



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων

Τομέας Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Οικονομική αξιολόγηση σεναρίων
συμπαγωγής και τριπαραγωγής σε
οικιακές εφαρμογές»*

Του μεταπτυχιακού φοιτητή

Κουμιώτη Νικόλαου

Επιβλέπων

Κακαράς Εμμανουήλ, Καθηγητής,
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, ΕΜΠ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017

*«If you want to live a happy life,
Tie it to a goal,
Not to people
Or objects.»*

Albert Einstein.





Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016 – 2017 στο εργαστήριο Ατμοκινητήρων και Λεβήτων της σχολής των Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Αντικείμενο της παρούσας εργασίας υπήρξε η οικονομική αξιολόγηση οικιακής συμπαραγωγής και τριπαραγωγής για παραγωγή θέρμανσης τον χειμώνα και ψύξη το καλοκαίρι μέσω ψύκτη απορρόφησης ή προσρόφησης σε σύγκριση με τη συμβατική περίπτωση λέβητα ΦΑ το χειμώνα και αντλία θερμότητας το καλοκαίρι.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω αρχικά τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Σωτήριο Καρέλλα για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το θέμα αυτό, την υπομονή, την κατανόηση και την θέληση του, που έθεσαν τα θεμέλια για την εκπόνηση και την ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής εργασίας. Επίσης πολλές ευχαριστίες οφείλω στον διδακτορικό φοιτητή Μπραϊμάκη Κωσταντίνο για την πολύτιμη βοήθεια του. Τέλος, πολλά ευχαριστώ οφείλω στην οικογένεια μου που με στηρίζει σε ό,τι κάνω και αποτελεί κύρια πηγή δύναμης και κινήτρου για μένα, καθώς επίσης στους φίλους μου που με αγαπούν και με αφογκράζουνται.

Η διπλωματική αυτή είναι στην μνήμη των πολυαγαπημένων μου παππούδων Άγγελου και Νίκου και της γιαγιάς μου Ασπασίας.



Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε η μελέτη της ανάπτυξης συστημάτων οικιακής μικρό-συμπαραγωγής ή μικρό-τριπαραγωγής. Συστήματα τέτοιου είδους αποτελούν σημαντική καινοτομία στο κλάδο της θέρμανσης και ψύξης ενός σπιτιού, ενός ξενοδοχείου, ενός νοσοκομείου ή και μίας μικρής βιομηχανίας καθώς δίνουν την δυνατότητα της αποδοτικότερης ενεργειακής κάλυψης φέρνοντας τις κοινωνίες ένα βήμα πιο κοντά στην αιεφόρο ανάπτυξη.

Για τους λόγους αυτούς αναπτύχθηκαν, παρουσιάστηκαν και μελετήθηκαν ως προς τον τρόπο λειτουργίας και την οικονομική βιωσιμότητα τους τρία σενάρια μικρό-συμπαραγωγής/τριπαραγωγής, τα οποία είναι εγκατεστημένα στο υπόγειο τριώροφης πολυκατοικίας στην περιοχή της Αττικής και είναι συνδεδεμένα με το εθνικό δίκτυο. Με τη βοήθεια μιας βάσης ενεργειακών δεδομένων στο Excel προσδιορίστηκαν για κάθε ώρα του έτους οι ανάγκες της πολυκατοικίας σε θέρμανση και ψύξη. Σε όλα τα σενάρια το χειμώνα οι ανάγκες για την θέρμανση των χώρων και του ZNX καλύπτονται από μια συμπαραγωγική μονάδα που είναι MEK, ότι αδυνατεί να καλύψει η MEK καλύπτεται από ένα λέβητα αιχμής. Στο πρώτο και στο τρίτο σενάριο οι περισσότερες ψυκτικές ανάγκες καλύπτονται από τις καινοτόμες τεχνολογίες ψύξης, τον ψύκτη προσρόφησης και απορρόφησης, αντίστοιχα. Ενώ στο δεύτερο σενάριο χρησιμοποιείται αντλία θερμότητας, η οποία τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο. Σε όλα τα σενάρια η συμπαραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πουλιέται στο δίκτυο σε τιμή που ορίζεται από τη νομοθεσία και υπολογίζεται.

Στο κεφάλαιο 1 παρουσιάζονται και ορίζονται βασικές έννοιες που χρησιμοποιούνται στην εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας καθώς και μερικά βασικά στοιχεία και εφαρμογές τους. Στο κεφάλαιο 2 παρουσιάζονται αναλυτικά τα τρία εξεταζόμενα σενάρια συμπαραγωγής και αναλύονται με διαγράμματα ροής και λειτουργίας τόσο για την χειμερινή όσο και για την καλοκαιρινή περίοδο. Στο κεφάλαιο 3 παρουσιάζεται η οικονομική ανάλυση των τριών σεναρίων και παρουσιάζονται κάποιες αναλύσεις ευαισθησίας για την διεξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων στην προσπάθεια μελέτης και κατανόησης αυτών των συστημάτων μικρο-συμπαραγωγής. Τέλος στο κεφάλαιο 4, παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της διπλωματικής εργασίας καθώς και προτάσεις για μελλοντική μελέτη.

Στόχος της εργασίας είναι ο υπολογισμός της οικονομικής απόδοσης τέτοιων συστημάτων και μέσω σύγκρισης με συμβατικά συστήματα ψύξης και θέρμανσης, η εκτίμηση της προοπτικής ενσωμάτωσής τους στον οικιακό τομέα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το σενάριο λειτουργίας με τον ψύκτη απορρόφησης είναι το πιο οικονομικά βιώσιμο για αυτήν την εφαρμογή με έντοκη περίοδο αποπληρωμής περίπου τα 10 έτη, ενώ στη συνέχεια έπονται αυτό με τον ψύκτη προσρόφησης και την αντλία θερμότητας με έντοκη περίοδο αποπληρωμής περίπου 20 και 25 χρόνια αντίστοιχα.



Abstract

The purpose of this diploma thesis is to study the development and the usage of micro combined heat and power (CHP)/ combined cooling heat and power (CCHP) technologies in the residential sector. Micro-CHP/CCHP systems represent a great innovation in the heating and cooling sector of households, hotels, hospitals or even small industries, since they enable a more efficient coverage of energy demands, bringing communities one step closer to sustainable development. For this reason, an innovative system like that assumed to be installed in a multi-family block in Athens.

In this diploma thesis, three micro CHP/CCHP systems scenarios for residential buildings, have been evaluated and analyzed as far as their economical aspect. These systems were assumed to be installed in the basement of a multi-family block and connected to the grid. With the aid of an energy data base and by using Excel, the annual heating and cooling demands of the building were determined. In every scenario, the winter, the heat for space and water is produced by an internal combustion engine and a natural gas boiler. On the other hand, during summer, the heat produced by the internal combustion engine combined with innovative cooling technologies and used for cooling loads. An adsorption and an absorption chiller are used to the first and third scenarios, respectively. The second scenario use a heat pump for cooling loads. The electricity, that simultaneously produced by the internal combustion engine, is sell every moment to the grid.

In the first chapter, the definitions of CHP/CCHP systems are provided, while there is also a great analysis regarding their advantages and disadvantages. Lastly there is a brief description on the ways these systems can be applied. In the second chapter, the three micro CHP/CCHP systems scenarios are analyzed thoroughly, and their flowcharts are presented. The third chapter includes the economic evaluation of every scenario as well as a sensitivity analysis in order to establish accurate findings for every scenario respectively. Through these evaluation and analysis some useful results and conclusions about the three scenarios are pointed. Lastly, the last chapter summarizes the conclusions and provides ideas for future research topics regarding this topic.

The purpose of this study is to determine economic efficiency of the investigated system and through comparison with the conventional heating and cooling systems, the evaluation of whether they could be integrated in the residential sector. The results show that the scenario with the absorption chiller is the most profitable investment because it has a discount payback period of almost 10 years, in contrast to scenario with the adsorption chiller and the heat pump, which has discount payback periods of almost 20 and 25 years, respectively.





ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Πρόλογος.....	5
Περίληψη.....	7
Abstract.....	9
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	11
Περιεχόμενα Εικόνων	13
Περιεχόμενα Πινάκων	15
Περιεχόμενα Διαγραμμάτων	17
1. Εισαγωγή.....	19
1.1. Εισαγωγικά Στοιχεία	19
1.2. Συμβατικά συστήματα για παραγωγή θερμότητας και ψύξης στα σπίτια	21
1.2.1. Ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμού, αντλία θερμότητας	21
1.2.2. Λέβητας φυσικού αερίου.....	24
1.3. Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και θερμότητας	25
1.3.1. Ορισμός και γενικά στοιχεία για την συμπαραγωγή	25
1.3.2. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα συμπαραγωγής.....	28
1.3.3. Τεχνολογίες της Συμπαραγωγής και τρόποι λειτουργίας.....	30
1.3.4. Μικρο-συμπαραγωγή και οικιακή συμπαραγωγή.....	34
1.3.5. Εφαρμογές Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας.....	36
2. Διαμόρφωση σεναρίων σε συστήματα οικιακής συμπαραγωγής και τριπαραγωγής με ψύκτη απορρόφησης και προσρόφησης	43
2.1. Βασικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενων στα σενάρια τεχνολογιών	43
2.1.1. Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, ΜΕΚ.....	43
2.1.2. Ψύκτες προσρόφησης.....	44
2.1.3. Ψύκτες απορρόφησης.....	47
2.2. Περιγραφή κατοικίας	50
2.3. Σύστημα οικιακής μικρο-τριπαραγωγής με ψύκτη προσρόφησης	55
2.3.1. Στρατηγική λειτουργίας και περιγραφή συνολικού συστήματος	55
2.4. Σύστημα οικιακής μικρο-συμπαραγωγής με αντλία θερμότητας.	63
2.4.1. Στρατηγική λειτουργίας και περιγραφή συνολικού συστήματος.....	63
2.5. Σύστημα οικιακής μικρο-τριπαραγωγής με ψύκτη απορρόφησης	64
2.5.1. Στρατηγική λειτουργίας και περιγραφή συνολικού συστήματος.....	64



3. Οικονομική αξιολόγηση 3 σεναρίων οικιακής συμπαραγωγής	66
3.1. Παραδοχές και οικονομική ανάλυση σεναρίων	67
3.1.1. Οικονομικοί δείκτες.....	67
3.1.2. Παραδοχές.....	68
3.1.3. Συμβατικό σενάριο θέρμανσης ψύξης	71
3.1.4. Σενάριο 1 (Τριπαραγωγή με MEK και ψύκτη προσρόφησης).....	71
3.1.5. Σενάριο 2 (Συμπαραγωγή με MEK και χρήση ΑΘ)	74
3.1.6. Σενάριο 3 (Τριπαραγωγή με MEK και ψύκτη απορρόφησης).....	74
3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	75
3.2.1. Οικονομικά αποτελέσματα συμβατικού σεναρίου θέρμανσης ψύξης	75
3.2.2. Οικονομικά αποτελέσματα σεναρίου 1 (τριπαραγωγή με MEK και ψύκτη προσρόφησης)	76
3.2.3. Οικονομικά αποτελέσματα σεναρίου 2 (συμπαραγωγή με MEK και χρήση ΑΘ)	79
3.2.4. Οικονομικά αποτελέσματα σεναρίου 3 (τριπαραγωγή με MEK και ψύκτη απορρόφησης)	83
3.2.5. Σύγκριση 3 σεναρίων	86
3.3. Αναλύσεις Ευαισθησίας	87
3.3.1. Μεταβολή της εγκατεστημένης ονομαστικής θερμικής ισχύος της MEK ως προς το peak θερμικό φορτίο.....	87
3.3.2. Μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς των συστημάτων ψύξης.....	89
3.3.3. Μεταβολή της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας.....	91
3.3.4. Μεταβολή στο κόστος του καυσίμου	93
4. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.....	97
4.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	97
4.2. Προτάσεις για μελλοντικές ενέργειες	100
5. Βιβλιογραφία.....	103



Περιεχόμενα Εικόνων

Εικόνα 1. Ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμού.....	22
Εικόνα 2. Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας του ψυκτικού μέσου R22 με υπερθέρμανση και υπόψυξη. [3].....	23
Εικόνα 3. Λειτουργία Λέβητα Συμπυκνώσεως.....	25
Εικόνα 4. Σύγκριση συμβατικού συστήματος με σύστημα συμπαραγωγής.....	28
Εικόνα 5. Τυπικό διάγραμμα συστήματος CCHP.....	34
Εικόνα 6. Εφαρμογή οικιακής μικρο-συμπαραγωγής.....	36
Εικόνα 7. Παραστατικό σχέδιο τρόπου λειτουργίας micro-CHP ΜΕΚ.....	44
Εικόνα 8. Αρχή λειτουργίας ενός ψυκτικού συστήματος προσρόφησης μονού σταδίου.	46
Εικόνα 9. Αρχή λειτουργίας ενός ψυκτικού συστήματος απορρόφησης μονού σταδίου.	48
Εικόνα 10. Κατανομή λειτουργικού κόστους συστήματος με ψύκτη προσρόφησης.	78
Εικόνα 11. Κατανομή λειτουργικού κόστους συστήματος με αντλία θερμότητας.....	81
Εικόνα 12. Κατανομή λειτουργικού κόστους συστήματος με ψύκτη απορρόφησης.....	84
Εικόνα 13. Σύστημα τριπαραγωγής με Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.	100





Περιεχόμενα Πινάκων

Πίνακας 1. Σύγκριση μεταξύ διαφόρων τεχνολογιών συμπαραγωγής [8].	31
Πίνακας 2. Εγκατεστημένες ισχύς μονάδων CHP σε 37 χώρες το 2007.....	38
Πίνακας 3. Σύγκριση μεταξύ ψύξης με απορρόφηση και προσρόφηση.[8, 27]	49
Πίνακας 4. Ετήσια ενεργειακά δεδομένα πολυκατοικίας.....	66
Πίνακας 5. Γενικές παραδοχές σεναρίων.	69
Πίνακας 6. Παραγωγές σεναρίου MEK-ΨΠ για την base case περίπτωση.....	76
Πίνακας 7. Κόστος επένδυσης συστήματος με MEK και ψύκτη προσρόφησης.	77
Πίνακας 8. Ετήσια οφέλη και κόστη συστήματος σεν.1 σε σχέση με το συμβατικό σενάριο. .	79
Πίνακας 9. Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης για σύστημα οικιακής τριπαραγωγής με MEK (παραγωγή στο 60% του max ωριαίου θερμικού φορτίου) και ψύκτη προσρόφησης. ...	79
Πίνακας 10. Παραγωγές σεναρίου MEK-AΘ για την base case περίπτωση.....	80
Πίνακας 11. Ετήσια οφέλη και κόστη συστήματος σεν.1 σε σχέση με το συμβατικό σενάριο.	82
Πίνακας 12. Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης για σύστημα οικιακής συμπαραγωγής (παραγωγή στο 60% του max ωριαίου θερμικού φορτίου) και χρήση AΘ.	82
Πίνακας 13. Παραγωγές σεναρίου MEK-ΨΑ για την base case περίπτωση.....	83
Πίνακας 14. Κόστος επένδυσης συστήματος με MEK και ψύκτη απορρόφησης.	83
Πίνακας 15. Ετήσια οφέλη και κόστη συστήματος σεν.3 σε σχέση με το συμβατικό σενάριο.	85
Πίνακας 16. Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης για σύστημα οικιακής τριπαραγωγής με MEK (παραγωγή στο 60% του max ωριαίου θερμικού φορτίου) και ψύκτη απορρόφησης. ...	85
Πίνακας 17. Οικονομική σύγκριση των τριών σεναρίων οικιακής συμπαραγωγής/τριπαραγωγής.....	86
Πίνακας 18. Παρουσίαση ενεργειακών δεδομένων των 3 σεναρίων.....	98





Περιεχόμενα Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1. Καμπύλη διάρκειας φορτίου θέρμανσης χώρου χειμερινής περιόδου για τους μήνες ΟΚΤ-ΑΠΡ [kWth], [ΣΥΝΟΛΟ: 179044,1 kWth]	50
Διάγραμμα 2. Καμπύλη διάρκειας φορτίου ψύξης θερινής περιόδου για τους μήνες ΜΑΙ-ΣΕΠΤ [kWcool], [ΣΥΝΟΛΟ: 17298,15 kWcool]	51
Διάγραμμα 3. Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου για ανάγκες σε ΖΝΧ [kWth] [ΣΥΝΟΛΟ: 21225,4 kWth].....	52
Διάγραμμα 4. Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου τυπική τριώροφης πολυκατοικίας στην Αθήνα [kWth], [ΣΥΝΟΛΟ: 224981,1629 kWth].	53
Διάγραμμα 5. Κατανομή φορτίων θέρμανσης χώρου, ψύξης και ΖΝΧ ανά μήνα.	54
Διάγραμμα 6. Διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με ΜΕΚ και λέβητα αιχμής.	57
Διάγραμμα 7. Χειμερινή λειτουργία συστήματος με ΜΕΚ και λέβητα αιχμής.	59
Διάγραμμα 8. Διάγραμμα συστήματος τριπαραγωγής με ΜΕΚ, ψύκτη προσρόφησης και Αντλία Θερμότητας.	60
Διάγραμμα 9. Καλοκαιρινή λειτουργία συστήματος τριπαραγωγής με ΜΕΚ, ψύκτη προσρόφησης και αντλία θερμότητας.	62
Διάγραμμα 10. Διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με ΜΕΚ και αντλία θερμότητας.	64
Διάγραμμα 11. Επίδραση της μεταβολή της ποσοστιαίας παραγωγής θερμικής ενέργειας της ΜΕΚ σε σχέση με το peak ωριαίο θερμικό φορτίο στη DPB, σύγκριση 3 σεναρίων.....	87
Διάγραμμα 12. Επίδραση της μεταβολή του COP του ψύκτη προσρόφησης στη DPB. (σενάριο 1).....	89
Διάγραμμα 13. Επίδραση της μεταβολή του COP της ΑΘ στη DPB. (σενάριο 2).....	90
Διάγραμμα 14. Επίδραση της μεταβολή του COP του ψύκτη απορρόφησης στη DPB. (σενάριο 3).....	90
Διάγραμμα 15. Επίδραση της μεταβολή της τιμής πώλησης της συμπαραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, στο εθνικό δίκτυο, στη DPB, σύγκριση 3 σεναρίων.	92
Διάγραμμα 16. Επίδραση της μεταβολή της τιμής αγοράς του ΦΑ, στη DPB, σύγκριση 3 σεναρίων.	94





1. Εισαγωγή

1.1. Εισαγωγικά Στοιχεία

Αποτελεί αναντίρρητο γεγονός ότι η παγκόσμια ζήτηση για την κατανάλωση ενέργειας αυξάνεται και μάλιστα με ραγδαίους ρυθμούς. Οι εκτιμήσεις ενεργειακής ζήτησης για το έτος 2030 εμφανίζουν 40% αύξηση (σε σχέση με τα επίπεδα του 2008). Κατά τα έτη 2000-2008, καταγράφηκε μέση ετήσια αύξηση της παγκόσμιας ενεργειακής κατανάλωσης 2,7%. Το πετρέλαιο παραμένει το κυρίαρχο καύσιμο σε όλες τις περιοχές, πλην της Ευρώπης και της Ασίας (φυσικό αέριο και κάρβουνο αντίστοιχα). Το 60% της αύξησης ζήτησης ενέργειας για το 2030 οφείλεται στη ζήτηση των αναπτυσσόμενων χωρών της Ασίας. Για το 2020, ο πληθυσμός της γης αναμένεται να ξεπεράσει, και θα ξεπεράσει τα 9 δις. Κάθε άνθρωπος, στην ουσία, προβλέπεται να καταναλώνει ενέργεια 43 «προβιομηχανικών» ανθρώπων. Η κατακόρυφη αύξηση της ενεργειακής ζήτησης αναδυόμενων αγορών θα προκαλέσει πρόσθετη ενεργειακή σπατάλη. [1]

Η μετατροπή της ενέργειας που προέρχεται από τα ορυκτά καύσιμα (πετρέλαιο, ΦΑ) σε χρήσιμη και βιώσιμη ενέργεια, ώστε αυτή η αστική ανάπτυξη να χαρακτηρίζεται ανθεκτική και υγιείς, αποτελεί ταυτόχρονα το κίνητρο και την υποχρέωση μας στο περιβάλλον και συνεπακόλουθα στον πλανήτη μας. Στις ημέρες παγκόσμιας κρίσης, τις οποίες όλοι μας βιώνουμε, η μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων, που οδηγεί σε ανάλογη αύξηση των τιμών τους, η ραγδαία αύξηση του παγκόσμιου πληθυσμού και ο φόβος των επιστημόνων περιβάλλοντος για την περιβαλλοντική καταστροφή είναι όλα γεγονόδες. Αυτές οι καταστάσεις πυροδοτούν τις κυβερνήσεις, τους παγκόσμιους οργανισμούς, τις επιστημονικές κοινότητες και όλους τους ανθρώπους να βρίσκουν ευοίωνες, φιλικές προς το περιβάλλον και ευέλικτες λύσεις. Οι στόχοι προστασίας του περιβάλλοντος, όπως αυτοί διαμορφώνονται από το πρωτόκολλο του Κιότο, καθιστούν την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης ως βασικό στόχο των μονάδων παραγωγής και τροφοδότησης ενέργειας. Η χρήση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) δεν μπορεί να αποτελεί τη μοναδική λύση, αφού οι πηγές ενέργειας όπως ο ήλιος, ο άνεμος, η βιομάζα δεν είναι πάντοτε διαθέσιμες, δεν βρίσκονται πάντα σε επαρκείς ποσότητες και δεν είναι εύκολα επεξεργάσιμες και αξιοποιήσιμες σε όλες τις καταστάσεις. Η συνεπαγωγή αυτών των περιπτώσεων δημιουργεί αστάθεια στο δίκτυο και μη επαρκή κάλυψη των αναγκών των καταναλωτών.



Και ενώ με τις ΑΠΕ δημιουργούνται αυτά τα εμπόδια, πολλές υποσχόμενες εναλλακτικές λύσεις έρχονται στο προσκήνιο. Η αποκεντρωμένη παραγωγή ενέργειας μέσω εφαρμογών τηλεθέρμανσης / τηλεψύξης μπορεί να παρέχει την απαιτούμενη ενέργεια, είτε ως ηλεκτρική ενέργεια, είτε ως θέρμανση είτε ως ψύξη, χρησιμοποιώντας την διαθέσιμη απορριπτόμενη ενέργεια από την τοπική ηλεκτρική παραγωγή, αυξάνοντας ραγδαία τη συνολική ενεργειακή απόδοση της εγκατάστασης, καθιστώντας ευνοϊκότερες συνθήκες διαβίωσης τόσο στα αστικά κέντρα όσο και στα προάστια. Ως προέκταση αυτών των εφαρμογών παρουσιάζονται επίσης εφαρμογές εμπορικής/βιομηχανικής/οικιακής χρήσης, που αξιοποιούν τα οφέλη της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για την κάλυψη θερμικών, ψυκτικών, ηλεκτρικών αναγκών μεμονωμένα ή και ταυτόχρονα (εφαρμογές τριπαραγωγής).

Σύμφωνα με στοιχεία της Ευρωπαϊκής Επιτροπής, η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση, ψύξη, φωτισμό, και ζεστό νερό χρήσης στον οικιακό και τριτογενή κτιριακό τομέα, αντιστοιχεί στο 40% της συνολικής ενεργειακής κατανάλωσης στην Ευρώπη. Η διακύμανση ανά χώρα ποικίλλει από 20% για την Πορτογαλία έως και 45% για την Ιρλανδία, ενώ στην Ελλάδα κυμαίνεται περίπου στο 35%, με μέσο ρυθμό αύξησης 4% τα τελευταία δέκα έτη. Έτσι, τα κτίρια των κατοικιών μαζί με αυτά του τριτογενή τομέα (σχολεία, εκπαιδευτικά ιδρύματα, νοσοκομεία, εστιατόρια, ξενοδοχεία, γυμναστήρια, κολυμβητήρια, καταστήματα και γραφεία), αποτελούν πλέον τον δεύτερο μεγαλύτερο καταναλωτή ενέργειας στην Ελλάδα, ενώ στην Ευρώπη βρίσκονται ήδη στην πρώτη θέση [2]. Ταυτόχρονα, η παραγωγή και η χρήση ενέργειας ευθύνονται για το 94% των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂) στην ατμόσφαιρα, με ένα μερίδιο 45% να αναλογεί στον κτιριακό τομέα. Το CO₂ και άλλοι αέριοι ρύποι απορροφούν και κατακρατούν μέρος της θερμότητας, που εκπέμπει η επιφάνεια της γης προς το διάστημα με τη μορφή της υπέρυθρης ακτινοβολίας. Η παγίδευση της ακτινοβολίας ονομάζεται φαινόμενο του θερμοκηπίου και συμβάλλει στην υπερθέρμανση της γης. [2]

Οι περισσότερες διαδεδομένες μονάδες παραγωγής θερμότητας για θέρμανση χώρων που εφαρμόζονται στα ελληνικά κτήρια είναι οι λέβητες. Επίσης σημαντικό είναι το ποσοστό των κτιρίων (κυρίως κατοικιών), που χρησιμοποιούν ηλεκτρικές μονάδες για τη θέρμανση των χώρων (ηλεκτρικά σώματα διαφόρων τύπων, άμεσης απόδοσης ή θερμοσυσσώρευσης κ.α.). Σε μικρότερο ποσοστό, και κυρίως σε κτίρια τριτογενούς τομέα (όπου χρειάζεται και ψύξη), οι μονάδες παραγωγής θερμότητας είναι οι αντλίες θερμότητας νερού ή άμεσης εξάτμισης. Σε λίγες περιπτώσεις γίνεται η χρήση των ΑΠΕ (π.χ. ηλιακή ενέργεια, γεωθερμία). Τέλος, σε πολύ περιορισμένη κλίμακα στα ελληνικά κτίρια εφαρμόζονται συστήματα τηλεθέρμανσης ή/και συστήματα συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας/ψύξης. Η κάλυψη των αυξημένων



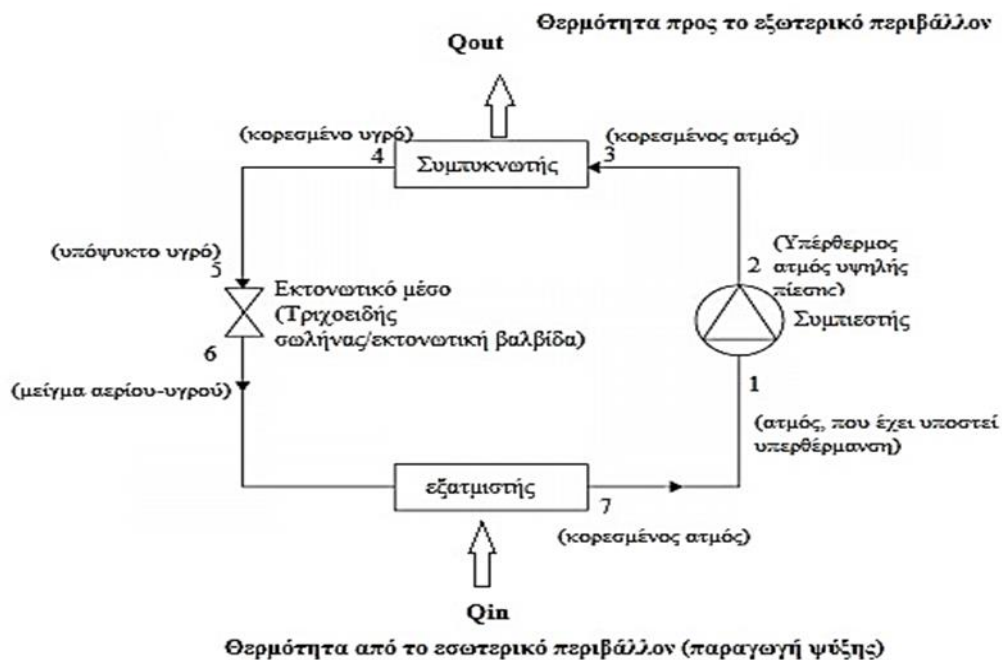
ενεργειακών αναγκών με συμβατικές τεχνολογίες χαμηλής απόδοσης οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές ρύπων και υψηλά κόστη επομένως μοιάζει να έχει τεράστιο ενδιαφέρον η μελέτη της εγκατάστασης συστημάτων συμπαραγωγής/τριπαραγωγής σε κτήρια όπου υπάρχουν υψηλές ενεργειακές απαιτήσεις και η εξοικονόμηση ενέργειας με αυτόν τον τρόπο, δημιουργώντας συστήματα πιο ευέλικτα και φιλικά στο περιβάλλον.

Η εκπόνηση της διπλωματικής αυτής εργασίας είχε ως σκοπό την μελέτη εφαρμογής συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας/ψύξης στον οικιακό τομέα στην θέση των συμβατικών τεχνολογιών που κυριαρχούν στα σπίτια αυτόν τον καιρό. Σαν μονάδα συμπαραγωγής μελετήθηκε μηχανή εσωτερικής καύσεως (ΜΕΚ) όπου συμβάλει στην κάλυψη των θερμικών φορτίων τον χειμώνα και των ψυκτικών το καλοκαίρι μέσω ψυκτών προσρόφησης ή απορρόφησης. Σαν συμβατικές τεχνολογίες θεωρήθηκαν ο λέβητας φυσικού αερίου για την παραγωγή θέρμανσης τον χειμώνα, και η αντλία θερμότητας για την παραγωγή ψύξης το καλοκαίρι. Η αντλία θερμότητας επιλέχθηκε διότι αποτελεί μία τεχνολογία δοκιμασμένη και αξιόπιστη, φιλική προς το περιβάλλον αλλά κυρίως λειτουργικά πολύ οικονομική.

1.2. Συμβατικά συστήματα για παραγωγή θερμότητας και ψύξης στα σπίτια

1.2.1. Ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμού, αντλία θερμότητας

Στον κύκλο ψύξης με συμπίεση ατμών, από την απλούστερη έως και την πιο σύνθετη και αυτοματοποιημένη ψυκτική μηχανή, τέσσερα είναι τα βασικότερα εξαρτήματα τα οποία παίζουν αναντικατάστατο ρόλο. Ο συμπιεστής, ο συμπυκνωτής, η εκτονωτική βαλβίδα και ο εξατμιστής. Τα παραπάνω βασικά εξαρτήματα, συνδέονται με αυτή τη σειρά, Εικόνα 1, και σε αυτά προστίθενται σωληνώσεις, βοηθητικά εξαρτήματα και αυτοματισμοί (μηχανικοί και ηλεκτρικοί), αφού τοποθετήσουμε μέσα και το φορέα μεταφοράς της θερμότητας που είναι το κατάλληλο ψυκτικό ρευστό. Όλο αυτό το σύστημα αποτελεί μια ψυκτική μηχανή.



Εικόνα 1. Ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμού.

Ο συμπιεστής συμπιέζει το αέριο που έρχεται σε αυτόν από την αναρρόφηση σε χαμηλή πίεση και θερμοκρασία. Μέσω της κατάθλιψης το αέριο σε υψηλή θερμοκρασία και πίεση πηγαίνει στον συμπυκνωτή. Εκεί ψύχεται συνεχώς και η θερμοκρασία του μειώνεται μέχρι τη θερμοκρασία συμπύκνωσης που αντιστοιχεί στην πίεση του συμπυκνωτή. Η υγροποίηση του ψυκτικού αερίου συνεχίζεται μέχρι να γίνει όλο υγρό. Το υγρό ψυκτικό ωθείται στο εκτονωτικό μέσο όπου στην έξοδό του η πίεσή του έχει μειωθεί μέχρι την πίεση που θέλουμε να έχει στον εξατμιστή. Φτάνοντας στον εξατμιστή το ψυκτικό έχει αρχίσει να εξατμίζεται και η πίεση που έχει είναι μικρή και η θερμοκρασία του επίσης μικρή, όση η θερμοκρασία εξάτμισης που αντιστοιχεί στην πίεση που επικρατεί στον εξατμιστή. Πριν την έξοδο από τον εξατμιστή η εξάτμιση τελειώνει και αρχίζει η υπερθέρμανση του αερίου πλέον ψυκτικού. Σε αυτή την κατάσταση φτάνει στο συμπιεστή για να αρχίσει ξανά η ίδια διαδικασία. Με λίγα λόγια, όλη η διαδικασία του ψυκτικού κύκλου γίνεται για να φτάσει το ψυκτικό μέσο σε υγρή μορφή στον

εξάτμιστή, ώστε να μπορέσει να μετατραπεί σε αέριο με την εξάτμιση και έτσι να απορροφήσει τη θερμότητα του χώρου ή των προϊόντων του ψυγείου.

