(Wang, et al., 2014)	Μελέτη Μοντέλου	✓	-	✓	TER, Ισολογισμοί ενέργειας/μάζας, Στοιχειομετρία καύσης, Ανάλυση ευαισθησίας, Σύγκριση διαφορετικών διαμορφώσεων

Κεφάλαιο 6^ο

Πειραματικά συστήματα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας

Παρ' όλο που τα συστήματα ειδικά κάτω των 15-20kW εμφανίζονται αρκετά υποσχόμενα, τα υπάρχοντα στην αγορά είναι λίγα, και μάλιστα χαμηλής δυναμικότητας (Aprile, et al., 2009). Στην μικρο-τριπαραγωγή, η περαιτέρω βελτίωση και μελέτη είναι αναγκαία καθώς:

- Τα φορτία θέρμανσης, ψύξης και ηλεκτρικής ενέργειας μεταβάλλονται με το χρόνο και θα πρέπει να εκτιμώνται για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή (π.χ. οικιακά, ξενοδοχείο, γραφείο)
- Λόγω τεχνικών και οικονομικών λόγων, η μικρο-τριπαραγωγή σήμερα δεν μπορεί να καλύψει τα φορτία αιχμής και ταυτόχρονα να είναι οικονομικά βέλτιστη
- Το αρχικό κόστος της εγκατάστασης είναι αρκετά μεγάλο, καθώς εκτός των βασικών υποσυστημάτων περιλαμβάνει στοιχεία, όπως εφεδρικό ψύκτη και σύστημα θέρμανσης
- Διαφορές στην τιμολόγηση ηλεκτρικής ενέργειας συνεπάγονται ότι, για την ορθή αξιολόγηση του οικονομικού οφέλους, πρέπει να καθοριστούν όχι μόνο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα αλλά και οι εξαγωγές και εισαγωγές ενέργειας του δικτύου στο οποίο συνδέεται
- Ορισμένα κίνητρα έχουν ανατεθεί σύμφωνα με πολύπλοκους κανόνες, όπως τα 'λευκά πιστοποιητικά'
- Οι μελλοντικές τιμές της ενέργειας είναι αβέβαιες και η ευαισθησία αυτών των συστημάτων στις τιμές της ενέργειας είναι μεγάλη
- Οι εξωτερικές συνθήκες περιβάλλοντος έχουν αντίκτυπο στην λειτουργία των υποσυστημάτων
- Η ασυνεχής λειτουργία της μονάδας και το μεταβατικό στάδιο κατά την εκκίνηση έχουν αντίκτυπο στην καθαρή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και θερμότητας
- Πρέπει να εξεταστεί η επίδραση των θερμικών απωλειών από τους αγωγούς διανομής και θερμική αποθήκευση.

Επομένως, για την ανατροπή του υπάρχοντος σκηνικού, τα ενεργειακά και οικονομικά οφέλη ερευνώνται λεπτομερώς από πλήθος επιστημόνων και ερευνητών, κυρίως με τη βοήθεια προσομοιώσεων και μοντέλων. Στον παρακάτω πίνακα εμφανίζονται μερικά συστήματα που έχουν μελετηθεί ή/και κατασκευαστεί είτε για ερευνητικούς σκοπούς είτε ως πιλοτικές μονάδες σε διάφορες εφαρμογές. Εμφανής είναι η χρήση των μηχανών εσωτερικής καύσης αερίου ως κινητήριων μονάδων. Όσον αφορά στις μεθόδους ανάλυσης και μελέτης, αυτές παρουσιάζονται σε επόμενη ενότητα.

Πίνακας 5: Συγγραφείς που μελέτησαν ή/και κατασκεύασαν πειραματικές διατάξεις

Συγγραφείς	Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία	Καύσιμο	Εργαζόμενο Ζεύγος	Θερμοκρασία Λειτουργίας	Ηλεκτρική Ισχύς	Ψυκτική Ισχύς	Θερμική Ισχύς	COP	Εφαρμογές
(Kong, et al., 2005)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης/Ψύκτης Προσρόφησης	Φ. Αέριο ή LPG	Silica gel/Νερό	Ζεστό νερό 60-95°C	12 kW	9 kW	28 kW	>0.3	Προσομοίωση HVAC
(Huangfu, et al., 2006)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης/Ψύκτης Προσρόφησης	Αέριο ή LPG	Silica gel/Νερό	Ζεστό νερό 65°C	12 kW	9 kW	28.1 kW	0.4	Κατοικίες, Μικρά εμπορικά κτήρια (MBCHP)
(Lin, et al., 2007)	Μηχανή Diesel/Ψύκτης Απορρόφησης	Αέριο	Νερό/NH ₃	Καυσαέριο 227-245°C	9.5 kW	7.4 W	11.34 kW	0.035	Προσομοίωση κατοικίας
(Henning, et al., 2007)	Μονάδα Συμπαραγωγής/Σύστημα Αφύγρανσης/Ψύκτης Συμπίεσης Ατμού	-	Silica gel/Αέρας	Ζεστό νερό 85 °C	9.36 kW	19.1 kW	21.85 kW	1.03	Πίλοτικό σύστημα σε κτήριο
(Deng, et al., 2008)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης/Ψύκτης Προσρόφησης	Αέριο	Silica gel/Νερό	Ζεστό νερό 60-95 °C	12 kW	9 kW	28 kW	0.3 – 0.4	Ανάπτυξη μοντέλου θερμο-οικονομικής
(Kong, et al., 2009)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης/Ψύκτης Προσρόφησης	Φυσικό Αέριο	-	Ζεστό Νερό 60-95 °C	12 kW	10 kW	-	0.3 – 0.4	Ανάπτυξη μεθόδου σχεδιασμού βέλτιστης λειτουργίας
(Angrisani, et al., 2010)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης/Σύστημα Αφύγρανσης/Ηλ. Ψύκτης/Boiler	Φυσικό Αέριο	Silica gel/Νερό	-	6 kW	-	11.7 kW	-	Σύγκριση με συμβατικό HVAC για κτήριο
(Kong, et al., 2010)	Μηχανή Diesel/Ψύκτης Προσρόφησης	Φυσικό Αέριο	Silica gel/Νερό	Ζεστό νερό 60-95 °C	12 kW	9 kW	28 kW	0.4	Κατοικίες, Μικρές εμπορικές εφαρμογές

(Khatri, et al., 2010)	Μηχανή Diesel/Ψύκτης Απορρόφησης Ατμού	Αέριο	Νερό/NH ₃	Καυσαέριο 115 °C	3.7 kW	40.5 W	> 174.2 W	0.2325	Προσομοίωση κατοικίας
(Angrisani, et al., 2012)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης/Ψύκτης Απορρόφησης/Θερμική Αποθήκευση	Φυσικό Αέριο	Νερό/LiCl	Ζεστό Νερό από δεξαμενή αποθήκευσης και χρήση boiler	6 kW	10 kW	11.3 kW	<0.7	Προσομοίωση κατοικίας
(Borga, et al., 2013)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης/Ψύκτης Απορρόφησης/Θερμική Αποθήκευση	LPG	-	Ζεστό Νερό από δεξαμενή αποθήκευσης και χρήση boiler	5.5 kW	10 kW	12.5 kW	-	Προσομοίωση κατοικίας
(Goyal, et al., 2014)	Μηχανή Diesel/Ψύκτης Απορρόφησης Ατμού	Αέριο	Νερό/NH ₃ +H	Καυσαέριο 110°C	3.75 kW	0.24 kW	4.145 kW	0.2115	Ψύξη χώρου
(Wu, et al., 2014)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης/Ψύκτης Προσρόφησης/Ελεγκτικής Διαχείρισης Θερμότητας	-	Silica gel/Νερό	Ζεστό Νερό από δεξαμενή αποθήκευσης 50°C	16 kW	6.5 kW	17.7 kW	<0.4	-
(Angrisani, et al., 2014)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης/Σύστημα Αφύγρανσης/Ηλ. Ψύκτης/Θερμική Αποθήκευση	Φυσικό Αέριο	Silica gel/Αέρας	Ζεστός Αέρας από δεξαμενή αποθήκευσης και χρήση boiler	5.6 kW	8.50 kW	11.7 kW	-	Κλιματισμός αίθουσας διδασκαλίας, ZNX σε κατοικία
(Wang, et al., 2014)	Κυψέλη Καυσίμου DFFC/Boiler/ Ψύκτης Απορρόφησης Διπλής Δράσης	Μεθάνιο	LiBr/Νερό	Καυσαέρια 124°C	0.92 kW	5 kW	5 kW	-	Κλιματισμός για οικιακή εφαρμογή

Κεφάλαιο 7^ο

Συστήματα με Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

Ως εξέλιξη των τριπαραγωγών συστημάτων μικρο-κλίμακας που αποτελούνται από τα παραπάνω αναφερόμενα μέρη, παρουσιάζονται υβριδικά συστήματα που αποτελούνται από ή/και περιλαμβάνουν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ΑΠΕ), σε μια προσπάθεια αύξησης της χρήσης φιλικότερων προς το περιβάλλον τεχνολογιών.

Η γενική αρχιτεκτονική ενός συστήματος τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας που βασίζεται σε ανανεώσιμες πηγές μπορεί να περιλαμβάνει:

- Μονάδα παραγωγής ισχύος με χρήση ανανεώσιμων καυσίμων (βιομάζας)
- Βοηθητικές μονάδες θέρμανσης, όπως ηλιακούς συλλέκτες και εφεδρικές αντιστάσεις
- Φωτοβολταϊκά πάνελ
- Μονάδες θερμικής ή ηλεκτρικής αποθήκευσης
- Μηχανοκίνητο ή θερμοκίνητο σύστημα κλιματισμού/ψύξης
- Άλλα

Οι μηχανές Stirling και οι μονάδες που στηρίζονται στον κύκλο Rankine (ατμοστρόβιλοι) θεωρούνται οι προτιμότερες κινητήριες μηχανές για συστήματα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας που συνδυάζονται με ΑΠΕ, χάρη στην τεχνική ευελιξία, τις χαμηλές εκπομπές και τις αποδεκτές αποδόσεις τους. Παρόλα αυτά, το υψηλό αρχικό κόστος (πάνω από 60% μεγαλύτερο από ενός συστήματος ORC) και η ανάγκη για θερμότητα υψηλής ποιότητας των μηχανών Stirling, κάνει την χρήση τους αντιοικονομική (Βλ. και § 2.2). Ως αποτέλεσμα, ότι ο κύκλος Rankine, και ειδικότερα ο οργανικός κύκλος Rankine (ORC), έχει τραβήξει το ενδιαφέρον. Χάριν πληρότητας σημειώνεται ότι οι μονάδες οργανικού κύκλου Rankine χρησιμοποιούν οργανικά εργαζόμενα μέσα με πολύ καλές θερμοδυναμικές ιδιότητες αντί νερού και ως αποτέλεσμα λειτουργούν σε χαμηλότερες θερμοκρασίες και πιέσεις, απλοποιώντας την κατασκευή, αυξάνοντας την αντοχή της και μειώνοντας τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης (Dong, et al., 2009).

7.1. Γενικά περί ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Οι ΑΠΕ αποτελούν «ενέργειες που λαμβάνονται από ροές που υπάρχουν στο περιβάλλον και έχουν μια συνεχή και επαναλαμβανόμενη φύση». Εν ολίγοις, οι ΑΠΕ αναφέρονται σε μορφές ενέργειας που προκύπτουν από φυσικές ανανεώσιμες διαδικασίες. Συγκεκριμένα είναι, κατά μεγαλύτερο ποσοστό, η εισερχόμενη στην Γη ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο στην μορφή ηλιακής ακτινοβολίας, η γεωθερμία

από το εσωτερικό της Γης και η παλίρροια σαν αποτέλεσμα της βαρύτητας και της πλανητικής κίνησης.

Ο Ήλιος εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ευρέως φάσματος συχνοτήτων. Η Γη απορροφά ακτινοβολία μικρού μήκους κύματος, και άρα υψηλότερου ενεργειακού επιπέδου. Αυτή μπορεί να αξιοποιηθεί με διάφορους τρόπους, δηλαδή:

- *Αισθητή θερμότητα:* Αξιοποιείται από ηλιακούς θερμοσίφωνες, ηλιακά κτίρια, ηλιακά στεγνωτήρια και συναντάται ως θερμική ενέργεια θαλασσών
- *Λανθάνουσα θερμότητα και δυναμική ενέργεια:* Αξιοποιείται ως υδροηλεκτρική ενέργεια
- *Κινητική ενέργεια:* Αξιοποιείται από ανεμογεννήτριες ως αιολική ενέργεια και από συσκευές αξιοποίησης της ενέργειας των κυμάτων
- *Διεργασίες φωτονίων:* Χρησιμοποιείται ως βιομάζα ή βιοκαύσιμα και αξιοποιείται από Φωτοβολταϊκά

Η γεωθερμία είναι μια πηγή ενέργειας που προέρχεται από τη θερμότητα που βρίσκεται αρκετά κάτω από την επιφάνεια της Γης. Αυτή μπορεί να παράγει ζεστό νερό και ατμό από τα πετρώματα που έχουν θερμανθεί από το μάγμα. Για την αξιοποίηση αυτής της ενέργειας γίνονται γεωτρήσεις στα πετρώματα και μέσω αυτών αναβλύζει ο ατμός ή το ζεστό νερό. Πρόκειται για καθαρή και ασφαλή πηγή ενέργειας και σε ορισμένα μέρη του κόσμου αποτελεί άριστο πόρο, όπως στην Ισλανδία, όπου από την γεωθερμία καλύπτεται το $\frac{1}{4}$ των αναγκών σε ηλεκτρισμό. Σε άλλα μέρη υπάρχουν οι υπόγειες θερμές πηγές σε τέτοιο βάθος κάτω από την επιφάνεια της Γης που δεν μπορούν αξιοποιηθούν.

Η παλίρροια είναι αποτέλεσμα κυρίως της επίδρασης της Σελήνης στην κίνηση των νερών των ωκεανών. Η βαρυτική έλξη της Σελήνης και λιγότερο του Ηλίου, καθώς και η περιστροφή αυτών, προκαλεί την περιοδική άνοδο και κάθοδο της στάθμης των νερών. Σαν αποτέλεσμα εμφανίζεται μια ροπή που δρα ως τροχοπέδη στην περιστροφή της Γης, παράγοντας ένα σχετικά μικρό ποσό ενέργειας που διαχέεται κυρίως μέσα στα νερά των ωκεανών.

Παρακάτω αναλύονται οι ανανεώσιμες πηγές και οι τεχνολογίες αξιοποίησης τους, που ενδιαφέρουν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής.