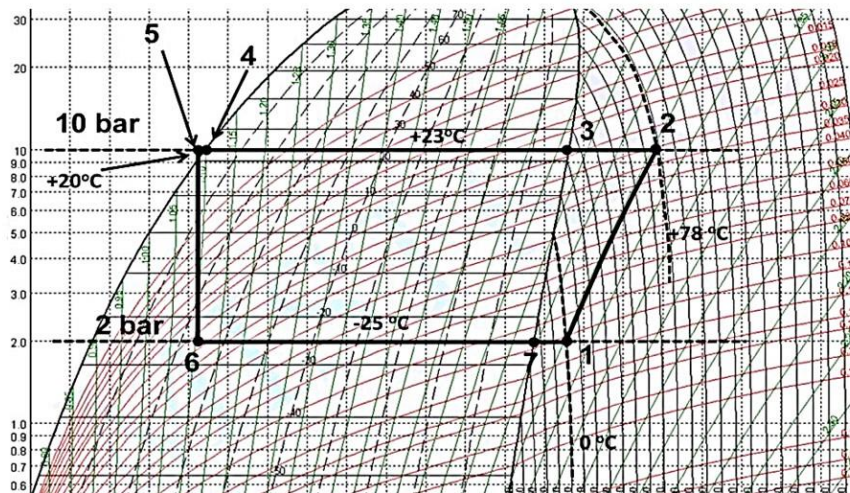
Ο ψυκτικός κύκλος μηχανικής συμπίεσης ατμού με υπερθέρμανση και υπόψυξη περιλαμβάνει τα εξής στάδια όπως φαίνονται παρακάτω και απεικονίζονται επίσης στην Εικόνα 2 σε διάγραμμα ενθαλπίας-πίεσης:

1. (12): Ισεντροπική συμπίεση αερίου. ΣΥΜΠΙΕΣΤΗΣ
2. (23): Ισόθλιπτη ψύξη υπέρθερμου ατμού μέχρι να γίνει κορεσμένος.

ΚΑΤΑΘΛΙΨΗ, ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ

- (34): Ισόθλιπτη συμπύκνωση αερίου σε υγρό. ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ
- (45): Ισόθλιπτη υπόψυξη υγρού. ΣΥΜΠΥΚΝΩΤΗΣ
3. (56): Ισενθαλπική εκτόνωση. ΕΚΤΟΝΩΤΙΚΟ ΜΕΣΟ
4. (67): Ισόθλιπτη εξάτμιση υγρού μέχρι να γίνει κορεσμένος ατμός. ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΣ
- (71): Ισόθλιπτη υπερθέρμανση ατμού. ΕΞΑΤΜΙΣΤΗΣ, ΑΝΑΡΡΟΦΗΣΗ

Σημείωση: Η υπόψυξη γίνεται μέσα στον συμπυκνωτή αλλά και στη σωλήνωση από το συμπυκνωτή μέχρι το εκτονωτικό μέσο.



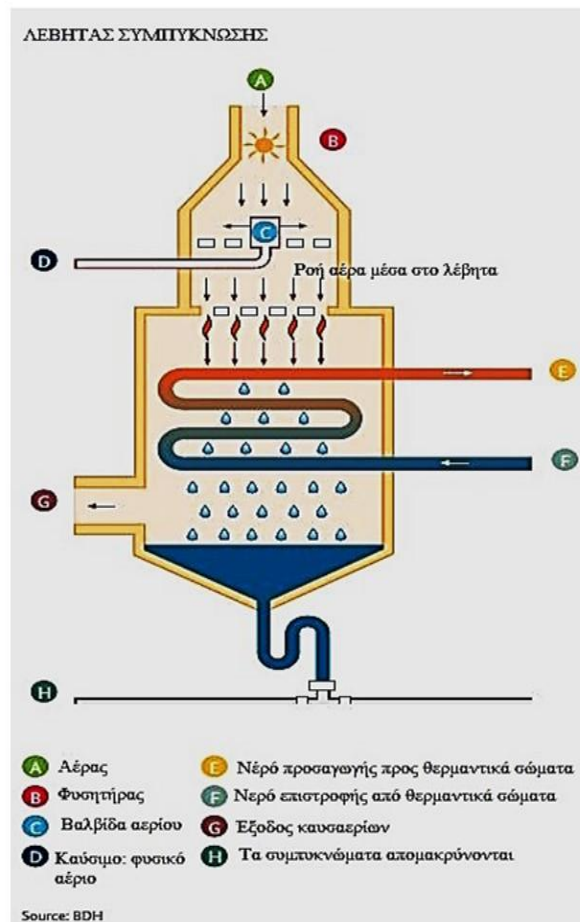
Εικόνα 2. Διάγραμμα πίεσης-ενθαλπίας του ψυκτικού μέσου R22 με υπερθέρμανση και υπόψυξη. [3]



1.2.2. Λέβητας φυσικού αερίου

Όπως ειπώθηκε και παραπάνω, οι επικρατέστερες μονάδες παραγωγής θερμικής ενέργειας στα ελληνικά κτίρια είναι οι λέβητες. Στα ελληνικά κτίρια βλέπουμε εφαρμογές από λέβητες θερμού νερού, πετρελαίου, φυσικού αερίου, σπανιότερα υγραερίου ή ηλεκτρικοί (σε μικρές εγκαταστάσεις) και πολύ σπάνια λέβητες βιομάζας [4]. Οι λέβητες φυσικού αερίου αποτελούν την πιο διαδεδομένη συμβατική εφαρμογή για θέρμανση κατοικιών με συνεχώς αυξανόμενη τάση λόγω των οικονομικών οφελών που προσφέρουν σε συνδυασμό με οικονομικά κίνητρα για την σύνδεση και την εγκατάστασή τους. Σε αυτό συμβάλει, το φυσικό αέριο και τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει ως καύσιμο στην χρήση του στην θέρμανση κατοικιών. Το φυσικό αέριο είναι ένα μίγμα υδρογονανθράκων με κύριο συστατικό το μεθάνιο, είναι ελαφρότερο από τον αέρα, πιο καθαρό από το θείο και με υψηλή θερμογόνο ικανότητα, το οποίο παρουσιάζει ενεργειακά, περιβαλλοντικά και οικονομικά πλεονεκτήματα. Το φυσικό αέριο, λοιπόν, δίνει τη δυνατότητα τέλει καύσης, υψηλού βαθμού απόδοσης (άρα μικρότερης κατανάλωσης καυσίμου, οικονομικό πλεονέκτημα) λόγω της δυνατότητας ψύξης των καυσαερίων και συμπίκνωσης λόγω μη ύπαρξης θείου. Επίσης, εκπέμπει μειωμένους ρύπους (CO, NO_x λόγω βέλτιστων καυστήρων, μειωμένη παραγωγή CO₂ λόγω της φύσης του καυσίμου). Τέλος το φυσικό αέριο έχει χαμηλότερη διεθνή τιμή από άλλα δημοφιλή συμβατικά μη ανανεώσιμα καύσιμα (π.χ. το πετρέλαιο) και χαμηλότερο φόρο στην Ελλάδα.

Οι λέβητες Φυσικού Αερίου χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με την εφαρμογή τους. Διακρίνονται σε λέβητες κεντρικής και ατομικής θέρμανσης, λέβητες συμβατικούς και σε λέβητες συμπίκνωσης, αερολέβητες και λέβητες τεχνολογίας. Οι λέβητες συμπίκνωσης, εικόνα 3, αναπτύχθηκαν για την εκμετάλλευση της λανθάνουσας θερμότητας ατμοποίησης κατά τη συμπίκνωση του παραγόμενου υδρατμού στο καυσαέριο (ο οποίος προέρχεται από το υδρογόνο του καυσίμου, την υγρασία του καυσίμου και την υγρασία του αέρα καύσης). Τα αέρια καύσιμα έχουν το πλεονέκτημα αυξημένης περιεκτικότητας υδρογόνου, ενώ δεν περιέχουν θείο. Ο λέβητας συμπίκνωσης, έχει βαθμό απόδοσης μεγαλύτερο από το συμβατικό λέβητα (περίπου 0.95 έναντι 0.87 στον συμβατικό λέβητα), γιατί εκμεταλλεύεται και τη θερμότητα των καυσαερίων, μέρος της οποίας ανακτάται μέσω ενός ειδικά σχεδιασμένου εναλλάκτη, στον οποίο πραγματοποιείται η ψύξη και συμπίκνωση των καυσαερίων.



Εικόνα 3. Λειτουργία Λέβητα Συμπυκνώσεως

1.3. Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

1.3.1. Ορισμός και γενικά στοιχεία για την συμπαραγωγή

Στην παραγωγή ενέργειας οι ηλεκτρικές και θερμικές ανάγκες ενός καταναλωτή μπορούν να εξυπηρετηθούν με τον συμβατικό τρόπο παραγωγής, όπου η αγορά ηλεκτρισμού γίνεται από το δίκτυο ή την καύση ενός καυσίμου σε έναν λέβητα. Είναι γεγονός ότι τα θερμικά ενεργειακά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος με λιγνίτη σε εθνικό επίπεδο, σπάνια επιτυγχάνουν βαθμούς απόδοσης μεγαλύτερους του 33 - 35%, ενώ οι απλοί σταθμοί φυσικού αερίου και συνδυασμένου κύκλου έχουν βαθμούς απόδοσης από 40 μέχρι 50%. [5] Η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ , Combined Heat and Power, CHP) είτε σε κεντρικές, είτε σε αποκεντρωμένες μονάδες αναγνωρίζεται πλέον, ως μία από τις αποδοτικότερες τεχνολογίες εξοικονόμησης ενέργειας. Η τεχνολογία αυτή, η οποία άνθισε κυρίως στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ μετά τη δεκαετία του '70, πραγματοποιείται η ταυτόχρονη



παραγωγή δύο ωφέλιμων προϊόντων (θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας), από μία μονάδα και από μία διεργασία [6]. Αυτό επιτυγχάνεται με την ανάκτηση, στο μεγαλύτερο μέρος της, της απορριπτόμενης θερμότητας από τις θερμικές μηχανές, ή τους θερμικούς σταθμούς.

Σύμφωνα με το Ν.3734/2009 [6]:

Ως συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας ή ΣΗΘ ορίζεται η ταυτόχρονη παραγωγή χρήσιμης θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής ή/και μηχανικής ενέργειας από την ίδια αρχική ενέργεια, στο πλαίσιο μόνο μίας διεργασίας.

Η παραγωγή ηλεκτρικής, θερμικής ενέργειας από το σύστημα, αλλά και η συμπαραγωγή των προϊόντων, καθορίζεται από τους αντίστοιχους βαθμούς απόδοσης:

Ως ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης $n_{e,CHP}$ ορίζεται ο λόγος της ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από τη μονάδα συμπαραγωγής, προς την ενέργεια καυσίμου, που καταναλώθηκε από τη μονάδα συμπαραγωγής, προκειμένου να παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια, E_{CHP} , και η χρήσιμη θερμική ενέργεια, H_{CHP} :

$$n_{e,CHP} = \frac{E_{CHP}}{F_{CHP}} = \frac{E_{CHP}}{m_B * H_u} \quad (1.1)$$

Ως θερμικός βαθμός απόδοσης $n_{h,CHP}$ ορίζεται ο λόγος της χρήσιμης θερμικής ενέργειας που προέρχεται από συμπαραγωγή, H_{CHP} , προς την ενέργεια καυσίμου, που καταναλώθηκε από τη μονάδα συμπαραγωγής, προκειμένου να παραχθεί η ηλεκτρική ενέργεια, E_C , και η χρήσιμη θερμική ενέργεια, H_{CHP} :

$$n_{h,CHP} = \frac{H_{CHP}}{F_{CHP}} = \frac{H_{CHP}}{m_B * H_u} \quad (1.2)$$

Ως ολικός βαθμός απόδοσης ορίζεται το άθροισμα του ηλεκτρικού και του θερμικού βαθμού απόδοσης:

$$n_{CHP} = n_{e,CHP} + n_{h,CHP} \quad (1.3)$$

Ως Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας υψηλής αποδοτικότητας (ΣΗΘΥΑ) ορίζεται η συμπαραγωγή που εξασφαλίζει εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας τουλάχιστον 10%, σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας. Η παραγωγή από μονάδες συμπαραγωγής μικρής και πολύ μικρής κλίμακας που εξασφαλίζει εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, ανεξαρτήτως ποσοστού, χαρακτηρίζεται ως ΣΗΘΥΑ. (τύπος 1.4)



$$PESR = \frac{F_e + F_h - F_{CHP}}{F_e + F_h} \geq 10\% \quad (1.4)$$

Όπου F_e και F_h , τα καύσιμα για την ξεχωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, αντίστοιχα.

Συνολικά μπορούμε να πούμε ότι με τον βαθμό απόδοσης που επιτυγχάνουν οι ΣΗΘΥΑ (λόγω της ανακύκλωσης της αλλιώς απορριπτόμενης θερμότητας επιτυγχάνουν ολικούς βαθμούς απόδοσης μέχρι και 85% [5]), συνεισφέρουν στην εξοικονόμηση ενέργειας, στην εξυπηρέτηση ηλεκτρικών και θερμικών αναγκών από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας, στην μείωση του κόστους και στην μείωση των εκπομπών διοξειδίου άνθρακα ανά παραγόμενη ηλεκτρική κιλοβατώρα.

Στις μονάδες συμπαραγωγής η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε μηχανική και θερμική ενέργεια. Η μηχανική ενέργεια γίνεται ηλεκτρική, ενώ η θερμική αξιοποιείται σε βιομηχανικές εφαρμογές, σε εμπορικές/κτιριακές/οικιακές εφαρμογές για τη παραγωγή Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX) και για θέρμανση/ψύξη χώρων και τέλος σε αγροτικές εφαρμογές σε μικρότερο ποσοστό. Μια μονάδα συμπαραγωγής μπορεί να τροφοδοτηθεί με μια ποικιλία καυσίμων όπως πετρέλαιο, φυσικό αέριο, βιοαέριο, βιομάζα ή ακόμα και πολλά είδη καυσίμων από τα παραπάνω μαζί.

Ένα σύστημα συμπαραγωγής χωρίζεται από τα εξής στοιχεία [7]:

- Τον κινητήρα (primary mover): όπου η χημική ενέργεια του καυσίμου μετατρέπεται σε μηχανική, ενώ ταυτόχρονα αποβάλλεται θερμότητα.
- Τη γεννήτρια (generator): όπου η κινητική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική.
- Το σύστημα ανάκτησης θερμότητας (heat recover system): όπου γίνεται η εκμετάλλευση της απορριπτόμενης θερμότητας για την παραγωγή ωφέλιμης θερμότητας.

Στην Εικόνα 4 που ακολουθεί παρουσιάζεται η σύγκριση ανάμεσα σε ένα συμβατικό σύστημα με ξεχωριστές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας με ένα σύστημα συμπαραγωγής:



Εικόνα 4. Σύγκριση συμβατικού συστήματος με σύστημα συμπαραγωγής.

1.3.2. Πλεονεκτήματα-μειονεκτήματα συμπαραγωγής

Πλεονεκτήματα:

Η ΣΗΘ βελτιστοποιεί την παροχή ενέργειας προς όλους τους καταναλωτές, ενώ ταυτόχρονα ωφελεί την εθνική οικονομία αφού έχει [6]:

- Αυξημένη απόδοση της μετατροπής και χρήση της ενέργειας. Αφού η απορριπτόμενη θερμότητα αξιοποιείται σε περαιτέρω διαδικασίες αυξάνοντας θεαματικά τον συνολικό βαθμό απόδοσης, μέχρι και παραπάνω από 85% [5, 6].
- Προφανή μείωση στους εκπεμπόμενους ρύπους (CO_2 , CO , SO_2 , NO_x , PM), καθώς για την ίδια παραγωγή ενέργειας η κατανάλωση του καυσίμου είναι πολύ μικρότερη από την περίπτωση της χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Ανάλογα με το είδος του καυσίμου (π.χ. ανανεώσιμο καύσιμο) η μείωση μπορεί να είναι ακόμα μεγαλύτερη. Η μείωση του CO_2 , του σημαντικότερου εκπεμπόμενου αερίου του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθιστά τη συμπαραγωγή μία από τις καλύτερες λύσεις για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από το Πρωτόκολλο του Κιότο, τους οποίους έχει αποδεχθεί η Ελλάδα.
- Σημαντική ευκαιρία στην προώθηση αποκεντρωμένων λύσεων ηλεκτροπαραγωγής. Σύμφωνα με αυτές, οι σταθμοί ΣΗΘ σχεδιάζονται για να ανταποκρίνονται στις ανάγκες



των τοπικών καταναλωτών, παρέχοντας υψηλή απόδοση, αποφεύγοντας απώλειες μεταφοράς και αυξάνοντας την ευελιξία στη χρήση του συστήματος. Όταν το ΦΑ χρησιμοποιείται ως καύσιμο, το πλεονέκτημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό.

- Σημαντική εξοικονόμηση οικονομικών πόρων, παρέχοντας πρόσθετη ανταγωνιστικότητα στη βιομηχανία και τα ΜΜΕ, καθώς η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα παρέχονται σε προσιτές τιμές.
- Βελτιωμένη, τοπική και γενική, ασφάλεια παροχής, αφού μειώνονται οι πιθανότητες οι καταναλωτές να μείνουν χωρίς ηλεκτρική ή/και θερμική ή/και ψυκτική ενέργεια. Επιπρόσθετα, η μειωμένη ανάγκη καυσίμων που παρέχει η ΣΗΘ, μειώνει την εξάρτηση από τις εισαγωγές, μία τεράστια πρόσκληση για το ενεργειακό μέλλον της Ελλάδος και της Ευρώπης.
- Δημιουργία νέων θέσεων εργασίας μέσω της ανάπτυξης των συστημάτων Συμπαραγωγής.
- Η ΣΗΘ μειώνει το σύνολο των δαπανών για εισαγόμενα καύσιμα, επιδρώντας θετικά στην οικονομία της χώρας.

Πέρα από τα σημαντικά οφέλη που δημιουργούνται εντούτοις παρουσιάζονται και αρνητικές επιπτώσεις σε διάφορες εφαρμογές της συμπαραγωγής όπως:

- Οι εκπεμπόμενοι ρύποι παραμένουν σε αρκετά υψηλά επίπεδα στην περίπτωση που μονάδα συμπαραγωγής λειτουργεί με συμβατικά καύσιμα. Η περίπτωση αυτή είναι ακόμα δυσμενέστερη όταν οι μονάδες βρίσκονται κοντά στα αστικά κέντρα (αποκεντρωμένη παραγωγή) αφού το περιβάλλον επιβαρύνεται σε μεγάλο βαθμό σε σύγκριση με τους συνηθισμένους απομακρυσμένους συμβατικούς θερμικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.
- Η δημιουργία πολλών μικρών μονάδων συμπαραγωγής συνδεδεμένων με το δίκτυο μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην ευστάθεια του δικτύου, εάν ο ρυθμός αύξησης της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας γίνει μεγαλύτερος από τον ρυθμό αύξησης της ζήτησης.
- Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί ότι για να είναι οικονομικά βιώσιμη μία εγκατάσταση ΣΗΘ απαιτεί την ύπαρξη θερμικών καταναλώσεων αλλιώς η παραγόμενη θερμότητα είναι άχρηστη και η επένδυση ανούσια.



1.3.3. Τεχνολογίες της Συμπαραγωγής και τρόποι λειτουργίας

1.3.3.1. Τεχνολογίες της Συμπαραγωγής

Τα συστήματα συμπαραγωγής περιλαμβάνουν μια ποικιλία από διαφορετικές τεχνολογίες και μεγέθη, ενώ μπορούν να περιλαμβάνουν είτε εσωτερική, είτε εξωτερική καύση. Με βάση τον κινητήρα τους (primary mover) οι μονάδες συμπαραγωγής κατηγοριοποιούνται σε διάφορες κατηγορίες.

Ως συμπαραγωγική μονάδα, λοιπόν, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ΜΕΚ (πιο συγκεκριμένα συστήματα εμβολοφόρων μηχανών εσωτερικής καύσης), ατμοστρόβιλοι αντίθλιψης, ατμοστρόβιλοι συμπύκνωσης-απομάστευσης, ατμοστρόβιλοι και συστήματα αποσύμπλεξης χαμηλής πίεσης, αεριοστρόβιλοι ανοικτού κύκλου με λέβητα ανάκτησης θερμότητας, αεριοστρόβιλοι ανοικτού κύκλου με έγχυση ατμού στο θάλαμο καύσης, αεριοστρόβιλοι κλειστού κύκλου, μικροστρόβιλοι, μηχανές Stirling, κυψέλες καυσίμου, ατμομηχανές, οργανικός κύκλος Rankine καθώς και συνδυασμένος κύκλος αεριοστρόβιλου με ανάκτηση θερμότητας. Οι πιο διαδεδομένες συμπαραγωγικές μονάδες είναι αυτές με κινητήρα Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (Εμβολοφόρες μηχανές ή Αεριοστρόβιλοι).

Στην περίπτωση των ΜΕΚ και των μικροστρόβιλων, ο δρομέας της στρεφόμενης γεννήτριας βρίσκεται στην προέκταση του άξονα της μηχανής (π.χ. στροφαλοφόρου), ενώ για την εξυπηρέτηση των θερμικών ή/και των ψυκτικών φορτίων αξιοποιούνται το υγρό του συστήματος ψύξης και η θερμότητα των καυσαερίων. Όσον αφορά το μέγεθος κυμαίνονται σε ισχύεις μικρότερες των 5 kWel από μικροστρόβιλους, κυψέλες καυσίμου, μηχανές Stirling μέχρι και 300 MWel ή και μεγαλύτερα.

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται συνοπτικά τα κύρια χαρακτηριστικά των διάφορων τεχνολογιών συμπαραγωγικών μονάδων σύμφωνα με την μηχανή που χρησιμοποιούν ως primary mover [8]:



Πίνακας 1. Σύγκριση μεταξύ διαφόρων τεχνολογιών συμπαραγωγής [8].

Τύπος	Μέγεθος (KW)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	Εκπομπές	Εφαρμογές
ΜΕΚ	10-5000	Χαμηλό κόστος επένδυσης, Γρήγορη εκκίνηση, Υψηλή αξιοπιστία	Απαιτεί τακτική συντήρηση	Υψηλά NO _x στο diesel, προτιμάται το ΦΑ	Εφαρμογές με ψύκτες απορρόφησης/ηλεκτρικούς ψύκτες, Εφαρμογές μικρής (<1MW)/μεσαίας κλίμακας (1-10MW)
Α/Σ	500-250000	Υψηλή ποιότητα καυσαερίων		NO _x (25ppm), CO (10-50 ppm)	Εφαρμογές μεγάλης κλίμακας (>10MW), μεγάλης ζήτησης θερμικής ενέργειας.
Ατμοστρόβιλοι	50-500000	Ευέλικτο Καύσιμο	Χαμηλός ηλεκτρικός ΒΑ, αργή εκκίνηση	Εξαρτάται το καύσιμο	Εφαρμογές μεγάλης κλίμακας, όπου η ΗΕ είναι δευτερεύον προϊόν.
Μικροστρόβιλοι	1-1000	Ευέλικτο καύσιμο, Μικρό μέγεθος, Χαμηλότερος θόρυβος	Υψηλό κόστος επένδυσης, χαμηλός ηλεκτρικός ΒΑ	NO _x <10 ppm	Εφαρμογές σε αποκεντρωμένα συστήματα ενέργειας, Εφαρμογές μικρής/πολύ μικρής κλίμακας.
Μηχανές Stirling	>100	Ευέλικτο καύσιμο, Πιο σιωπηλές και ασφαλής μηχανές, Δεν απαιτεί τακτική συντήρηση	Υψηλό κόστος επένδυσης	Λιγότερες από ΜΕΚ	Εφαρμογές με ηλιακή ενέργεια, Εφαρμογές μικρής κλίμακας
Κυψέλες Καυσίμου	0,5-1200	Λειτουργούν σιωπηλά, Υψηλός ΒΑ, Υψηλότερη αξιοπιστία από ΜΕΚ και Α/Σ	Κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου λόγω της παραγωγής Υδρογόνου	Πάρα πολύ χαμηλές	Εφαρμογές πολύ μικρής κλίμακας-εφαρμογές μεσαίας κλίμακας.

1.3.3.2. Τρόποι λειτουργίας των συστημάτων συμπαραγωγής

Η λειτουργία των συστημάτων συμπαραγωγής χαρακτηρίζεται από το κριτήριο ρύθμισης της παραγωγής του ηλεκτρισμού και της ωφέλιμης θερμότητας σε δεδομένη χρονική περίοδο. Οι πιο διαδεδομένοι τρόποι λειτουργίας παρατίθενται παρακάτω [9]:

- Κάλυψη του θερμικού φορτίου/ηλεκτρικού φορτίου (heat/electricity match): Σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή, η ωφέλιμη παραγωγή θερμότητας/η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του συστήματος συμπαραγωγής είναι ίση με το θερμικό φορτίο/ηλεκτρικό φορτίο (χωρίς υπέρβαση της δυναμικότητας του συστήματος ΣΗΘ). Εάν η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια/η συμπαραγόμενη θερμότητα είναι μεγαλύτερη από το φορτίο η πλεονάζουσα ενέργεια πωλείται στο δίκτυο/η πλεονάζουσα θερμότητα αποβάλλεται στο περιβάλλον μέσω συσκευών ψύξης ή καυσαερίων, αν είναι μικρότερη από το φορτίο η συμπληρωματική ενέργεια αγοράζεται από το δίκτυο/ η συμπληρωματική θερμική ενέργεια παρέχεται από λέβητες αιχμής.
- Κάλυψη του θερμικού φορτίου βάσης/ ηλεκτρικού φορτίου βάσης: Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα ΣΗΘ διαστασιολογείται ώστε να παρέχει την ελάχιστη απαιτούμενη θερμική ενέργεια/ελάχιστη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας της εγκατάστασης βάση της καμπύλης των ιστορικών αναγκών. Οι υπόλοιπες ανάγκες σε θερμική ενέργεια/ηλεκτρική ενέργεια παρέχονται από λέβητες ή καυστήρες αιχμής/από το δίκτυο τις περιόδους που η ζήτηση θερμικής ενέργειας/ηλεκτρικής ενέργειας είναι υψηλότερη. Εάν η ανάγκη για ηλεκτρική ενέργεια/θερμική ενέργεια της εγκατάστασης υπερβαίνει αυτή που μπορεί να δώσει ο κύριος κινητήρας, τότε η υπόλοιπη ποσότητα μπορεί να αγοραστεί από το δίκτυο/μπορεί να καλυφθεί από λέβητες αιχμής. Αντίστοιχα, αν υπάρχει πλεονάζουσα ηλεκτρική ενέργεια/θερμική ενέργεια μπορεί να πωληθεί στο δίκτυο/ σε γειτονικούς πελάτες, εάν το επιτρέπουν οι ισχύοντες νόμοι και συνθήκες.
- Μικτή κάλυψη (mixed-match mode): Ορισμένες περιόδους ακολουθείται ο τρόπος κάλυψης του θερμικού φορτίου, ενώ άλλες ακολουθείται ο τρόπος κάλυψης του ηλεκτρικού φορτίου. Αυτό αποφασίζεται μέσω της εκτίμησης παραμέτρων όπως είναι τα επίπεδα των φορτίων, η τιμή των καυσίμων και το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας κατά την συγκεκριμένη ημέρα και ώρα.
- Αυτόνομη λειτουργία (stand-alone): Υφίσταται πλήρη κάλυψη θερμικών/ηλεκτρικών αναγκών σε οποιαδήποτε χρονική περίοδο χωρίς κάλυψη στο δίκτυο. Αυτός ο τρόπος λειτουργίας απαιτεί να διαθέτει το σύστημα ηλεκτρική και θερμική δυναμικότητα

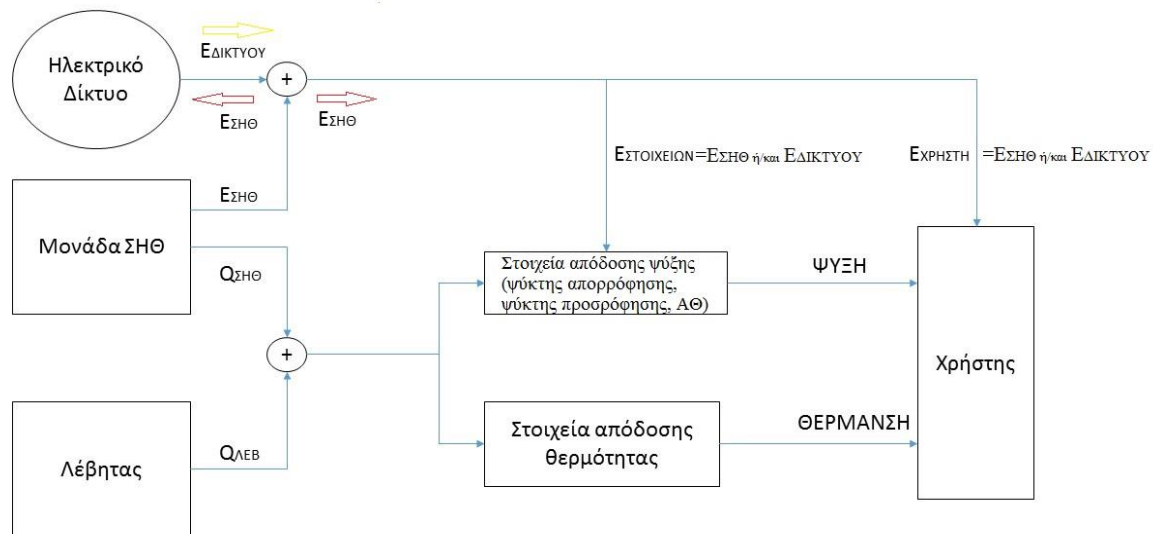
εφεδρείας, έτσι ώστε αν μια μονάδα τεθεί εκτός λειτουργίας, οι υπόλοιπες μονάδες να είναι σε θέση να καλύψουν το ηλεκτρικό και θερμικό φορτίο. Αυτή η στρατηγική είναι η πιο δαπανηρή όσο αφορά το αρχικό κόστος επένδυσης.

Η διαστασιολόγηση του συστήματος συμπαραγωγής αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους στην σχεδίαση της μονάδας, και είναι καθοριστικός παράγοντας στην τεχνοοικονομική αξιολόγηση της επένδυσης. Μία σωστά διαστασιολογημένη μονάδα μπορεί να μεγιστοποιήσει τα έσοδα της επένδυσης, να ελαχιστοποιήσει την κατανάλωση πρωτογενούς καυσίμου και να βελτιώσει τους εκπεμπόμενους ρύπους του συστήματος.

1.3.3.3. Συμπαραγωγή σε εφαρμογές ψύξης και τριπαραγωγή

Η χρονική περίοδος κατά την οποία απαιτείται θέρμανση των κτηρίων στην Ελλάδα είναι σχετικά μικρή (της τάξεως των 7 μηνών). Έτσι, η εφαρμογή της ΣΗΘ στον κτηριακό/οικιακό τομέα αποκλειστικά για κάλυψη των θερμικών φορτίων είναι αντιοικονομική, λόγω των περιορισμένων ετήσιων ωρών λειτουργίας. Τα κτήρια αυτά όμως έχουν ανάγκη για ψύξη για ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Ψύξη μπορεί να παραχθεί από την απορριπτόμενη θερμότητα ενός σταθμού ΣΗΘ, μέσω των κύκλων απορρόφησης ή προσρόφησης, σε απλές εφαρμογές συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και ψύξης ή σε εφαρμογές τριπαραγωγής.

Τριπαραγωγή (trigeneration) ή συνδυασμός ψύξης, θερμότητας και ηλεκτρισμού (Combined Cooling, Heat and Power system, CCHP) είναι η ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού, χρήσιμης θερμότητας και ψύξης από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας (καύση ενός καυσίμου), Εικόνα 5. Η απορριπτόμενη θερμότητα από την παραγωγή ηλεκτρισμού χρησιμοποιείται στη συνέχεια για θέρμανση νερού ή χώρου, όπως περιγράφεται στην συμπαραγωγή. Η διαφορά είναι ότι στην τριπαραγωγή η απορριπτόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται ταυτόχρονα τόσο για την παραγωγή θερμότητας όσο και για την παραγωγή ψύξης. Η ψύξη παράγεται με την βοήθεια τεχνολογιών ψύξης, επικρατέστερες τεχνολογίες είναι ο ψύκτης απορρόφησης (absorption chiller) και ο ψύκτης προσρόφησης (adsorption chiller), οι οποίοι έχουν ως είσοδο την απορριπτόμενη θερμότητα από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της μονάδας συμπαραγωγής, ή τριπαραγωγής, και μέσω ενός βαθμού απόδοσης (COP) παράγουν ψύξη.



Εικόνα 5. Τυπικό διάγραμμα συστήματος CCHP.

1.3.4. Μικρό-συμπαραγωγή και οικιακή συμπαραγωγή

Ο όρος μικρό-συμπαραγωγή (micro-CHP) προσδιορίζει την συμπαραγωγή μικρής (≤ 1 MWe) και πολύ μικρής (≤ 50 kWe) κλίμακας με σκοπό την ικανοποίηση οικονομικά δικαιολογημένης, ταυτόχρονης ζήτησης για ηλεκτρισμό, θέρμανση ή/και ψύξη (τριπαραγωγή), βασικά ζήτησης που δεν υπερβαίνει τις υπάρχουσες ανάγκες θέρμανσης ή/και ψύξης σπιτιών και μεγαλύτερων κτιρίων ή συγκροτημάτων, και η οποία διαφορετικά θα ικανοποιείτο, σύμφωνα με τις συνθήκες της αγοράς, από διαδικασίες παραγωγής χρήσιμων μορφών ενέργειας διαφορετικές από τη συμπαραγωγή [10].