7.2. Φωτοβολταϊκά

Τα φωτοβολταϊκά είναι η επικρατέστερη τεχνολογία μεταξύ αυτών που εκμεταλλεύονται την ηλιακή ενέργεια. Ένα φωτοβολταϊκό πάνελ παράγει ηλεκτρικό ρεύμα εκμεταλλευόμενο το φωτοβολταϊκό φαινόμενο, δηλαδή την πόλωση των

ηλεκτρικών φορτίων που συμβαίνει σε συγκεκριμένα υλικά όταν αυτά εκτεθούν σε φωτεινή ακτινοβολία. Έχουν αποδειχθεί ιδιαίτερος κατάλληλα σε κτηριακές εφαρμογές για πολλούς λόγους, όπως:

- Σε αρκετές τοποθεσίες ανά τον κόσμο έχει επέλθει ισοτιμία δικτύου (grid parity). Με τον όρο αυτό δηλώνεται η χρονική στιγμή στην οποία μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία παράγει ηλεκτρική ενέργεια με το ίδιο κόστος για τους φορολογούμενους όπως και οι παραδοσιακές τεχνολογίες, δηλαδή όταν το κόστος παραγωγής είναι ίδιο με την αγορά του ρεύματος από το δίκτυο.
- Η τάση της παραγόμενης ενέργειας ομοιάζει με την τάση ζήτησης του κτηρίου
- Δεν υπάρχει ανάγκη επιπρόσθετων επιφανειών σε υφιστάμενο κτήριο
- Έχει ως αποτέλεσμα εμμέσως την διατήρηση της ενέργειας λόγω της συμμετοχής των καταναλωτών στην παροχή ρεύματος
- Η λειτουργία του συστήματος είναι ολοσχερώς αθόρυβη
- Έχουν σχεδόν μηδενικές απαιτήσεις συντήρησης και μεγάλη διάρκεια ζωής (20-30 χρόνια)
- Μέσω αναπτυξιακών και επενδυτικών νόμων ο ιδιώτης πουλά την πλεονάζουσα ενέργεια της εγκατάστασης ιδιόχρησης σε ανταγωνιστική τιμή, με επιπλέον όφελος φορ ελάφρυνσης

Παρά τα παραπάνω, το υψηλό τους κόστος περιορίζει την εκτεταμένη εφαρμογή τους στον οικιακό και κτηριακό τομέα (Yagoub, et al., 2006), (Brandoni, et al., 2014).

7.3. Θερμικά ηλιακά συστήματα

Οι ηλιακοί θερμοσίφωνες απορροφούν την ηλιακή ακτινοβολία και την μετατρέπουν σε θερμότητα. Αυτή η θερμότητα μεταφέρεται σε κάποιο ρευστό (νερό, αέρας, κ.ά.) το οποίο ρέει διαμέσου του συλλέκτη. Ουσιαστικά κατά την λειτουργία τους γίνεται εκμετάλλευση δυο φυσικών φαινομένων, της αρχής θερμοσίφωνα που εξασφαλίζει φυσική κυκλοφορία χωρίς μηχανικά μέρη και του φαινομένου του θερμοκηπίου που αναπτύσσεται στο συλλέκτη για τη θέρμανση του ρευστού. Είναι η απλούστερη και γνωστότερη ηλιακή συσκευή που χρησιμοποιείται για την παραγωγή ζεστού νερού χρήσης σε νοικοκυριά. Υπάρχουν διάφοροι τύποι ηλιακών συλλεκτών, όπως ο επίπεδος, ο συγκεντρωτικός και ο συλλέκτης κενού. Παράλληλα με την ηλιακή ενέργεια μπορούν ταυτόχρονα να εκμεταλλεύονται και άλλες ενεργειακές πηγές. Έτσι χωρίζονται σε:

- Διπλής ενέργειας: Ο θερμοσίφωνας λειτουργεί εκμεταλλεύομενος είτε την ηλιακή ενέργεια είτε το ηλεκτρικό ρεύμα (π.χ. κατά την διάρκεια συννεφιάς οπότε η ηλιακή ενέργεια δεν είναι αρκετή για να ζεστάνει το νερό). Για τον σκοπό αυτό, υπάρχει ηλεκτρική αντίσταση τοποθετημένη εντός του τμήματος αποθήκευσης.
- Τριπλής ενέργειας: Λειτουργεί όπως ο ηλιακός θερμοσίφωνας διπλής ενέργειας αλλά έχει επιπλέον μια είσοδο για να εκμεταλλευτεί ως θερμαντικό μέσο το ζεστό νερό του καλοριφέρ που παράγεται από τον λέβητα κεντρικής θέρμανσης. Προϋπόθεση για την εγκατάσταση ηλιακού θερμοσίφωνα τριπλής ενέργειας είναι να υπάρχει η κατάλληλη υποδομή στο οίκημα υπό την μορφή ξεχωριστών σωληνώσεων (ανά διαμέρισμα εάν πρόκειται για πολυκατοικία) που να συνδέουν το λεβητοστάσιο με τον χώρο εγκατάστασης του ηλιακού θερμοσίφωνα (ταράτσα ή σκεπή).

Ο ηλιακός θερμοσίφωνας είναι μια απ' τις "καθαρότερες" και πιο αποδοτικές συσκευές που χρησιμοποιούν ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στη διάρκεια ζωής του ο ηλιακός θερμοσίφωνας εξοικονομεί περίπου δυο χιλιάδες ευρώ απ' τους λογαριασμούς ρεύματος σε τιμές 2005, ενώ αποφεύγεται η έκλυση περίπου τριάντα τόνων διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα. Κάθε ντους με νερό από ηλιακό θερμοσίφωνα ισοδυναμεί με τρία κιλά διοξειδίου του άνθρακα λιγότερα στην ατμόσφαιρα (Ζερβός, 2008), (el.wikipedia.org, 2015), (Badea, 2015).

7.4. Βιομάζα-Βιοκαύσιμα

Τα ορυκτά καύσιμα είναι πεπερασμένα και στην ουσία εκπροσωπούν αποθηκευμένες πηγές ενέργειας που σχηματίστηκαν με το πέρασμα εκατομμυρίων χρόνων. Τα υπάρχοντα και πειραματικά συστήματα χωρίς ΑΠΕ χρησιμοποιούν κυρίως φυσικό αέριο. Εναλλακτικά καύσιμα που φιλοδοξούν να αντικαταστήσουν τα ορυκτά καύσιμα αναφέρονται και ως ανανεώσιμα καύσιμα, όταν παράγονται από ανανεώσιμες πηγές ή συντίθενται με την χρήση ΑΠΕ.

Ως βιομάζα αποκαλείται οποιοδήποτε υλικό παράγεται από ζωντανούς οργανισμούς (ξύλο, προϊόντα του δάσους, υπολείμματα καλλιεργειών, κτηνοτροφικά απόβλητα, απόβλητα βιομηχανιών τροφίμων κ.λπ.) και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο για παραγωγή ενέργειας. Η ενέργεια της βιομάζας (βιοενέργεια ή πράσινη ενέργεια) είναι δευτερογενής ηλιακή ενέργεια, καθώς αυτή μετασχηματίζεται από τα φυτά μέσω της φωτοσύνθεσης χρησιμοποιώντας ως βασικές πρώτες ύλες το νερό και το διοξείδιο του άνθρακα, που είναι άφθονα στη φύση. Είναι η μόνη φυσικά ευρισκόμενη πηγή ενέργειας με άνθρακα που τα αποθέματά της είναι ικανά ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο των ορυκτών καυσίμων και είναι ανανεώσιμη καθώς απαιτείται μόνο μια σύντομη χρονική περίοδος για να αναπληρωθεί ό,τι χρησιμοποιείται ως πηγή ενέργειας. Συνεπώς, η βιομάζα είναι μια από τις ΑΠΕ, για την ακρίβεια η τέταρτη μεγαλύτερη, που είναι συνεχής, ανεξάρτητη του τύπου παραγωγής και εύκολη στην αποθήκευση (Huang, et al., 2011). Παγκοσμίως συνεισφέρει περίπου στο 14% της ζήτησης σε πρωτογενή ενέργεια, ενώ για τις πιο

αναπτυγμένες χώρες η συνεισφορά της βιομάζας εγχώρια είναι αισθητά μεγαλύτερη και σε ποσοστό από 20% έως και 90% (Dong, et al., 2009).

Ως βιοκαύσιμα ορίζονται τα στερεά, υγρά ή αέρια καύσιμα που προέρχονται από τη βιομάζα, η αιθανόλη και η μεθανόλη που παράγονται από την ανακύκλωση του διοξειδίου του άνθρακα και διάφορα έλαια λαχανικών. Τα κυριότερα είναι το βιο-ντίζελ, η βιο-αιθανόλη, το βιο-αέριο και τα pellets. Ειδικά το βιο-ντίζελ και τα pellets είναι αρκετά δοκιμασμένα και αντικαθιστούν πολύ ικανοποιητικά τα συμβατικά καύσιμα. Βιοκαύσιμο μπορεί να θεωρηθεί και το υδρογόνο όταν παράγεται από βιομάζα μέσω των διαδικασιών της αεριοποίησης και της πυρόλυσης.

Ακόμα, το υδρογόνο μπορεί να προκύψει και από φυσικό-χημικές μεθόδους, οι περισσότερες από τις οποίες απαιτούν ηλεκτρόλυση του νερού. Όταν για την διαδικασία αυτή η απαιτούμενη ενέργεια λαμβάνεται από ΑΠΕ, όπως από ανεμογεννήτριες ή φωτοβολταϊκά, τότε το παραγόμενο υδρογόνο εμπίπτει στην κατηγορία των ανανεώσιμων καυσίμων. Μάλιστα, έχει ταυτοποιηθεί ως ένα από τα πιο αξιολογήσιμα, μακροπρόθεσμα ανανεώσιμα και λιγότερο ρυπογόνα καύσιμα, όταν ακολουθείται αυτός ο τρόπος παραγωγής του (Wang, et al., 2011).

Ένα υβριδικό σύστημα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας μπορεί να αποτελείται από μια μηχανή εσωτερικής καύσης ή μικρο-τουρμπίνα τροφοδοτούμενη απευθείας με το κατάλληλο βιοκαύσιμο ή συνδυασμένη με μετατροπέα βιομάζας (biomass converter). Η βιομάζα αρχικώς μετατρέπεται σε ζεστό νερό, ατμό, υγρό ή αέριο προϊόν και στην συνέχεια αυτό το προϊόν αξιοποιείται στην αντίστοιχη κινητήρια μηχανή παρέχοντας τελικώς ηλεκτρισμό, θέρμανση και ψύξη οικονομικά και με μηδενικό ισοζύγιο CO₂. Κάποιες από τις κυριότερες τεχνολογίες μετατροπής βιομάζας για την τροφοδότηση μικρο-τριπαραγωγών συστημάτων παρουσιάζονται στον παρακάτω Πίνακα 6 (Dong, et al., 2009). Συστήματα που συνδυάζουν καύση ή αεριοποίηση pellet και μηχανές Stirling βρίσκονται σε πιλοτική λειτουργία και αναμένεται τα επόμενα χρόνια να είναι διαθέσιμα στην αγορά (González, et al., 2015).

Πίνακας 6: Κυριότερες τεχνολογίες μετατροπής για συστήματα τροφοδοτούμενα με βιομάζα

Τεχνολογία Μετατροπής	Δευτερεύουσα Τεχνολογία
Καύση παράγοντας ατμό, ζεστό νερό	Οργανικός κύκλος Rankine (ORC)
Αεριοποίηση παράγοντας αέρια καύσιμα	Μηχανές εσωτερικής καύσης, μικρο-τουρμπίνες, κυψέλες καυσίμου
Πυρόλυση παράγοντας υγρά ή αέρια καύσιμα	Μηχανές εσωτερικής καύσης
Βιοχημικές/βιολογικές διαδικασίες παράγοντας αιθανόλη ή βιοαέριο	Μηχανές εσωτερικής καύσης
Χημικές/μηχανικές διαδικασίες παράγοντας βιο-ντίζελ	Μηχανές εσωτερικής καύσης

Κεφάλαιο 8^ο

Πειραματικά συστήματα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας με ΑΠΕ

Στις μέρες μας, έχουν μελετηθεί ή/και κατασκευαστεί αρκετά υβριδικά τριπαραγωγά συστήματα μεγάλης και μεσαίας κλίμακας. Συνηθέστερα, αυτά συναντώνται σε κτήρια γραφείων, νοσοκομεία, ξενοδοχεία κλπ. Παράδειγμα εν λειτουργία ολοκληρωμένου τριπαραγωγού συστήματος με ΑΠΕ αποτελεί το κτήριο γραφείων του Κέντρου Έρευνας Ηλιακής Ενέργειας (CIESOL) της Ισπανίας, που χρησιμοποιεί ηλιοβοηθούμενο σύστημα απορρόφησης LiBr/νερού για την κάλυψη των αναγκών του (Sabina, et al., 2013). Εντυπωσιακή είναι και η μελέτη που έχει γίνει για κτήριο γραφείων στην Σιγκαπούρη, η οποία συνδυάζει μικρο-τουρμπίνα, κυψέλη καυσίμου, φωτοβολταϊκό πάνελ, ηλιακό συλλέκτη και ψύκτη απορρόφησης διεξάγοντας παράλληλα πολύ-κριτηριακή ανάλυση με σκοπό την εύρεση του βέλτιστου ποσοστού συμμετοχής του κάθε υποσυστήματος στο γενικό σύνολο (Chua, et al., 2012).

Λαμβάνοντας αυτά ως σημείο αναφοράς, και άλλοι ερευνητές στραφεί τα τελευταία χρόνια στην ενσωμάτωση ΑΠΕ στα μέχρι τώρα μελετημένα πειραματικά μικρο-τριπαραγωγά συστήματα και στην ανάπτυξη νέων. Όπως φαίνεται στον παρακάτω πίνακα, αυτές οι έρευνες αυτές είναι ακόμα περιορισμένες σε αριθμό.