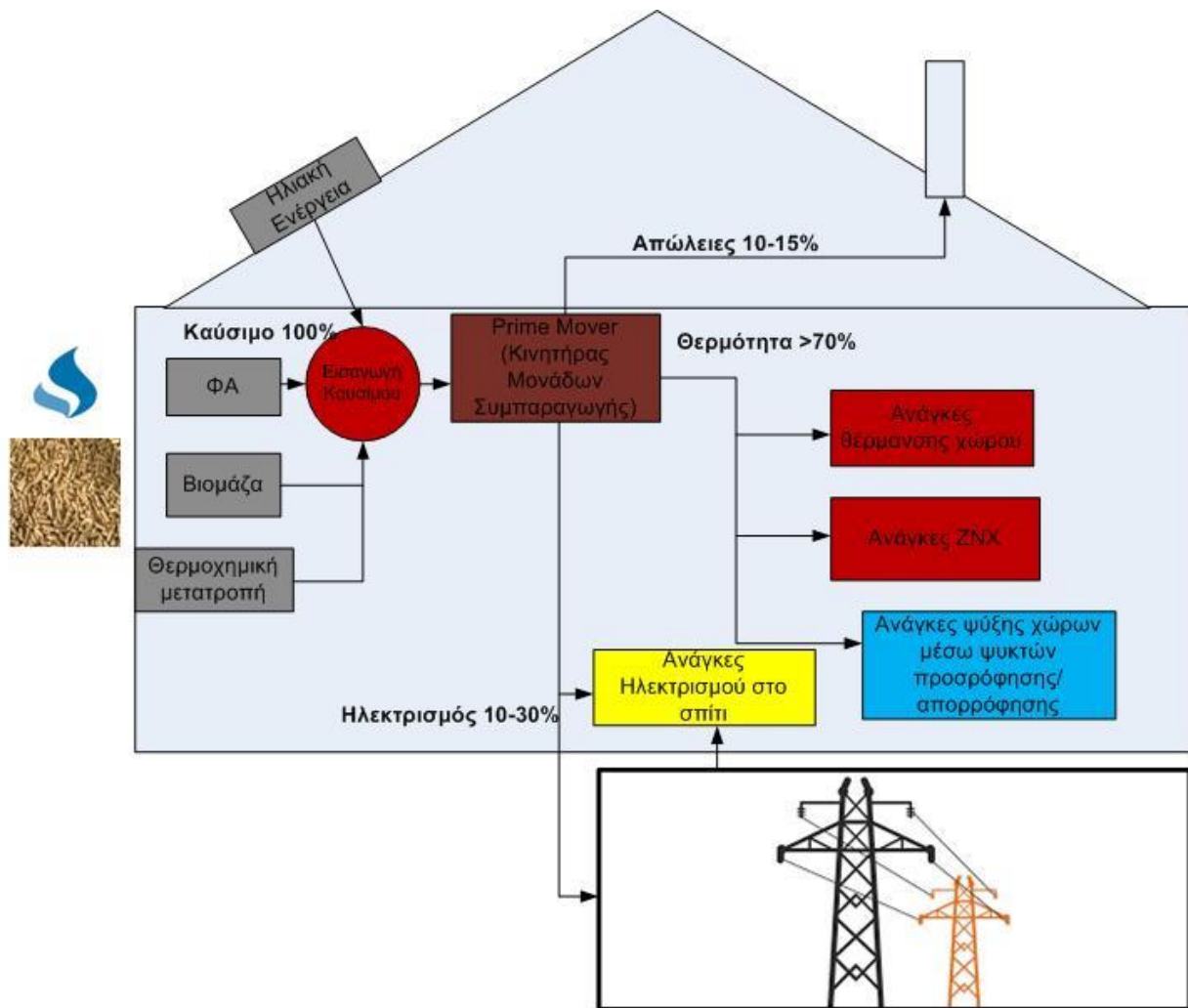
Η μικρής κλίμακας συμπαραγωγή έχει αρχίσει να αναπτύσσεται ραγδαία λόγω της μεγάλης αγοράς στην οποία απευθύνεται, σε επιχειρήσεις μικρής και μεσαίας κλίμακας, σε μικρές βιομηχανίες, μικρές νοσοκομειακές μονάδες, οικιακά συγκροτήματα, κυρίως για μονάδες ισχύος των 100 kWel και άνω [6]. Ενώ, η συμπαραγωγή πολύ μικρής κλίμακας [6], ειδικά σε ισχύ 15-20 kWel αποτελεί επίσης τεχνολογία που απευθύνεται σε μεγάλη αγορά καθώς μπορεί να αντικαταστήσει τους συμβατικούς λέβητες κάθε νοικοκυριού μιας μικρής ή μεσαίας οικογένειας, προσφέροντας ένα αδιαμφισβήτητο πλεονέκτημα την παραγωγή και ηλεκτρικής ισχύος προς όφελος του ιδιοκτήτη, Εικόνα 6. (είτε μέσω της χρήσης αυτής είτε μέσω της πώλησης για χρήση στο δίκτυο).



Πλεονεκτήματα των συστημάτων αυτών είναι ο συνολικά πολύ υψηλός βαθμός απόδοσης που επιτυγχάνουν, οι ελάχιστες απαιτήσεις συντήρησης συγκριτικά με τον συμβατικό λέβητα, ο μικρός θόρυβος και οι αμελητέες δονήσεις στην εγκατάσταση τους σε οικιακές εφαρμογές, καθώς και οι πολύ χαμηλές εκπομπές NO_x, CO_x, SO_x και σωματιδίων.

Τα σημερινά συστήματα μικρό-Συμπαραγωγής περιλαμβάνουν ένα κινητήρα για την οδήγηση της γεννήτριας που είναι στις περισσότερες περιπτώσεις Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (MEK) με καύσιμο το φυσικό αέριο. Φυσικά είναι τεχνικά δυνατή η χρήση μηχανών diesel οπουδήποτε δεν φθάνουν τα δίκτυα φυσικού αερίου και ταυτόχρονα είναι εξασφαλισμένη η οικονομική βιωσιμότητα του εγχειρήματος. Πάντως, οι διαθέσιμες τεχνολογίες παραγωγής μηχανικής ισχύος περιλαμβάνουν ακόμα τις μηχανές Stirling, τους μικροστρόβιλους (micro & mini turbines), και τον οργανικό κύκλο Rankine. Σ' αυτά πρέπει να προστεθεί και η εναλλακτική των κυψελών καυσίμου (fuel cells) τα οποία μετατρέπουν χημική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική χωρίς να μεσολαβήσει καύση και ταυτόχρονα εκλύουν θερμότητα ως παραπροϊόν.

Οι υπάρχουσες σήμερα στο εμπόριο μονάδες μικρό-συμπαραγωγής έχουν το μέγεθος ενός συμβατικού λέβητα αντίστοιχης ισχύος τον οποίο και συνήθως αντικαθιστούν, ενώ παράγουν συγκρίσιμα επίπεδα θορύβου ή κραδασμών. Με την απαραίτητη τεχνικοοικονομική μελέτη αξιολόγησης της επένδυσης, επιλέγεται η καταλληλότερη τεχνολογία και τρόπος λειτουργίας για την κάθε περίπτωση, όμως η γενική ιδέα παραμένει η ίδια: παραγωγή θερμού νερού για κοινή οικιακή χρήση και για την κεντρική θέρμανση τον χειμώνα, παραγωγή ψύξης μέσω ψυκτών απορρόφησης ή προσρόφησης, είτε για κλιματισμό μόνο το καλοκαίρι, είτε για την εξυπηρέτηση ψυκτικών φορτίων όλο τον χρόνο (π.χ. ψυγεία), και ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρισμού είτε για εσωτερική κατανάλωση, είτε για πώληση στο δίκτυο. Είναι πάντως προφανές ότι η οικονομική βιωσιμότητα του έργου και το μέγεθος του οφέλους, είναι άρρηκτα συνδεδεμένα από τα σχετικά κόστη του εξοπλισμού μονάδας μικρό-συμπαραγωγής – συμβατικού λέβητα – αντλίας θερμότητας/ Air Conditions, ψυκτικών μονάδων (αρχική αγορά-εγκατάσταση, συντήρηση, διάρκεια ζωής), από τις τιμές αγοράς από το δίκτυο και πώλησης στο δίκτυο της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, από τις συνολικές ώρες λειτουργίας μέσα σε ένα έτος και από τις τιμές των καυσίμων. Για τις χρήσεις ορυκτών καυσίμων με αυτές τις τεχνολογίες φαίνεται ένα παράθυρο ευκαιρίας ίσως 30 χρόνων, ενώ αναμένεται να παραμείνουν συμφέρουσες για μεγαλύτερο διάστημα εφαρμογές χρήσης Βιομάζας ή Βιοκαυσίμων.



Εικόνα 6. Εφαρμογή οικιακής μικρό-συμπαραγωγής.

1.3.5. Εφαρμογές Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας

1.3.5.1. Ιστορική αναδρομή της Συμπαραγωγής

Η συμπαραγωγή πρωτοεμφανίστηκε γύρω στο 1890 στον βιομηχανικό τομέα στην Ευρώπη και στις ΗΠΑ [11]. Κατά τις πρώτες δεκαετίες του 20ού αιώνα, οι περισσότερες βιομηχανίες στις ΗΠΑ και την Ευρώπη είχαν δικές τους μονάδες ηλεκτροπαραγωγής με αμιολέβητα-στρόβιλο και άνθρακα, ως καύσιμο, όπου πολλές από τις μονάδες αυτές ήταν συμπαραγωγικές. Στην Ευρώπη, μεγάλη ανάπτυξη της ΣΗΘ αναφέρεται στη Δανία, τη Φιλανδία, την Ολλανδία κα, που παρουσιάζεται υψηλή ποσοστιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ. Στις χώρες αυτές, εκτός των μονάδων ΣΗΘ σε μεγάλες βιομηχανίες και σε μεγάλους σταθμούς παραγωγής



ηλεκτρικής ενέργειας για την τηλεθέρμανση πόλεων, υπάρχουν σημαντικές εγκαταστάσεις ΣΗΘ στον τριτογενή (νοσοκομεία, ξενοδοχεία, αθλητικά κέντρα, κα), αλλά και στον οικιακό τομέα.

1.3.5.2. Η συμπαραγωγή στην Ελλάδα

Η Συμπαραγωγή στην Ελλάδα ξεκινά από τις αρχές του 20ου αιώνα, όταν στο Βόλο και ειδικότερα στην κεραμοποιεία Τσαλαπάτα εγκαταστάθηκε, από Βέλγους μηχανικούς, σύστημα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας για τις ανάγκες της, που λειτούργησε μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του 70. Σε ευρύτερη κλίμακα, οι πρώτες μονάδες Συμπαραγωγής εγκαταστάθηκαν σε μεγάλες ελληνικές βιομηχανίες στις αρχές της δεκαετίας του '70. Σήμερα, λειτουργούν μονάδες Συμπαραγωγής σε βιομηχανίες ζάχαρης και χαρτιού, διυλιστήρια πετρελαίου, κλωστοϋφαντουργίες, κ.λπ. Επίσης, ηλεκτροπαραγωγικές μονάδες της ΔΕΗ έχουν τροποποιηθεί κατάλληλα, ώστε να καλύπτουν τις θερμικές ανάγκες αστικών περιοχών με τα δίκτυα τηλεθέρμανσης, όπως τα δίκτυα της Κοζάνης, της Πτολεμαΐδας, του Αμυνταίου και της Μεγαλόπολης.

Αναλύοντας τα στοιχεία των εγκαταστάσεων μέχρι σήμερα φαίνεται ότι από το 1990 και μετά έχουμε σημαντικές βελτιώσεις στις εγκαταστάσεις ΣΗΘ στις ελληνικές βιομηχανίες. Η βελτίωση δεν ήταν μόνον ποιοτική αλλά και ποσοτική (αύξηση εγκατεστημένου ισχύος) σε επίπεδο βιομηχανίας. Μετά τα μέσα της δεκαετίας του 1990, η άφιξη του φυσικού αερίου στην Ελλάδα και οι δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία της Συμπαραγωγής, οδήγησαν στη δραστηριοποίηση ενός σημαντικού αριθμού εταιρειών ή οργανισμών, με στόχους την ενημέρωση του επιχειρηματικού κόσμου, την παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών για τη μελέτη και κατασκευή εγκαταστάσεων συμπαραγωγής με το "κλειδί στο χέρι", τη συντήρηση, λειτουργία και εκμετάλλευση εγκαταστάσεων συμπαραγωγής.

Αν και αρκετές νέες εγκαταστάσεις κατασκευάστηκαν την τελευταία δεκαετία, παίρνοντας μάλιστα χρηματοδότηση από τα υπάρχοντα επενδυτικά προγράμματα, πολλές από τις εγκαταστάσεις ΣΗΘ με φυσικό αέριο έχουν βγει εκτός λειτουργίας. Αυτό οφείλεται στη σχετικά υψηλή τιμή αγοράς του φυσικού αερίου και τη χαμηλή τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, όπου οι δύο αυτές παράμετροι παίζουν καθοριστικό ρόλο για την βιωσιμότητα επενδύσεων ΣΗΘ.

Η συμμετοχή της ΣΗΘ στην παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, στην Ελλάδα το 2008, ήταν της τάξης του 2% και στην εγκατεστημένη ισχύ είναι επίσης της τάξης του 2%, σε αντίθεση με τις άλλες Ευρωπαϊκές χώρες, όπου 11 χώρες παράγουν πάνω από το 20% της ηλεκτρικής τους ενέργειας από ΣΗΘ και 4 χώρες πάνω από 50%. Ο Ευρωπαϊκός μέσος όρος είναι γύρω στο 10%.



Από τη συμπαραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια το 40% παράγεται από καύση φυσικού αερίου, το 19% από καύση άνθρακα και το 10% από ΑΠΕ [12].

1.3.5.3. Η συμπαραγωγή σε παγκόσμια κλίμακα

Η IEA (International Energy Agency) δημοσίευσε το 2007 ότι το 9% της παγκόσμιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας προέρχεται από συστήματα συμπαραγωγής. Επίσης ανακοίνωσε ότι η παγκόσμια εγκατεστημένη ισχύς των συστημάτων ΣΗΘ ανέρχεται στα 330 GWe. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των μονάδων ΣΗΘ το 2007 σε 37 χώρες παρουσιάζεται στον Πίνακα 2 [13]:

Πίνακας 2. Εγκατεστημένες ισχύς μονάδων CHP σε 37 χώρες το 2007.

Χώρα	MWe	Χώρα	MWe	Χώρα	MWe	Χώρα	MWe
Αυστραλία	1864	Φιλανδία	5830	Κορέα	4522	Σλοβακία	5410
Αυστρία	3250	Γαλλία	6600	Λετονία	590	Ισπανία	6045
Βέλγιο	1890	Γερμανία	20840	Λιθουανία	1040	Σουηδία	3490
Βραζιλία	1316	Ελλάδα	240	Μεξικό	2838	Ταϊβάν	7378
Βουλγαρία	1190	Ουγγαρία	2050	Ολλανδία	7160	Τουρκία	790
Καναδάς	6765	Ινδία	10012	Πολωνία	8310	UK	5440
Κίνα	28153	Ινδονησία	1203	Πορτογαλία	1080	USA	84707
Τσεχία	5200	Ιρλανδία	110	Ρουμανία	5250		
Δανία	5690	Ιταλία	5890	Ρωσία	65100		
Εσθονία	1600	Ιαπωνία	8723	Σιγκαπούρη	1602		

Σύμφωνα με ένα σενάριο που έτρεξε η IEA, οι χώρες του G8 μαζί με την Βραζιλία, την Κίνα, την Ινδία, το Μεξικό και την Ν. Αφρική έχουν τη δυνατότητα να φτάσουν τα 430 GWe εγκατεστημένης ισχύς από μονάδες συμπαραγωγής το 2015 (15% της ηλεκτροπαραγωγής όλων αυτών των χωρών), και να ξεπεράσουν τα 830GWe το 2030 (24% της ηλεκτροπαραγωγής). Στις Η.Π.Α. το 2012 η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ΣΗΘ εκτιμήθηκε στα 82 GWe, ενώ



τέλος έρευνες έδειξαν πως η συνολικά εγκατεστημένη ισχύς μονάδων ΣΗΘ στην Ευρώπη μπορεί να φτάσει μέχρι 150-250 GWe μέχρι το 2025 [13].

1.3.5.4. Βιβλιογραφική επισκόπηση συστημάτων οικιακής συμπαραγωγής

Πέρα από τα οικονομικά οφέλη σε επίπεδο ενός σπιτιού, μιας πολυκατοικίας ή ενός μεγαλύτερου συγκροτήματος κατοικιών ή επαγγελματικών χώρων, ενός νοσοκομείου, ενός εμπορικού κέντρου ή μιας επιχείρησης, όπου ένα σύστημα Μικρό-Συμπαραγωγής μπορεί να εγκατασταθεί, υπάρχουν και γενικότερα οφέλη για το κοινωνικό σύνολο που βρίσκονται σε συμφωνία με τις επιδιώξεις για την ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, την οικονομική ανταγωνιστικότητα και τον περιορισμό του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Για αυτό ακριβώς τον λόγο η Ευρωπαϊκή Ένωση και οι κυβερνήσεις κρατών ενθαρρύνουν την χρησιμοποίηση μονάδων μικρό-συμπαραγωγής σε οικιακές και όχι μόνο εφαρμογές. Η κυβέρνηση του Ηνωμένου Βασιλείου μείωσε το ΦΠΑ από 17.5% σε 5% στα νοικοκυριά που εγκαθιστούσαν συστήματα μικρό-συμπαραγωγής και έθεσε στόχο τη μείωση των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα μέχρι και 60% έως το 2050 [14]. Επίσης η Ολλανδική κυβέρνηση υποστηρίζει την εφαρμογή συστημάτων μικρό-συμπαραγωγής με παρόμοιες πρωτοβουλίες και επιπρόσθετα παρείχε διαθέσιμες χρηματοδοτήσεις στις εταιρίες για την μαζική ανάπτυξη αυτών των εφαρμογών. Τέλος, στόχος της βρετανικής κυβέρνησης είναι μέχρι το 2050 τα συστήματα μικρο-συμπαραγωγής να μπορούν να παρέχουν το 30%-40% των εθνικών αναγκών σε ηλεκτρισμό [14].

Λόγω των τεχνολογικών χαρακτηριστικών, της ενεργειακής ευελιξίας και του έντονου ενδιαφέροντος που προκάλεσαν στις κυβερνήσεις τα συστήματα οικιακής συμπαραγωγής οδήγησαν πολλούς ερευνητές να ασχοληθούν μαζί τους, στο διάστημα των τελευταίων ετών. Οι Ren και Gao [15] καθώς και οι Hawkes και Leach [16] μελέτησαν τρόπους λειτουργίας μονάδων μικρο-συμπαραγωγής διαφορετικών τεχνολογιών για να μεγιστοποιήσουν τα οικονομικά οφέλη και να ελαχιστοποιήσουν τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Όπως φάνηκε στην έρευνα των Hawkes και Leach αυτά τα δύο δεν είναι πάντοτε ανάλογα, αφού στις μηχανές Stirling και στους Α/Σ η λειτουργία για μέγιστη μείωση των εκπομπών CO₂ δεν συμπίπτει με το ελάχιστο κόστος λειτουργίας που μπορεί να έχει το σύστημα συμπαραγωγής. Αντίθετα αυτό συμβαίνει στην περίπτωση των κυψελών καυσίμων, στο σύστημα που μελετήθηκε από τους Hawkes και Leach. Ενώ οι Staffell, Green και Kendall [17] καθώς και οι Peacock και Newborough [18] μελέτησαν



οικονομικά διάφορες τεχνολογίες μικρο-συμπαραγωγής σε συνδυασμό με την βέλτιστη εξοικονόμηση ενέργειας και τη μείωση των εκπομπών. Τέλος, τα συστήματα μικρο-συμπαραγωγής τέθηκαν σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλών μεταβλητών, με μεταβλητές του προβλήματος το κόστος επένδυσης, τον συνολικό βαθμό απόδοσης, το κόστος καυσίμου, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας και τις εκπομπές CO₂ όπως αυτό που δημοσίευσαν οι Pilavachi, Roumpeas, Minett και Afgan [19].

Η Ιαπωνία, η Γερμανία, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ολλανδία και οι Η.Π.Α. είναι οι 5 πιο ενεργές χώρες στην έρευνα και στην κατασκευή συστημάτων μικρο-συμπαραγωγής. Ιδιαίτερα, η Γερμανία και η Ιαπωνία έρχονται πρώτες σε αυτές τις δραστηριότητες. Μέχρι το 2003, πάνω από 8000 μονάδες μικρο-συμπαραγωγής εγκατεστημένης ισχύς 5 KW είχαν τοποθετηθεί σε επιχειρήσεις στην Γερμανία και σε μεγάλα νοικοκυριά. Ενώ, η γερμανική κυβέρνηση φιλοδοξεί να αυξήσει τον αριθμό αυτών των μονάδων σε 850.000, που αποτελεί το 5% του συνολικού αριθμού των γερμανικών νοικοκυριών [20]. Στο Ηνωμένο Βασίλειο, μέχρι το 2002, περίπου 2000 μονάδες μικρο-συμπαραγωγής ήταν σε λειτουργία, ενώ περίπου 13.500.000 νοικοκυριά αναμένεται να είναι εν δυνάμει κατάλληλα για εγκατάσταση μονάδων μικρο-συμπαραγωγής μεγέθους 1-3 KW [21]. Μια άλλη ευρωπαϊκή χώρα, η Ολλανδία, άρχισε να αποκτά εξοικείωση με συστήματα μικρο-συμπαραγωγής στα σπίτια το 2008, εγκαθιστώντας κυρίως μηχανές Stirling μεγέθους 1.2 KW [22]. Τέλος, στην Ιαπωνία, η εφαρμογή συστημάτων μικρο-συμπαραγωγής άρχισε το 2003, και 90.000 μονάδες είχαν τοποθετηθεί μέχρι το 2009, κυρίως ΜΕΚ. Ενώ, η κυβέρνηση της Ιαπωνίας έθεσε ως στόχο να εισάγει 1.200.000 μονάδες συμπαραγωγής κυψελών καυσίμου έως το 2010, με τον συνολικό αριθμό των νοικοκυριών στην Ιαπωνία να ανέρχεται στα 50.000.000 [15].

Συνολικά τα συστήματα μικρο-συμπαραγωγής και ιδιαίτερα η χρήση τους σε οικιακές εφαρμογές έχουν τα εξής σημαντικά χαρακτηριστικά και για αυτό αποτελούν το μέλλον στην θέρμανση και ψύξη χώρων και ένα ελπιδοφόρο εργαλείο στην προστασία του περιβάλλοντος και στην αειφόρο ανάπτυξη:

- α) Ο πρωταρχικός σκοπός ύπαρξης ενός τέτοιου συστήματος ΣΗΘΥΑ, όπως και η λειτουργία των απλών λεβήτων και συστημάτων κλιματισμού τα οποία καλείται να αντικαταστήσει, είναι η κάλυψη των αναγκών για θέρμανση ή ψύξη. Με την κατανάλωση της ίδιας ή λίγο μεγαλύτερης ποσότητας καυσίμου, παράγεται ως παραπροϊόν και ηλεκτρισμός “χαμηλού ίχνους άνθρακα”. Επιπλέον, οι ώρες της ημέρας κατά τις οποίες λειτουργεί πιο έντονα, συμπίπτουν με τις ώρες αιχμής του συστήματος. Έτσι αντικαθιστά ένα μέρος από την ηλεκτρική ενέργεια που θα παραγόταν από θερμικές μονάδες ορυκτών



καυσίμων για την ικανοποίηση της ζήτησης αιχμής. Εκτιμάται ότι συνολικά μπορεί να αποφευχθεί η εκπομπή 1 ως 2 τόνων CO₂ το χρόνο ανά εγκατάσταση συστήματος Μίκρο-Συμπαραγωγής.

β) Η παραγωγή ηλεκτρισμού έρχεται δίπλα στην κατανάλωση μειώνοντας τις απώλειες πάνω στα καλώδια μεταφοράς.

γ) Λόγω αυτής της εγγύτητας στην κατανάλωση και του προφίλ της παραγωγής ηλεκτρισμού (λειτουργία κατά τις ώρες αιχμής), σε περίπτωση μαζικών εγκαταστάσεων μεγάλου αριθμού τέτοιων μονάδων μειώνεται η ανάγκη για επενδύσεις σε υποδομές (δίκτυα μεταφοράς και θερμικές μονάδες παρακολούθησης αιχμών).



Οικονομική αξιολόγηση σεναρίων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής σε οικιακές εφαρμογές

Διαμόρφωση σεναρίων σε συστήματα οικιακής συμπαραγωγής και τριπαραγωγής με ψύκτη

απορρόφησης και προσρόφησης



2. Διαμόρφωση σεναρίων σε συστήματα οικιακής συμπαραγωγής και τριπαραγωγής με ψύκτη απορρόφησης και προσρόφησης

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας μελετήθηκαν 3 σενάρια οικιακής μικρό-συμπαραγωγής τα οποία θα αναλυθούν σε αυτό το κεφάλαιο, με σκοπό να μελετηθούν τεχνοοικονομικά συγκρινόμενα με ένα σενάριο συμβατικού συστήματος θέρμανσης ψύξης. Το πρώτο σενάριο αφορά σύστημα τριπαραγωγής με MEK και ψύκτη προσρόφησης (MEK-ΨΠ), το δεύτερο σενάριο αφορά σύστημα συμπαραγωγής με MEK και αντλία θερμότητας (MEK-ΑΘ) και το τρίτο σενάριο αφορά σύστημα τριπαραγωγής με MEK και ψύκτη απορρόφησης (MEK-ΨΑ). Στο συμβατικό σενάριο θέρμανσης ψύξης γίνεται η χρήση ενός λέβητα φυσικού αερίου για τη θέρμανση των χώρων και την παραγωγή Ζεστού Νερού Χρήσης (ZNX) το χειμώνα, ενώ το καλοκαίρι το ZNX παράγεται επίσης από το Λέβητα φυσικού αερίου και για την ψύξη χώρων χρησιμοποιείται μία αντλία θερμότητας, η οποία καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο.

2.1. Βασικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιούμενων στα σενάρια τεχνολογιών

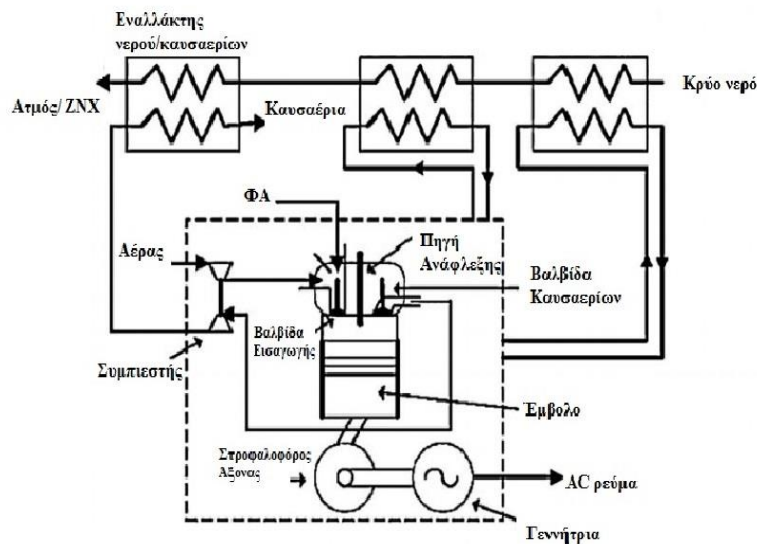
2.1.1. Μηχανές Εσωτερικής Καύσης, MEK

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης (MEK) είναι θερμικές μηχανές όπου τα προϊόντα της καύσης του αέρα με το καύσιμο αποτελούν κατευθείαν το εργαζόμενο μέσο για την παραγωγή της μηχανικής ισχύος. Η εμβολοφόρος MEK είναι η πιο κοινή μορφή κινητηρίου μηχανής. Η απλή κατασκευή της, ως MEK, και η δυνατότητας της να χρησιμοποιεί εργαζόμενο μέσο σε υψηλή θερμοκρασιακή στάθμη οδηγεί σε καλό ολικό βαθμό απόδοσης και υψηλή συγκέντρωση ισχύος [23].

Τα συστήματα μικρό-συμπαραγωγής με κινητήρια παλινδρομική εμβολοφόρο MEK έχουν το μεγαλύτερο ποσοστό στην αγορά συστημάτων που εφαρμόζονται στα σπίτια. Αυτό οφείλεται στην αποδεδειγμένη αξιοπιστία της τεχνολογίας τους. Μειονέκτημα τους πάντως, είναι η ανάγκη

για τακτική συντήρηση και επισκευή ώστε να εξασφαλίζεται η αδιάλειπτη λειτουργία τους. Το μέγεθος τους ποικίλει από μερικά kW έως 10 MW.

Ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης των ΜΕΚ εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ηλεκτρική ισχύς του συστήματος. Σε περιπτώσεις μικρότερες των 15 kW_{el} ο βαθμός απόδοσης δεν μπορεί να ξεπεράσει το 26%. Ο θερμικός βαθμός απόδοσης εξαρτάται από την μηχανή αλλά και από την υπόλοιπη εγκατάσταση, αν π.χ. χρησιμοποιούνται επιπρόσθετα μονάδες συμπύκνωσης όπως συμβαίνει στο μοντέλο Senertec Dachs G 5.5 Condensing με θερμικό βαθμό απόδοσης 72% [24]. Στην εικόνα 7. απεικονίζεται ένα παραστατικό σχέδιο του τρόπου λειτουργίας μιας ΜΕΚ σε ένα σύστημα μικρό-συμπαραγωγής [25].



Εικόνα 7. Παραστατικό σχέδιο τρόπου λειτουργίας micro-CHP ΜΕΚ.

2.1.2. Ψύκτες προσρόφησης

Ο όρος προσρόφηση (adsorption), χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συσσώρευση διαλυμένων ιόντων, ατόμων ή και μορίων στην διεπιφάνεια, συνήθως στερεού-υγρού και



στερεού-αερίου, με αποτέλεσμα την κατανομή των μορίων μεταξύ στερεού και ρευστού. Η χημική ουσία που συγκεντρώνεται ή προσροφάται στην διεπιφάνεια ονομάζεται προσροφούμενο υλικό (adsorbate) και η επιφάνεια στην οποία γίνεται η συσσώρευση ονομάζεται προσροφητικό μέσο ή προσροφητής (adsorbent).

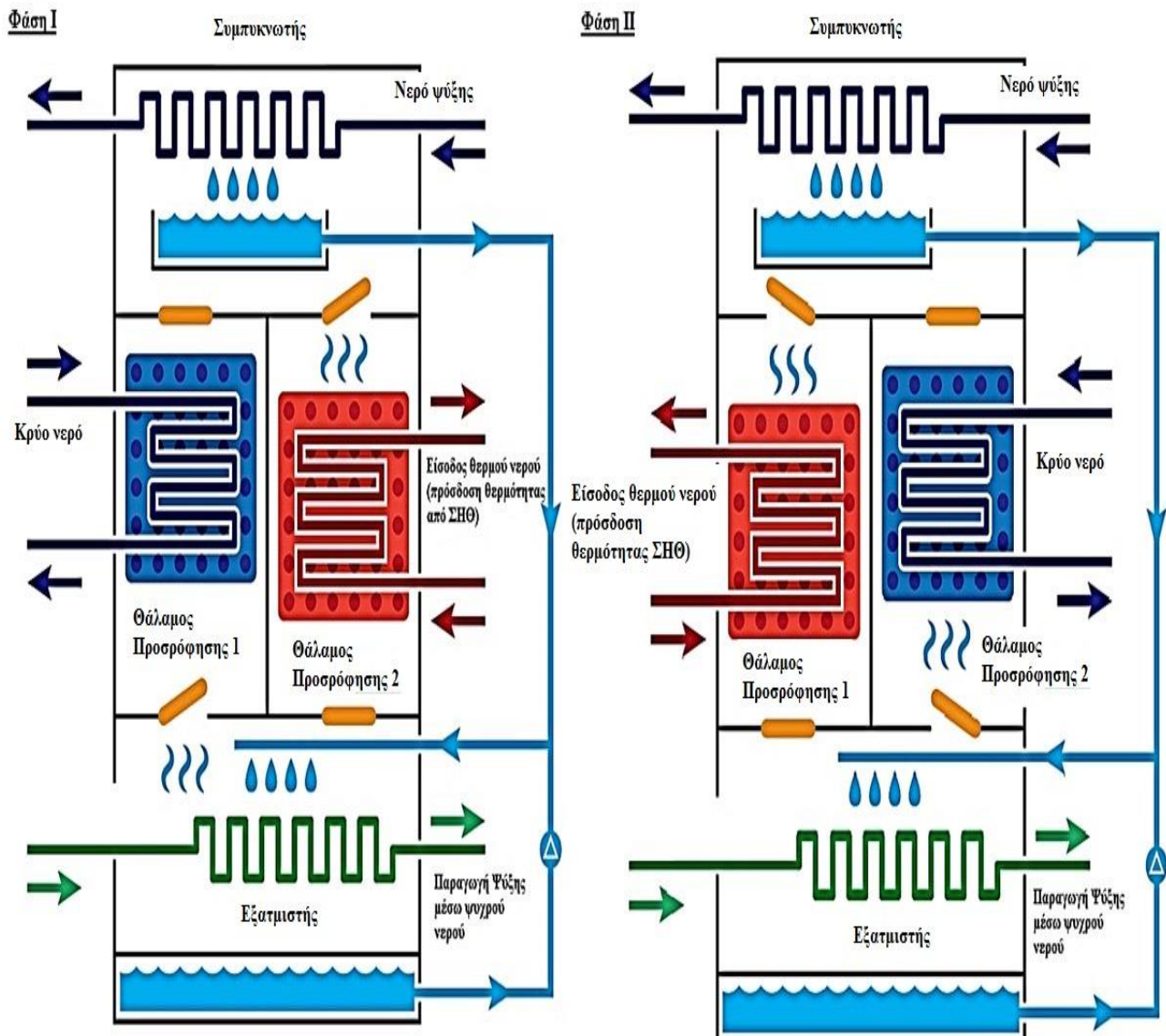
Οι ψύκτες προσρόφησης (adsorption chiller), όπως και οι ψύκτες απορρόφησης που θα δούμε στη συνέχεια, αξιοποιούν την απορριπτόμενη θερμότητα από μονάδες ΣΗΘ για τον κλιματισμό χώρων. Ο ψύκτης προσρόφησης μπορεί να λειτουργήσει με χαμηλές θερμοκρασίες εισόδου δηλαδή υψηλής ποιότητας θερμότητα. Στην περίπτωση των ψυκτών προσρόφησης, αντί για υγρό διάλυμα χρησιμοποιούνται στερεά πορώδη ροφητικά υλικά. Τα διαθέσιμα στην αγορά συστήματα χρησιμοποιούν νερό ως ψυκτικό μέσο και πήκτωμα πυριτίου (silica gel) ως προσροφητικό μέσο, ενώ κάποιοι άλλοι κατασκευαστές στη θέση του πηκτώματος πυριτίου χρησιμοποιούν ζεόλιθους.