Πίνακας 7: Συγγραφείς που μελέτησαν ή/και κατασκεύασαν πειραματικές διατάξεις με ΑΠΕ

Συγγραφείς	Χρησιμοποιούμενη Τεχνολογία	Είδος ΑΠΕ	Θερμοκρασία Λειτουργίας	Ηλεκτρική Ισχύς	Ψυκτική Ισχύς	Θερμική Ισχύς	COP
(Yagoub, et al., 2006)	Μικρο-τουρμπίνα/ Boiler/ Εναλλάκτης	Ηλιακός Συλλέκτης	Ζεστό Νερό Εναλλάκτη 50 °C	1.5 kW	-	12 kW	-
(Wang, et al., 2011)	Μηχανή Diesel/ Ψύκτης Απορρόφησης/Θερμική Αποθήκευση	Βιο-καύσιμο (H)	Καυσαέριο 576 °C	6.5 kW	0.11-0.29 kW	11.15 kW	0.66
(Jradi, et al., 2014)	Μονάδα ORC/ Boiler/Σύστημα Αφύγρανσης /Εξατμ. Ψύκτης	Βιομάζα (Pellet ξύλου)	Ζεστό Νερό 60-80 °C	0.5 kW	6.5 kW	9.6 kW	0.84
(Brandoni, et al., 2014)	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης/Boiler/ Ψύκτης Απορρόφησης και Συμπύεσης/Θερμ.Αποθήκευση	Φωτοβ./ Σύστημα HCPV	-	6-28 kW	-	18-58 kW	0.7
(Wu, et al., 2015)	MEK/ Ψύκτης Απορρόφησης/ Θερμ.Αποθήκευση	Βιο-καύσιμο (SPO)	Καυσαέριο 300 °C Θερμότητα ψυκτικών 80-100 °C.	6.5 kW	-	>10 kW	-

Ακόμα λιγότερες είναι οι μελέτες που πέραν της χρήσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, προχώρησαν και σε ανάλυση 3-E, εξεργειακή ή άλλη. Οι υπάρχουσες μέχρι στιγμής στην βιβλιογραφία είναι οι εξής:

Πίνακας 8: Μελέτες που έχουν ασχοληθεί με αναλύσεις συστημάτων τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας με ΑΠΕ ή/και ανάπτυξη υπολογιστικών μοντέλων

Συγγραφείς	Είδος Έρευνας	Ανάλυση 3-E	Εξεργειακή Ανάλυση	Άλλες Αναλύσεις	Χρησιμοποιούμενοι Δείκτες/Μοντέλα
(Wang, et al., 2011)	Μελέτη /Κατασκευή Μοντέλου	✓	-	-	BSFC, TCO ₂ ER, Λογισμικό προσομοίωσης για μοντελοποίηση
(Jradi, et al., 2014)	Πειραματική Μελέτη	✓	-	-	<i>ημtrigen</i>
(Brandoni, et al., 2014)	Μελέτη	✓	-	✓	Πολύ-παραμετρικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, FESR, TCO ₂ ER
(Wu, et al., 2015)	Σχεδιασμός/ Κατασκευή Πρωτοτύπου	-	-	✓	Αριθμητικό μοντέλο για μελέτη υλικών αλλαγής φάσης σε θερμική αποθήκευση

Κεφάλαιο 9^ο

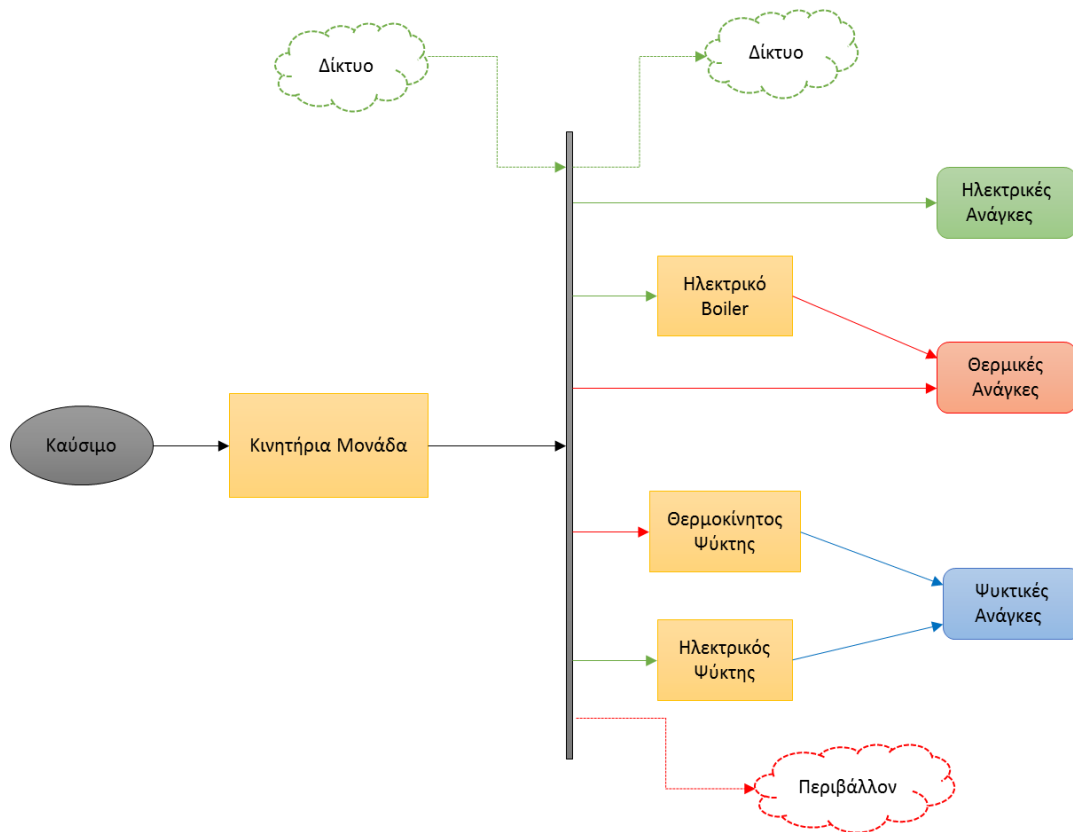
Μελέτη Περίπτωσης: Διάρθρωση υποτυπώδους συστήματος

Όπως αναφέρεται και ανωτέρω (Βλ. §1), σε κάθε εφαρμογή όπου γίνεται χρήση συστήματος τριπαραγωγής σκοπός είναι η εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού υποσυστημάτων (κινητήριας μηχανής, θερμοκίνητων τεχνολογιών, δεξαμενών αποθήκευσης, μπαταριών, κλ.), με τον οποίο θα είναι δυνατή η κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρισμό, θέρμανση και ψύξη.

Στον παρόν κεφάλαιο θα γίνει μια προσπάθεια συγκρότησης ενός τέτοιου υποτυπώδους συστήματος με χρήση υποσυστημάτων από την αγορά και θα περιλαμβάνει:

- Κινητήρια μηχανή, που θα παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα και θερμότητα μέσω της καύσης καυσίμου
- Ηλεκτρικό Boiler, που θα παρέχει επιπρόσθετη θερμότητα όταν αυτή της κινητήριας μηχανής δεν επαρκεί και θα τροφοδοτείται με ρεύμα είτε από την κινητήρια μηχανή είτε από το δίκτυο
- Θερμοκίνητος Ψύκτης, που θα παρέχει ψύξη μέσω της θερμότητας που προκύπτει από την κινητήρια μηχανή ή/και το ηλεκτρικό boiler
- Ηλεκτρικός Ψύκτης, που θα παρέχει επιπρόσθετη ψύξη όταν αυτή της θερμοκίνητης τεχνολογίας δεν επαρκεί και θα τροφοδοτείται με ρεύμα από την κινητήρια μηχανή ή/και το δίκτυο

Η διάρθρωση του συστήματος είναι τέτοια ώστε να μπορεί να καλύψει όλες τις πιθανές περιπτώσεις που είναι δυνατόν να εμφανιστούν κατά την διάρκεια της λειτουργίας του. Σχηματικά η ροή ενέργειας είναι η εξής:



Σχήμα 4: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας

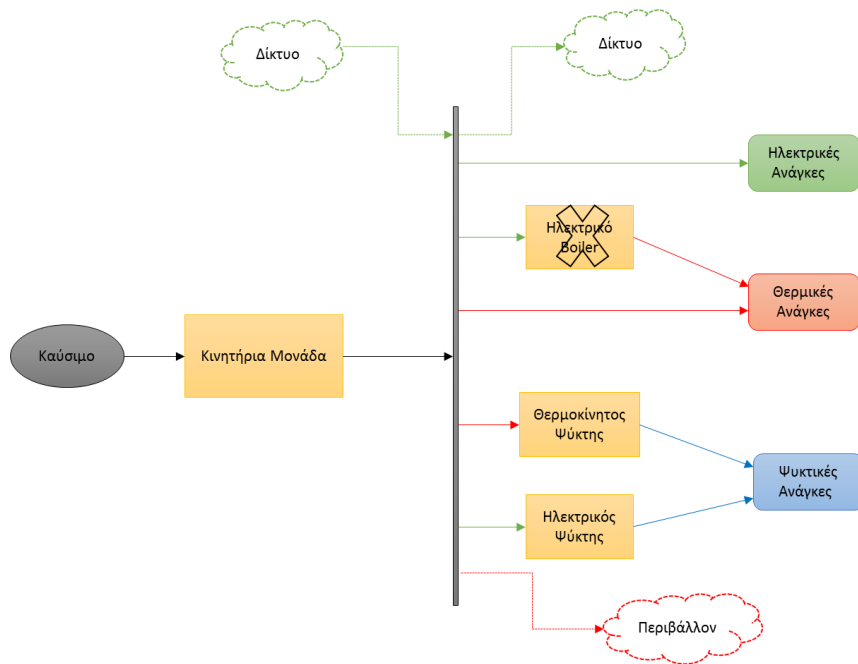
Αναλυτικά:

- 1^η περίπτωση

Η κινητήρια μηχανή μπορεί να καλύψει εξ ολοκλήρου τις ανάγκες σε ρεύμα και θέρμανση και η θερμότητα που απομένει αρκεί για να μπορεί να καλύψει ο θερμοκίνητος ψύκτης τις ανάγκες ψύξης. Εάν το ψυκτικό φορτίο της μονοκατοικίας είναι μικρότερο από το μέγιστο που μπορεί να αποδώσει ο θερμοκίνητος ψύκτης, τότε ο ηλεκτροκίνητος ψύκτης δεν λειτουργεί. Σε αντίθετη περίπτωση, ο θερμοκίνητος ψύκτης δουλεύει στο μέγιστο και ο ηλεκτρικός λειτουργεί συμπληρωματικά. Το boiler δεν λειτουργεί και η περίσσεια θερμότητας απορρίπτεται στο περιβάλλον. Όταν λειτουργούν οι ψύκτες εάν το ρεύμα που χρειάζεται δεν καλύπτεται επίσης από την κινητήρια μηχανή, εισάγεται από το δίκτυο. Όταν υπάρχει περίσσεια ρεύματος εξάγεται στο δίκτυο.

- 2^η περίπτωση

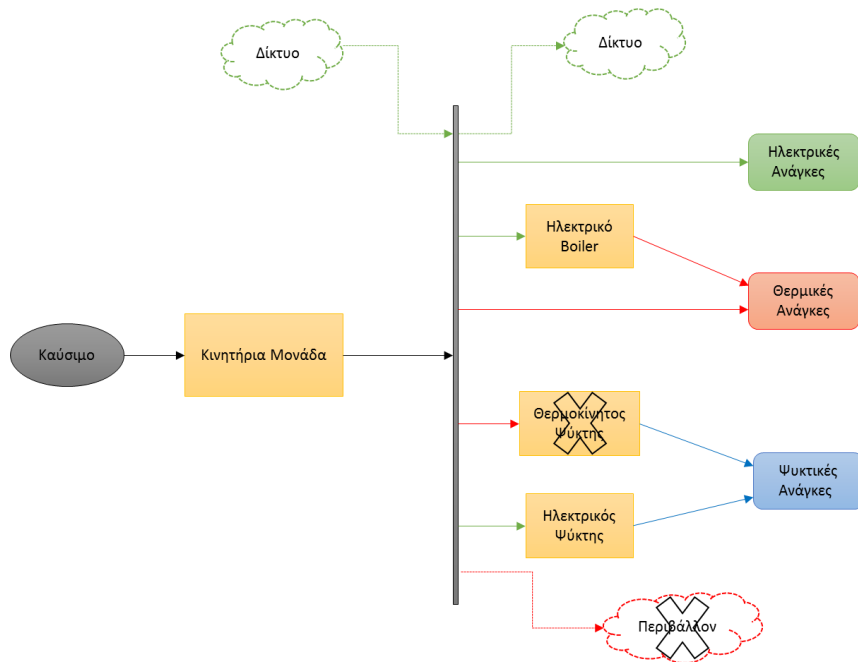
Η κινητήρια μηχανή μπορεί να καλύψει εξ ολοκλήρου τις ανάγκες σε ρεύμα και θέρμανση, αλλά η θερμότητα που απομένει δεν αρκεί για να μπορεί να καλύψει μόνο ο θερμοκίνητος ψύκτης τις ανάγκες ψύξης. Συνεπώς δουλεύει πάντοτε παράλληλα και ο ηλεκτρικός ψύκτης. Το boiler δεν λειτουργεί και η περίσσεια θερμότητας, εάν υπάρχει, απορρίπτεται στο περιβάλλον. Εάν το ρεύμα που απαιτούν οι ψύκτες δεν καλύπτονται επίσης από την κινητήρια μηχανή, εισάγεται από το δίκτυο. Σε αντίθετη περίπτωση η περίσσεια ρεύματος εξάγεται στο δίκτυο.



Σχήμα 5: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας για την πρώτη περίπτωση και δεύτερη περίπτωση

- 3^η περίπτωση

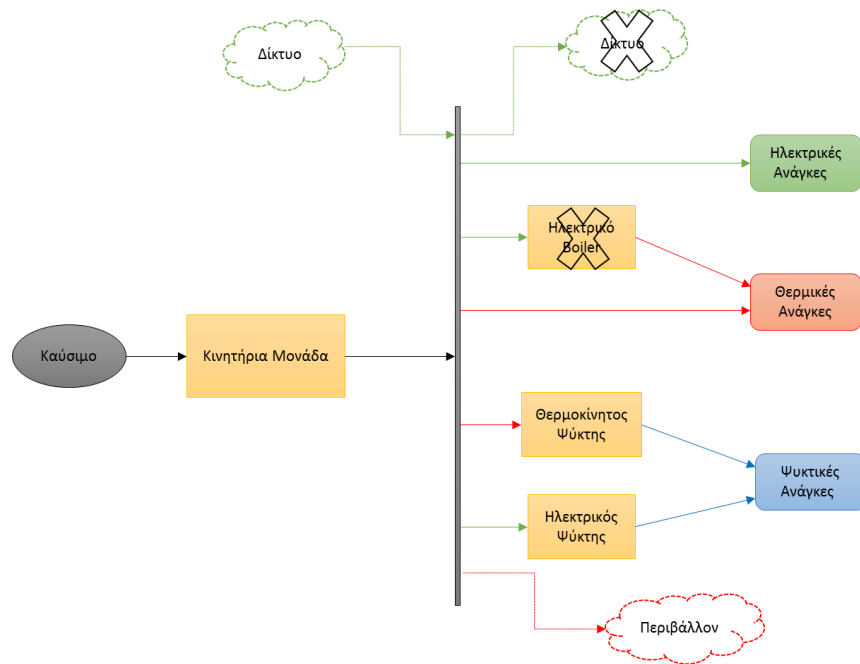
Η κινητήρια μηχανή μπορεί να καλύψει εξ ολοκλήρου μόνο τις ανάγκες σε ρεύμα. Στην περίπτωση αυτή το ψυκτικό φορτίο καλύπτεται εξ ολοκλήρου από τον ηλεκτρικό ψύκτη, τίθεται σε λειτουργία το boiler και δεν απορρίπτεται καθόλου θερμότητα στο περιβάλλον. Εάν το ρεύμα που απαιτεί ο ψύκτης και το boiler δεν καλύπτονται επίσης από την κινητήρια μηχανή, εισάγεται από το δίκτυο. Σε αντίθετη περίπτωση η περίσσεια ρεύματος εξάγεται στο δίκτυο.