Οι ψύκτες προσρόφησης αποτελούνται από δύο χώρους προσροφητικού μέσου (two sorbent compartments), ένα εξατμιστή και έναν συμπυκνωτή, Εικόνα 8. Ενώ το προσροφητικό μέσο στο πρώτο διαμέρισμα αναγεννάται χρησιμοποιώντας ζεστό νερό από εξωτερική πηγή θερμότητας (απορριπτόμενη θερμότητα από ΣΗΘ) και οι δημιουργούμενοι ατμοί του ψυκτικού μέσου (νερού) οδηγούνται στον συμπυκνωτή για να μετατραπούν ξανά σε υγρή φάση με τη βοήθεια ενός κυκλώματος νερού που τους αφαιρεί θερμότητα, το προσροφητικό μέσο στο δεύτερο διαμέρισμα προσροφά τους υδρατμούς που εισάγονται από τον εξατμιστή. Αυτός ο χώρος πρέπει να ψύχεται προκειμένου να επιτραπεί συνεχής προσρόφηση (χρήση re-cooler). Το νερό στον εξατμιστή περνά στην αέρια φάση, θερμαινόμενο από ένα εξωτερικό κύκλωμα νερού. Στην πραγματικότητα, εδώ παράγεται η χρήσιμη ψυκτική ισχύς. Εάν η ψυκτική ισχύς μειωθεί σε κάποια ορισμένη τιμή λόγω του κορεσμού του προσροφητικού μέσου τότε οι θάλαμοι αντιστρέφουν τη λειτουργία τους.

Η ψυκτική ικανότητα τους κυμαίνεται από 5.5-500 kW. Σε τυπικές συνθήκες λειτουργίας με θερμοκρασία αναγέννησης γύρω στους 80°C, τα συστήματα επιτυγχάνουν COP γύρω στο 0.6-0.7 ενώ μπορούν να λειτουργήσουν και σε θερμοκρασίες αναγέννησης μέχρι τους 60°C. Η απλότητα κατασκευής των ψυκτών προσρόφησης και η μηχανική αντοχή τους σε συνδυασμό με την ελάχιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (μη ύπαρξη αντλίας), που απαιτούν, και τη μη ύπαρξη περιορισμού στη θερμοκρασία απόρριψης θερμότητας είναι σημαντικά πλεονεκτήματα αυτού του τύπου. Ενώ ο μεγάλος τους όγκος, το βάρος τους και το υψηλό τους κόστος, λόγω του ακόμα περιορισμένου αριθμού τους, είναι μειονεκτήματα αυτής της τεχνολογίας ψυκτών.



Το βασικό τους πλεονέκτημα έναντι των ψυκτών απορρόφησης είναι η δυνατότητα για μικρής κλίμακας εφαρμογές της τάξης των 10 kW.



Εικόνα 8. Αρχή λειτουργίας ενός ψυκτικού συστήματος προσρόφησης μονού σταδίου.



2.1.3. Ψύκτες απορρόφησης

Ο όρος απορρόφηση (absorption) αναφέρεται στο φαινόμενο κατά το οποίο μία ουσία σε μία φυσική κατάσταση εισχωρεί και ομοιογενοποιείται με μία άλλη ουσία διαφορετικής φυσικής κατάστασης. Οι δύο ουσίες παρουσιάζουν ισχυρή έλξη και δημιουργούν ένα μίγμα. Η διεργασία αυτή είναι αντιστρεπτή και η απορροφημένη ουσία μπορεί να αποδεσμευτεί από τον απορροφητή με την πρόσδοση θερμότητας στο μίγμα. Ο κύκλος απορρόφησης είναι παρόμοιος με το ψυκτικό κύκλο μηχανικής συμπίεσης ατμού με τη μόνη διαφορά ότι ο συμπιεστής αντικαθίσταται από έναν χημικό κύκλο που λαμβάνει χώρα μεταξύ των απορροφητή (absorber), την αντλία (pump) και τον αναγεννητή (regenerator).

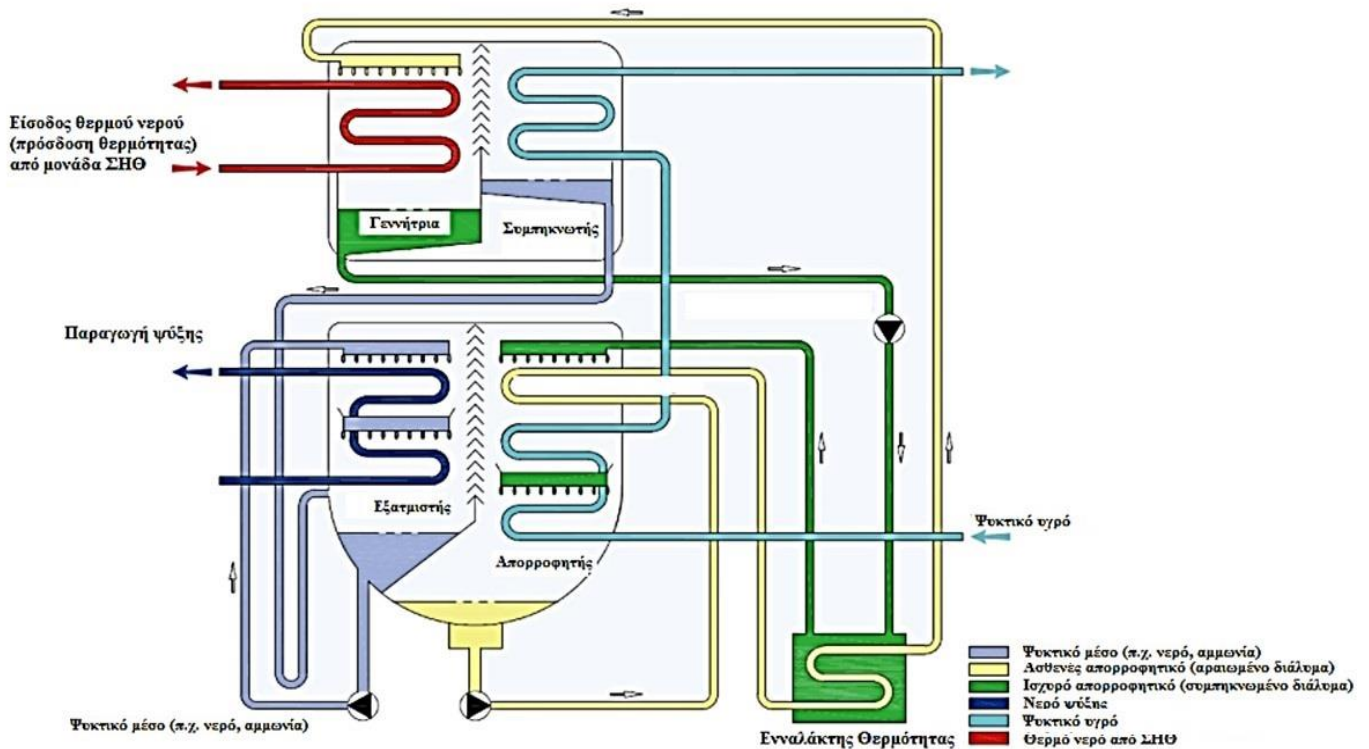
Στην διαδικασία της ψύξης με απορρόφηση, χρησιμοποιείται διάλυμα ως εργαζόμενο μέσο, το οποίο αποτελείται από δύο ρευστά, το ψυκτικό μέσο και το απορροφητικό υγρό (absorbent). Τα βασικά εργαζόμενα μέσα που χρησιμοποιούνται στην πράξη είναι τα διαλύματα νερού-βρωμιούχου λιθίου ($\text{H}_2\text{O-LiBr}$), και το διάλυμα αμμωνίας-νερού ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$). Στην πρώτη περίπτωση το νερό είναι το ψυκτικό μέσο και το βρωμιούχο λίθιο παίζει το ρόλο του απορροφητικού υγρού, ενώ στη δεύτερη περίπτωση το νερό είναι το απορροφητικό υγρό και η αμμωνία παίζει το ρόλο του ψυκτικού μέσου. Τα συστήματα ψύξης απορρόφησης χωρίζονται επίσης σε έμμεσης θέρμανσης (indirect fired), όπου η τροφοδότηση του αναγεννητή γίνεται από έναν λέβητα ατμού ή ζεστού νερού και σε άμεσης θέρμανσης (direct fired), όπου η θέρμανση του αναγεννητή γίνεται απευθείας με καύση υγρών ή κυρίως αερίων καυσίμων. Τέλος, οι ψύκτες χωρίζονται ανάλογα με το πόσες βαθμίδες διαθέτουν σε μονοβάθμιες (single-stage) και πολυβάθμιες (double stage, triple stage) μηχανές.

Στην πιο απλή σχεδιάσή της, η μηχανή απορρόφησης αποτελείται από εξατμιστή, συμπυκνωτή, απορροφητή, μια γεννήτρια και μια αντλία διαλύματος. Συνοπτικά η διαδικασία της απορρόφησης περιλαμβάνει τα εξής στάδια [26]: Το ψυκτικό μέσο εισέρχεται στον εξατμιστή όπου προσλαμβάνει θερμότητα και εξατμίζεται (παραγωγή ψύξης). Ο ατμός του ψυκτικού μέσου (ψυκτικός ατμός, refrigerant vapor), απορροφάται σε ένα απορροφητικό υγρό μέσα στον απορροφητή, με αποτέλεσμα να συντελείται μία εξώθερμη αντίδραση που συνεπάγει την αύξηση της θερμοκρασίας, και έτσι δημιουργείται το «ασθενές απορροφητικό» διάλυμα (diluted solution). Το διάλυμα αυτό αντλείται προς μεγαλύτερη πίεση και εισάγεται στον αναγεννητή, όπου προσλαμβάνει θερμότητα και έτσι το ψυκτικό μέσο αποδεσμεύεται ως ατμός. Το ατμοποιημένο ψυκτικό μέσο εισέρχεται στον συμπυκνωτή, όπου και συμπυκνώνεται λόγω του



νερού ψύξης, για να επιστρέψει ως συμπύκνωμα στον εξατμιστή και να κλείσει το κύκλωμα υδρατμών του κύκλου απορρόφησης. Το αναγεννημένο ή «ισχυρό απορροφητικό» (concentrated solution) οδηγείται στη συνέχεια μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας πίσω στον απορροφητή για να συλλέξει εκ νέου ψυκτικό ατμό. Η βασική αρχή του ψύκτη απορρόφησης φαίνεται στην Εικόνα 9.

Στα συστήματα τριπαραγωγής, ο κατάλληλος τύπος ψύκτη απορρόφησης (absorption chiller) χρησιμοποιεί νερό-διάλυμα βρωμιούχου λιθίου μονής βαθμίδας. Αυτό γιατί χρησιμοποιείται για κλιματισμό, δηλαδή δεν υπάρχει απαίτηση για πολύ χαμηλές θερμοκρασίες, και αξιοποιεί απορριπτόμενη θερμότητα χαμηλής ποιότητας από το σύστημα συμπαραγωγής.



Εικόνα 9. Αρχή λειτουργίας ενός ψυκτικού συστήματος απορρόφησης μονού σταδίου.



Συνοπτικά στον Πίνακα 3 [8] εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα ώστε να μπορεί να γίνει σύγκριση των δύο τύπων ψυκτών που αναλύθηκαν προηγουμένως:

Πίνακας 3. Σύγκριση μεταξύ ψύξης με απορρόφηση και προσρόφηση.[8, 27]

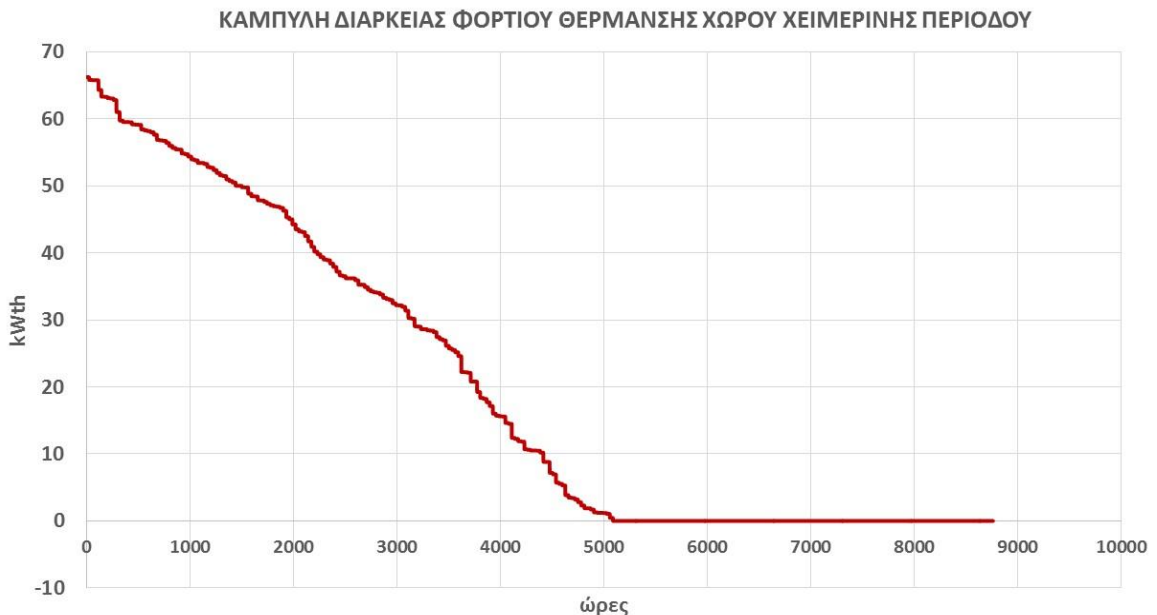
Τύπος	Μέγεθος (Ψυκτική ισχύς)	Πλεονεκτήματα	Μειονεκτήματα	T _{εισόδου} (°C)	COP	Εφαρμογές
Ψύκτης απορρόφησης	10kW-1MW	Λειτουργία με ατμό, χαμηλός θόρυβος, μπορεί να λειτουργήσει με χαμηλής ποιότητα θερμότητα (θερμοκρασία θερμού νερού εισόδου 70-100°C), χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.	Λιγότερος αποδοτικός από συμβατικό ψύκτη με συμπιεστή.	70-100	≤1.2	LiBr/H ₂ O: Θερμοκρασία εξάτμισης 5-10°C, NH ₃ /H ₂ O: Θερμοκρασία εξάτμισης <0°C, Εφαρμογές μικρής-μεγάλης κλίμακας,
Ψύκτης προσρόφησης	5.5kW-500kW	Λειτουργία με ατμό, καθόλου θόρυβος, δεν υπάρχει κρυσταλοποίηση και διάβρωση, δεν απαιτεί λίπανση, χαμηλές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.	Μπορεί να λειτουργήσει μόνο με υψηλής ποιότητα θερμότητα (θερμοκρασία θερμού νερού εισόδου 55-90°C), υψηλό κόστος,	55-90	≤0.7	Εφαρμογές μικρής κλίμακας.



2.2. Περιγραφή κατοικίας

Η υπό μελέτη κατοικία θεωρήθηκε ότι βρίσκεται στη Νέα Φιλαδέλφεια της Αττικής και διαθέτει 3 ορόφους, δύο κατοικήσιμων διαμερισμάτων, με συνολικό εμβαδό πολυκατοικίας 600 m². Η χειμερινή περίοδος θεωρήθηκε ότι καλύπτεται από τους μήνες Οκτώβριο – Απρίλιο (5088 ώρες) και τα ενεργειακά της δεδομένα, δηλαδή οι θερμικές ανάγκες για θέρμανση χώρων, χρησιμοποιήθηκαν από την διπλωματική εργασία της Τσαούσης Ραφαέλας [28]. Αντίστοιχα, η καλοκαιρινή περίοδος θεωρήθηκε ότι καλύπτεται από τους μήνες Μάιο – Σεπτέμβριο (3672 ώρες). Τα ενεργειακά της δεδομένα που εκφράζουν τις ανάγκες για ψύξης χώρων και ανάγκες για ΖΝΧ το καλοκαίρι και το χειμώνα, χρησιμοποιήθηκαν από την διπλωματική εργασία του Φοίφα Κωνσταντίνου [27].

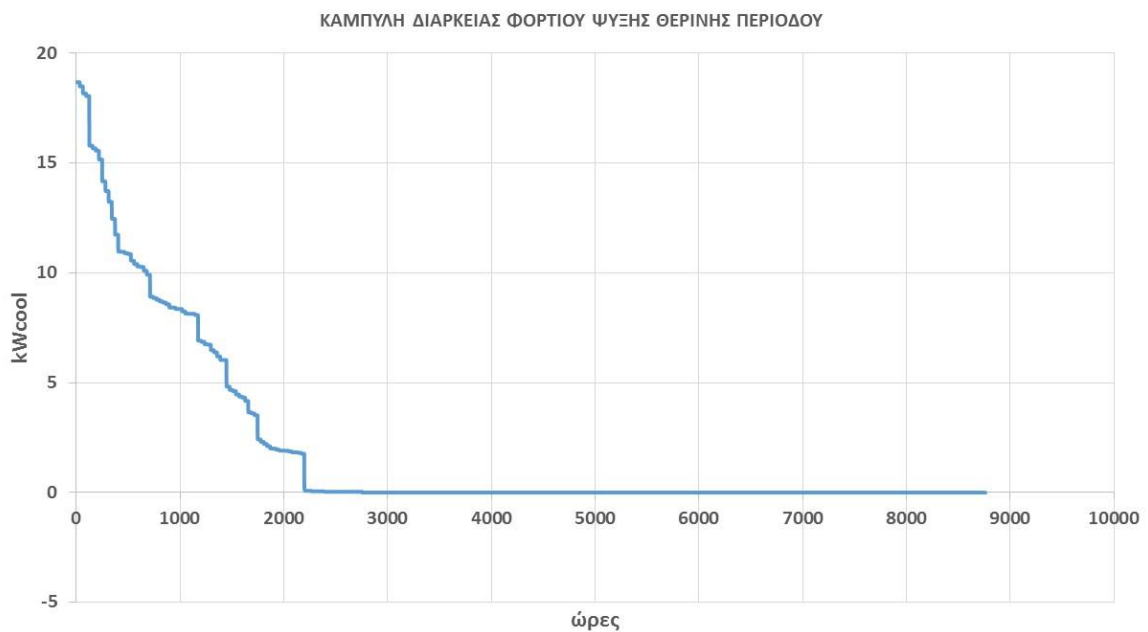
Στα επόμενο διαγράμματα παρουσιάζονται οι καμπύλες διάρκειας φορτίου για τους χειμερινούς και καλοκαιρινούς μήνες. Βάση αυτών των φορτίων θα γίνει η διαστασιολόγηση των εγκαταστάσεων μικρό-συμπαραγωγής, που θα μελετηθούν στην παρούσα διπλωματική εργασία. Έπειτα, θα μελετηθούν ως προς την οικονομική τους βιωσιμότητα ύστερα από την σύγκριση τους με την συμβατική περίπτωση θέρμανσης από λέβητα φυσικού αερίου και ψύξης από αντλία θερμότητας.



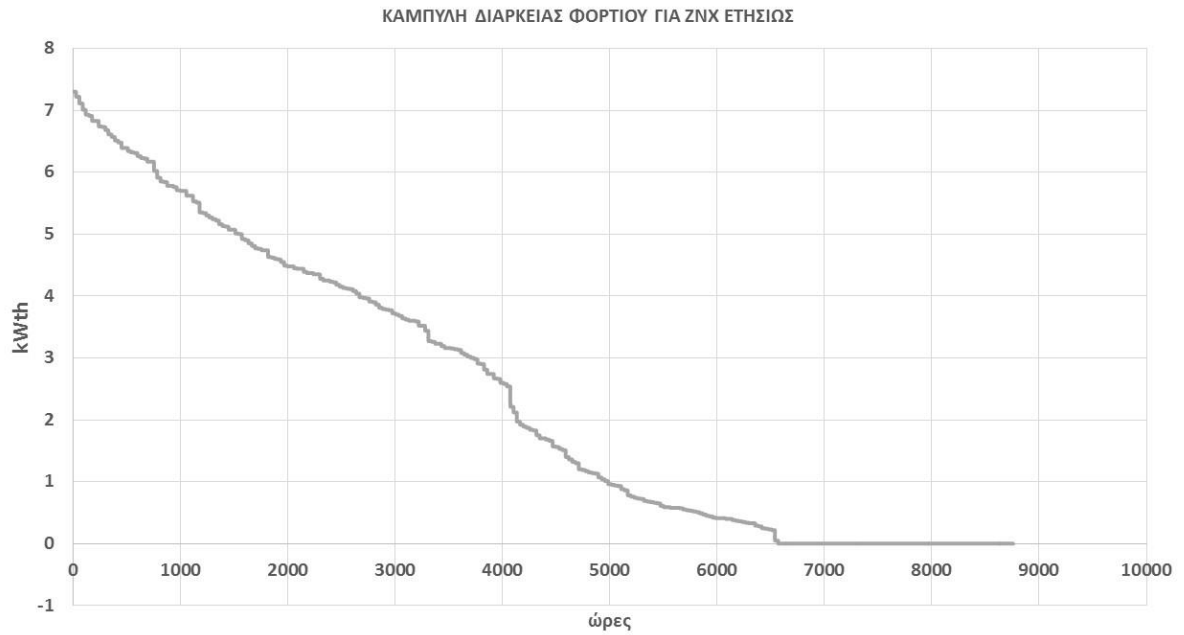
Διάγραμμα 1. Καμπύλη διάρκειας φορτίου θέρμανσης χώρου χειμερινής περιόδου για τους μήνες ΟΚΤ-ΑΠΡ [kW_{th}], [ΣΥΝΟΛΟ: 179044.1 kWh_{th}]



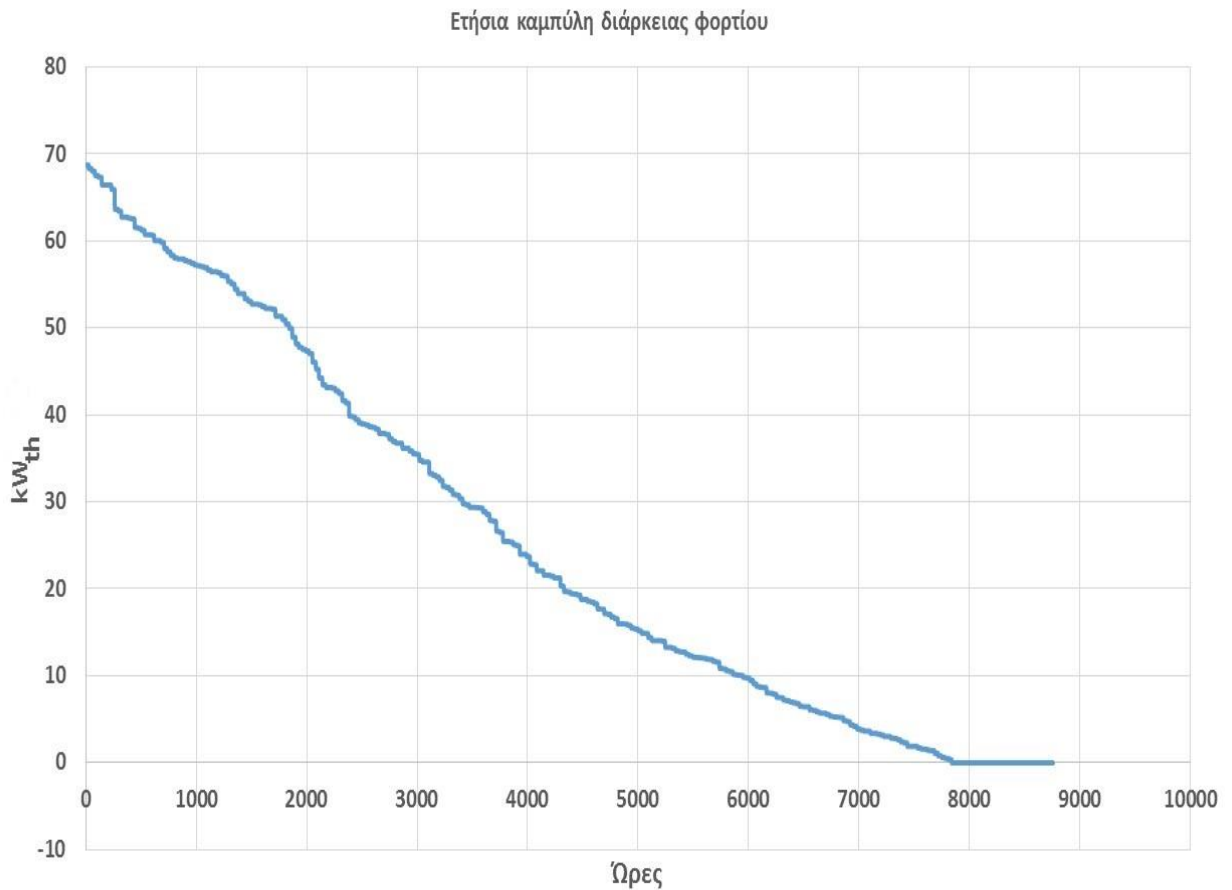
Στο διάγραμμα 1 απεικονίζεται η καμπύλη διάρκειας των φορτίων θέρμανσης χώρου για την χειμερινή περίοδο για την υπό μελέτη τριώροφη πολυκατοικία. Οι συνολικές ώρες είναι 5088. Στο διάγραμμα 2 απεικονίζεται καμπύλη η διάρκειας του ψυκτικού φορτίου καλοκαιριού για την υπό μελέτη τριώροφη πολυκατοικία. Το καλοκαιρινό ψυκτικό φορτίο εκφράζει τις ανάγκες σε ψύξη που έχει η πολυκατοικία από τον Μάιο μέχρι τον Σεπτέμβριο. Οι συνολικές ώρες είναι 3672. Στη συνέχεια, στο διάγραμμα 3 απεικονίζεται η καμπύλη διάρκειας φορτίου που αφορούν τις ανάγκες της πολυκατοικίας σε ZNX κατά τη διάρκεια του έτους. Οι συνολικές ώρες είναι 8760. Στο διάγραμμα 4 απεικονίζεται η ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου της τυπικής τριώροφης πολυκατοικίας, όπου εξετάζεται. Τα ενεργειακά δεδομένα (φορτία θέρμανσης και ZNX το χειμώνα και φορτία ψύξης, μέσω του βαθμού απόδοσης COP, και ZNX το καλοκαίρι) είναι όλα εκφρασμένα σε αντίστοιχα θερμικά φορτία [kW_{th}] και οι συνολικές εξεταζόμενες ώρες είναι 8760, με αντίστοιχη ζήτηση θερμικής ενέργειας 224981.16 kWh_{th} . Ο βαθμός απόδοσης COP για ψύκτη προσρόφησης θεωρήθηκε ίσος με 0.7 όπως θα αναλυθεί παρακάτω.



Διάγραμμα 2. Καμπύλη διάρκειας φορτίου ψύξης θερινής περιόδου για τους μήνες ΜΑΙ-ΣΕΠΤ [kW_{cool}], [ΣΥΝΟΛΟ: 17298.15 kWh_{cool}]

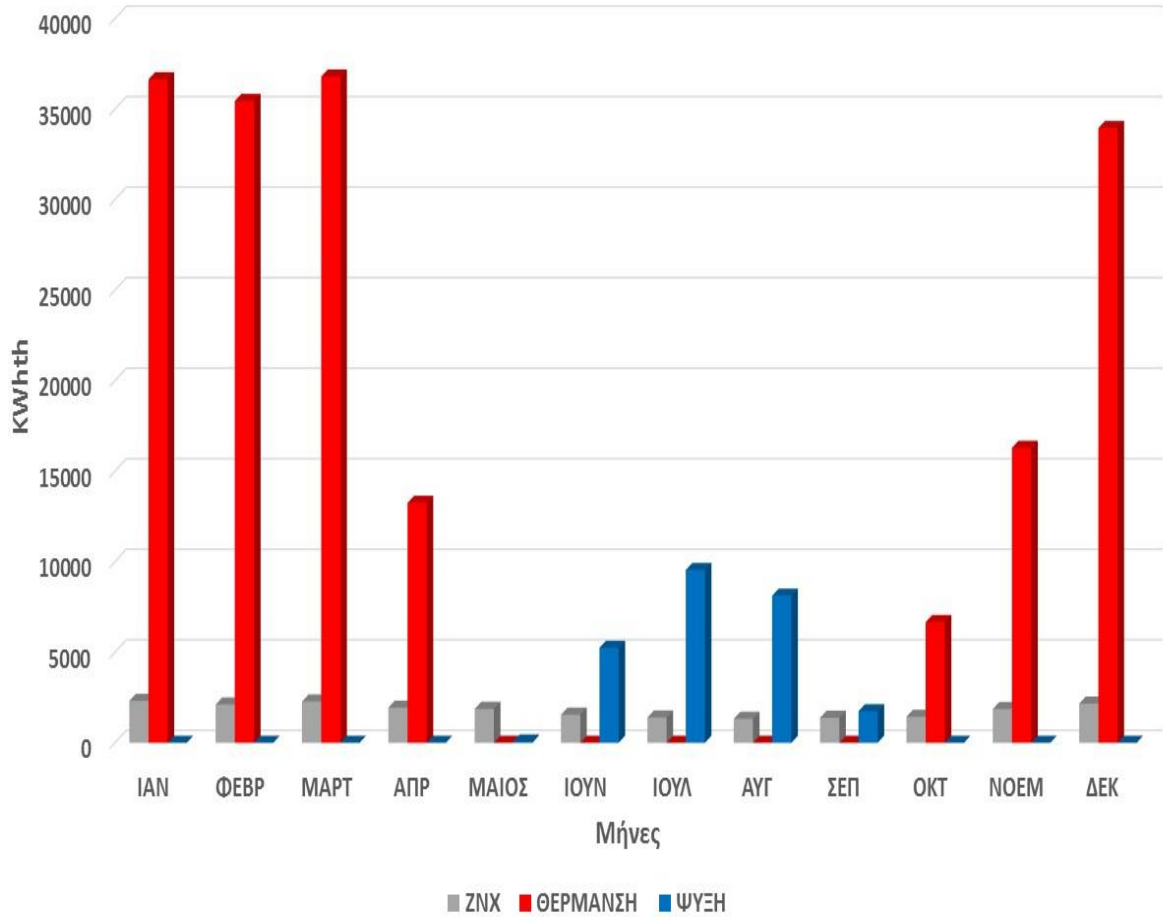


Διάγραμμα 3. Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου για ανάγκες σε ΖΝΧ [kW_{th}] [ΣΥΝΟΛΟ: 21225.4 kW_{th}]



Διάγραμμα 4. Ετήσια καμπύλη διάρκειας φορτίου τυπική τριώροφης πολυκατοικίας στην Αθήνα [kW_{th}], [ΣΥΝΟΛΟ: 224981.1629 kWh_{th}].