Σχήμα 6: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας για την τρίτη περίπτωση

- 4^η περίπτωση

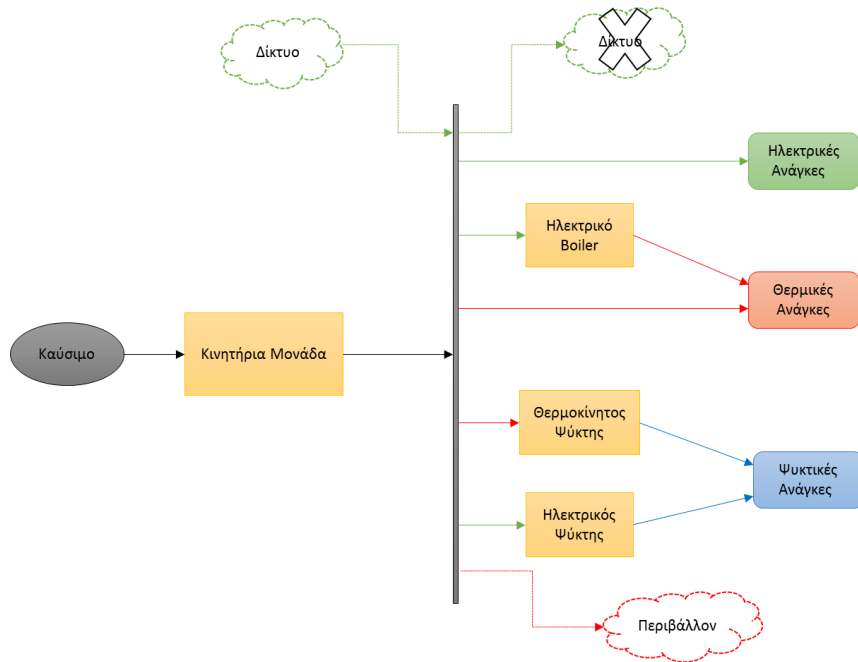
Η κινητήρια μηχανή μπορεί να καλύψει εξ ολοκλήρου τις ανάγκες σε θέρμανση, η θερμότητα που απομένει αρκεί για την κάλυψη του ψυκτικού φορτίου από τον ψύκτη απορρόφησης ή προσρόφησης, αλλά δεν καλύπτονται οι ηλεκτρικές ανάγκες. Στην περίπτωση αυτή λειτουργεί ο θερμοκίνητος ψύκτης και εάν χρειαστεί και ο ηλεκτρικός. Το boiler δεν λειτουργεί και η περίσσεια θερμότητας απορρίπτεται στο περιβάλλον. Ρεύμα εισάγεται από το δίκτυο.



Σχήμα 7: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας για την τέταρτη περίπτωση

- 5^η περίπτωση

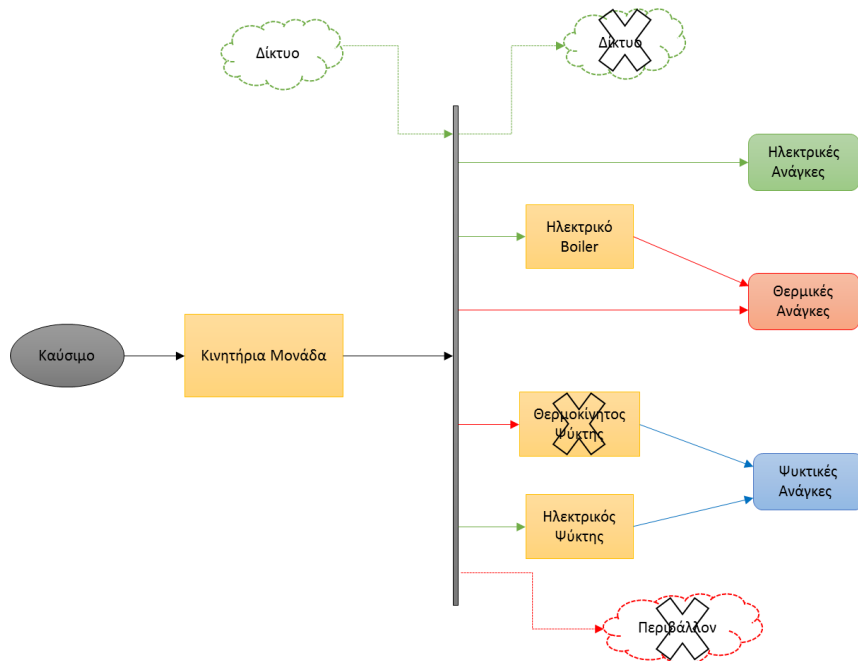
Η κινητήρια μηχανή μπορεί να καλύψει τις ανάγκες σε θέρμανση, ενώ οι ανάγκες σε ψύξη απαιτούν την λειτουργία και των δυο ψυκτών. Στην περίπτωση αυτή, με την επιπλέον θερμότητα μετά την κάλυψη των θερμικών αναγκών, λειτουργεί ο θερμοκίνητος ψύκτης και οι ανάγκες σε ψύξη καλύπτονται συμπληρωματικά από τον ηλεκτρικό. Το boiler δεν λειτουργεί και η περίσσεια θερμότητας απορρίπτεται στο περιβάλλον. Ρεύμα εισάγεται από το δίκτυο.



Σχήμα 8: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας για την πέμπτη περίπτωση

- 6^η περίπτωση

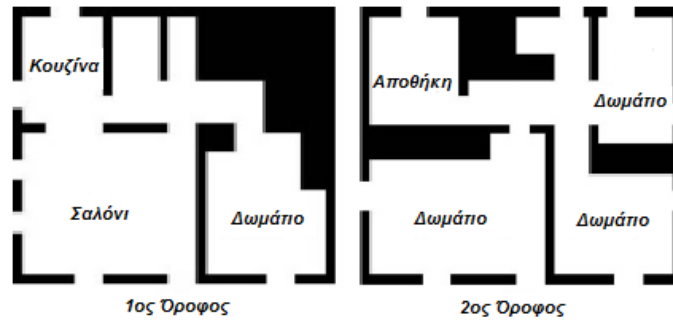
Η κινητήρια μηχανή δεν μπορεί να καλύψει εξ ολοκλήρου καμία ανάγκη. Στην περίπτωση αυτή λειτουργεί το boiler και ο ηλεκτρικός ψύκτης. Δεν λειτουργεί ο θερμοκίνητος ψύκτης και δεν απορρίπτεται θερμότητα στο περιβάλλον. Ρεύμα εισάγεται από το δίκτυο.



Σχήμα 9: Απλοποιημένη απεικόνιση της ροής ενέργειας για την έκτη περίπτωση

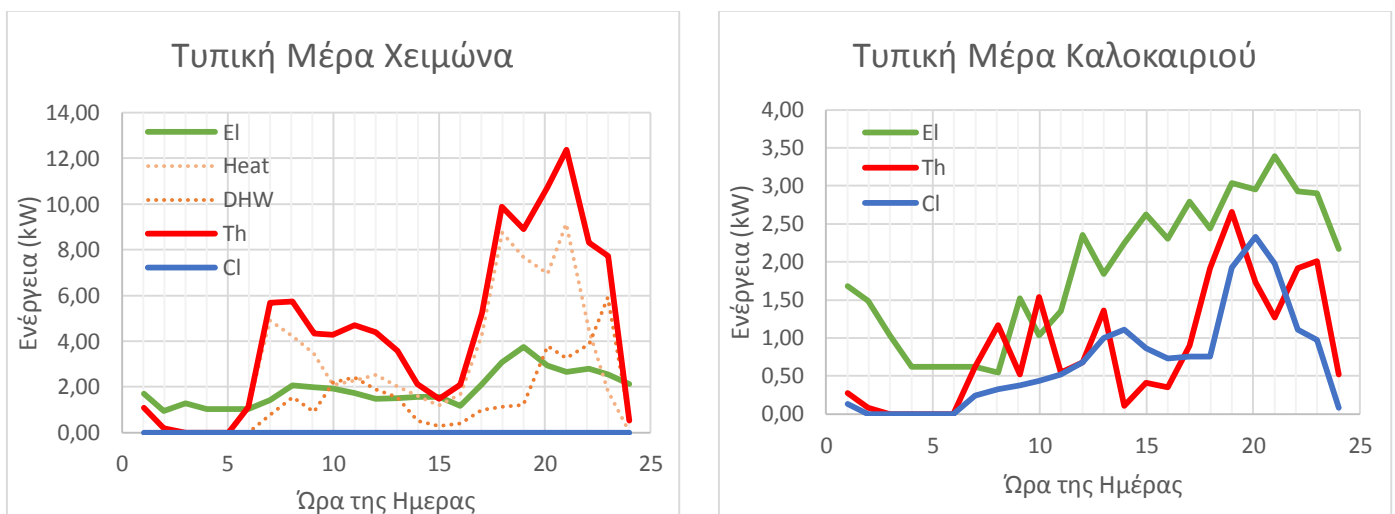
9.1. Αντικείμενο μελέτης

Ως αντικείμενο μελέτης λαμβάνεται μια ανεξάρτητη διώροφη μονοκατοικία, η οποία θεωρείται πρότυπο μοντέλο σπιτιού, όπως αυτή περιγράφεται από τους Hongbo Ren και Weijun Gao στην δημοσίευσή τους (Ren, et al., 2010). Χάριν πληρότητας παρατίθεται στο παρακάτω σχήμα το σχέδιο της εν λόγω μονοκατοικίας.



Σχήμα 10: Σχέδιο της μονοκατοικίας που μελετάται για την τοποθέτηση συστήματος τριπαραγωγής

Αρχικά, θα πρέπει να είναι γνωστό το μέγεθος των ενεργειακών αναγκών της μονοκατοικίας. Αυτές μπορούν γενικά να προκύψουν είτε με απευθείας μετρήσεις είτε με χρήση λογισμικών προσομοίωσης, όπως τα EnergyPlus, Flexsim, DOE-2 και άλλα. Στην παρούσα περίπτωση, διακρίνονται σε ηλεκτρικές (EI), ψύξης (CI) και θέρμανσης χώρου (Heat) και ζεστού νερού χρήσης (DHW), με τις δύο τελευταίες να συνοψίζονται σε ανάγκες θέρμανσης (Th), και παρατίθενται στα παρακάτω διαγράμματα για τυπική μέρα χειμώνα και καλοκαιριού.



Διάγραμμα 1: Ωριαίες καταναλώσεις για τυπική μέρα χειμώνα και καλοκαιριού

9.2. Κινητήριες μηχανές

Με απώτερο ιδανικό σκοπό την πλήρη ανεξαρτησία της μονοκατοικίας από το δίκτυο, η επιλεγείσα κινητήρια μηχανή θα πρέπει να καλύπτει εξ ολοκλήρου ή όσο το δυνατόν στο μεγαλύτερο ποσοστό τις παραπάνω ανάγκες. Για τις περιπτώσεις μικροκλίμακας, έχει αναφερθεί (Βλ. §2) ότι οι διαθέσιμες στην αγορά είναι περιορισμένες στον αριθμό, με επικρατέστερες τις μηχανές εσωτερικής καύσης και τις μηχανές Stirling. Από καταλόγους κατασκευαστών (Berliner Energieagentur GmbH) και δημοσιεύσεις (Roselli, et al., 2011), και λαμβάνοντας υπόψιν τα μέγιστα των παραπάνω διαγραμμάτων, κάποιες από αυτές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην συγκεκριμένη εφαρμογή είναι οι παρακάτω:



Sunmachine



SoloStirling 161



Senertec Dachs
HKAG 5.5



Ecopower e 4.7

Εικόνα 5: Οι προς σύγκριση κινητήριες μηχανές

Οι δύο πρώτες που απεικονίζονται στην *Εικόνα 1* είναι μηχανές Stirling και οι δύο επόμενες είναι μηχανές εσωτερικής καύσης. Πρέπει να τονιστεί ότι επιλέχθηκαν έτσι ώστε από κάθε είδος να υπάρχει μια μηχανή που να τροφοδοτείται με συμβατικό καύσιμο και μια που να τροφοδοτείται με ανανεώσιμο καύσιμο. Τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά αυτών παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 9: Χαρακτηριστικά των προς σύγκριση κινητήριων μηχανών

	Sunmachine	SoloStirling 161	Senertec Dachs HKAG 5.3	Ecopower e 4.7
Τεχνολογία	Stirling	Stirling	Μηχανή Εσ. Καύσης	Μηχανή Εσ. Καύσης
Ηλεκτρική Ισχύς	3 kW	9.5 kW	5.3 kW	4.7 kW
Θερμική Ισχύς	10 kW	26 kW	10.3 kW	12.5 kW
Είδος Καυσίμου	Pellets	Φυσικό Αέριο, LPG, Βιοαέριο, Βιομάζα	Βιο-ντίζελ	Φυσικό Αέριο, Προπάνιο
Κόστος Μονάδας	23.000 €	25.000 €	15.000 €	15.000 €

9.3. Θερμοκίνητοι ψύκτες

Όπως φαίνεται και από τις παραπάνω αναφερόμενες μελέτες (Βλ. §5 και §8), συνθηθέστερα χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες παραγωγής ψύξης από θερμότητα είναι οι ψύκτες απορρόφησης και προσρόφησης. Από καταλόγους κατασκευαστών και δημοσιεύσεις (Jakob, 2008), και λαμβάνοντας υπόψιν τα μέγιστα των ψυκτικών αναγκών στα παραπάνω διαγράμματα, δύο από τους θερμοκίνητους ψύκτες που μπορούν να χρησιμοποιηθούν είναι:



Rotartica
Solar 045

(a)



SorTech
ACS 08

(b)

Εικόνα 6: (a) Ψύκτης Απορρόφησης, (b) Ψύκτης Προσρόφησης

Τονίζεται ότι σκοπίμως επιλέγεται ένας ψύκτης από το κάθε είδος. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται καλύτερα η ορθότητα των αποτελεσμάτων. Τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά είναι:

Πίνακας 10: Χαρακτηριστικά των προς σύγκριση θερμοκίνητων ψυκτών

	Rotartica Solar 045	SorTech ACS 08
Τεχνολογία	Απορρόφηση	Προσρόφηση
Εργαζόμενο Ζεύγος	H ₂ O/LiBr	H ₂ O/Silica gel
Ηλεκτρική Ισχύς	0.4 kW	0.007 kW
Ψυκτική Ισχύς	4.5 kW	7.5 kW
Θερμοκρασία Ζεστού Νερού (°C)	90/85	75/68
Θερμοκρασία Κρύου Νερού (°C)	13/10	18/15
COP	0.625	0.6
Κόστος Μονάδας	17.930 €	17.300 €

9.4. Λοιπός εξοπλισμός

Ο συμπληρωματικός εξοπλισμός στον παρόν υποτυπώδες σύστημα είναι ένας ηλεκτροκίνητος αερόψυκτος ψύκτης και ένα ηλεκτρικό boiler. Τα συστήματα αυτά τοποθετούνται για να εξασφαλίζεται η κάλυψη των αναγκών του συστήματος όταν το σύστημα τριπαραγωγής δεν επαρκεί ή και σε περίπτωση αστοχίας κάποιου τμήματος αυτού. Από τα διαθέσιμα στην αγορά επιλέχθηκαν τα εξής:



Guanya GY-01A

(a)



Elite 80Lt 4Kw

(b)

Εικόνα 7: (a) Αερόψυκτος Ψύκτης, (b) Ηλεκτρικό Boiler

Τα βασικότερα τεχνικά χαρακτηριστικά τους είναι:

Πίνακας 11: Χαρακτηριστικά λοιπών στοιχείων διάταξης

Στοιχείο	Τροφοδοσία	Ισχύς Εξόδου	Μέγιστη Ηλ. Κατανάλωση	COP	Τιμή Μονάδας
Boiler	Ηλεκτρικό Ρεύμα	-	4 kW	-	100 €
Ψύκτης	Ηλεκτρικό Ρεύμα	2.8 kW	1.2 kW	2.33	990 €

9.5. Σύγκριση πιθανών συνδυασμών υποσυστημάτων

Για την εύρεση του βέλτιστου συστήματος χρησιμοποιήθηκε κώδικας ανεπτυγμένος σε λογισμικό Matlab. Αυτός λαμβάνει ως εισόδους τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά των υποσυστημάτων και τις ενεργειακές ανάγκες της μονοκατοικίας και εξετάζει όλες τις περιπτώσεις ροής ενέργειας. Έτσι για κάθε κινητήρια μηχανή και για κάθε θερμοκίνητο ψύκτη, προκύπτει:

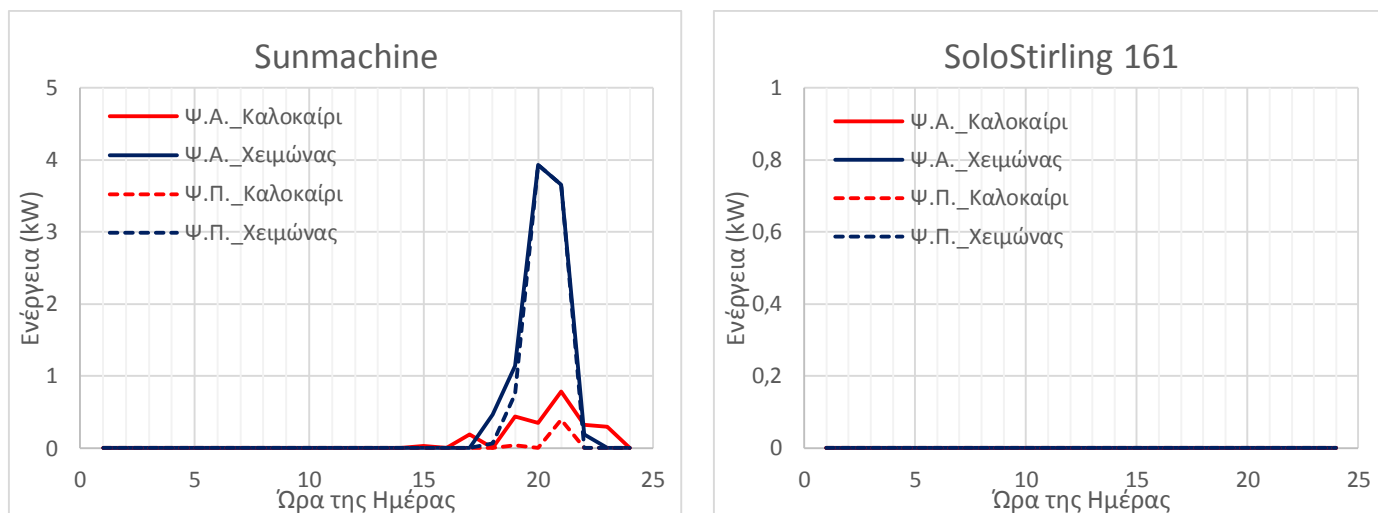
- ✓ Η ανά ώρα απαιτούμενη εισροή ρεύματος
- ✓ Η ανά ώρα εκροή ρεύματος
- ✓ Η ανά ώρα απορριπτόμενη θερμότητα στο περιβάλλον
- ✓ Η ανά ώρα απαιτούμενη θερμότητα από το boiler
- ✓ Το συνολικό αρχικό κόστος εξοπλισμού, δηλαδή το κόστος αγοράς των ψυκτών, του boiler και της κινητήριας μηχανής

Διευκρινίζεται ότι ο συγκεκριμένος κώδικας θεωρεί σε όλες τις περιπτώσεις ότι η κινητήρια λειτουργεί στην μέγιστη ηλεκτρική και θερμική ισχύ της, ότι οι ψύκτες λειτουργούν με σταθερό COP (το ονομαστικό) και ότι τόσο οι θερμοκίνητοι ψύκτες όσο και το boiler λειτουργούν με την μέγιστη ηλεκτρική κατανάλωση.

9.5.1. Σύγκριση των μηχανών Stirling

Κάθε μια από τις μηχανές Stirling συνδέεται πρώτα με τον ψύκτη απορρόφησης και μετά με τον προσρόφησης.

1. Η ανά ώρα απαιτούμενη εισροή ρεύματος

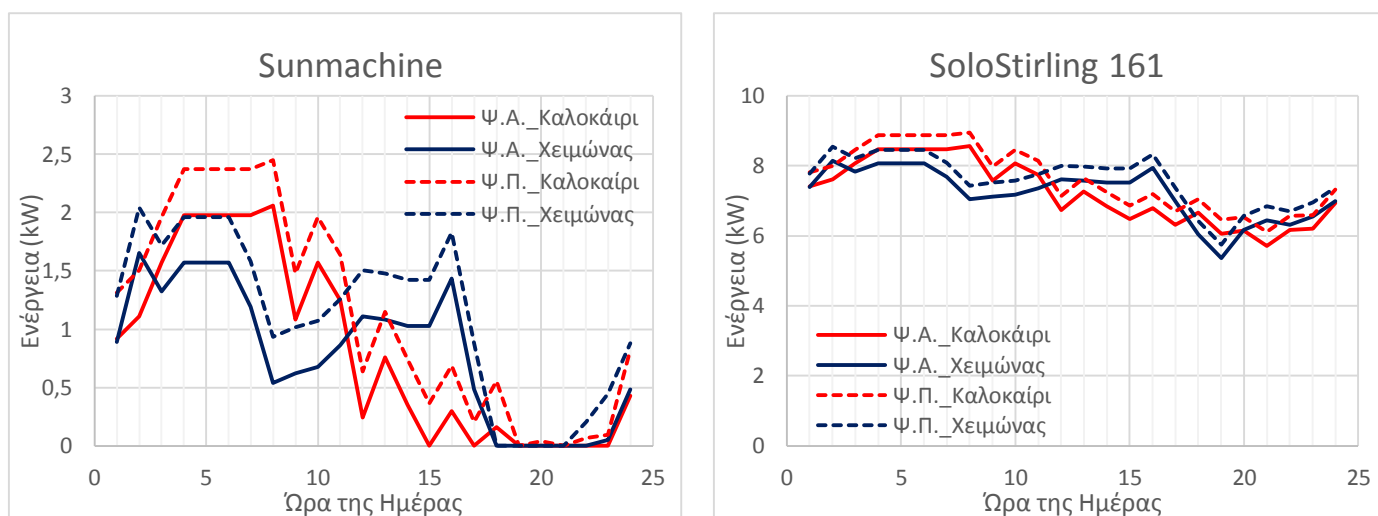


Διάγραμμα 2: Σύγκριση των μηχανών Stirling ως προς την εισροή ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, η μηχανή Sunmachine όταν συνδέεται με ψύκτη απορρόφησης λαμβάνει ρεύμα από το δίκτυο κατά τις ώρες 18:00-22:00 το χειμώνα, συνολικής ισχύος 9.38 kW_e και κατά τις ώρες 15:00, 17:00 και 19:00-23:00 το καλοκαίρι, συνολικής ισχύος 2.42 kW_e. Όταν συνδέεται με ψύκτη προσρόφησης λαμβάνει ρεύμα κατά τις ώρες 18:00-21:00 το χειμώνα, συνολικής ισχύος 8.40 kW_e και 19:00 και 22:00 το καλοκαίρι, συνολικής ισχύος 0.44 kW_e.

Όσον αφορά την μηχανή SoloStirling 161, επιτυγχάνεται κάθε ημέρα πλήρης ανεξαρτησία από το δίκτυο με όποιον από τους θερμοκίνητους ψύκτες και να συνδεθεί.

2. Η ανά ώρα εκροή ρεύματος

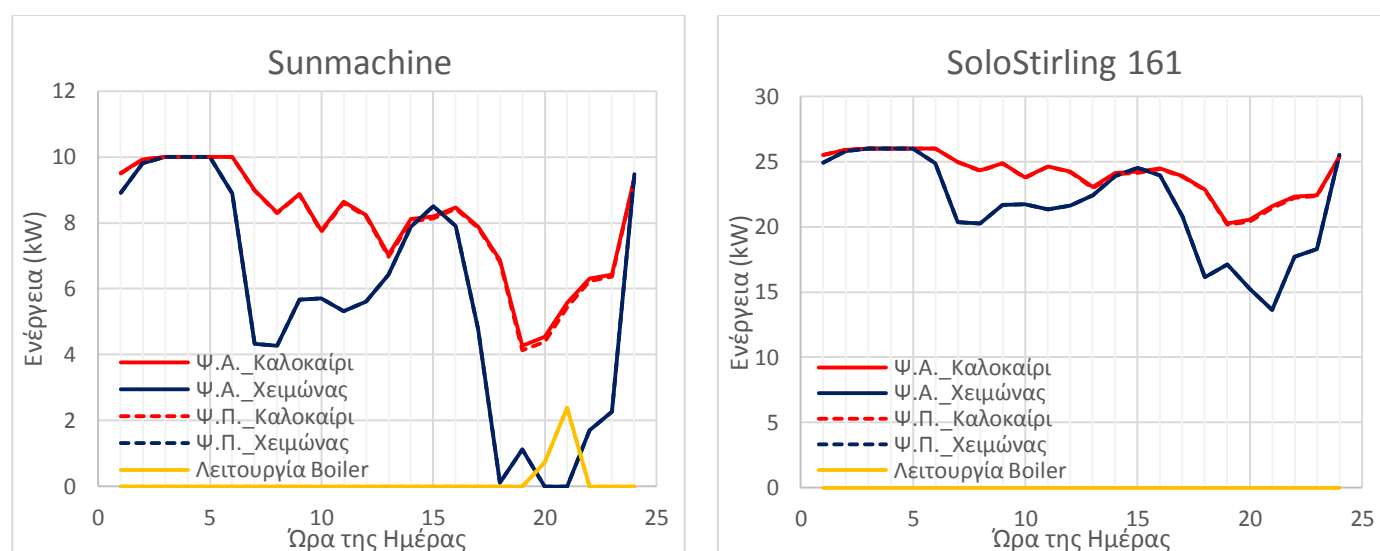


Διάγραμμα 3: Σύγκριση των μηχανών Stirling ως προς την εκροή ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα

Με την μηχανή Sunmachine υπάρχει εκροή ρεύματος στο δίκτυο κατά τις ώρες που φαίνονται στο διάγραμμα. Όταν συνδέεται με ψύκτη απορρόφησης, εξάγει ρεύμα συνολικής ημερήσιας ισχύος 19.18 kW_e το χειμώνα και 19.70 kW_e το καλοκαίρι. Όταν συνδέεται με ψύκτη προσρόφησης οι τιμές αυτές είναι 26.85 kW_e και 27.15 kW_e αντίστοιχα.

Η μηχανή SoloStirling 161 εξάγει ρεύμα όλες τις ώρες της ημέρας. Με ψύκτη απορρόφησης η συνολική ημερήσια ισχύς είναι 173.00 kW_e για το χειμώνα και 173.28 kW_e για το καλοκαίρι. Για τον ψύκτη προσρόφησης, οι τιμές αυτές είναι αντίστοιχα 182.44 kW_e και 182.71 kW_e.

3. Η ανά ώρα απορριπτόμενη θερμότητα στο περιβάλλον και η απαιτούμενη θερμότητα από το boiler

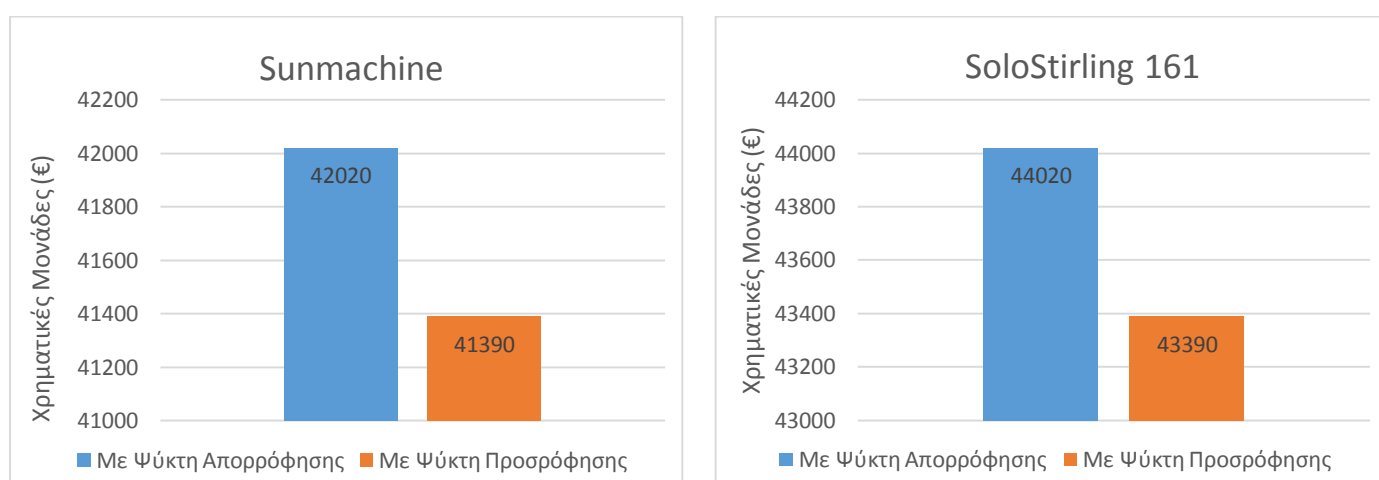


Διάγραμμα 4: Σύγκριση των μηχανών Stirling ως προς την θερμότητα που απορρίπτει το σύστημα και την λειτουργία του boiler

Με μια αρχική ματιά στα διαγράμματα, φαίνεται ότι, και για την τυπική μέρα χειμώνα και για την τυπική μέρα καλοκαιριού, η μηχανή Sunmachine απορρίπτει την ίδια ποσότητα θερμότητας στο περιβάλλον με όποιον και από τους δυο θερμοκίνητους ψύκτες και αν συνδεθεί. Για την τυπική μέρα χειμώνα αυτό επαληθεύεται, με την συνολική ισχύ που απορρίπτεται να είναι 138.69 kW_{th} και στις δύο περιπτώσεις. Για την τυπική μέρα καλοκαιριού, υπάρχει μια διαφορά, καθώς για τον ψύκτη απορρόφησης η συνολική απορριπτόμενη ισχύς είναι 193.29 kW_{th} και για τον προσρόφησης 192.2 kW_{th}. Σε κάθε περίπτωση, η μηχανή Sunmachine δεν μπορεί να καλύψει πλήρως τις θερμικές ανάγκες κατά τις ώρες 20:00-21:00 της τυπικής μέρας χειμώνα και έτσι λειτουργεί συμπληρωματικά το boiler προσφέροντας συνολικά 3.11 kW_{th}.

Ομοίως, για την μηχανή SoloStirling 161, από τα διαγράμματα φαίνεται ότι και για την τυπική μέρα χειμώνα και για την τυπική μέρα καλοκαιριού απορρίπτεται η ίδια ποσότητα θερμότητας στο περιβάλλον με όποιον και από τους δυο θερμοκίνητους ψύκτες και αν συνδεθεί. Κατά την τυπική μέρα χειμώνα η συνολικά απορριπτόμενη ισχύς είναι 519.58 kW_{th} και για τους δυο ψύκτες, ενώ κατά την τυπική μέρα καλοκαιριού είναι 577.19 kW_{th} και 576.20 kW_{th} για ψύκτη απορρόφησης και προσρόφησης αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση, η μηχανή SoloStirling 161 μπορεί να καλύψει πλήρως τις θερμικές ανάγκες και το boiler δεν τίθεται καθόλου σε λειτουργία.

4. Συνολικό αρχικό κόστος εξοπλισμού



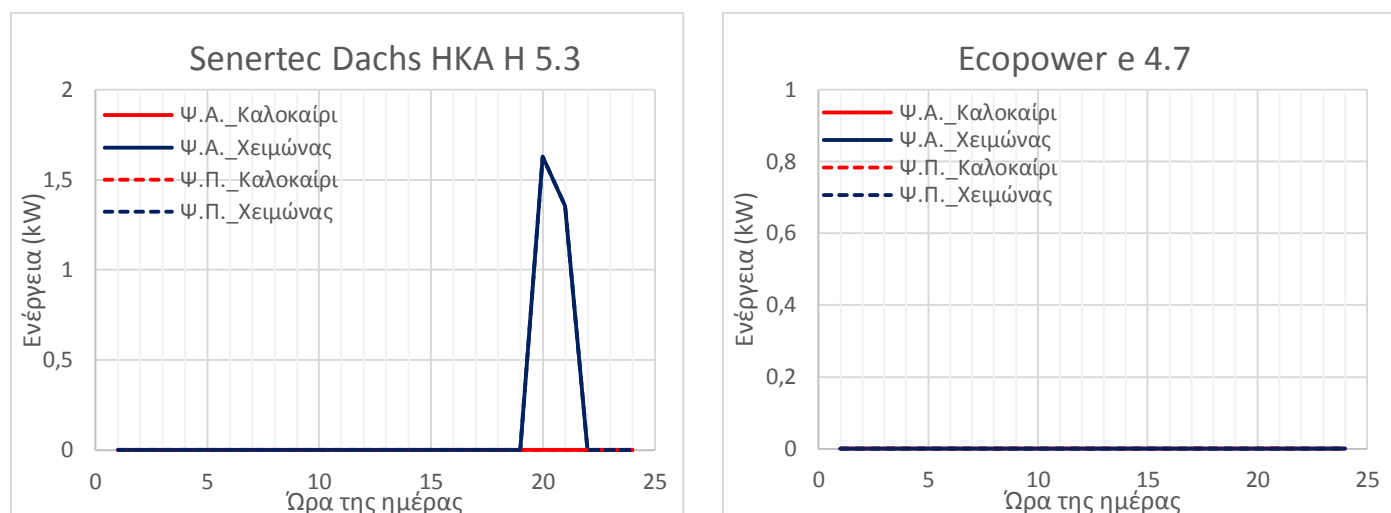
Διάγραμμα 5: Σύγκριση των μηχανών Stirling ως προς το αρχικό κόστος εξοπλισμού του συστήματος

Και με τις δύο μηχανές ο ηλεκτρικός ψύκτης μπορεί να αφαιρεθεί, μειώνοντας το συνολικό αρχικό κόστος εξοπλισμού. Με την μηχανή SoloStirling161, μπορεί να παραλειφθεί και το ηλεκτρικό boiler.

9.5.2. Σύγκριση των μηχανών εσωτερικής καύσης

Κάθε μια από τις μηχανές εσωτερικής καύσης συνδέεται πρώτα με τον ψύκτη απορρόφησης και μετά με τον προσρόφησης.

1. Η ανά ώρα απαιτούμενη εισροή ρεύματος

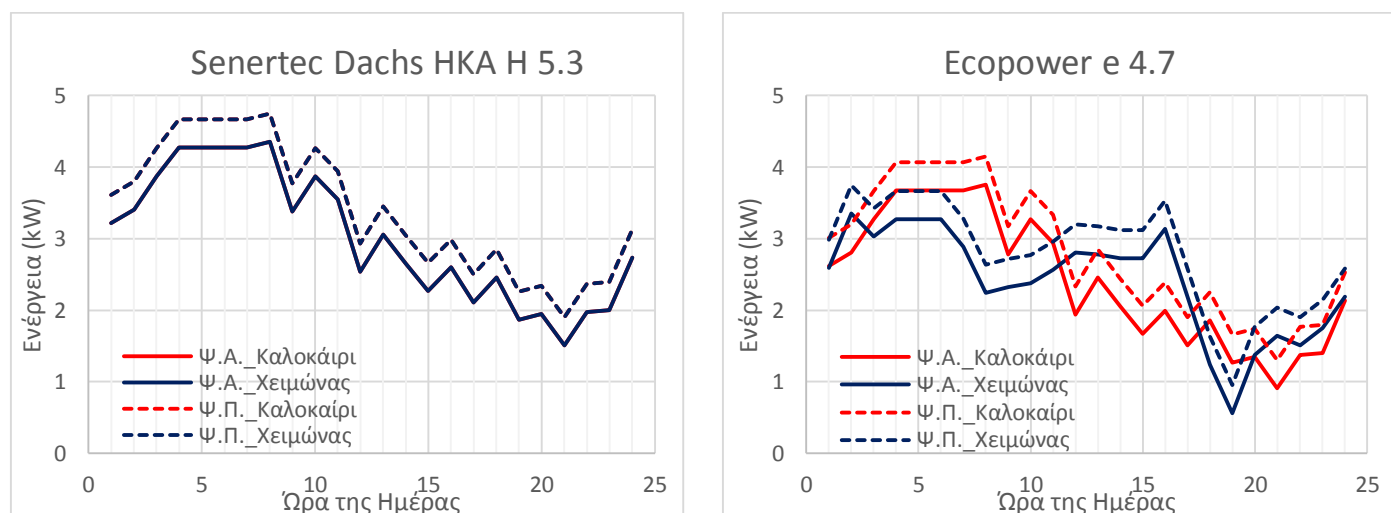


Διάγραμμα 6: Σύγκριση των μηχανών εσωτερικής καύσης ως προς την εισροή ηλεκτρικής ενέργειας στο σύστημα

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω διαγράμματα, η μηχανή Senertec Dachs HKΑ Η 5.3 παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά ως προς την εισροή ρεύματος στο σύστημα και για τους δυο ψύκτες. Αναλυτικά, κατά την τυπική μέρα καλοκαιριού οι ηλεκτρικές ανάγκες καλύπτονται πλήρως, χωρίς τη συμβολή του δικτύου, ενώ για την τυπική μέρα χειμώνα εισάγονται συνολικά 2.98 kW_e κατά τις ώρες 20:00-21:00.

Όσον αφορά την μηχανή Ecopower e 4.7, επιτυγχάνεται κάθε ημέρα πλήρης ανεξαρτησία από το δίκτυο με όποιον από τους θερμοκίνητους ψύκτες και να συνδεθεί.

2. Η ανά ώρα εκροή ρεύματος

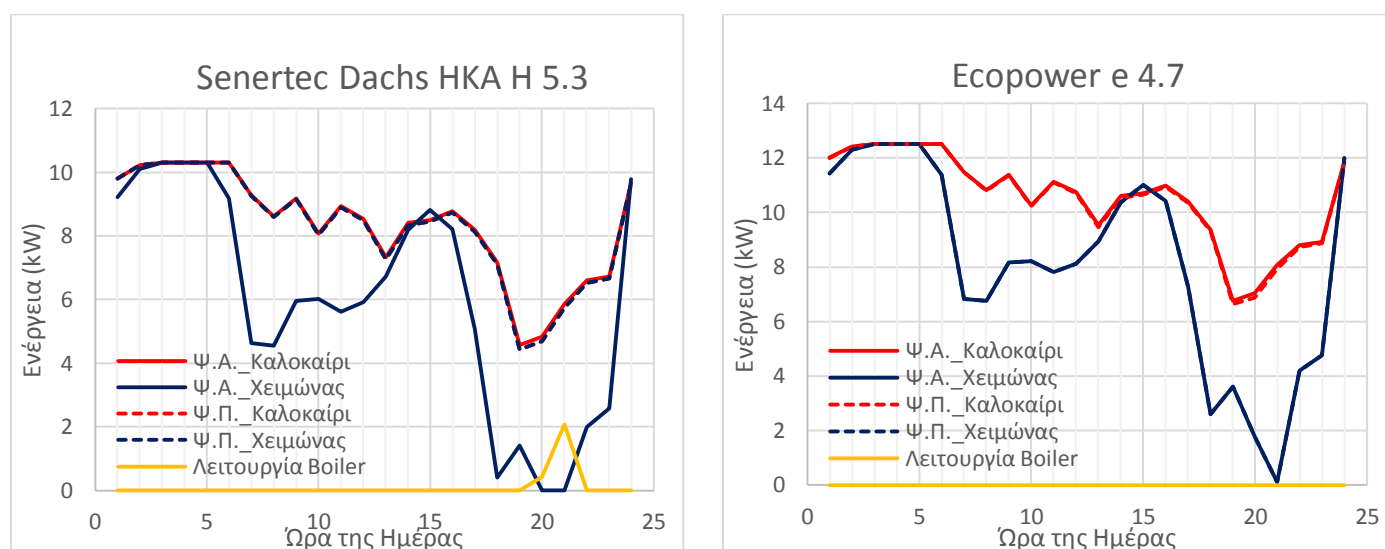


Διάγραμμα 7: Σύγκριση των μηχανών εσωτερικής καύσης ως προς την εκροή ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα

Με την μηχανή Senertec Dachs HKΑ Η 5.3 υπάρχει εκροή ρεύματος στο δίκτυο κατά τις ώρες που φαίνονται στο διάγραμμα. Όταν συνδέεται με ψύκτη απορρόφησης, εξάγει ρεύμα συνολικής ημερήσιας ισχύος 67.99 kW_e το χειμώνα και 72.48 kW_e το καλοκαίρι. Όταν συνδέεται με ψύκτη προσρόφησης οι τιμές αυτές είναι 76.64 kW_e και 81.91 kW_e αντίστοιχα.

Η μηχανή Ecorpower e 4.7 εξάγει ρεύμα όλες τις ώρες της ημέρας. Με ψύκτη απορρόφησης η συνολική ημερήσια ισχύς είναι 57.81 kW_e για το χειμώνα και 58.08 kW_e για το καλοκαίρι. Για τον ψύκτη προσρόφησης, οι τιμές αυτές είναι αντίστοιχα 67.24 kW_e και 67.51 kW_e.

3. Η ανά ώρα απορριπτόμενη θερμότητα στο περιβάλλον και η απαιτούμενη θερμότητα από το boiler



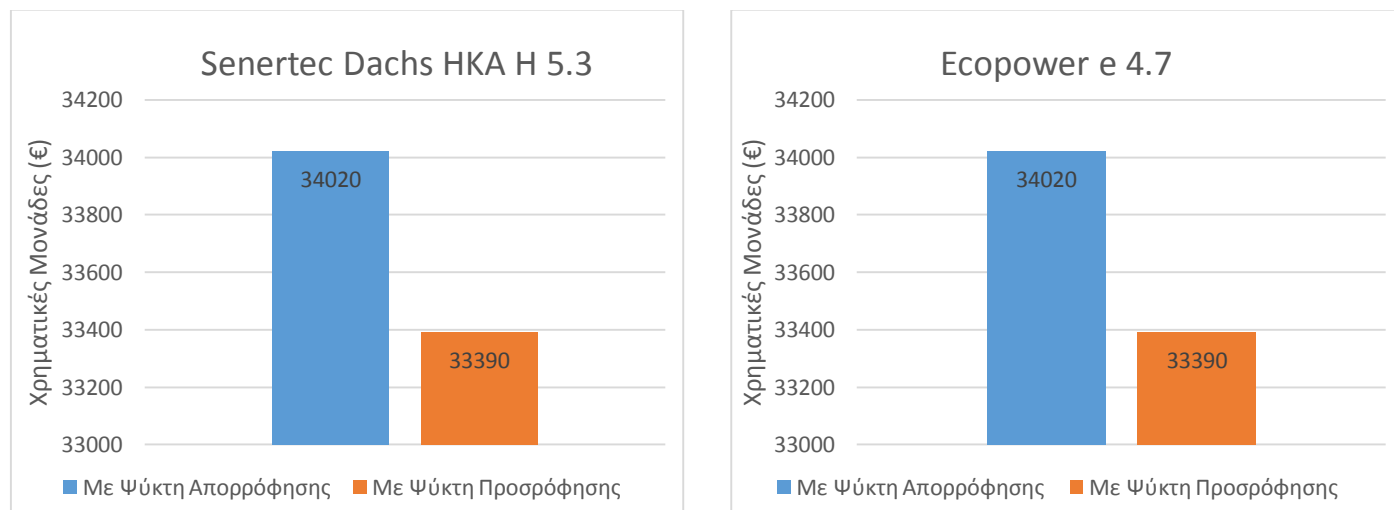
Διάγραμμα 8: Σύγκριση των μηχανών εσωτερικής καύσης ως προς την θερμότητα που απορρίπτει το σύστημα και την λειτουργία του boiler

Για την μηχανή Senertec Dachs HKΑ Η 5.3 την τυπική μέρα χειμώνα η συνολική ισχύς που απορρίπτεται είναι 145.29 kW_{th} και στις δύο περιπτώσεις ψυκτών. Για την τυπική μέρα καλοκαιριού, υπάρχει μια διαφορά, καθώς για τον ψύκτη απορρόφησης η συνολική απορριπτόμενη ισχύς είναι 200.49 kW_{th} και για τον προσρόφησης 139.40 kW_{th}. Σε κάθε περίπτωση, η μηχανή Senertec Dachs HKΑ Η 5.3 δεν μπορεί να καλύψει πλήρως τις θερμικές ανάγκες κατά τις ώρες 20:00-21:00 της τυπικής μέρας χειμώνα και έτσι λειτουργεί συμπληρωματικά το boiler προσφέροντας συνολικά 2.51 kW_{th}.

Για την μηχανή Ecorpower e 4.7, από τα διαγράμματα φαίνεται ότι και για την τυπική μέρα χειμώνα και για την τυπική μέρα καλοκαιριού απορρίπτεται η ίδια ποσότητα θερμότητας στο περιβάλλον με όποιον και από τους δυο θερμοκίνητους ψύκτες και αν συνδεθεί. Κατά την τυπική μέρα χειμώνα η συνολικά απορριπτόμενη ισχύς είναι 195.58 kW_{th} και για τους δυο ψύκτες, ενώ κατά την τυπική μέρα

καλοκαιριού είναι 253.29 kW_{th} και 252.20 kW_{th} για ψύκτη απορρόφησης και προσρόφησης αντίστοιχα. Σε κάθε περίπτωση, η μηχανή Ecopower e 4.7 μπορεί να καλύψει πλήρως τις θερμικές ανάγκες και το boiler δεν τίθεται καθόλου σε λειτουργία.