Τέλος, στο διάγραμμα 5 απεικονίζεται η ανά μήνα κατανομή των φορτίων θέρμανσης χώρου, ψύξης χώρου και ZNX, όπως αυτή καταγράφηκε και εξετάστηκε στην ανάλυση των συστημάτων συμπαραγωγής που θα ακολουθήσει στα επόμενα κεφάλαια. Όσο αφορά τα φορτία θέρμανσης χώρων και ZNX είναι εκφρασμένα σε kWh_{th}, όπως επίσης και τα ψυκτικά φορτία μέσω του COP. Όπως είναι φανερό, οι περισσότερες ανάγκες που πρέπει να ικανοποιήσει το σύστημα μας είναι ανάγκες θέρμανσης χώρων, και αυτές εμφανίζονται κυρίως τους χειμερινούς μήνες.



Διάγραμμα 5. Κατανομή φορτίων θέρμανσης χώρου, ψύξης και ZNX ανά μήνα.



2.3. Σύστημα οικιακής μικρο-τριπαραγωγής με ψύκτη προσρόφησης

2.3.1. Στρατηγική λειτουργίας και περιγραφή συνολικού συστήματος

Θα αρχίσει τώρα η εξέταση των τριών σεναρίων. Και στα τρία σεναρία θεωρείται ότι:

α) Η μελέτη των συστημάτων γίνεται σε ωριαία βάση σε όλη τη διάρκεια του έτους.

β) Η διαστασιολόγηση της ΜΕΚ, και στις δύο περιόδους λειτουργίας, γίνεται με βάση το ποσοστό του μέγιστου (peak) θερμικού φορτίου που καλύπτει η ΜΕΚ κάθε φορά, θεωρώντας τυπικούς βαθμούς απόδοσης της ΜΕΚ $\eta_{th}=0.7$ και $\eta_e=0.3$. (Οι τιμές αντλήθηκαν από τον πίνακα δεδομένων με διάφορες ΜΕΚ της διπλωματικής εργασίας της Ραφαέλας Τσαούσης [28].)

γ) Όπως προκύπτει από τα ενεργειακά δεδομένα της εξεταζόμενης τριώροφης πολυκατοικίας, το μέγιστο (peak) ωριαίο θερμικό φορτίο, βάση των ενεργειακών δεδομένων ανέρχεται στα 68.8 kW_{th} και βάση αυτού διαστασιολογείται η ΜΕΚ του συστήματος συμπαραγωγής. Το peak αυτό εμφανίζεται, πιο συγκεκριμένα, τον μήνα Φεβρουάριο στο διάστημα μεταξύ 6:00-7:00 και διαμορφώνεται από 64.31 kW_{th} σε ανάγκες θέρμανσης χώρου και 4.49 kW_{th} σε ανάγκες για ΖΝΧ.

δ) Η λειτουργία σε μερικό φορτίο (Operation in Partial Load, OPL) είναι μια χρήσιμη παράμετρος στην διαδικασία αξιολόγησης μιας συμπαραγωγικής μονάδας. Μία αποδεκτή ικανότητα λειτουργίας σε μερικό φορτίο σημαίνει ότι ο βαθμός απόδοσης του κύριου κινητήρα της συμπαραγωγικής μονάδας δεν μειώνεται αισθητά καθώς το φορτίο κατανάλωσης μειώνεται σε σχέση με το ονομαστικό. Αυτή η ικανότητα διαφέρει από κινητήρες σε κινητήρες στις συμπαραγωγικές μονάδες και είναι αρκετά υψηλή στις ΜΕΚ [29]. Επιπρόσθετα, στους διάφορους τύπους κινητήρων υπάρχουν κάποια τεχνικά ελάχιστα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, όταν το φορτίο κατανάλωσης μειώνεται πολύ σε σχέση με το ονομαστικό. Αυτά τα όρια μπορεί να προέρχονται από περιβαλλοντικούς περιορισμούς, διότι η μηχανή σε τέτοια φορτία μπορεί να παραβιάζει όρια εκπομπών.

Χρήσιμα συμπεράσματα διεξάγονται στις αναφορές τις Wärtsilä [30]. Αρχικά, στις ΜΕΚ εν αντιθέσει με τους Α/Σ υπάρχει πολύ μικρή απόκλιση στον βαθμό απόδοσης της μηχανής όσο το φορτίο κατανάλωσης μειώνεται από το ονομαστικό. Επίσης το σημείο που σταματάει η μηχανή να λειτουργεί στις ΜΕΚ είναι σε αρκετά χαμηλότερα φορτία του ονομαστικού από ότι στους Α/Σ. Οπότε, προς ευκολία των υπολογισμών στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει θεωρηθεί σταθερός βαθμός απόδοσης σε όλα τα φορτία που παρουσιάζονται και έχει τεθεί σαν τεχνικό



ελάχιστο παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος της ΜΕΚ το 15% του peak φορτίου που εμφανίζεται [30].

Συνεπώς, υπάρχει ένα τεχνικό ελάχιστο, κάτω από το οποίο η ΜΕΚ δεν είναι δυνατό να παράγει ενέργεια και αυτό είναι το 15% του peak φορτίου μας δηλαδή 4.4229 kW_e (που αντιστοιχούν σε 10.32 kW_{th}). Όταν υπάρχει ζήτηση χαμηλότερη από αυτό το ελάχιστο, η ΜΕΚ παράγει το τεχνικό της ελάχιστο.

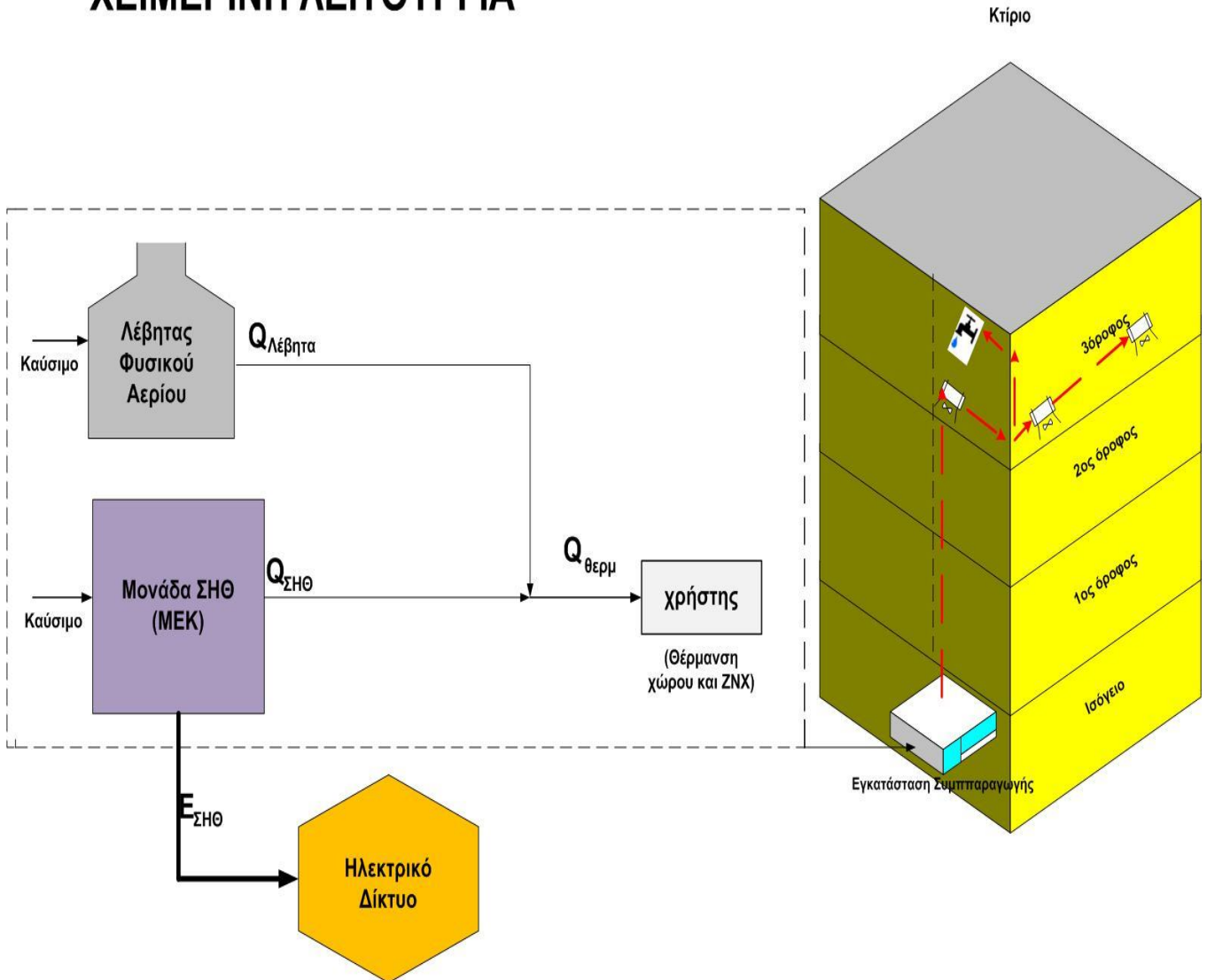
ε) Η συμπαραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια μεταβάλλεται κάθε ώρα, ώστε η θερμική ενέργεια που παράγουμε από τη ΜΕΚ να είναι ίση με το θερμικό φορτίο. Η συμπαραγόμενη αυτή ηλεκτρική ενέργεια πουλιέται κάθε στιγμή στο δίκτυο σε ειδικά διαμορφωμένη τιμή.

Στο σενάριο ΜΕΚ-ΨΠ το σύστημα αποτελείται από μία κεντρική μονάδα παραγωγής, η οποία είναι ΜΕΚ και τροφοδοτείται από ΦΑ, έναν λέβητα ΦΑ, έναν ψύκτη προσρόφησης και μία αντλία θερμότητας. Η γραφική απεικόνιση του συστήματος φαίνεται στο διάγραμμα 6 για την χειμερινή λειτουργία και στο διάγραμμα 8 για την θερινή λειτουργία.



2.3.1.1. Χειμερινή λειτουργία

ΧΕΙΜΕΡΙΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ



Διάγραμμα 6. Διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με ΜΕΚ και λέβητα αιχμής.



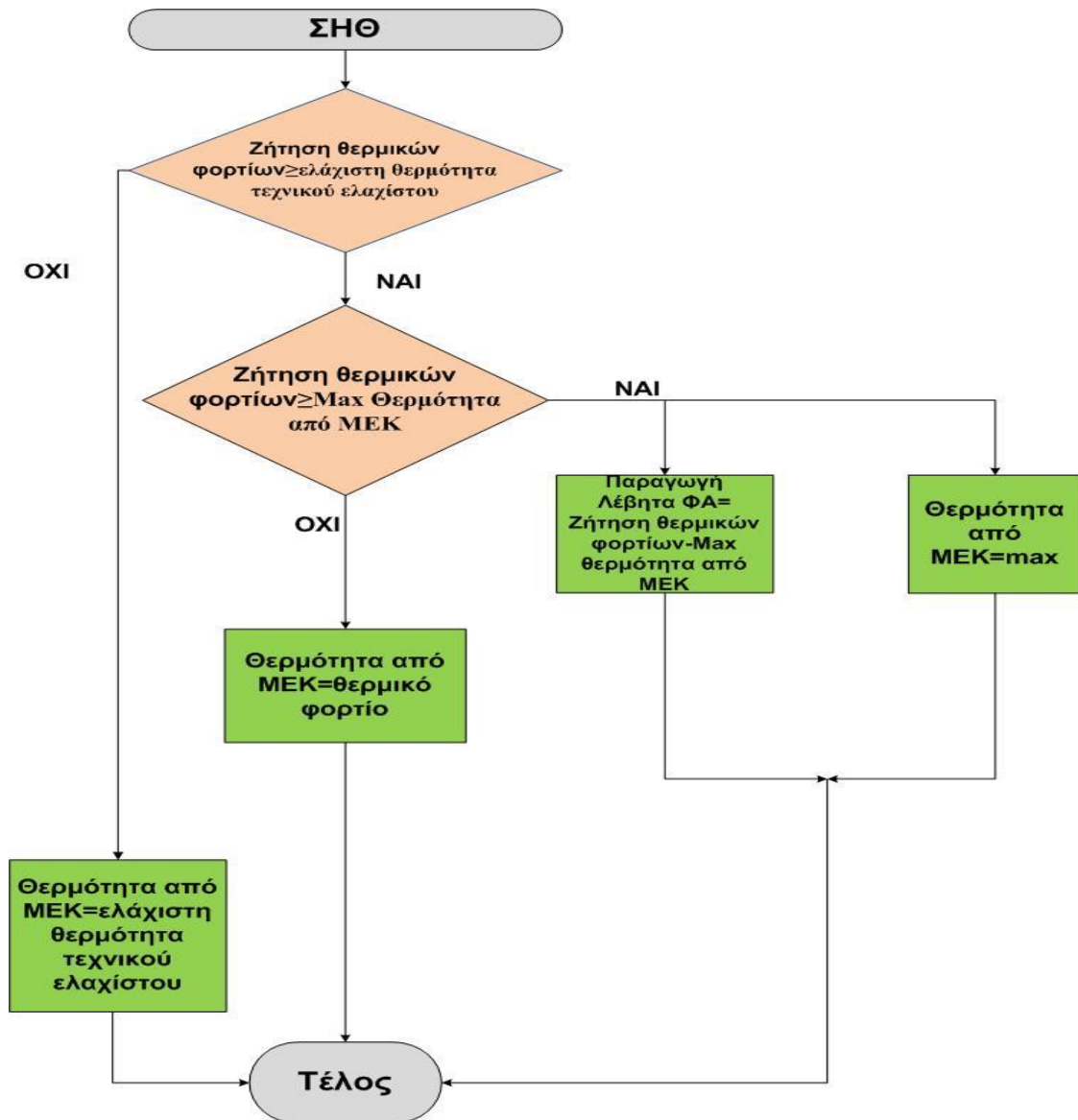
Κατά τους μήνες, που αποτελούν την εξεταζόμενη χειμερινή περίοδο και υπάρχει ζήτηση αναγκών τόσο για θέρμανση χώρου όσο και για ZNX, ενώ τα ψυκτικά φορτία είναι μηδέν, μέσω της διαστασιολόγησης της MEK, δηλαδή το ποσοστό του peak φορτίου που έχει οριστεί να καλύπτεται από την MEK, ορίζεται η παραγωγή της MEK ούτως ώστε η παραγόμενη θερμική ισχύς να είναι ίση με το θερμικό φορτίο κάθε ώρα της ημέρας και συνεπαγωγικά ορίζεται και η παραγωγή του λέβητα αιχμής, όπου αυτή χρειάζεται.

$$Q_{\text{ζητούμενο θερμικό φορτίο}} (kWth) = Q_{MEK} (kWth), \forall \text{ hour} \quad (2.1)$$

Σε κάθε ώρα του χρόνου γίνεται η εξής διερεύνηση, αν η ζήτηση των συνολικών θερμικών αναγκών του συστήματος εκείνη την ώρα είναι μικρότερη η ίση από την μέγιστη παραγωγή της MEK τότε όλο το θερμικό φορτίο το καλύπτει η MEK, αν συμβαίνει το αντίθετο τότε οι πλεονάζουσες θερμικές ανάγκες καλύπτονται από τον λέβητα του συστήματος μας. Η MEK, τις ώρες που η ζήτηση θερμικών αναγκών κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου είναι μικρότερη από το τεχνικό της ελάχιστο, παράγει σταθερά 4.4229 kW_e, η πλεονάζουσα θερμότητα απορρίπτεται στο περιβάλλον με τη μορφή καυσαερίων. Ενδιαφέρον προέκταση αυτή της εφαρμογής είναι η αποθήκευση της πλεονάζουσας αυτής θερμότητας για μελλοντική χρήση.

Τόσο η MEK όσο και ο λέβητας αιχμής τροφοδοτούνται από φυσικό αέριο. Οι τιμές υπολογίζονται και παρουσιάζονται σε επόμενη ενότητα. Η περιγραφή που μόλις διατυπώθηκε αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής, διάγραμμα 7, που περιγράφει ακριβώς την χειμερινή λειτουργία του συστήματος.

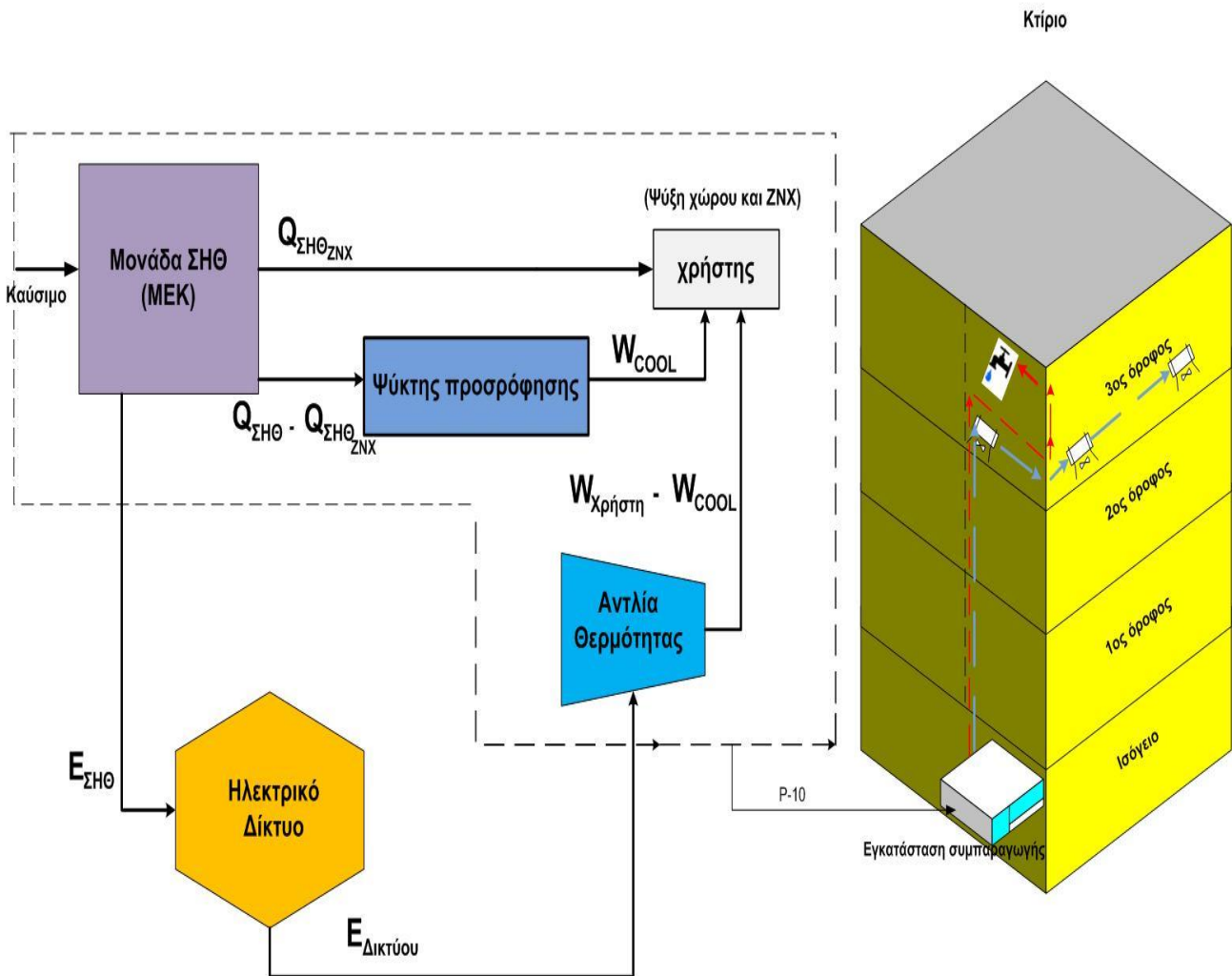
Ουσιαστικά, για την χειμερινή περίοδο παρουσιάζεται ένα υποσύστημα μικρο-συμπαραγωγής με MEK ως κεντρική μηχανή συστήματος μαζί με ένα λέβητα αιχμής που καλύπτει τις θερμικές ανάγκες των καταναλωτών όταν αδυνατεί η MEK. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται αγοράζεται κάθε στιγμή από το δίκτυο σε ειδικά διαμορφωμένη από νόμους τιμή, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.



Διάγραμμα 7. Χειμερινή λειτουργία συστήματος με MEK και λέβητα αιχμής.

2.3.1.2. Καλοκαιρινή λειτουργία

ΚΑΛΟΚΑΙΡΙΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ



Διάγραμμα 8. Διάγραμμα συστήματος τριπαραγωγής με MEK, ψύκτη προσρόφησης και Αντλία Θερμότητας.

Κατά τους μήνες, που αποτελούν την καλοκαιρινή περίοδο και υπάρχει ζήτηση φορτίων για ψύξη χώρου και ZNX, ανάλογα με τη διαστασιολόγηση της MEK (δηλαδή το ποσοστό του peak φορτίου που έχει οριστεί να καλύπτεται από την MEK) ορίζεται η παραγωγή της MEK, η παραγωγή του ψύκτη προσρόφησης και η παραγωγή της αντλίας θερμότητας. Η παραγωγή του



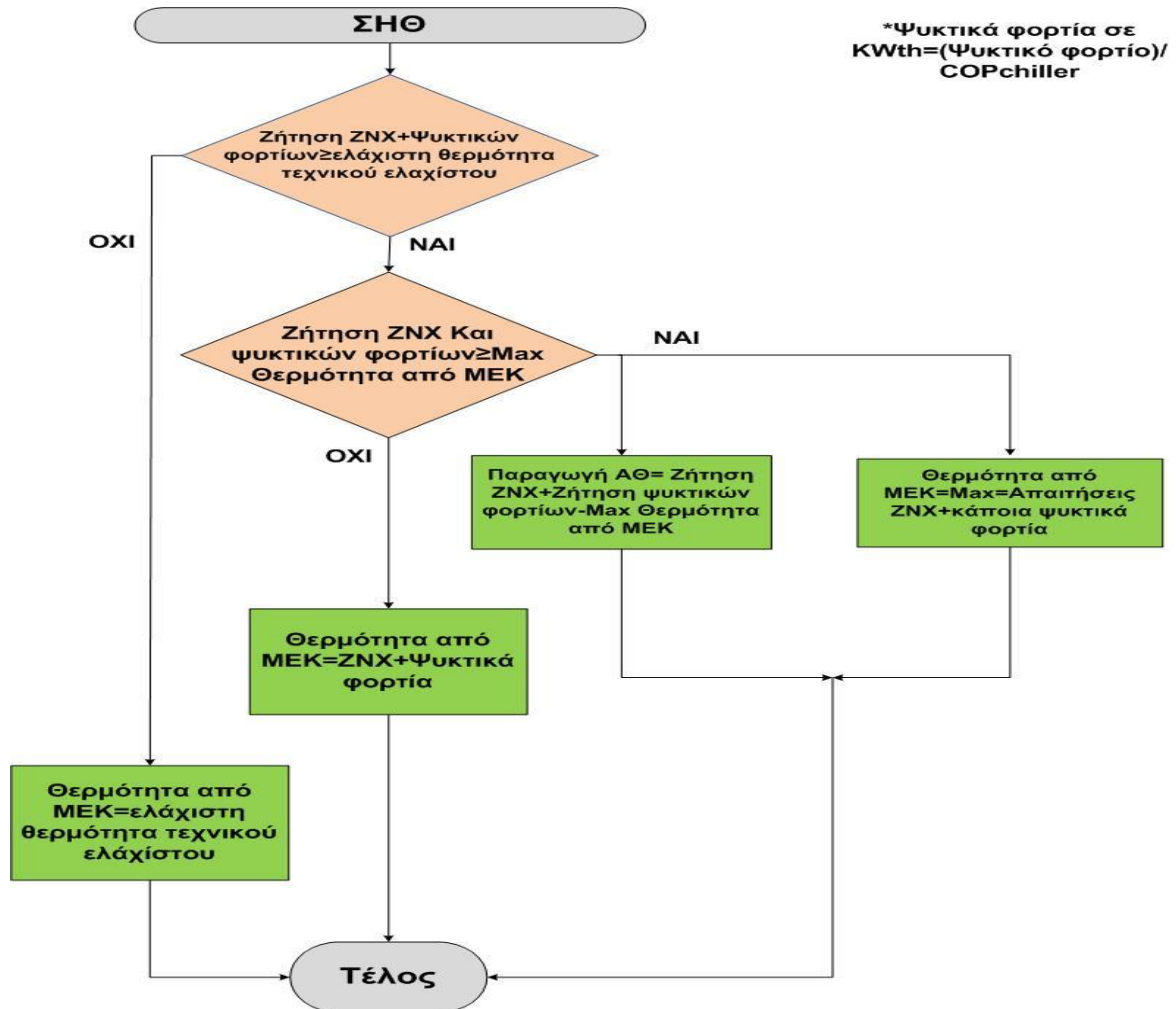
ψύκτη προσρόφησης ορίζεται μονοσήμαντα από την παραγωγή της MEK αφού την θερμότητα που λαμβάνει την μετατρέπει σε ψύξη με έναν συντελεστή απόδοσης, COP. Εδώ να σημειωθεί ότι ο COP για τον ψύκτη προσρόφησης (και απορρόφησης) είναι η ψύξη που παράγει ο ψύκτης δια τη θερμότητα που λαμβάνει.

Σε κάθε ώρα του χρόνου γίνεται η εξής διερεύνηση, αν η ζήτηση των συνολικών ψυκτικών αναγκών του συστήματος εκείνη την ώρα, εκφρασμένη σε θερμικά φορτία μέσω του COP του ψύκτη προσρόφησης, αθροιστικά μαζί με τη ζήτηση ZNX είναι μικρότερη η ίση από την μέγιστη παραγωγή της MEK τότε όλες τις ψυκτικές ανάγκες τις καλύπτει η MEK, μέσω του ψύκτη προσρόφησης, καθώς και όλες τις ανάγκες για ZNX.

$$Q_{\text{αναγκες ψυξης}} (kW_{\text{cool}}) / COP + Q_{\text{ZNX}} (kW_{\text{th}}) = Q_{\text{MEK}} (kW_{\text{th}}), \quad \forall \text{hour} \quad (2.2)$$

Αν συμβαίνει το αντίθετο τότε, η MEK καλύπτει πρωτίστως όλες τις ανάγκες για ZNX. Την υπόλοιπη διαθέσιμη θερμότητα, μέσω του ψύκτη προσρόφησης, την δίνει για να καλύψει τις ψυκτικές ανάγκες του συστήματος. Οι υπολειπόμενες ψυκτικές ανάγκες εξυπηρετούνται από αντλία θερμότητας αιχμής. Η αντλία θερμότητας τροφοδοτείται με ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο, ενώ η MEK όπως ειπώθηκε με ΦΑ, ενώ όπως και προηγουμένως η συμπαραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια πουλιέται στο δίκτυο. Η περιγραφή που μόλις διατυπώθηκε αποτυπώνεται στο παρακάτω διάγραμμα ροής, διάγραμμα 9, που περιγράφει ακριβώς την θερινή λειτουργία του συστήματος.

Ουσιαστικά, για την θερινή περίοδο παρουσιάζεται ένα υποσύστημα μικρο-τριπαραγωγής με MEK ως κεντρική μηχανή συστήματος, η οποία παράγει θέρμανση και καλύπτει τις ανάγκες για ZNX όλη την εξεταζόμενη περίοδο και θέρμανση για την τροφοδότηση ψύκτη προσρόφησης για την κάλυψη των ψυκτικών αναγκών της πολυκατοικίας. Σε συνδυασμό με τις παραπάνω τεχνολογίες λειτουργεί αντλία θερμότητας για την εξυπηρέτηση των ψυκτικών αναγκών όταν ο ψύκτης προσρόφησης (κατά συνέπεια η MEK) αδυνατεί. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται αγοράζεται κάθε στιγμή από το δίκτυο σε ειδικά διαμορφωμένη από νόμους τιμή, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.



Διάγραμμα 9. Καλοκαιρινή λειτουργία συστήματος τριπαραγωγής με MEK, ψύκτη προσρόφησης και αντλία θερμότητας.



2.4. Σύστημα οικιακής μικρο-συμπαραγωγής με αντλία θερμότητας.

Στο σενάριο MEK-AΘ το σύστημα αποτελείται από μία κεντρική μονάδα παραγωγής, η οποία είναι MEK και τροφοδοτείται από ΦΑ, έναν λέβητα ΦΑ και μία αντλία θερμότητας.

2.4.1. Στρατηγική λειτουργίας και περιγραφή συνολικού συστήματος.

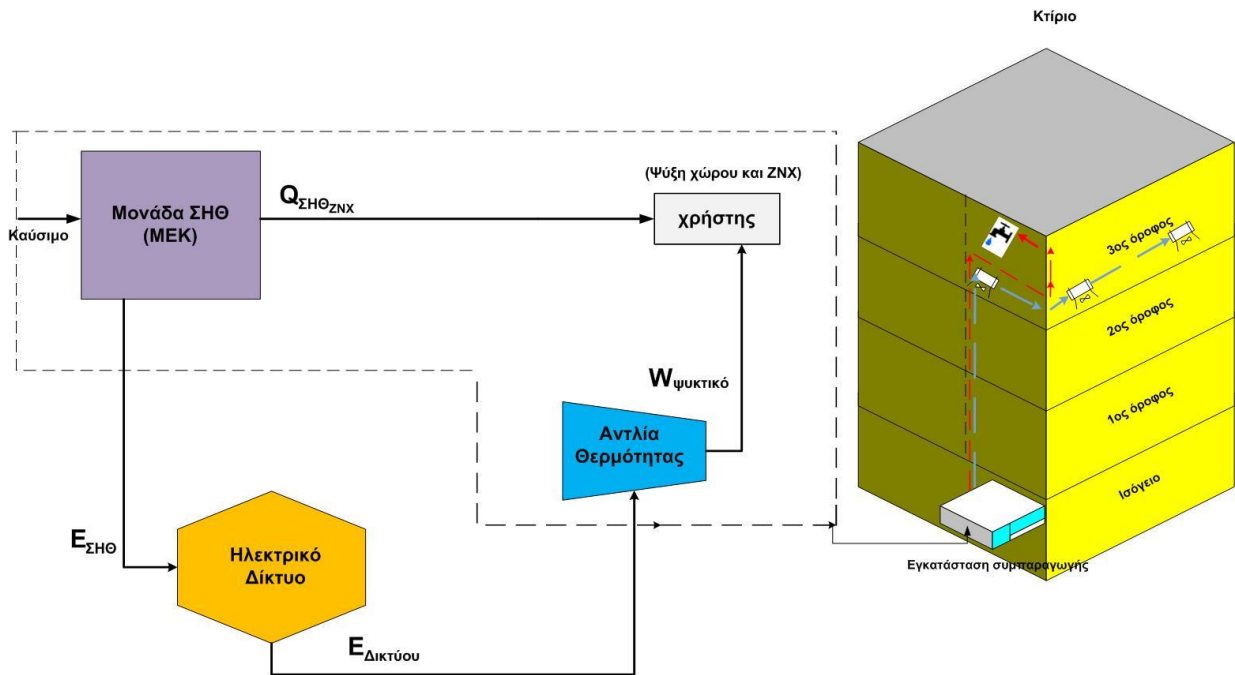
2.4.1.1. Χειμερινή περίοδος

Κατά την χειμερινή περίοδο η λειτουργία του συστήματος είναι ακριβώς η ίδια με αυτή του σεναρίου MEK-ΨΠ, αποτελείται δηλαδή από την MEK και τον λέβητα αιχμής, και περιγράφεται αναλυτικά στο διάγραμμα 6 και στο διάγραμμα ροής, διάγραμμα 7.

2.4.1.2. Θερινή περίοδος

Η θερινή λειτουργία αυτού του σεναρίου αποτυπώνεται στο διάγραμμα 10. Η MEK θα καλύπτει κάθε στιγμή τις ανάγκες για ZNX το καλοκαίρι, ενώ οι ψυκτικές ανάγκες των χώρων θα καλύπτονται κάθε στιγμή από την αντλία θερμότητας, η οποία θα τροφοδοτείται από το δίκτυο. Ουσιαστικά στο σενάριο MEK-AΘ και στις δύο περιόδους λειτουργίας παρουσιάζεται ένα σύστημα οικιακής μικρο-συμπαραγωγής. Το χειμώνα καλύπτει τις θερμικές ανάγκες της πολυκατοικίας, ενώ όταν αδυνατεί λειτουργεί ο λέβητας ΦΑ και το καλοκαίρι καλύπτει όλες τις ανάγκες για ZNX. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται αγοράζεται κάθε στιγμή από το δίκτυο σε ειδικά διαμορφωμένη από νόμους τιμή, όπως θα αναλυθεί παρακάτω.

ΚΑΛΟΚΑΙΡΙΝΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ



Διάγραμμα 10. Διάγραμμα συστήματος συμπαραγωγής με MEK και αντλία θερμότητας.

2.5. Σύστημα οικιακής μικρο-τριπαραγωγής με ψύκτη απορρόφησης

Στο σενάριο MEK-ΨΑ το σύστημα αποτελείται από μία κεντρική μονάδα παραγωγής, η οποία είναι MEK και τροφοδοτείται από ΦΑ, έναν λέβητα ΦΑ, έναν ψύκτη απορρόφησης και μία αντλία θερμότητας.