4. Συνολικό αρχικό κόστος εξοπλισμού



Διάγραμμα 9: Σύγκριση των μηχανών εσωτερικής καύσης ως προς το αρχικό κόστος εξοπλισμού του συστήματος

Και με τις δύο μηχανές οι ψυκτικές ανάγκες καλύπτονται εξ ολοκλήρου από τους θερμοκίνητους ψύκτες, επομένως ο ηλεκτρικός ψύκτης μπορεί να αφαιρεθεί, μειώνοντας το συνολικό αρχικό κόστος εξοπλισμού.

Με την μηχανή Ecopower e 4.7, μπορεί να παραλειφθεί και το ηλεκτρικό boiler.

9.6. Αξιολόγηση αποτελεσμάτων

Για να γίνει σωστά η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων της σύγκρισης μεταξύ των διάφορων τρόπων διάρθρωσης του υπό μελέτη συστήματος πρέπει να διευκρινιστούν τα εξής:

- ✓ Η εισροή ρεύματος από το δίκτυο σημαίνει πρόσθετα έξοδα, επομένως όσο λιγότερη είναι η ηλεκτρική ισχύς που εισάγεται τόσο προτιμότερο το σύστημα.
- ✓ Η εκροή ρεύματος από το σύστημα σημαίνει έσοδα, καθώς η περίσσεια ρεύματος αγοράζεται από το δίκτυο, και μάλιστα με υψηλότερη τιμή όταν γίνεται χρήση ΑΠΕ. Επομένως, όσο μεγαλύτερη η εκροή ηλεκτρικής ισχύος τόσο προτιμότερο το σύστημα.
- ✓ Η απορριπτόμενη θερμότητα στο περιβάλλον μπορεί να είναι ένδειξη υπερδιαστασιολόγησης της κινητήριας μηχανής. Γενικά, θεωρείται

καλύτερο ένα σύστημα με χαμηλές τιμές απορριπτόμενης θερμικής ισχύος, στα πλαίσια και της προσπάθειας βελτίωσης του συνολικού βαθμού απόδοσης του συστήματος.

- ✓ Η απαιτούμενη θερμότητα που απαιτείται από το boiler θα πρέπει να είναι όσο το δυνατόν λιγότερη, καθώς ιδανικά το σύστημα τριπαραγωγής θα πρέπει να είναι ικανό να καλύψει τις θερμικές ανάγκες.
- ✓ Το συνολικό αρχικό κόστος εξοπλισμού προτιμάται να είναι χαμηλό για ευνόητους λόγους.

Είναι εύκολο να διακρίνει κανείς από τα παραπάνω, ότι το υποτυπώδες σύστημα τριπαραγωγής που μελετάται δύναται να δουλέψει αποτελεσματικότερα και με χαμηλότερο αρχικό κόστος εξοπλισμού όταν ως θερμοκίνητη τεχνολογία ψύξης επιλέγεται ο ψύκτης προσρόφησης. Για το λόγο αυτό η σύγκριση των αποτελεσμάτων θα περιοριστεί στις περιπτώσεις σύνδεσης των κινητήριων μηχανών με τον ψύκτη προσρόφησης.

9.6.1. Μηχανές Stirling

Με κινητήρια μηχανή την Sunmachine, το σύστημα τριπαραγωγής καλύπτει τις ψυκτικές του ανάγκες. Δεν ισχύει το ίδιο για τις ηλεκτρικές και θερμικές ανάγκες, αφού όπως ειπώθηκε εισάγεται κάποιες ώρες ρεύμα από το δίκτυο και τίθεται σε λειτουργία το boiler. Ωστόσο, η θερμότητα που διαφεύγει στο περιβάλλον είναι πολύ λιγότερη από της μηχανής SoloStirling 161. Το ίδιο ισχύει και με το κόστος αγοράς.

Με κινητήρια μηχανή την SoloStirling 161, το σύστημα τριπαραγωγής καλύπτει όλες τις ηλεκτρικές, θερμικές και ψυκτικές ανάγκες της μονοκατοικίας με αποτέλεσμα την επίτευξη πλήρους ανεξαρτησίας αυτής. Ακόμη, το ρεύμα που πωλείται στο δίκτυο είναι πολλαπλάσιο της περίπτωσης με μηχανή Sunmachine και ο λοιπός εξοπλισμός μπορεί να παραληφθεί, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε ταχύτατη απόσβεση των επιπλέον 2.000 € στην τιμή αγοράς της. Στον αντίποδα, η θερμότητα που απορρίπτεται και συνεπώς μένει ανεκμετάλλευτη είναι αρκετά μεγάλη ώστε να αμεληθεί.

Με την υπάρχουσα συγκρότηση, καλύτερη επιλογή φαίνεται η μηχανή SoloStirling 161, ενώ με προσθήκη μπαταριών και δεξαμενής θερμικής αποθήκευσης, μπορεί να κριθεί ως μηχανή μεγαλύτερης ισχύος από την απαιτούμενη και τελικώς καλύτερη επιλογή να είναι η Sunmachine.

9.6.2. Μηχανές εσωτερικής καύσης

Με κινητήρια μηχανή την Senertec Dachs HKA H 5.3, από το σύστημα τριπαραγωγής η θερμότητα που διαφεύγει στο περιβάλλον είναι λιγότερη, ενώ ημερησίως πωλείται περισσότερο ρεύμα στο δίκτυο. Δεν επιτυγχάνεται ανεξαρτησία της μονοκατοικίας, όπως συμβαίνει με την κινητήρια μηχανή Ecopower e 4.7, αφού κάποιες ώρες χρειάζεται να αγοραστεί ρεύμα και να λειτουργήσει το boiler. Όμως, με την προσθήκη μπαταριών και δεξαμενής θερμικής αποθήκευσης αυτό το 'αδύνατο'

σημείο εξαλείφεται, δεδομένου ότι το μέγεθος της απαιτούμενης συμπληρωματικής ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος είναι μικρό. Τέλος, ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της Senertec Dachs HKA H 5.3 έναντι της Ecopower e 4.7 είναι ότι λειτουργεί με βιο-ντίζελ.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις παραμέτρους, είναι εμφανές ότι οι μηχανές εσωτερικής καύσης υπερτερούν, ειδικά όσον αφορά το συνολικό αρχικό κόστος εξοπλισμού. Αυτό ήταν αναμενόμενο, δεδομένου ότι οι μηχανές Stirling για συστήματα τέτοιας κλίμακας είναι σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης (Βλ. §2.2), γεγονός που έχει αρνητικό αντίκτυπο στην απόδοση και την τιμή αγοράς τους.

9.7. Προτάσεις / Βελτιώσεις

Η ανάλυση που έγινε ανωτέρω, λόγω των απλοποιήσεων και παραδοχών, παρέχει μόνο μια πρώτη διαστασιολόγηση και επιλογή των βασικών υποσυστημάτων του αντικείμενου μελέτης, δηλαδή της μονοκατοικίας. Για να σχηματιστεί τελικώς το αποδοτικότερο τριπαραγωγό σύστημα, απαιτούνται επιπρόσθετες πληροφορίες και η εξέταση επιπλέον περιπτώσεων (Βλ. και §5).

Αρχικά, πρέπει να εξεταστούν όλοι εκείνοι οι παράγοντες που χρήζουν βελτίωσης και δε σχετίζονται με το σύστημα τριπαραγωγής, αλλά με το αντικείμενο μελέτης καθαυτό. Πρόκειται δηλαδή για τρόπους μείωσης των απωλειών και αύξησης της ενεργειακής κλάσης της μονοκατοικίας, όπως τοποθέτηση διπλών υαλοπινάκων, μονώσεων, καλύτερων ηλεκτρικών συσκευών, τεχνικών βιοκλιματικού σχεδιασμού, εάν και εφόσον βέβαια όλα αυτά είναι εφικτά. Στον παρακάτω πίνακα φαίνονται πώς μπορούν εξωτερικοί παράγοντες να επηρεάσουν το σύστημα. Οι επεμβάσεις που μπορούν να γίνουν αυτού του είδους συχνά παραλείπονται ή γίνονται μετά την τοποθέτηση του συστήματος τριπαραγωγής.

Στην συνέχεια, πρέπει οι πληροφορίες σχετικά με τις ενεργειακές ανάγκες της μονοκατοικίας να λαμβάνονται λεπτομερέστερα και σε μεγαλύτερο βάθος χρόνου, δηλαδή να μετρούνται τυπικές μέρες για κάθε μήνα των προηγούμενων ετών, να καταγράφονται τα μέγιστα και τα ελάχιστα κάθε ανάγκης και τότε εμφανίζονται και εάν είναι δυνατόν να χρησιμοποιούνται μοντέλα πρόβλεψης για την μελλοντική ζήτηση. Με τον τρόπο αυτό, γίνεται ακριβέστερη διαστασιολόγηση της κινητήριας μηχανής και μπορούν να φανούν οι στρατηγικές λειτουργίας (Βλ. § 4, (Kanvadias, et al., 2009)), που είναι κατάλληλες κάθε φορά έτσι ώστε να γίνεται καλύτερη εκμετάλλευση των εξόδων της κινητήριας μηχανής και να μειώνονται οι απώλειες. Για παράδειγμα, στην παραπάνω ανάλυση, βλέποντας το μέγεθος των θερμικών απωλειών η λειτουργία με έμφαση στη θερμική έξοδο εκ πρώτης όψεως φαίνεται καλύτερη.

Πίνακας 12: Μερικοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση μικρο-τριπαραγωγού συστήματος σε κατοικία

Παράγοντας	Πιθανή επίδραση στο σύστημα
Βελτίωση στα δομικά υλικά του κτηρίου	Μεταβολή της θερμικής ζήτησης, του θερμικού φορτίου και του χρόνου λειτουργίας
Μέγεθος κτηρίου και αριθμός χρηστών	Μεταβολή της θερμικής ζήτησης, του θερμικού φορτίου και του χρόνου λειτουργίας
Χρήση καλύτερης απόδοσης οικιακών συσκευών	Μεταβολή της ζήτησης σε ηλεκτρισμό
Προσθήκη δεξαμενής αποθήκευσης κρύου νερού	Αλλαγή του τρόπου λειτουργίας
Ευαισθησία σε βελτιώσεις του συνδεδεμένου δικτύου	Αλλαγή των αποτελεσμάτων σύγκρισης με την περίπτωση χωριστής παραγωγής
Ευαισθησία στις τιμές καυσίμων	Αλλαγή του κόστους συντήρησης και λειτουργίας
Ευαισθησία στην τιμολόγηση του ρεύματος	Αλλαγή των αποτελεσμάτων σύγκρισης με την περίπτωση χωριστής παραγωγής

(Borga, et al., 2013)

Ακόμη, πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν οι καμπύλες λειτουργίας τόσο της κινητήριας μηχανής, όσο και των θερμοκίνητων ψυκτών. Η θεώρηση που έγινε εδώ της διατήρησης του ονομαστικού βαθμού απόδοσης σταθερού και στα δύο υποσυστήματα δεν αποτελεί μια ρεαλιστική θεώρηση.

Πέραν των μπαταριών και της δεξαμενής αποθήκευσης που έχει ήδη αναφερθεί, σημαντική βελτίωση αυτού του υποτυπώδους συστήματος μπορεί να επέλθει και με εκτενέστερη έρευνα αγοράς στα βασικά υποσυστήματα. Τα μοντέλα κινητήριων μηχανών που είναι διαθέσιμα στην αγορά, προφανώς δε περιορίζονται σε αυτά που συγκρίνονται παραπάνω. Επίσης, αντί για ηλεκτρικό boiler, υπάρχει η επιλογή του θερμικού boiler ή του boiler αερίου. Η σύνδεση με ηλιακά είναι επίσης μια διαδεδομένη επιλογή.

Για το συγκεκριμένο ή άλλα αντικείμενα μελέτης, μπορούν σε επόμενο στάδιο να μελετηθούν και άλλοι τρόποι για μείωση του ποσοστού εξάρτησης από εξωτερικές πηγές, κυρίως μέσω της εκμετάλλευσης των ενεργειών που απορρίπτει το σύστημα μετά την κάλυψη των αναγκών. Η προσθήκη τεχνολογιών για την παραγωγή των καυσίμων στο σπίτι δεν είναι μια διαδεδομένη πρακτική. Παρόλα αυτά, το καύσιμο που χρησιμοποιείται από την κινητήρια μηχανή εάν υπάρχουν και οι κατάλληλες πρώτες ύλες δεν χρειάζεται εξ ολοκλήρου να αγοράζεται. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που η εξεταζόμενη οικία είναι κοντά σε αγροτική ή δασική έκταση, με ένα σπαστήρα και συμπιεστή δημιουργούνται pellets. Η τροφοδοσία αυτών μπορεί να καλύπτεται από το παραγόμενο ρεύμα. Πέραν αυτού, έχουν γίνει γνωστοί και τρόποι για την παραγωγή βιο-ντίζελ από τα χρησιμοποιημένα μαγειρικά έλαια και λίπη, με αποτέλεσμα να μειώνεται το ποσοστό αυτού που πρέπει να αγοράζεται. Ακόμη

παραπέρα, η συγκρότηση θερμοκηπίου μικρού μεγέθους, εάν υπάρχει η κατάλληλη έκταση ή η προσθήκη στα παραπάνω μιας μηχανής αφαλάτωσης, για αντικείμενα μελέτης κοντά σε λίμνες και θάλασσες, δύνανται να προσφέρουν ανεξαρτησία στον τομέα των τροφίμων και του νερού, χρησιμοποιώντας την θερμότητα που διαφεύγει ανεκμετάλλευτη στη περιβάλλον.

Τέλος, όπως και σε κάθε έργο μηχανικού, οι οικονομικοί δείκτες είναι από τις πιο καθοριστικές παραμέτρους. Η βιωσιμότητα του έργου, η διάρκεια ζωής του, η περίοδος αποπληρωμής είναι μόνο μερικοί από αυτούς.

Όταν όλα τα παραπάνω εξεταστούν και αξιολογηθούν, τότε το αποτέλεσμα δεν μπορεί παρά να είναι το καλύτερο.