2.5.1. Στρατηγική λειτουργίας και περιγραφή συνολικού συστήματος.

Είναι το ίδιο σενάριο ακριβώς με το σενάριο MEK-ΨΠ, μόνο που στη θέση του ψύκτη προσρόφησης χρησιμοποιείται ψύκτης απορρόφησης. Κατά συνέπεια, η γραφική απεικόνιση του συστήματος φαίνεται στο διάγραμμα 6 και περιγράφεται στο διάγραμμα ροής, διάγραμμα 7, για την χειμερινή λειτουργία, ενώ για την θερινή λειτουργία η απεικόνιση της διάγραμμα 8 και το διάγραμμα ροής της, διάγραμμα 9, αποτυπώνουν πλήρως την λειτουργία του συστήματος.





3. Οικονομική αξιολόγηση 3 σεναρίων οικιακής συμπαραγωγής

Σε αυτό το κεφάλαιο διεξάγεται οικονομική αξιολόγηση των τριών σεναρίων, που αναλύθηκαν προηγουμένως, με σκοπό τη διαπίστωση της οικονομικής τους βιωσιμότητάς ή όχι. Η περίοδος απόσβεσης της επένδυσης παίζει πολύ σημαντικό ρόλο στην οικονομικότητα της, ενώ εξετάζονται και εκτιμώνται οι παράγοντες που την επηρεάζουν περισσότερο. Η σύγκριση γίνεται με το συμβατικό σενάριο θέρμανσης ψύξης, στο οποίο τον χειμώνα η θέρμανση χώρου και το ZNX προέρχεται από λέβητα ΦΑ, ενώ το καλοκαίρι το ZNX προέρχεται από τον λέβητα ΦΑ και οι ανάγκες για ψύξη χώρου από αντλία θερμότητας.

Σύμφωνα με τα ενεργειακά δεδομένα της πολυκατοικίας έχουμε συνολικές θερμικές ανάγκες το χειμώνα 192746.9 kWh_{th}. Από αυτές, όπως αναφέρθηκε και πιο πάνω, 179044.1 kWh_{th} είναι ανάγκες για θέρμανση χώρου και οι υπόλοιπες 13702.78 kWh_{th} για ZNX. Το μέγιστο ωριαίο θερμικό φορτίο που εμφανίζεται την χειμερινή περίοδο και αποτελεί το peak όλου του έτους και με αυτό διαστασιολογείται η MEK του συστήματος είναι 68.8 kW_{th} και εμφανίζεται τον Φεβρουάριο στις 6:00-7:00. Οι ανάγκες ψύξης το καλοκαίρι είναι 17298.15 kWh_{cool}, με το μέγιστο ωριαίο ψυκτικό φορτίο που παρουσιάζεται να είναι 18.67 kW_{cool} τον Ιούλιο στις 15:00-16:00, και βάση αυτού να διαστασιολογείται η ΑΘ στο συμβατικό σενάριο θέρμανσης ψύξης, και θα κοστολογηθούν τα κόστη επένδυσης των ψυκτών προσρόφησης και απορρόφησης. Τέλος, οι ανάγκες για ZNX το καλοκαίρι 7522.62 kWh_{th}. Τα στοιχεία αυτά συγκεντρώνεται στον πίνακα 4.

Πίνακας 4. Ετήσια ενεργειακά δεδομένα πολυκατοικίας

<u>Χειμώνας:</u>	Θέρμανση χώρων: 179044.1 kWh _{th}
(max: 68.8 kW _{th})	ZNX: 13702.78 kWh _{th}
<u>Καλοκαίρι:</u>	Ψύξη χώρων: 17298.15 kWh _{cool}
(max: 18.67 kW _{cool})	ZNX: 7522.62 kWh _{th}



3.1. Παραδοχές και οικονομική ανάλυση σεναρίων

3.1.1. Οικονομικοί δείκτες

Για την οικονομική αξιολόγηση του συστήματος χρησιμοποιήθηκαν οι δείκτες Καθαράς Παρούσας Αξίας, Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης και Έντοκης Περιόδου Αποπληρωμής, όπως αυτοί αναλύονται παρακάτω:

Καθαρά Παρούσα Αξία (ΚΠΑ) επένδυσης (Net Present Value, NPV):

Καθαρά παρούσα αξία μιας επένδυσης είναι το συνολικό καθαρό όφελος που προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ του λειτουργικού οφέλους και του συνόλου των δαπανών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της επένδυσης. Όλα τα ποσά είναι εκφρασμένα σε παρούσα αξία, ανηγμένη στην αρχή του πρώτου έτους λειτουργίας του συστήματος. Η NPV προσδιορίζεται από την σχέση:

$$ΚΠΑ = -C_{επένδυσης} + \sum_{i=1}^N \frac{R_{tot}}{(1+d)^i} + \frac{SV_N}{(1+d)^N} \quad (3.1)$$

Όπου N ο οικονομικός κύκλος ζωής της επένδυσης, εδώ και στα επόμενα δύο σεναρία ίσος με 20 χρόνια. SV_N η υπολειμματική αξία της επένδυσης στο τέλος του οικονομικού κύκλου της επένδυσης, εδώ θεωρείται μηδενική μετά τα 20 έτη. Τέλος, d είναι το επιτόκιο αναγωγής σε παρούσα αξία (επιθυμητή απόδοση κεφαλαίου), εδώ λαμβάνεται ίσο με 5%.

- Όταν η ΚΠΑ > 0 η επένδυση είναι βιώσιμη,
- Όταν ΚΠΑ = 0 η επένδυση είναι βιώσιμη με μέσο ετήσιο βαθμό απόδοσης ίσο με d,
- Όταν ΚΠΑ < 0 η επένδυση είναι αντισυμβαλλόμενη.



Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (EBA) (Internal Rate of Return, IRR):

Είναι η τιμή του επιτοκίου αναγωγής, η οποία μηδενίζει την ΚΠΑ και προσδιορίζεται από την εξίσωση (λύση ως προς d):

$$NPV(d = IRR) = 0 \quad (3.2)$$

Έντοκη περίοδος αποπληρωμής (EΠΑ) (Discounted Payback Period, DPB):

Είναι το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την αποπληρωμή της αρχικής επένδυσης καθώς και των τόκων που θα μπορούσαν να ληφθούν από μία εναλλακτική τοποθέτηση του αρχικού κεφαλαίου. Προσδιορίζεται από την εξίσωση (λύση ως προς N):

$$NPV(N = DPB) = 0 \quad (3.3)$$

Εάν η υπολειμματική αξία της επένδυσης μετά τα N έτη είναι μηδενική και το ετήσιο λειτουργικό όφελος R_{tot} θεωρηθεί σταθερό (σε σταθερές τιμές), τότε η DPB υπολογίζεται από τη σχέση:

$$DPB = \frac{\ln\left(\frac{1}{1 - \frac{R_{tot} * d}{C_{επένδυσης}}}\right)}{\ln(1 + d)} \quad (3.4)$$

3.1.2. Παραδοχές

Κατά τη μελέτη τις κάλυψης των ενεργειακών αναγκών του προς μελέτη οικιστικού συγκροτήματος, στα 3 σεναρία που αναλύθηκαν παραπάνω, συμπαραγωγής και τριπαραγωγής πολύ μικρής κλίμακας έγιναν παραδοχές, όπως αυτές παρουσιάζονται στον επόμενο πίνακα 5:



Πίνακας 5. Γενικές παραδοχές σεναρίων.

Τεχνικές παραδοχές	
BA λέβητα ΦΑ, $n_{λεβ}$ [31]	0.87
Ηλεκτρικός BA ΜΕΚ, $n_{e_{ΜΕΚ}}$	0.3
Θερμικός BA ΜΕΚ, $n_{th_{ΜΕΚ}}$	0.7
Τεχνικό ελάχιστο της ΜΕΚ (kW_e)	4.42
Θερμότητα που αντιστοιχεί στο τεχνικό ελάχιστο της ΜΕΚ (kW_{th})	10.32
COP αντλία θερμότητας, $COP_{Aθ}$ [31]	3
COP ψύκτη απορρόφησης [8]	0.9
COP ψύκτη προσρόφησης [8]	0.7
Οικονομικές παραδοχές	
Τιμή αγοράς ΦΑ, $Price_{ΦΑ}$, (€/kWh _{thAΘΔ}) [32]	0.05
Τιμή αγοράς ΗΕ από το δίκτυο, $Price_{HE}$, (€/kWh _e) [33]	0.17
Τιμή πώλησης ΗΕ στο δίκτυο, $Price_{πώλησης ΗΕ}$ (€/kWh _e)	0.095
Επιτόκιο αναγωγής, i (%)	5
Διάρκειας επένδυσης, N (έτη)	20

Η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες ΣΗΘΥΑ μικρότερες του 1 MW που χρησιμοποιούν τεχνολογίες εκτός του συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου με ανάκτηση θερμότητας και ατμοστρόβιλου συμπύκνωσης-απομάστευσης (σύμφωνα με τον νόμο υπ' αριθμόν 4414, 9/8/2016 [34]) διαμορφώνεται ως εξής:

$$92+ΠΤ \text{ (€/MWh)} \quad (3.5)$$

Όπου ΠΤ ορίζεται η προσαρμογή της τιμής του ΦΑ, οριζόμενη από τον τύπο:

$$ΠΤ = (MTΦA_t - 26) * \frac{1 - \frac{n - n_e}{n_{hr}}}{n_e} \quad (3.6)$$

Όπου n_e : ο ηλεκτρικός BA της μονάδας συμπαραγωγής, n_{hr} : η τιμή αναφοράς του BA για την χωριστή παραγωγή θερμικής ενέργειας, n : ο ολικός BA της μονάδας συμπαραγωγής



και ΜΤΦΑ_ι: η ανά μήνα μέση μοναδιαία μικτή τιμή του ΦΑ σε euro/MWh (ΜΤΦΑ_μ ή ΜΤΦΑ_η), ανώτερης θερμογόνου δύναμης, η οποία περιλαμβάνει την τιμή πώλησης με το κόστος μεταφοράς, τον ειδικό φόρο κατανάλωσης και τυχόν φόρους και τέλη που σύμφωνα με την εκάστοτε νομοθεσία εφαρμόζονται, εξαιρουμένου του ΦΠΑ, στην οποία προστίθεται και το μέσο κόστος CO₂, που αντιστοιχεί στην παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

ΜΤΦΑ_μ: Η ανά μήνα μέση μοναδιαία τιμή πώλησης ΦΑ για συμπαραγωγή σε euro/MWh, ανώτερης θερμογόνου δύναμης, στους χρήστες ΦΑ στην Ελλάδα, εξαιρουμένων των πελατών ηλεκτροπαραγωγής. ΜΤΦΑ_η: για πελάτες ηλεκτροπαραγωγής.

Αρμόδια για τον υπολογισμό ΜΤΦΑ_μ και ΜΤΦΑ_η και την κοινοποίηση τους ανά μήνα στη ΛΑΓΗΕ είναι η διεύθυνση Υδρογονανθράκων του Υπουργείου Περιβάλλοντος και Ενέργειας (Υ.Π.ΕΝ) [35].

Το μέσο κόστος CO₂, που λαμβάνεται υπόψιν στην ΠΤ είναι:

$$\text{Μέσο κόστος } CO_2 \left(\frac{\text{€}}{MWh} \right) = 0,37 * MT_{\text{ΔΙΚΑΙΩΜΑΤΩΝ } CO_2} \left(\frac{\text{€}}{tn} \right) * n_e \quad (3.7)$$

Η μέση τιμή δικαιωμάτων CO₂ προκύπτει από τα στοιχεία του EEX (energy exchange) υπολογίζεται με μέριμνα της διεύθυνσης κλιματικής αλλαγής και ποιότητας της ατμόσφαιρας του Υ.Π.ΕΝ και κοινοποιείται ανά μήνα στο ΛΑΓΗΕ [35].

Θεωρούνται τυπικοί ΒΑ $n=67\%$, $n_e=33\%$ και $n_{hr}=81\%$ [34] και υπολογίζονται οι μέσοι όροι [35]:

$$MT_{\text{ΦΑ}_\mu} = 27.61 \text{ €/MWh}$$

$$M.T. CO_2 = 5.09 \text{ €/tn} \rightarrow \text{Μέσο κόστος } CO_2 = 0.37 * 5.09 * 0.33 = 0.621489 \frac{\text{€}}{MWh}$$

$$\text{Άρα } PT = (27.61 + 0.621489 - 26) * \frac{1 - \frac{0.67 - 0.33}{0.81}}{0.33} = 3.92$$

$$\text{Άρα Τιμή πώλησης ΗΕ στο δίκτυο} = 92 + 3.92 = 95.92 \frac{\text{€}}{MWh} \text{ ή } 0.09592 \frac{\text{€}}{kWh}$$



3.1.3. Συμβατικό σενάριο θέρμανσης ψύξης

Ο λέβητας ΦΑ, η αντλία θερμότητας και οι τερματικές μονάδες απόδοσης θερμότητας/ψύξης, που όπως έχει προαναφερθεί είναι στοιχεία ανεμιστήρα (fan coils), είναι προεγκατεστημένα στο συμβατικό σενάριο θέρμανσης ψύξης.

Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει το κόστος καυσίμου (φυσικού αερίου) για τον λέβητα, και το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Όλη η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται αγοράζεται από το δίκτυο. Για τον λέβητα ΦΑ ένα ενδεικτικό κόστος συντήρησης λαμβάνεται ίσο με 60 €/έτος [31], ενώ για την αντλία θερμότητας οι κατασκευαστές δίνουν μηδενικό κόστος συντήρησης.

$$\text{Λειτουργ. κόστος συμβ. περίπτωσης} = C_{th_{conv}} + C_{e_{conv}} + C_{maint_{conv}} \quad (3.8)$$

Όπου $C_{th_{conv}}$ το κόστος αγοράς καυσίμου για την παραγωγή θέρμανσης με τον συμβατικό τρόπο, $C_{e_{conv}}$ το κόστος αγοράς ΗΕ για την παραγωγή ψύξης με τον συμβατικό τρόπο, και $C_{maint_{conv}}$ το κόστος συντήρησης του συμβατικού συστήματος θέρμανσης/ ψύξης. Πιο συγκεκριμένα

$$C_{th_{conv}} = \frac{Q_{th}}{n_{\lambda\epsilon\beta}} * 1.1 * Price_{\Phi A} \quad (3.9)$$

$$C_{e_{conv}} = \frac{W_{cool}}{COP_{A\theta}} * Price_{HE} \quad (3.10)$$

3.1.4. Σενάριο 1 (Τριπαραγωγή με ΜΕΚ και ψύκτη προσρόφησης)

3.1.4.1. Κόστος επένδυσης σεναρίου 1

Το κόστος επένδυσης της εγκατάστασης αποτελείται από τα κόστη των συνιστωσών του συστήματος που αποτελεί το πρώτο σενάριο. Για την ακρίβεια το κόστος της ΜΕΚ, του ψύκτη προσρόφησης, του recoler [27] και της νέας αντλίας θερμότητας αιχμής, εάν είναι αναγκαία η εγκατάσταση της. Από αυτό το κόστος επένδυσης θα αφαιρεθεί το κόστος εγκατάστασης της προηγούμενης αντλίας θερμότητας που κάλυπτε όλο το ψυκτικό φορτίο του καλοκαιριού.

Το κόστος μιας μονάδας συμπαραγωγής εξαρτάται από την ονομαστική ηλεκτρική ισχύς της και τον τύπο του καυσίμου που χρησιμοποιεί. Συγκεκριμένα το κόστος περιλαμβάνει τον κινητήρα



και την γεννήτρια με όλο τον απαραίτητο εξοπλισμού ασφάλειας και ελέγχου. Περιλαμβάνει επίσης το κόστος εναλλάκτη θερμότητας νερού και αερίων εξάτμισης, τον καταλύτη και την αντλία ψύξης. Το κόστος μονάδας συμπαραγωγής με καύσιμο το ΦΑ συμπεριλαμβανομένης και της τεχνολογίας συμπύκνωσης για μεγιστοποίηση της ενεργειακής απόδοσης για μονάδες ισχύς μικρότερες από 120 kW_e δίνεται από τον τύπο [24]:

$$K_c = 3976.1 * P_{\Sigma H\theta_e}^{-0,2497} + 185.53 * P_{\Sigma H\theta_e}^{-0,238} \quad (3.11)$$

Ο τύπος αυτός προσδιορίζει το αρχικό κόστος μονάδας ΣΗΘ με καύσιμο το ΦΑ ανά κιλοβάτ εγκατεστημένης ηλεκτρικής ισχύος σε σχέση με την ηλεκτρική ισχύς του συστήματος ΣΗΘ, $P_{\Sigma H\theta_e}$, (δηλαδή το αποτέλεσμα είναι σε €/kW_e).

3.1.4.2. Ετήσιο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης σεναρίου 1

Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει το κόστος καυσίμου (φυσικού αερίου) για την ΜΕΚ, $C_{th_{MEK}}$, και τον λέβητα, $C_{th_{\lambda EB}}$, και το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας, $C_{e_{\Sigma H\theta}}$. Όλη η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται αγοράζεται από το δίκτυο.

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης της ΜΕΚ δίνεται από την σχέση [24]:

$$K_{Cfunction} = 2.3133 * P_{\Sigma H\theta_e}^{-0.141} \quad (3.12)$$

Το κόστος λειτουργίας και συντήρησης για τον ψύκτη προσρόφησης θεωρείται μηδενικό σύμφωνα με τον κατασκευαστή, ωστόσο για όλο το σύστημα μαζί με της αντλίες λαμβάνεται ίσο με το 0.05% του κόστους επένδυσης [27].

$$C_{th_{MEK}} = \text{Κόστος καυσίμου ΜΕΚ} = \frac{Q_{th_{MEK}}}{n_{th_{MEK}}} * 1.1 * Price_{\Phi A} \quad (3.13)$$

$$C_{th_{\lambda EB}} = \text{Κόστος καυσίμου Λέβητα} = \frac{Q_{th_{\lambda EB}}}{n_{th_{\lambda EB}}} * 1.1 * Price_{\Phi A} \quad (3.14)$$



$$C_{th_{\Sigma H\Theta}} = C_{th_{MEK}} + C_{th_{\Lambda EB}} \quad (3.15)$$

Όπου $C_{th_{\Sigma H\Theta}}$ το συνολικό κόστος καυσίμου για παραγωγή θέρμανσης και ΖΝΧ από το σύστημα τριπαραγωγής.

$$C_{e_{\Sigma H\Theta}} = \text{Κόστος αντλίας θερμότητας} = \frac{W_{cool}}{COP_{A\Theta}} * Price_{HE} \quad (3.16)$$

$$C_{maint_{\Sigma H\Theta}} = \text{Λειτουργικά κόστη συντήρησης} \quad (3.17)$$

$$= \text{κόστος συντήρησης}_{MEK} + \text{κόστος συντήρησης}_{\psiυκτ\eta} + \text{κόστος συντήρησης}_{\lambda\acute{\epsilon}\beta\eta\tau\alpha}$$

3.1.4.3. Ετήσιο λειτουργικό όφελος σεναρίου 1

Το ετήσιο λειτουργικό όφελος είναι η διαφορά μεταξύ της ετήσιας αξίας της ηλεκτρικής ενέργειας και θερμικής ενέργειας που καταναλώνεται σε σχέση με την αντίστοιχη του συμβατικού σεναρίου θέρμανσης ψύξης και του κόστους λειτουργίας και συντήρησης του, καθώς επίσης και τα έσοδα λειτουργίας του συστήματος.

$$\text{Ετήσιο λειτουργικό όφελος} = \quad (3.18)$$

$$(C_{th_{conv}} - C_{th_{\Sigma H\Theta}}) + (C_{e_{conv}} - C_{e_{\Sigma H\Theta}}) + (C_{maint_{conv}} - C_{maint_{\Sigma H\Theta}}) + R_e$$

Τα λειτουργικά έσοδα του συστήματος R_e αποτελούν σημαντικό κομμάτι στη βιωσιμότητά της επένδυσης και προέρχονται από την πώληση της συμπαραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο σε τιμή, που υπολογίστηκε πιο προηγουμένως ίση με 0.09592 €/kWh.

$$R_e = \text{Έσοδα από πώληση HE στο δίκτυο} = \frac{Q_{th_{MEK}}}{n_{th_{MEK}}} * n_{e_{MEK}} * Price_{\text{πώλησης HE}} \quad (3.19)$$

Η αξία της παραγόμενης θερμικής ενέργειας είναι το ετήσιο κόστος που αποφεύγεται για παραγωγή θέρμανσης μόνο από λέβητα φυσικού αερίου, και αντίστοιχα η αξία της παραγόμενης ψυκτικής ενέργειας είναι το ετήσιο κόστος που αποφεύγεται για παραγωγή ψύξης μόνο από αντλία θερμότητας.



3.1.5. Σενάριο 2 (Συμπαραγωγή με MEK και χρήση ΑΘ)

3.1.5.1. Κόστος επένδυσης σεναρίου 2

Το κόστος επένδυσης του συστήματος σε αυτό το σενάριο αποτελείται μόνο από το κόστος εγκατάστασης της MEK, το οποίο υπολογίζεται από την σχέση (3.11). Το κόστος της αντλίας θερμότητας είναι το ίδιο ακριβώς με την συμβατική περίπτωση οπότε δεν υπολογίζεται καθόλου στο κόστος επένδυσης.

3.1.5.2. Ετήσιο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης σεναρίου 2

Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει το κόστος καυσίμου (φυσικού αερίου) για την MEK και τον λέβητα, και το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας. Όλη η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται αγοράζεται από το δίκτυο.

Οι υπολογισμοί για τα κόστη καυσίμου της MEK και του λέβητα ΦΑ, καθώς επίσης και για την αγορά ΗΕ από το δίκτυο δίνονται από τους τύπους (3.13), (3.14) και (3.16) αντίστοιχα. Τα κόστη συντήρησης του σεναρίου αυτού δίνονται από την σχέση (3.17) χωρίς να συμπεριληφθεί υπόψιν το κόστος συντήρησης του ψύκτη προσρόφησης.

3.1.5.3. Ετήσιο λειτουργικό όφελος σεναρίου 2

Ισχύει ότι και στο σενάριο 1, επομένως χρησιμοποιούνται οι τύποι (3.18) και (3.19).

3.1.6. Σενάριο 3 (Τριπαραγωγή με MEK και ψύκτη απορρόφησης)

3.1.6.1. Κόστος επένδυσης σεναρίου 3

Το κόστος επένδυσης του συστήματος αποτελείται από το κόστος της MEK, που υπολογίζεται από τον τύπο (3.11), το κόστος ενός ψύκτη απορρόφησης μονής βαθμίδας LiBr-H₂O που δίνεται από τον τύπο [24], και το κόστος της νέας αντλίας θερμότητας μείον το κόστος της αντλίας θερμότητας στην συμβατική περίπτωση θέρμανσης ψύξης.

$$K_{C_{absorption}} = 14740.2095 * Q_{cool}^{-0.6849} + 3.29 \quad (3.20)$$



3.1.6.2. Ετήσιο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης σεναρίου 3

Το λειτουργικό κόστος περιλαμβάνει το κόστος καυσίμου (φυσικού αερίου) για την ΜΕΚ και τον λέβητα, και το κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας για τη λειτουργία της αντλίας θερμότητας, όποτε αυτό είναι απαραίτητο. Όλη η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται αγοράζεται από το δίκτυο.

Οι υπολογισμοί για το κόστος καυσίμου της ΜΕΚ, του λέβητα, της αγοράς ΗΕ ενέργειας και συντήρησης και λειτουργίας είναι οι ίδιοι που αναφέρθηκαν στα δύο προηγούμενα σενάρια και περιγράφονται από τις σχέσεις (3.13)-(3.17).

3.1.6.3. Ετήσιο λειτουργικό όφελος σεναρίου 3

Ισχύει ότι και στο σενάριο 1 και 2, επομένως χρησιμοποιούνται οι τύποι (3.18) και (3.19).

3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Μια βασική μεταβλητή του συστήματος είναι το ποσοστό κάλυψης του μέγιστου θερμικού φορτίου, διότι είναι άμεσα συνδεδεμένο με τη διαστασιολόγηση της ΜΕΚ. Το ποσοστό κάλυψης του μέγιστου θερμικού φορτίου είναι μια πάρα πολύ σημαντική μεταβλητή διότι επηρεάζει τόσο το κόστος επένδυσης του συστήματος όσο και την θερμότητα, την ψύξη και τον ηλεκτρισμό που αυτό παράγει, για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να μελετηθεί ως μία ανεξάρτητη μεταβλητή.

Σε αυτήν την ενότητα θα παρουσιαστούν τα ακριβή οικονομικά αποτελέσματα για την βασική περίπτωση (base case), που ορίζεται να είναι όταν η ΜΕΚ καλύπτει το 60% του peak θερμικού φορτίου και για τα 3 εξεταζόμενα σενάρια. Δηλαδή η ΜΕΚ έχει σαν μέγιστη δυνατή παραγωγή $0.6 \cdot 68.8 = 41.28 \text{ kW}_{th}$, βάση του οποίου θα γίνει η παρακάτω οικονομική ανάλυση και αξιολόγηση. Να αναφερθεί σε αυτό το σημείο ότι, η διαστασιολόγηση της ΜΕΚ καθορίζει τη διαστασιολόγηση του λέβητα καθώς και των ψυκτών.

3.2.1. Οικονομικά αποτελέσματα συμβατικού σεναρίου θέρμανσης ψύξης

Μία ενδεικτική τιμή ενός συνήθη λέβητα ΦΑ μαζί με την εγκατάσταση λαμβάνεται ενδεικτικά ίσο με 3600 € σύμφωνα με έρευνα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου [31]. Για διευκόλυνση των υπολογισμών, και λόγω ελάχιστης επιρροής στο τελικό αποτέλεσμα, η τιμή του συνήθη



λέβητα ΦΑ θεωρείται ίδια μεταξύ του συμβατικού σεναρίου θέρμανσης ψύξης και των εξεταζόμενων σεναρίων και αμετάβλητη ως προς την θερμική παραγωγή του. Μία ενδεικτική τιμή μιας αντλίας θερμότητας εκτιμάται γύρω στα 500 €/kW_{cool} [27]. Τέλος τα fan coils είναι εγκατεστημένα και στις δύο περιπτώσεις (συμβατική περίπτωση και κάποιο εξεταζόμενο σενάριο) οπότε δεν λαμβάνονται υπόψιν στην οικονομική ανάλυση που ακολουθεί.

Βάση αυτών υπολογίζεται το λειτουργικό κόστος συμβατικής περίπτωσης. Το κόστος εγκατάστασης της αντλίας θερμότητας στην συμβατική περίπτωση θέρμανσης ψύξης είναι $500 * W_{cool_{MAX}} = 500 * 18.86 = 9335€$.

Το λειτουργικό κόστος και το κόστος συντήρησης της συμβατικής περίπτωσης ψύξης θέρμανσης υπολογίζεται από την σχέση (3.8) και είναι ίσο με 14723.57 €.

3.2.2. Οικονομικά αποτελέσματα σεναρίου 1 (τριπαραγωγή με MEK και ψύκτη προσρόφησης)

Σε αυτήν την περίπτωση η MEK παράγει το χειμώνα 162541.6 kWh_{th}, ενώ ο λέβητας ΦΑ 33822.42 kWh_{th}. Το καλοκαίρι η MEK παράγει 39133.65 kWh_{th} και καλύπτει τις ανάγκες για ZNX και ψύξης χώρων, πίνακας 6. Τις ανάγκες για ψύξη χώρων τις καλύπτει μέσω του ψύκτη προσρόφησης βαθμού απόδοσης COP 0.7, ο ψύκτης προσρόφησης ικανοποιεί μέγιστο ψυκτικό φορτίο σε αυτή την περίπτωση 18.67 kW_{cool}. Η αντλία θερμότητας σε αυτήν την περίπτωση διαστασιολόγησης δεν λειτουργεί καθόλου αφού υπερκαλύπτονται τα ψυκτικά φορτία το καλοκαίρι από τον ψύκτη προσρόφησης και δε χρειάζεται η εγκατάσταση της αντλίας θερμότητας.

Πίνακας 6. Παραγωγές σεναρίου MEK-ΨΠ για την base case περίπτωση.

Χειμώνας	MEK: 162541.6 kWh _{th}
	Λεβ. ΦΑ: 33822.42 kWh _{th}
Καλοκαίρι	MEK: 39133.65 kWh _{th}
	ΑΘ: 0 kWh _{cool}

3.2.2.1. Οικονομικά αποτελέσματα κόστους επένδυσης σεναρίου 1

Το κόστος ψυκτών προσρόφησης με εργαζόμενο ζεύγος νερό-πήκτωμα πυριτίου ενδεικτικά λαμβάνεται ίσο με 600 €/kW_{cool} [27]. Ενώ, το κόστος του recoler θεωρείται σταθερό με επικρατέστερη τιμή αυτή των 3000 € για ονομαστική ισχύ 29 kW_{th} [27].



Το κόστος επένδυσης αυτού του σεναρίου για ΜΕΚ διαστασιοποιημένη στο 60% του μέγιστου φορτίου αποτυπώνεται στον παρακάτω πίνακα 7:

Πίνακας 7. Κόστος επένδυσης συστήματος με ΜΕΚ και ψύκτη προσρόφησης.

Μονάδα	Τιμή/μονάδα	Τιμή (€)
ΜΕΚ	Τύπος (3.11)	35985
Ψύκτης Προσρόφησης	600 €/kWc	11202
Recooler		3000
ΑΘ	500 €/kWc	0
Συνολικό κόστος επένδυσης		50186.98799-9335=40852 €

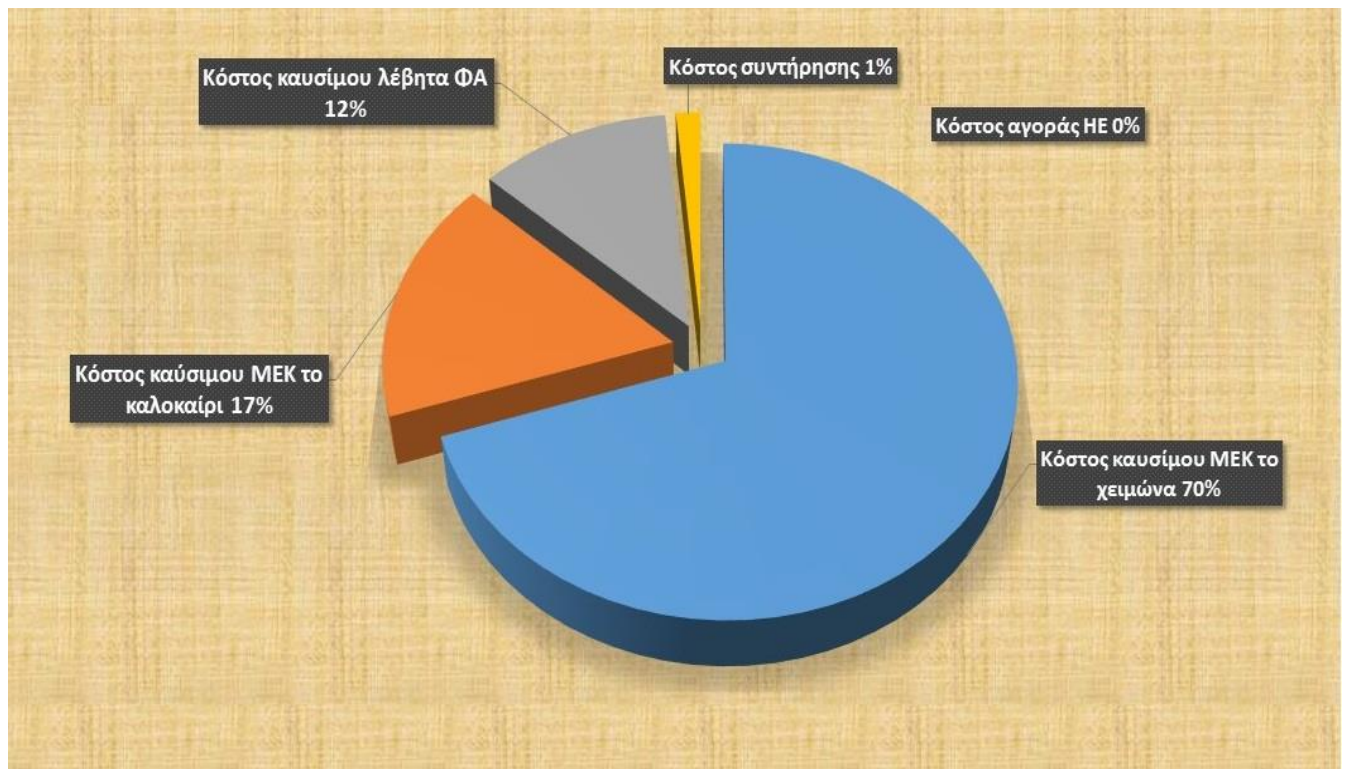
Όπως είναι φανερό το μεγαλύτερο ποσοστό στο κόστος επένδυσης οφείλεται στην εγκατάσταση της ΜΕΚ. Η εγκατάσταση του ψύκτη προσρόφησης διαδραματίζει και αυτή σημαντικό ρόλο στο κόστος επένδυσης αφού είναι περίπου το $\frac{1}{3}$ του κόστους εγκατάστασης της ΜΕΚ.

3.2.2.2. Οικονομικά αποτελέσματα ετήσιου λειτουργικού κόστους και κόστους συντήρησης σεναρίου 1

Σύμφωνα με τους τύπους (3.13)-(3.17) τα αποτελέσματα που βγαίνουν είναι τα εξής:

$$C_{th_{MEK}} = 17119 \text{ €}, C_{th_{AEB}} = 2310 \text{ €}, C_{th_{ΣΗΘ}} = 19429 \text{ €}, C_{e_{ΣΗΘ}} = 0 \text{ €}, C_{maint_{ΣΗΘ}} = 292 \text{ €}$$

Οπότε το συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης για αυτό το σενάριο λειτουργίας ανέρχεται στα 19720€.



Εικόνα 10. Κατανομή λειτουργικού κόστους συστήματος με ψύκτη προσρόφησης.

Όπως είναι φανερό από την Εικόνα 10, το σημαντικότερο κομμάτι του λειτουργικού κόστους της επένδυσης το προκαλεί το κόστος καυσίμου της MEK με 87% του συνολικού λειτουργικού κόστους. Το 70% το χειμώνα όπου η MEK καλύπτει ανάγκες για θέρμανση και ZNX, και 17% που η MEK καλύπτει ανάγκες για ψύξη και ZNX. Έπειτα το κόστος καυσίμου του λέβητα ΦΑ συνεισφέρει 12% στο ετήσιο λειτουργικό κόστος συστήματος, ενώ ελάχιστη είναι η συνεισφορά του κόστους συντήρησης των τεχνολογιών του συστήματος. Τέλος δεν έχουμε κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αφού δεν λειτουργεί η αντλία θερμότητας.

3.2.2.3. Οικονομικά αποτελέσματα ετήσιου λειτουργικού οφέλους σεναρίου 1

Από τον τύπο (3.19) υπολογίζεται ότι $R_e=8291\text{€}$. Και με τους υπολογισμούς που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 8 υπολογίζεται το ετήσιο λειτουργικό όφελος.



Πίνακας 8. Ετήσια οφέλη και κόστη συστήματος σεν.1 σε σχέση με το συμβατικό σενάριο.

Ετήσια οφέλη (€)	
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από παραγωγή θέρμανσης	-5751 (ζημία)
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από παραγωγή ψύξης	986
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από συντήρηση	-232 (ζημία)
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από πώληση ΗΕ στο δίκτυο	8291
Συνολικό ετήσιο λειτουργικό όφελος (€)	3294

3.2.2.4. Οικονομική αξιολόγηση πρώτου σεναρίου

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το συγκεκριμένο σενάριο με χρόνο επένδυσης $N=20$ έτη, επιτόκιο αναγωγής $d=5\%$, μηδενική υπολειμματική αξία στο πέρας των 20 χρόνων και διαστασιολόγηση της MEK στο 60% του μέγιστου θερμικού φορτίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 9:

Πίνακας 9. Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης για σύστημα οικιακής τριπαραγωγής με MEK (παραγωγή στο 60% του max ωριαίου θερμικού φορτίου) και ψύκτη προσρόφησης.

NPV (€)	200
IRR (%)	0
DPB (έτη)	19.8

Όπως φαίνεται από τον πίνακα 9 η επένδυση είναι οικονομικά οριακά βιώσιμη αφού κάνει απόσβεση σε 19.8 χρόνια, ωστόσο ο IRR και η NPV είναι πολύ χαμηλά γεγονός που αφήνει περιθώρια για βελτίωση της οικονομικότητας της επένδυσης.

3.2.3. Οικονομικά αποτελέσματα σεναρίου 2 (συμπαραγωγή με MEK και χρήση ΑΘ)

Σε αυτήν την περίπτωση η MEK παράγει το χειμώνα 162541.5 kWh_{th}, ενώ ο λέβητας ΦΑ 33822.42 kWh_{th}. Το καλοκαίρι η MEK παράγει 37895.04 kWh_{th} και καλύπτει τις ανάγκες για ZNX. Τις ανάγκες για ψύξη χώρων τις καλύπτει αποκλειστικά η αντλία θερμότητας η οποία



παράγει 17298.15 kW_{cool}, με μέγιστο ικανοποιούμενο ωριαία ψυκτικό φορτίο 18.67 kW_{cool}, πίνακας 10.

Πίνακας 10. Παραγωγές σεναρίου MEK-AΘ για την base case περίπτωση.

Χειμώνας	MEK: 162541.6 kWh _{th}
	Λεβ. ΦΑ: 33822.42 kWh _{th}
Καλοκαίρι	MEK: 37895.04 kWh _{th}
	AΘ: 17298.15 kWh _{cool}

3.2.3.1. Οικονομικά αποτελέσματα κόστους επένδυσης σεναρίου 2

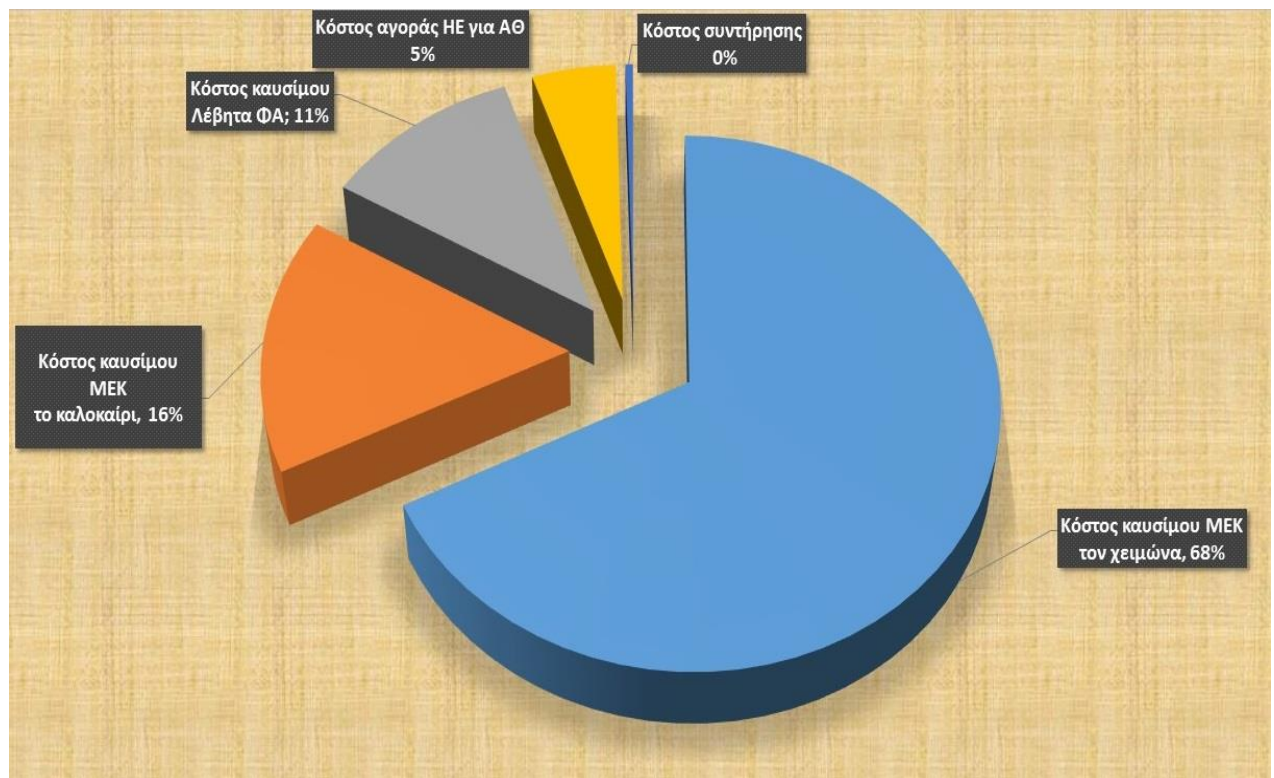
Από την σχέση (3.11) υπολογίζεται ότι για το σενάριο 2 το κόστος επένδυσης είναι ίδιο με του σεναρίου 1 και ίσο με 35985 €.

3.2.3.2. Οικονομικά αποτελέσματα ετήσιου λειτουργικού κόστους και κόστους συντήρησης σεναρίου 2

Σύμφωνα με τους τύπους (3.13)-(3.17) τα αποτελέσματα που βγαίνουν για αυτό το σενάριο λειτουργίας είναι τα εξής:

$$C_{th_{MEK}} = 17013 \text{ €}, C_{th_{\Delta EB}} = 2310 \text{ €}, C_{th_{\Sigma H\Theta}} = 19323 \text{ €}, C_{e_{\Sigma H\Theta}} = 986 \text{ €}, C_{maint_{\Sigma H\Theta}} = 87 \text{ €}$$

Οπότε το συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης για αυτό το σενάριο λειτουργίας ανέρχεται στα 20397 €.



Εικόνα 11. Κατανομή λειτουργικού κόστους συστήματος με αντλία θερμότητας.

Όπως είναι φανερό από την Εικόνα 11, το σημαντικότερο κομμάτι του λειτουργικού κόστους της επένδυσης το προκαλεί το κόστος καυσίμου της MEK με 84% του συνολικού λειτουργικού κόστους. Το 68% το χειμώνα όπου η MEK καλύπτει ανάγκες για θέρμανση και ZNX, και 16% που η MEK καλύπτει ανάγκες για ZNX. Έπειτα το κόστος καυσίμου του λέβητα ΦΑ συνεισφέρει 11% στο ετήσιο λειτουργικό κόστος συστήματος, ενώ το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που χρειάζεται η αντλία θερμότητας για να καλύψει τις ανάγκες ψύξης το καλοκαίρι έπεται με περίπου 5% του συνόλου του ετήσιου λειτουργικού κόστους του συστήματος.

3.2.3.3. Οικονομικά αποτελέσματα ετήσιου λειτουργικού οφέλους σεναρίου 2

Από τον τύπο (3.19) υπολογίζεται ότι $R_e=8240\text{€}$. Και με τους υπολογισμούς που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 11 υπολογίζεται το ετήσιο λειτουργικό όφελος.



Πίνακας 11. Ετήσια οφέλη και κόστη συστήματος σεν.1 σε σχέση με το συμβατικό σενάριο.

Ετήσια οφέλη (€)	
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από παραγωγή θέρμανσης	-5646 (ζημία)
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από παραγωγή ψύξης	0
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από συντήρηση	-28 (ζημία)
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από πώληση ΗΕ στο δίκτυο	8240
Συνολικό ετήσιο λειτουργικό όφελος (€)	2566

3.2.3.4. Οικονομική αξιολόγηση δευτέρου σεναρίου

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το συγκεκριμένο σενάριο με χρόνο επένδυσης $N=20$ έτη, επιτόκιο αναγωγής $d=5\%$, μηδενική υπολειμματική αξία στο πέρας των 20 χρόνων και διαστασιολόγηση της ΜΕΚ στο 60% του μέγιστου θερμικού φορτίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 12:

Πίνακας 12. Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης για σύστημα οικιακής συμπαραγωγής (παραγωγή στο 60% του max ωριαίου θερμικού φορτίου) και χρήση ΑΘ.

NPV (€)	-4000
IRR (%)	-
DPB (έτη)	24.7

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 12 ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης είναι μεγαλύτερος από 20 χρόνια οπότε η επένδυση κρίνεται ως αντικοινομική. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αρκετά λογικό αφού τα λειτουργικά οφέλη είναι μικρά σε σχέση με το κόστος επένδυσης και θα αργήσει πάρα πολύ να γίνει η απόσβεση.



3.2.4. Οικονομικά αποτελέσματα σεναρίου 3 (τριπαραγωγή με MEK και ψύκτη απορρόφησης)

Σε αυτήν την περίπτωση η MEK παράγει το χειμώνα 162541.6 kWh_{th}, ενώ ο λέβητας ΦΑ 33822.42 kWh_{th}. Το καλοκαίρι η MEK παράγει 34745.78 kWh_{th} και καλύπτει τις ανάγκες για ZNX και ψύξης χώρων. Τις ανάγκες για ψύξη χώρων τις καλύπτει μέσω του ψύκτη απορρόφησης βαθμού απόδοσης COP 0.9, ο ψύκτης απορρόφησης ικανοποιεί μέγιστο ψυκτικό φορτίο σε αυτή την περίπτωση 18.67 kW_{cool}. Η αντλία θερμότητας σε αυτήν την περίπτωση διαστασιολόγησης δεν λειτουργεί καθόλου αφού υπερκαλύπτονται τα ψυκτικά φορτία το καλοκαίρι από τον ψύκτη απορρόφησης και δε χρειάζεται η εγκατάσταση της αντλίας θερμότητας.

Πίνακας 13. Παραγωγές σεναρίου MEK-ΨΑ για την base case περίπτωση.

Χειμώνας	MEK: 162541.6 kWh _{th}
	Λεβ. ΦΑ: 33822.42 kWh _{th}
Καλοκαίρι	MEK: 34745.78 kWh _{th}
	ΑΘ: 0 kWh _{cool}

3.2.4.1. Οικονομικά αποτελέσματα κόστους επένδυσης σεναρίου 3

Το κόστος επένδυσης αυτού του σεναρίου για MEK διαστασιολογημένη στο 60% του μέγιστου φορτίου αποτυπώνεται στον παρακάτω πίνακα 14:

Πίνακας 14. Κόστος επένδυσης συστήματος με MEK και ψύκτη απορρόφησης.

Μονάδα	Τιμή/μονάδα	Τιμή (€)
MEK	Τύπος (3.11)	35985
Ψύκτης απορρόφησης	Τύπος (3.20)	1989
ΑΘ	500 €/KW _c	0
Συνολικό κόστος επένδυσης		28639

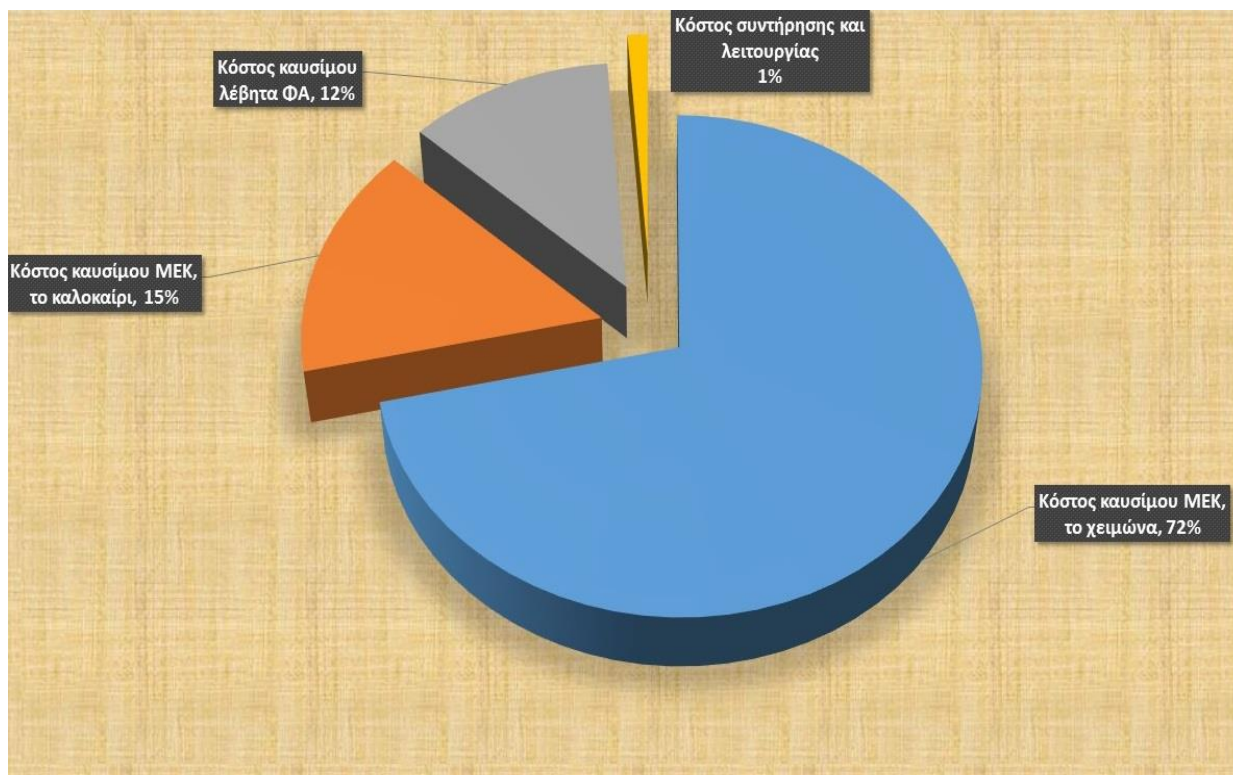
Όπως είναι φανερό το μεγαλύτερο ποσοστό στο κόστος επένδυσης οφείλεται στην εγκατάσταση της ΜΕΚ. Ενώ, η εγκατάσταση του ψύκτη απορρόφησης σε σχέση με την εγκατάσταση της ΜΕΚ έχει πολύ μικρή συνεισφορά στο κόστος επένδυσης.

3.2.4.2. Οικονομικά αποτελέσματα ετήσιου λειτουργικού κόστους και κόστους συντήρησης σεναρίου 3

Σύμφωνα με τους τύπους (3.13)-(3.17) τα αποτελέσματα που βγαίνουν είναι τα εξής:

$$C_{th_{MEK}} = 16746 \text{ €}, C_{th_{ΛΕΒ}} = 2310 \text{ €}, C_{th_{ΣΗΘ}} = 19056 \text{ €}, C_{e_{ΣΗΘ}} = 0 \text{ €}, C_{maint_{ΣΗΘ}} = 230 \text{ €}$$

Οπότε το συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος και κόστος συντήρησης για αυτό το σενάριο λειτουργίας ανέρχεται στα 19287€.



Εικόνα 12. Κατανομή λειτουργικού κόστους συστήματος με ψύκτη απορρόφησης.

Όπως είναι φανερό από την Εικόνα 12, το σημαντικότερο κομμάτι του λειτουργικού κόστους της επένδυσης το προκαλεί το κόστος καυσίμου της ΜΕΚ με 87% του συνολικού λειτουργικού κόστους. Το 72% το χειμώνα όπου η ΜΕΚ καλύπτει ανάγκες για θέρμανση και ΖΝΧ, και 15% που η ΜΕΚ καλύπτει ανάγκες για ψύξη και ΖΝΧ. Έπειτα το κόστος καυσίμου του λέβητα ΦΑ



συνεισφέρει 12% στο ετήσιο λειτουργικό κόστος συστήματος, ενώ ελάχιστη είναι η συνεισφορά του κόστους συντήρησης των τεχνολογιών του συστήματος. Τέλος δεν έχουμε κόστος αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αφού δεν λειτουργεί η αντλία θερμότητας.

3.2.4.3. Οικονομικά αποτελέσματα ετήσιου λειτουργικού οφέλους σεναρίου 3

Από τον τύπο (3.19) υπολογίζεται ότι $R_e=8110\text{€}$. Και με τους υπολογισμούς που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 15 υπολογίζεται το ετήσιο λειτουργικό όφελος.

Πίνακας 15. Ετήσια οφέλη και κόστη συστήματος σεν.3 σε σχέση με το συμβατικό σενάριο.

Ετήσια οφέλη (€)	
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από παραγωγή θέρμανσης	-5379 (ζημία)
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από παραγωγή ψύξης	986
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από συντήρηση	-230 (ζημία)
Ετήσιο λειτουργικό όφελος από πώληση ΗΕ στο δίκτυο	8110
Συνολικό ετήσιο λειτουργικό όφελος (€)	3547

3.2.4.4. Οικονομική αξιολόγηση τρίτου σεναρίου

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για το συγκεκριμένο σενάριο με χρόνο επένδυσης $N=20$ έτη, επιτόκιο αναγωγής $d=5\%$, μηδενική υπολειμματική αξία στο πέρας των 20 χρόνων και διαστασιολόγηση της MEK στο 60% του μέγιστου θερμικού φορτίου φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 16:

Πίνακας 16. Αποτελέσματα οικονομικής αξιολόγησης για σύστημα οικιακής τριπαραγωγής με MEK (παραγωγή στο 60% του max ωριαίου θερμικού φορτίου) και ψύκτη απορρόφησης.

NPV (€)	15567
IRR (%)	6
DPB (έτη)	10.6



Όπως φαίνεται στον πίνακα 16 ο χρόνος απόσβεσης της επένδυσης είναι περίπου 10.6 έτη, οπότε η επένδυση είναι αποδοτική και οικονομικά βιώσιμη με ικανοποιητικά μεγάλο IRR και NPV.

3.2.5. Σύγκριση 3 σεναρίων

Στον πίνακα 17 παρουσιάζονται οι τρεις δείκτες κάθε σεναρίου που υπολογίστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια ώστε να είναι δυνατή η οικονομική σύγκριση και αξιολόγηση των τριών σεναρίων που μελετήθηκαν. Και στα τρία σενάρια η base case έχει οριστεί έτσι ώστε η MEK του συστήματος να καλύπτει το 60% του peak φορτίου του συστήματος.

Πίνακας 17. Οικονομική σύγκριση των τριών σεναρίων οικιακής συμπαραγωγής/τριπαραγωγής.

	Σενάριο 1 με ψύκτη προσρόφησης	Σενάριο 2 με ΑΘ	Σενάριο 3 με ψύκτη απορρόφησης
NPV (€)	200	-4000	15567
IRR (%)	0	-	6
DPB (έτη)	19.8	24.7	10.6

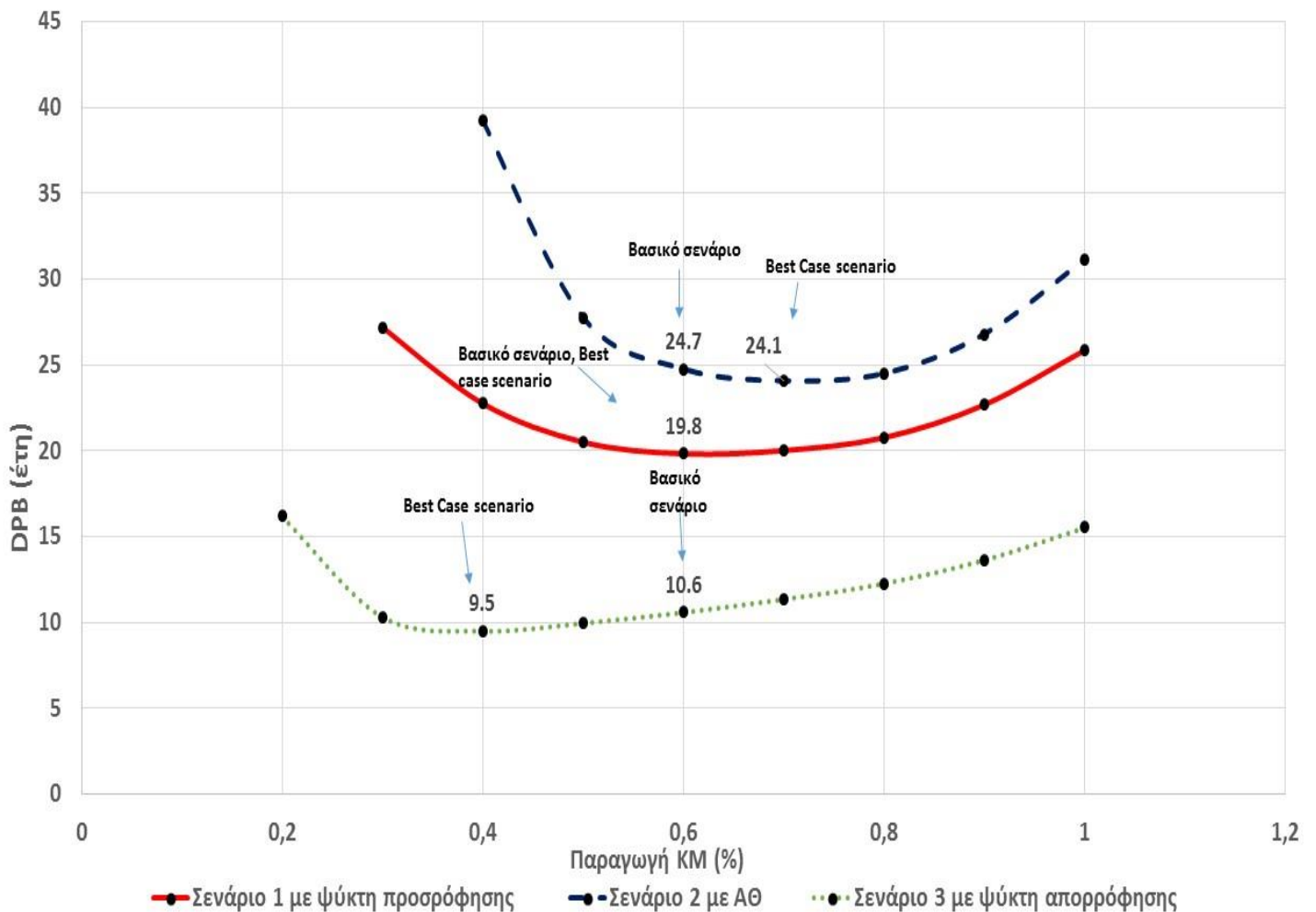
Από την σύγκριση που παρουσιάζεται στον πίνακα 17 είναι φανερό ότι όταν το καλοκαίρι καλύπτονται οι ψυκτικές ανάγκες από ψύκτη απορρόφησης, ο οποίος λαμβάνει την παραγόμενη θερμότητα από MEK διαστασιοποιημένη στο 60% του peak ωριαίου θερμικού φορτίου, έχουμε την οικονομικά πιο συμφέρουσα περίπτωση οικιακής τριπαραγωγής.

Αυτό οφείλεται κυρίως στο αρκετά πιο φθηνό κόστος επένδυσης που παρουσιάζεται στην περίπτωση του ψύκτη απορρόφησης σε σχέση με αυτό του ψύκτη προσρόφησης. Σημαντικό ρόλο επίσης διαδραματίζει ο καλύτερος COP που παρουσιάζει ο ψύκτης απορρόφησης.

3.3. Αναλύσεις Ευαισθησίας

3.3.1. Μεταβολή της εγκατεστημένης ονομαστικής θερμικής ισχύος της MEK ως προς το peak θερμικό φορτίο

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μία μελέτη της μεταβολής της DPB ανάλογα με το πώς διαστασιολογείται η MEK του συστήματος μας. Με άλλα λόγια διεξάγεται μία ανάλυση ευαισθησίας στην έντοκη περίοδο αποπληρωμής ανάλογα με το ποσοστό της εγκατεστημένης ονομαστικής θερμικής ισχύος της κεντρικής μονάδας του οικιακού συστήματος συμπαραγωγής/τριπαραγωγής ως προς το peak θερμικό φορτίο.



Διάγραμμα 11. Επίδραση της μεταβολής της ποσοστιαίας παραγωγής θερμικής ενέργειας της MEK σε σχέση με το peak ωριαίο θερμικό φορτίο στη DPB, σύγκριση 3 σεναρίων.



Όπως γίνεται αντιληπτό από το διάγραμμα 11 σε κάθε σενάριο υπάρχει ένα ελάχιστο σημείο που προσδιορίζει το ποσοστό εκείνο που πρέπει να διαστασιολογηθεί η ΜΕΚ ώστε να έχει την γρηγορότερη απόσβεση η επένδυση και θεωρείται η βέλτιστη διαστασιολόγηση κάθε σεναρίου. Το σημείο αυτό είναι μοναδικό και διαφορετικό σε κάθε σενάριο και ορίζεται από τις διάφορες παραμέτρους και τα κόστη του κάθε σεναρίου. Όταν η παραγωγή της ΜΕΚ ξεπεράσει αυτό το σημείο, τα ετήσια οφέλη του σεναρίου αρχίζουν να μειώνονται και η έντοκη περίοδος αποπληρωμής του σεναρίου να αυξάνεται. Στο σενάριο ΜΕΚ-ΨΠ είναι όταν η ΜΕΚ παράγει στο 60% του peak ωριαίου φορτίου, στο σενάριο ΜΕΚ-ΑΘ είναι όταν η ΜΕΚ παράγει στο 70% και τέλος στο σενάριο ΜΕΚ-ΨΑ είναι όταν η ΜΕΚ παράγει στο 40%. Αυτό δεν συμπίπτει πάντα όπως είναι φανερό με την base case περίπτωση, όπου πραγματοποιήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια η οικονομική ανάλυση των σεναρίων. Αυτό έγινε ώστε να πραγματοποιηθεί πιο δίκαια σύγκριση των σεναρίων.

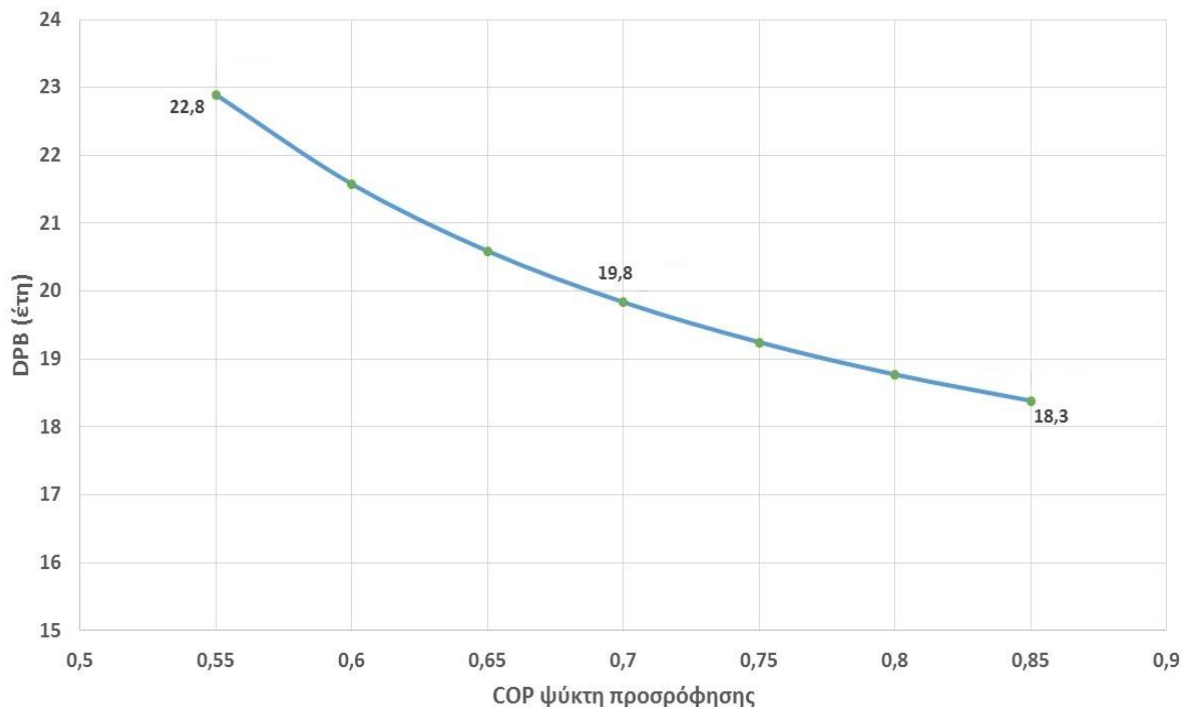
Παρατηρείται από τα διαγράμματα ότι η αύξηση της παραγωγής της ΜΕΚ οδηγεί μέχρι κάποιο σημείο (ανάλογα το σενάριο) σε μείωση της έντοκης περιόδου αποπληρωμής. Ενώ, ύστερα από αυτό το σημείο η αύξηση της παραγωγής της ΜΕΚ οδηγεί σε αύξηση της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η τιμή του κόστους καυσίμου μαζί με τον χαμηλό ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης οδηγούν σε γρηγορότερο ρυθμό αύξησης των ετήσιων λειτουργικών εξόδων από τα ετήσια λειτουργικά έσοδα, με αποτέλεσμα το ετήσιο λειτουργικό όφελος να μειώνεται. Με άλλα λόγια, η ζημία που προέρχεται από το λειτουργικό κόστος της παραγωγής θέρμανσης των συστημάτων συμπαραγωγής/τριπαραγωγής αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό από ότι το άθροισμα του λειτουργικού οφέλους από την παραγωγή ψύξης των συστημάτων συμπαραγωγής/τριπαραγωγής και των εσόδων από την πώληση της συμπαραγόμενης ΗΕ στο δίκτυο με αποτέλεσμα όσο αυξάνεται το ποσοστό κάλυψης του peak φορτίου από την ΜΕΚ να μειώνεται το ετήσιο λειτουργικό όφελος.

Από το διάγραμμα 11 είναι απολύτως κατανοητό ότι το σενάριο ΜΕΚ-ΨΑ είναι πιο οικονομικά κερδοφόρο από τα άλλα δύο σενάρια. Αφού για όλες τις περιπτώσεις διαστασιολόγησης της ΜΕΚ έχει μικρότερους χρόνους απόσβεσης της αρχικής επένδυσης. Στη συνέχεια έρχεται το σενάριο ΜΕΚ-ΨΠ και τέλος το σενάριο ΜΕΚ-ΑΘ, το οποίο έχει για όλες τις περιπτώσεις διαστασιολόγησης της ΜΕΚ χρόνους απόσβεσης της επένδυσης μεγαλύτερους από 20 χρόνια.