Κεφάλαιο 10^ο

Συμπεράσματα

Τα συστήματα τριπαραγωγής μικρο-κλίμακας είναι πολλά υποσχόμενα. Τα πλεονεκτήματα τους έχουν ήδη αναφερθεί, ενώ πολλές έρευνες γίνονται για την βελτίωση των υποσυστημάτων τους και των τρόπων λειτουργίας τους. Ειδικότερα στον οικιακό τομέα μπορούν να αποτελέσουν μια τεχνικοοικονομικά συμφέρουσα εναλλακτική πρόταση έναντι των μέχρι τώρα χρησιμοποιούμενων τρόπων κάλυψης των αναγκών, όπως φαίνεται από την μελέτη περίπτωσης στην παρούσα διπλωματική, αλλά και από τις υπάρχουσες στην βιβλιογραφία. Η προσοχή των ερευνητών, μελετητών και εταιριών πρέπει να στραφεί τώρα στα υβριδικά τριπαραγωγά συστήματα, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την διείσδυση φιλικότερων προς το περιβάλλον τεχνολογιών και συμβάλλοντας στην επίτευξη του στόχου της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την ολοκληρωμένη ενέργεια και την κλιματική αλλαγή, αποκαλούμενη και '20-20-20'. Φυσικά η χρήση των τριπαραγωγών συστημάτων δεν πρέπει να περιοριστεί μόνο στην μικρο-κλίμακα, αλλά να γίνεται παράλληλα και σε συστήματα μεγαλύτερων κλιμάκων για την κάλυψη πληθώρας εφαρμογών.

Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί, ότι η προσπάθεια της επιστημονικής κοινότητας για συνεχή ανάπτυξη και βελτιστοποίηση αυτών των συστημάτων δεν μπορεί από μόνη της να επιφέρει αλλαγές στον σημερινό συγκεντρωτικό τρόπο παραγωγής ενέργειας. Κάθε κράτος οφείλει μέσω κινήτρων και νομοθεσιών να προωθή τέτοιες πρακτικές στους πολίτες και τους επενδυτές της, κατευθύνοντας έτσι αλλαγές στις γραμμές παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, το σημαντικότερο μειονέκτημα των τριπαραγωγών συστημάτων, δηλαδή το υψηλό αρχικό κόστος εξοπλισμού δύναται να εξαλειφθεί.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Ahmadi, Pouria, Dincer, Ibrahim και Rosen, Marc A. 2012.** Exergo-environmental analysis of an integrated organic Rankine cycle. *Energy Conversion and Management* 64. 2012, σσ. 447-453.
- Allen, S.R., Hammond, G.P. και McManus, M.C. 2008.** Prospects for and barriers to domestic micro-generation: A United Kingdom perspective. *Applied Energy* 85. 2008, σσ. 528–544.
- Aman, J., Ting, D.S.-K. και Henshaw, P. 2014.** Residential solar air conditioning: Energy and exergy analyses of an ammonia-water absorption cooling system. *Applied Thermal Engineering* 62. 2014, σσ. 424-432.
- Angrisani, G., Roselli, C. και Sasso, M. 2013.** Distributed microtrigeneration systems. *Progress in Energy and Combustion Science* 38. 2013, σσ. 502-521.
- Angrisani, Giovanni, και συν. 2010.** Desiccant HVAC system driven by a micro-CHP: Experimental analysis. *Energy and Buildings* 42. 2010, σσ. 2028–2035.
- Angrisani, Giovanni, και συν. 2014.** Dynamic performance assessment of a micro-trigeneration system with a desiccant-based air handling unit in Southern Italy climatic conditions. *Energy Conversion and Management* 80. 2014, σσ. 188–201.
- Angrisani, και συν. 2012.** Experimental results of a micro-trigeneration installation. *Applied Thermal Engineering* 38. 2012, σ. 78e90.
- Aprile και Marcello. 2009.** *The market potential of micro-CHCP*. s.l. : PolySMART, 2009.
- Arosio, Sergio, Guilizzoni, Manfredo και Pravettoni, Francesca. 2011.** A model for micro-trigeneration systems based on linear optimization and the Italian tariff policy. *Applied Thermal Engineering* 31. 2011, σσ. 2292-2300.
- Askalanya, Ahmed A., και συν. 2012.** A review on adsorption cooling systems with adsorbent carbon. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16. 2012, σσ. 493–500.
- Badea, Nicolae. 2015.** *Design for Micro-Combined Cooling, Heating and Power Systems- Stirling Engines and Renewable Power Systems*. s.l. : Springer, 2015. σ. 369.
- Bao, Huashan, και συν. 2014.** Chemisorption cooling and electric power cogeneration system driven by low grade heat. *Energy* 72. 2014, σσ. 590-598.
- Berliner Energieagentur GmbH.** Use of micro CHP units in the electrical power range 1 – 5 kWe for Berlin. <http://www.cres.gr/perch/Germany1>. [Ηλεκτρονικό]
- Best, R και Rivera, W. 2014.** A review of thermal cooling systems. *Applied Thermal Engineering* . 2014.
- Borga, Simon Paul και Kelly, Nicolas James. 2013.** High resolution performance analysis of micro-trigeneration in an energy-efficient residential building. *Energy and Buildings* 67. 2013, σσ. 153–165.

- Brandoni, C., και συν. 2014.** Simulation of hybrid renewable microgeneration systems for variable electricity prices. *Applied Thermal Engineering* 71. 2014, σσ. 667-676.
- Cho, Heejin, Smith, Amanda D. και Mago, Pedro. 2014.** Combined cooling, heating and power: A review of performance. *Applied Energy* 136. 2014, σσ. 168-185.
- Chua, K.J., και συν. 2012.** Integrating renewable energy technologies to support building trigeneration - A multi-criteria analysis. *Renewable Energy* 41. 2012, σσ. 358-367.
- d'Accadia, M. Dentice, και συν. 2003.** Micro-combined heat and power in residential and light commercial applications. *Applied Thermal Engineering* 23. 2003, σσ. 1247–1259.
- Deng, J., Wang, R.Z. και Han, G.Y. 2011.** A review of thermally activated cooling technologies for combined cooling, heating and power systems. *Progress in Energy and Combustion Science* 37. 2011, σσ. 172-203.
- Deng, Jian, και συν. 2008.** Exergy cost analysis of a micro-trigeneration system based on the structural theory of thermoeconomics. *Energy* 33. 2008, σσ. 1417– 1426.
- Dong, Leilei, Liu, Hao και Riffat, Saffa. 2009.** Development of small-scale and micro-scale biomass-fuelled CHP systems –A literature review. *Applied Thermal Engineering* 29. 2009, σσ. 2119–2126.
- Dutta, P., και συν. 2014.** Organic Brayton Cycles with solid sorption thermal compression for low grade heat utilization. *Applied Thermal Engineering* 62. 2014, σσ. 171-175.
- Ebrahimi, Masood και Keshavarz, Ali. 2014.** *Combined Cooling, Heating and Power: Decision-Making, Design and Optimization.* 2014.
- Ebrahimi, Masood και Keshavarz, Ali. 2012.** Prime mover selection for a residential micro-CCHP by using two multi-criteria decision-making methods. *Energy and Buildings* 55. 2012, σσ. 322-331.
- Ebrahimi, Masood, Keshavarz, Ali και Jamali, Arash. 2012.** Energy and exergy analyses of a micro-steam CCHP cycle for a residential building. *Energy and Buildings* 45. 2012, σσ. 202– 210.
- Fahad, A. Al-Sulaiman, Hamdullahpur, Feridun και Dincer, Ibrahim. 2010.** Trigeneration: A comprehensive review based on prime movers. *INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY RESEARCH* 35. 2010, σσ. 233-258.
- Gluesenkamp, Kyle, Hwang, Yunho και Radermacher, Reinhard. 2011.** High efficiency micro trigeneration systems. *Applied Thermal Engineering* 50. 2011, σσ. 1480-1486.
- González, Arnau, και συν. 2015.** Review of micro- and small-scale technologies to produce electricity and heat from Mediterranean forests' wood chips. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43. 2015, σσ. 143–155.
- Goyal, Rahul, και συν. 2014.** Performance and emission analysis of CI engine operated microtrigeneration system for power, heating and space cooling. *Applied Thermal Engineering* xxx. 2014, σσ. 1-9.

- Grisel, Ruud J.H., Smeding, Simon F. και Boer, Robert de. 2010.** Waste heat driven silica gel/water adsorption cooling in trigeneration. *Applied Thermal Engineering* 30. 2010, σσ. 1039–1046.
- Henning, Hans-Martin, και συν. 2007.** Micro tri-generation system for indoor air conditioning in the Mediterranean climate. *Applied Thermal Engineering* 27. 2007, σσ. 2188–2194.
- Houwing, Michiel, και συν. 2008.** Uncertainties in the design and operation of distributed energy resources: The case of micro-CHP systems. *Energy* 33. 2008, σσ. 1518–1536.
- Huang, Y., και συν. 2011.** Biomass fuelled trigeneration system in selected buildings. *Energy Conversion and Management* 52. 2011, σσ. 2448–2454.
- Huangfu, Y., και συν. 2006.** Experimental investigation of adsorption chiller for Micro-scale BCHP system application. *Energy and Buildings* 39. 2006, σσ. 120-127.
- Jakob, Uli. 2008.** *www.solarnext.eu*. 2008.
- Jradi, M. και Riffat, S. 2014.** Experimental investigation of a biomass-fuelled micro-scale trigeneration system with an organic Rankine cycle and liquid desiccant cooling unit. *Energy* 71. 2014, σσ. 80-93.
- Jradi, M. και S.Riffat. 2013.** Tri-generation systems: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32. 2013, σσ. 396-415.
- Kavvadias, K.C., Tosios, A.P. και Maroulis, Z.B. 2009.** Design of a combined heating, cooling and power system: Sizing, operation strategy selection and parametric analysis. *Energy Conversion and Management* 51. 2009, σσ. 833-845.
- Khatri, Kamal Kishore, και συν. 2010.** Experimental investigation of CI engine operated Micro-Trigeneration system. *Applied Thermal Engineering* 30. 2010, σσ. 1505-1509.
- Kong, X.Q., και συν. 2005.** Experimental investigation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine. *International Journal of Refrigeration* 28. 2005, σσ. 977-987.
- Kong, X.Q., και συν. 2009.** Optimal operation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine. *Energy Conversion and Management* 50. 2009, σσ. 530–538.
- Kong, Xiang-qiang, και συν. 2010.** Performance Research of a Micro-CCHP System with Adsorption Chiller. 2010, σσ. 671-675.
- Li, Hui, και συν. 2005.** Energy utilization evaluation of CCHP systems. *Energy and Buildings* 38. 2005, σσ. 253-257.
- Li, S. και Wu, J.Y. 2009.** Theoretical research of a silica gel–water adsorption chiller in a micro combined cooling, heating and power (CCHP) system. *Applied Energy* 86. 2009, σσ. 958–967.
- Lin, Lin, και συν. 2007.** An experimental investigation of a household size trigeneration. *Applied Thermal Engineering* 27. 2007, σσ. 576–585.

- M., Badami και A., Portoraro. 2009.** Performance analysis of an innovative small-scale trigeneration plant with liquid desiccant cooling system. *Energy and Buildings* 41. 2009, σσ. 1195–1204.
- Mago, P.J., Chamra, L.M. και Ramsay, J. 2010.** Micro-combined cooling, heating and power systems hybrid electric-thermal Micro-combined cooling, heating and power systems hybrid electric-thermal. *Applied Thermal Engineering* 30. 2010, σσ. 800–806.
- Masood, Ebrahimi και Ali, Keshavarz. 2013.** Sizing the prime mover of a residential micro-combined cooling heating and power (CCHP) system by multi-criteria sizing method for different climates. *Energy* 54. 2013, σσ. 291-301.
- Mingxi, Liu, Shi, Yang και Fang, Fang. 2014.** Combined cooling, heating and power systems: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 35. 2014, σσ. 1-22.
- Mingxi, Liu, Yang, Shi και Fang, Fang. 2014.** Combined cooling, heating and power systems: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014, σσ. 1–22.
- Pang, S.C., και συν. 2013.** Liquid absorption and solid adsorption system for household, industrial and automobile applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 28. 2013, σσ. 836–847.
- Ren, Hongbo και Gao, Weijun. 2010.** Economic and environmental evaluation of micro CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan. *Energy and Buildings* 42. 2010, σσ. 853–861.
- Roselli, Carlo, και συν. 2011.** Experimental analysis of microgenerators based on different prime movers. *Energy and Buildings* 43. 2011, σσ. 796–804.
- Sabina, Rosiek και Javier, Batlles Francisco. 2013.** Renewable energy solutions for building cooling, heating and power system installed in an institutional building: Case study in southern Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26. 2013, σσ. 147–168.
- Sarbu, Ioan και Sebarchievici, Calin. 2013.** Review of solar refrigeration and cooling systems. *Energy and Buildings* 67. 2013, σσ. 286–297.
- Solmus, Ismail, και συν. 2010.** Adsorption properties of a natural zeolite–water pair for use in adsorption cooling cycles. *Applied Energy* 87. 2010, σσ. 2062–2067.
- Sonar, Deepesh, Soni, S.L. και Sharma, Dilip. 2014.** Micro-trigeneration for energy sustainability: Technologies, tools and trends. *Applied Thermal Engineering* 71. 2014, σσ. 790-796.
- Srihirin, Pongsid, Aphornratana, Satha και Chungpaibulpatana, Supachart. 2001.** A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5. 2001, σσ. 343–372.
- Sun, Jian, Fu, Lin και Zhang, Shigang. 2012.** A review of working fluids of absorption cycles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16. 2012, σσ. 1899–1906.
- Tso, C.Y. και Chao, Christopher Y.H. 2012.** Activated carbon, silica-gel and calcium chloride composite adsorbents for energy efficient solar adsorption cooling and dehumidification systems. *International journal of refrigeration* 35. 2012, σσ. 1626-1638.

- Wang, Dechang, και συν. 2014.** Progress in silica gel–water adsorption refrigeration technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 30. 2014, σσ. 85-104.
- Wang, L.W., Wang, R.Z. και Oliveira, R.G. 2009.** A review on adsorption working pairs for refrigeration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13. 2009, σσ. 518–534.
- Wang, Yaodong, και συν. 2011.** An investigation of a household size trigeneration running with hydrogen. *Applied Energy* 88. 2011, σσ. 2176–2182.
- Wang, Yuqing, και συν. 2014.** A micro tri-generation system based on direct flame fuel cells for residential applications. *international journal of hydrogen energy* 39. 2014, σσ. 5996-6005.
- Wu, D.W. και Wang, R.Z. 2006.** Combined cooling, heating and power: A review. *Progress in Energy and Combustion Science* 32. 2006, σσ. 459-495.
- Wu, Dawei, Chen, Junlong και Roskilly, Anthony P. 2015.** Phase change material thermal storage for biofuel preheating in micro trigeneration application: A numerical study. *Applied Energy* 137. 2015, σσ. 832–844.
- Wu, J.Y., και συν. 2014.** Experimental and simulative investigation of a micro-CCHP (micro combined cooling, heating and power) system with thermal management controller. *Energy* 68. 2014, σσ. 444-453.
- Yagoub, W., Doherty, P. και Riffat, S.B. 2006.** Solar energy-gas driven micro-CHP system for an office building. *Applied Thermal Engineering* 26. 2006, σσ. 1604–1610.
- Αραβανής, Θεοφάνης Ι. ΧΑΜΗΛΟΣΥΧΝΑ ΗΛΕΚΤΡΙΚΑ ΚΑΙ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ.**
- Βικιπαιδεία. Ηλιακοί Θερμοσίφωνες.**
- Ζερβός, Αρθούρος. 2008. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. 2008.**