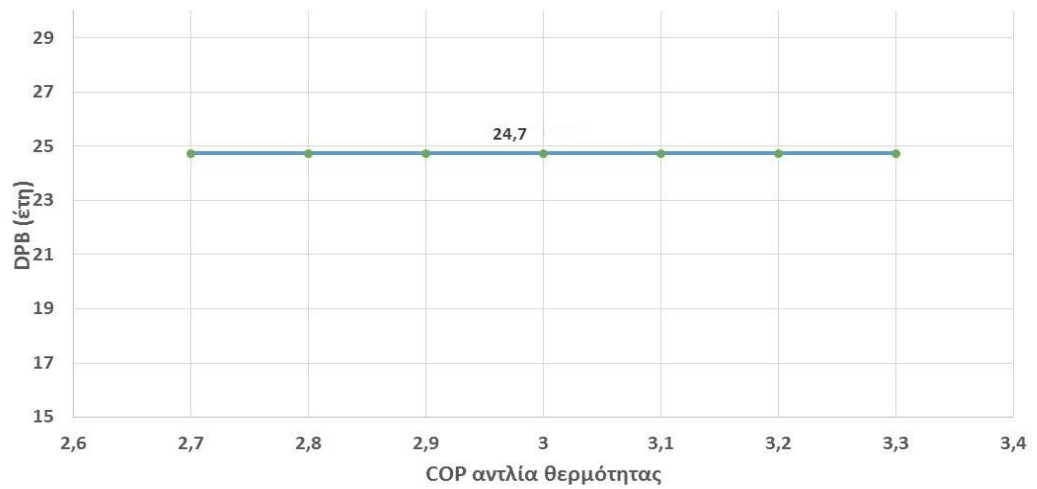
Η διαφορά μεταξύ του σεναρίου ΜΕΚ-ΨΑ και ΜΕΚ-ΨΠ οφείλεται στο μικρότερο κόστος επένδυσης που έχει ο ψύκτης απορρόφησης σε σχέση με τον ψύκτη προσρόφησης και ο μεγαλύτερος βαθμός απόδοσης του πρώτου ψύκτη, που οδηγεί στην γρηγορότερη απόσβεση της επένδυσης.

3.3.2. Μεταβολή του συντελεστή συμπεριφοράς των συστημάτων ψύξης

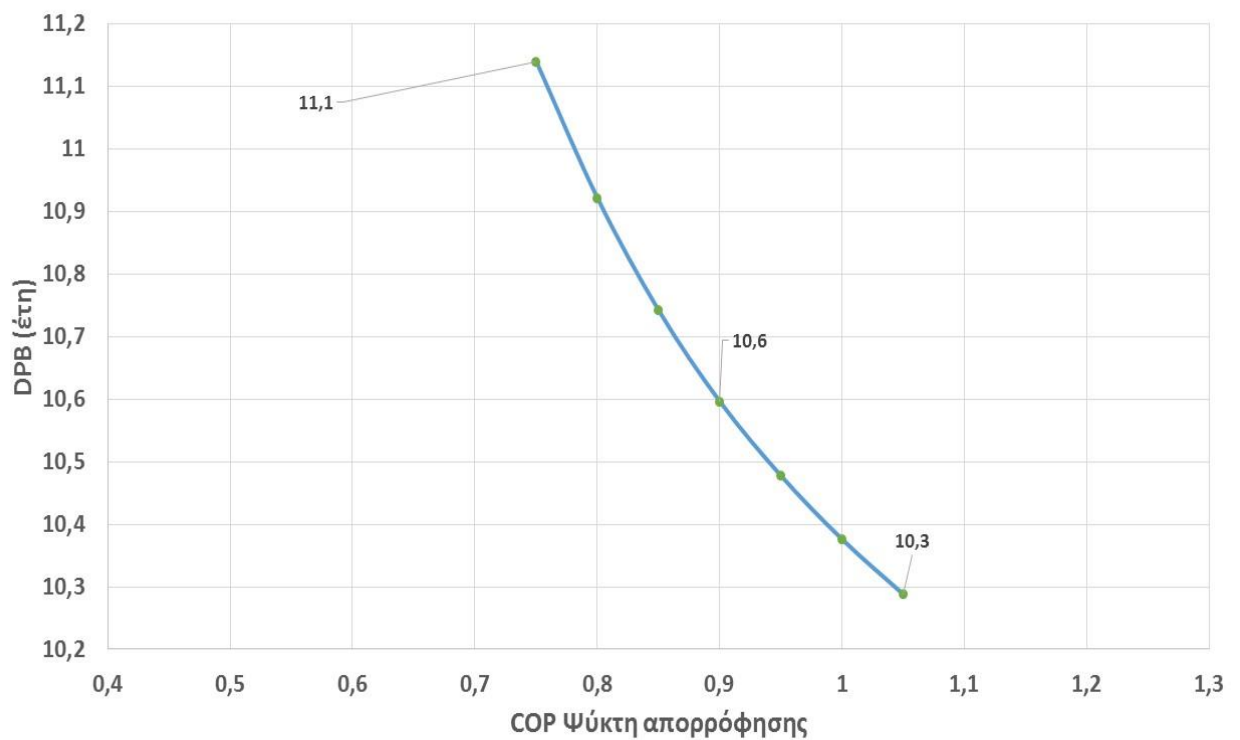
Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μία μελέτη της μεταβολής της DPB ανάλογα με συντελεστή συμπεριφοράς των τεχνολογιών ψύξης στα τρία εξεταζόμενα σενάρια. Να αναφερθεί ότι η ανάλυση ευαισθησίας που ακολουθεί γίνεται με βάση τις base case τιμές που λήφθηκαν προηγουμένως. Με άλλα λόγια διεξάγεται μία ανάλυση ευαισθησίας στην έντοκη περίοδο αποπληρωμής ανάλογα με την ικανότητα που έχουν τα συστήματα ψύξης να μετατρέπουν σε ψύξη την τροφοδοσία τους. Στα διαγράμματα 12,13 και 14 φαίνονται τα διαγράμματα για το καθένα από τα τρία εξεταζόμενα σενάρια.



Διάγραμμα 12. Επίδραση της μεταβολής του COP του ψύκτη προσρόφησης στη DPB. (σενάριο 1)



Διάγραμμα 13. Επίδραση της μεταβολή του COP της ΑΘ στη DPB. (σενάριο 2)



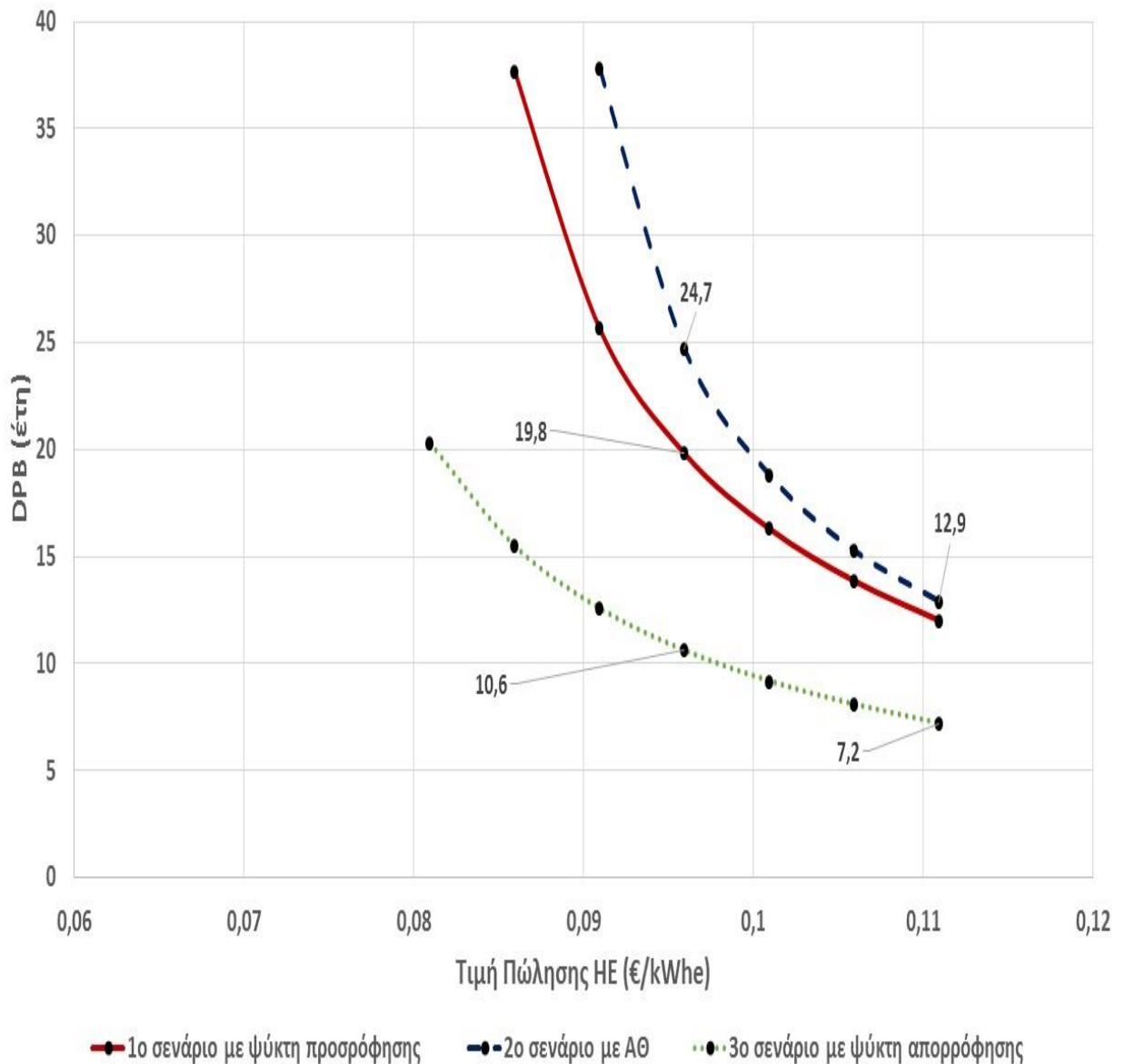
Διάγραμμα 14. Επίδραση της μεταβολή του COP του ψύκτη απορρόφησης στη DPB. (σενάριο 3)



Όπως διαπιστώνεται παρατηρώντας τα τρία διαγράμματα. Όσο αυξάνουμε τον συντελεστή συμπεριφοράς στον ψύκτη απορρόφησης και στον ψύκτη προσρόφησης τόσο μειώνεται η έντοκη περίοδος αποπληρωμής και η επένδυση γίνεται πιο βιώσιμη. Εδώ αξίζει να προστεθεί ότι η βελτίωση του COP του ψύκτη απορρόφησης δίνει μικρές αλλαγές στην βελτίωση της έντοκης περιόδου αποπληρωμής της επένδυσης, ενώ η βελτίωση του COP του ψύκτη προσρόφησης προκαλεί μεγαλύτερες αλλαγές στην βελτίωση της έντοκης περιόδου αποπληρωμής της επένδυσης. Βέβαια, να αναφερθεί πως η τιμή 0.7 που αρχικά είχε εξεταστεί για τον ψύκτη προσρόφησης ήδη είναι μία αρκετά καλή τιμή συντελεστή συμπεριφοράς για έναν τέτοιο ψύκτη και η περεταίρω αύξηση του σίγουρα αποτελεί πρόκληση [8]. Τέλος, παρατηρώντας την μεταβολή του COP στην αντλία θερμότητας στο δεύτερο σενάριο δεν παρατηρούμε μεταβολές στο χρονικό διάστημα απόσβεσης της επένδυσης, κάτι που ήταν αναμενόμενο αφού η αντλία θερμότητας αποτελεί την τεχνολογία απόδοσης ψύξης και στο συμβατικό σενάριο θέρμανσης ψύξης.

3.3.3. Μεταβολή της τιμής πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μία μελέτη της μεταβολής της DPB ανάλογα με την τιμή πώλησης της συμπαραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο εθνικό δίκτυο. Να αναφερθεί ότι η ανάλυση ευαισθησίας που ακολουθεί γίνεται με βάση τις base case τιμές για παραγωγή της MEK για κάλυψη του 60% του peak ωριαίου θερμικού φορτίου. Με άλλα λόγια διεξάγεται μία ανάλυση ευαισθησίας στην έντοκη περίοδο αποπληρωμής ανάλογα με την αύξηση ή την μείωση στην τιμή της πώλησης της παραγόμενης από το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας στο εθνικό δίκτυο. Στο διάγραμμα 15 αποτυπώνεται μία σύγκριση των τριών σεναρίων. Αρχική τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας είναι 0.095 €/kWh_e, και η τιμή αυτή αυξομειώνεται κατά 0.005 €/kWh_e για την διεξαγωγή της μελέτης ευαισθησίας στο διάστημα μεταξύ 0.080-0.11 €/kWh_e.



Διάγραμμα 15. Επίδραση της μεταβολή της τιμής πώλησης της συμπαραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, στο εθνικό δίκτυο, στη DPB, σύγκριση 3 σεναρίων.

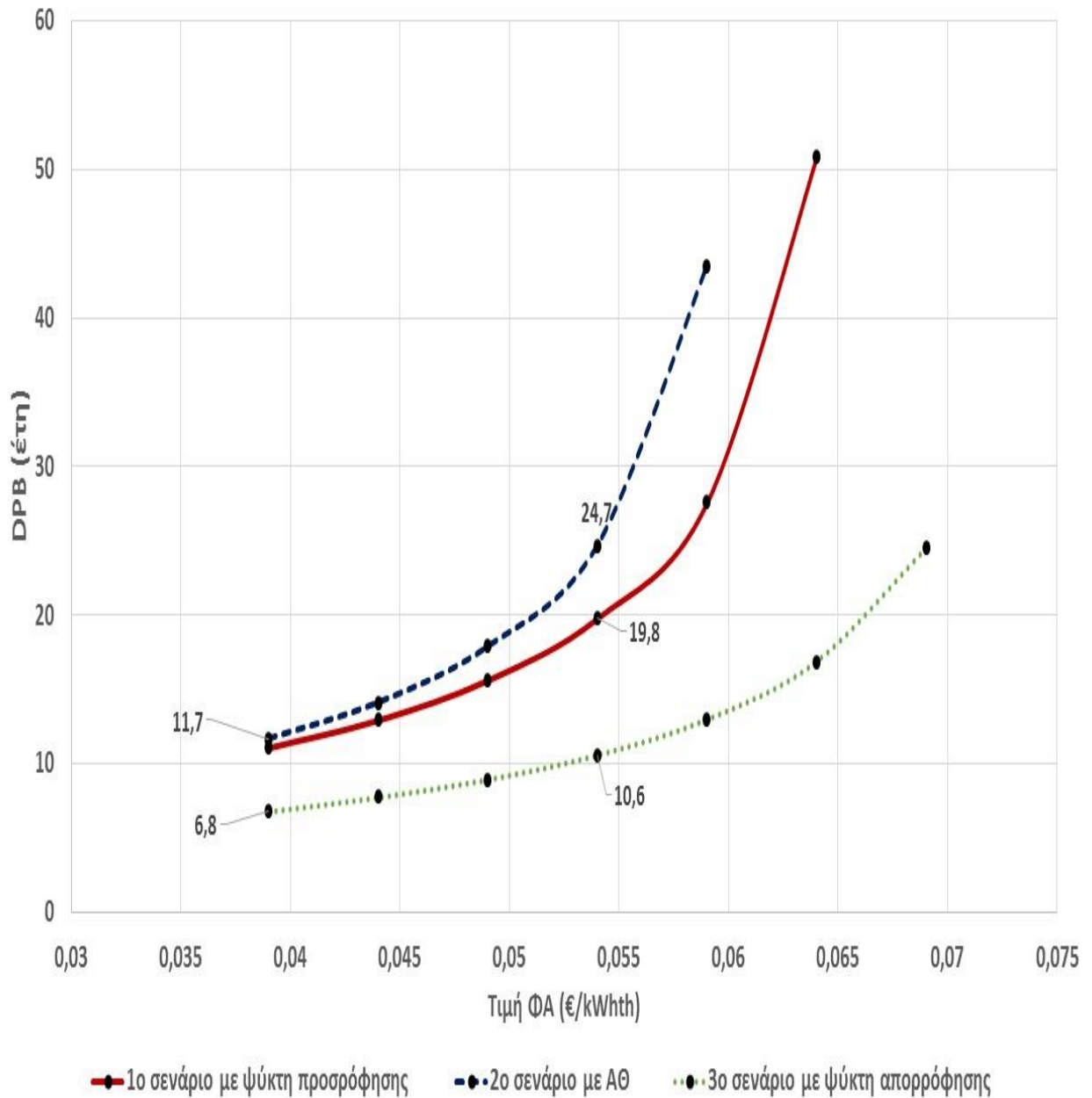
Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα 15, η τιμή πώληση της συμπαραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο είναι ανάλογη με τη μείωση της έντοκης περιόδου αποπληρωμής της



επένδυσης και της βελτίωσης της οικονομικότητας της επένδυσης. Αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό και αναμενόμενο αφού όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, τόσο αυξάνονται τα ετήσια λειτουργικά έσοδα της επένδυσης και επομένως το λειτουργικό ετήσιο όφελος της. Τέλος προκύπτουν οι ίδιες παρατηρήσεις με πριν όσο αφορά την βιωσιμότητα των τριών σεναρίων, αφού για κάθε εξεταζόμενη τιμή πώλησης της συμπαραγόμενης ΗΕ το σενάριο ΜΕΚ-ΨΑ είναι πιο λειτουργικά βιώσιμο από τα άλλα δύο σενάρια με τον ψύκτη προσρόφησης και την αντλία θερμότητας.

3.3.4. Μεταβολή στο κόστος του καυσίμου

Σε αυτήν την ενότητα θα γίνει μία μελέτη της μεταβολής της DPB ανάλογα με την τιμή αγοράς του καυσίμου της ΜΕΚ και του λέβητα, του ΦΑ. Να αναφερθεί ότι η ανάλυση ευαισθησίας που ακολουθεί γίνεται με βάση τις base case τιμές για παραγωγή της ΜΕΚ για κάλυψη του 60% του peak ωριαίου θερμικού φορτίου. Με άλλα λόγια διεξάγεται μία ανάλυση ευαισθησίας στην έντοκη περίοδο αποπληρωμής ανάλογα με την αύξηση ή την μείωση στην τιμή της αγοράς του ΦΑ. Στο διάγραμμα 16 αποτυπώνεται μία σύγκριση των τριών σεναρίων. Αρχική τιμή αγοράς του ΦΑ είναι 0.054 €/kWh_{th}, και η τιμή αυτή αυξομειώνεται κατά 0.005 €/kWh_{th} για την διεξαγωγή της μελέτης ευαισθησίας στο διάστημα μεταξύ 0.0390 – 0.0690 €/kWh_{th}.



Διάγραμμα 16. Επίδραση της μεταβολή της τιμής αγοράς του ΦΑ, στη DPB, σύγκριση 3 σεναρίων.

Όπως παρατηρείται από το διάγραμμα 16, το κόστος του ΦΑ είναι αντιστρόφως ανάλογο με τη μείωση της έντοκης περιόδου αποπληρωμής της επένδυσης και της βελτίωσης της



οικονομικότητας της επένδυσης. Αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό και αναμενόμενο αφού όσο αυξάνεται το κόστος του ΦΑ, τόσο αυξάνεται η ζημία που προέρχεται από το λειτουργικό κόστος της παραγωγής θέρμανσης των συστημάτων συμπαραγωγής/τριπαραγωγής και άρα τα ετήσια λειτουργικά κόστη τους και κατά συνέπεια μειώνεται το ετήσιο λειτουργικό όφελος της επένδυσης.





4. Συμπεράσματα και προτάσεις για περαιτέρω μελέτη

4.1. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκαν 3 συστήματα οικιακής μικρο-συμπαραγωγής/τριπαραγωγής (3 σεναρία). Σε όλα τα συστήματα η θέρμανση χώρων καθώς και οι ανάγκες για ZNX λαμβάνονται από MEK με καύσιμό το ΦΑ και από έναν βοηθητικό λέβητα ΦΑ, ενώ η ψύξη στο σενάριο 1 παράγεται από έναν ψύκτη προσρόφησης, στο σενάριο 2 από μία ΑΘ και στο σενάριο 3 από έναν ψύκτη απορρόφησης. Οι ψύκτες λαμβάνουν την απαιτούμενη θερμική ενέργεια από την MEK, ενώ η ΑΘ λαμβάνει ΗΕ από το δίκτυο. Σε κάθε σενάριο η συμπαραγόμενη ΗΕ του συστήματος πωλείται στο δίκτυο σε ειδικά διαμορφωμένη από τον νόμο τιμή. Τα συστήματα μελετήθηκαν για οικιακή χρήση σε κτίριο πολυκατοικίας στη Νέα Φιλαδέλφεια με σκοπό να προσδιοριστεί η δυνατότητα ενσωμάτωσης αντίστοιχων συστημάτων στον οικιακό τομέα, στην θέση του συμβατικού συστήματος θέρμανσης/ ψύξης με λέβητα ΦΑ και ΑΘ. Για το σκοπό αυτό αξιολογήθηκαν τα 3 σεναρία οικονομικά και διεξήχθησαν κάποιες αναλύσεις ευαισθησίας για την περαιτέρω κατανόηση τους.

Το σύστημα αναλύθηκε σε ωριαία βάση κατά όλη τη διάρκεια του έτους, το οποίο χωρίστηκε σε χειμερινή περίοδο λειτουργίας (ΟΚΤ-ΑΠΡ, 5088 h) και σε θερινή περίοδο λειτουργίας (ΜΑΙ-ΣΕΠ, 3672 h). Κατά συνέπεια, για την συγκεκριμένη πολυκατοικία κατά την χειμερινή περίοδο οι συνολικές ανάγκες για θέρμανση χώρου είναι 179044.1 kWh_{th} και οι ανάγκες για ZNX είναι 13702.8 kWh_{th}, ενώ κατά την θερινή περίοδο οι συνολικές ανάγκες για ψύξη χώρων ανέρχονται στις 17298.15 kWh_{cool} και οι ανάγκες για ZNX στις 7522.62 kWh_{th}. Το μέγιστο θερμικό και ψυκτικό φορτίο που εμφανίζεται στο σύστημα είναι 68,8 kW_{th} και 18,67 kW_{cool}, αντίστοιχα.

Η διαστασιολόγηση της MEK, και στις δύο περιόδους λειτουργίας, γίνεται με βάση το ποσοστό του μέγιστου (peak) θερμικού φορτίου που καλύπτει η MEK κάθε φορά. Όπως αναφέρθηκε, από τα ενεργειακά δεδομένα της εξεταζόμενης τριώροφης πολυκατοικίας, το μέγιστο (peak) ωριαίο θερμικό φορτίο, ανέρχεται στα 68.8 kW_{th} και βάση αυτού διαστασιολογείται η MEK του συστήματος συμπαραγωγής/τριπαραγωγής. Το ποσοστό κάλυψης του μέγιστου θερμικού φορτίου είναι μια πάρα πολύ σημαντική μεταβλητή διότι επηρεάζει τόσο το κόστος επένδυσης του συστήματος όσο και την θερμότητα, την ψύξη και τον ηλεκτρισμό που αυτό παράγει μέσω της διαστασιολόγησης της MEK, για αυτό το λόγο επιλέχθηκε να μελετηθεί ως ανεξάρτητη μεταβλητή. Σαν βασική περίπτωση ορίστηκε να είναι η περίπτωση που η MEK καλύπτει το 60%



του peak θερμικού φορτίου, και για το καθένα από τα τρία σενάρια διεξήχθησαν τα εξής αποτελέσματα, πίνακας 18:

Πίνακας 18. Παρουσίαση ενεργειακών δεδομένων των 3 σεναρίων

1° (ΜΕΚ-ΨΠ)	σενάριο	Χειμώνας	MEK: 162541.6 kWh _{th}	DPB: 19.8 έτη
			Λέβητας ΦΑ: 33822.42 kWh _{th}	
		Καλοκαίρι	MEK: 39133.65 kWh _{th}	
			AΘ: 0 kWh _{cool}	
2° (ΜΕΚ-ΑΘ)	σενάριο	Χειμώνας	MEK: 162541.6 kWh _{th}	DPB: 24.7 έτη
			Λέβητας ΦΑ: 33822.42 kWh _{th}	
		Καλοκαίρι	MEK: 37895 kWh _{th}	
			AΘ: 17298.15 kWh _{cool}	
3° (ΜΕΚ-ΨΑ)	σενάριο	Χειμώνας	MEK: 162541.6 kWh _{th}	DPB: 10.6 έτη
			Λέβητας ΦΑ: 33822.42 kWh _{th}	
		Καλοκαίρι	MEK: 34745.78 kWh _{th}	
			AΘ: 0 kWh _{cool}	

Βάση των παραπάνω διεξάγονται τα εξής συμπεράσματα:

1. Η ενσωμάτωση συστημάτων τριπαραγωγής και συμπαραγωγής στον οικιακό τομέα επιφέρει εξοικονόμηση ενέργειας σε σχέση με την συμβατική περίπτωση θέρμανσης/ψύξης και οι επενδύσεις ανάλογα με τις τεχνολογίες που τις συντελούν κρίνονται οικονομικά βιώσιμες και δύναται να επιφέρουν σημαντικές λύσεις στην παγκόσμια προσπάθεια για εξοικονόμηση ενέργειας και φέρνοντας τις κοινωνίες ένα βήμα πιο κοντά στην αειφόρο ανάπτυξη.
2. Πιο συγκεκριμένα στα 3 σενάρια που εξετάστηκαν, οικονομικά πιο βιώσιμο κρίθηκε το σενάριο ΜΕΚ-ΨΑ, με το σενάριο ΜΕΚ-ΨΠ να ακολουθεί. Η διαφορά αυτών των δύο σεναρίων, όπως φαίνεται και στον πίνακα 18, έγκειται τόσο, στην παραγωγή της ΜΕΚ κατά την θερινή περίοδο που για το σενάριο ΜΕΚ-ΨΑ είναι 34745.78 kWh_{th}, ενώ για το σενάριο ΜΕΚ-ΨΠ είναι μεγαλύτερη και για την ακρίβεια, 39133.65 kWh_{th}, όσο και στην έντοκη περίοδο αποπληρωμής που για το σενάριο ΜΕΚ-ΨΑ είναι 10.6 έτη και για το σενάριο ΜΕΚ-ΨΠ είναι 19.8 έτη. Η διαφορά στην παραγωγή της ΜΕΚ οφείλεται κυρίως στον βαθμό απόδοσης των δύο ψυκτών. Σημαντικό ρόλο στην μικρότερη έντοκη περίοδο

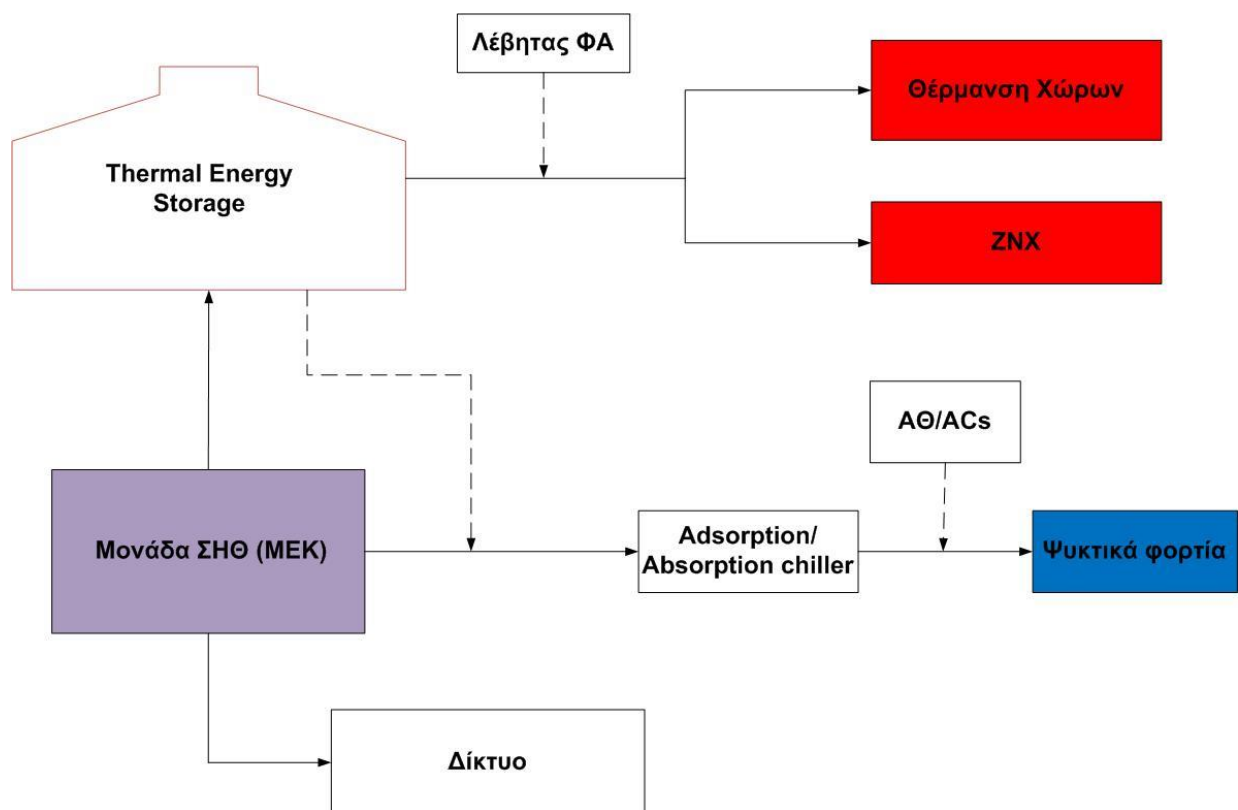


αποπληρωμής του σεναρίου MEK-ΨΑ παίζει και το σημαντικά μικρότερο κόστος επένδυσης του ψύκτη απορρόφησης έναντι του ψύκτη προσρόφησης.

3. Όπως παρατηρείται η μεγαλύτερη παραγωγή της MEK στο σενάριο MEK-ΨΠ, που επιφέρει μεγαλύτερα έσοδα λόγω πώλησης της συμπαραγόμενης HE στο δίκτυο, δεν οδηγεί σε οικονομικά πιο βιώσιμη επένδυση για τους εξής λόγους. Τον μικρότερο ηλεκτρικό BA απόδοσης της μηχανής σε σχέση με το θερμικό BA, και το αρχικό κόστος της επένδυσης που στην περίπτωση του ψύκτη προσρόφησης είναι αρκετά αυξημένο.
4. Οι αναλύσεις ευαισθησίας που διεξήχθησαν βγάλανε τα εξής συμπεράσματα:
 - Η γραφική παράσταση με άξονες την DPB και το ποσοστό κάλυψης από την MEK του peak θερμικού φορτίου παρουσιάζει σε κάθε σενάριο ένα ελάχιστο. Αυτό το ελάχιστο αποτελεί την best case περίπτωση λειτουργίας κάθε σεναρίου και διαφέρει από τεχνολογία σε τεχνολογία.
 - $COP \uparrow \rightarrow DPB \downarrow$, Όσο μεγαλύτερος είναι ο βαθμός απόδοσης των ψυκτών στο σύστημα τριπαραγωγής, τόσο μικρότερη είναι η έντοκη περίοδος αποπληρωμής της επένδυσης. Αυτό είναι λογικό αφού αξιοποιείται καλύτερα η προστιθέμενη στους ψύκτες θερμότητα με αποτέλεσμα να καίγεται λιγότερο καύσιμο. Συνεπώς, η βελτίωση αυτών των τεχνολογικών χαρακτηριστικών των ψυκτών με την όχι ανεξέλεγκτη αύξηση των τιμών τους αποτελεί σημαντικό παράγοντα στην καλύτερη ενσωμάτωση αυτών των συστημάτων στον οικιακό τομέα.
 - $Price_{\text{πώληση HE}} \uparrow \rightarrow DPB \downarrow$, Όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης της συμπαραγόμενης HE στο δίκτυο, τόσο μειώνεται η έντοκη περίοδος αποπληρωμής. Αναμενόμενο, αφού αυξάνονται τα έσοδα, οπότε και το λειτουργικό όφελος με αποτέλεσμα η απόσβεση της επένδυσης να γίνεται γρηγορότερα.
 - $Price_{\phi_A} \uparrow \rightarrow DPB \uparrow$, Όσο αυξάνεται η τιμή πώλησης του καυσίμου, ΦΑ, τόσο αυξάνεται η έντοκη περίοδος αποπληρωμής. Λογικό, αφού αυξάνονται τα λειτουργικά έξοδα, οπότε μειώνεται το λειτουργικό όφελος με αποτέλεσμα η απόσβεση της επένδυσης να γίνεται πιο αργά.

4.2. Προτάσεις για μελλοντικές ενέργειες

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για την οικονομική αξιολόγηση συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής σε οικιακές εφαρμογές με ενσωματωμένα συστήματα αποθήκευσης θερμικής ενέργειας (Thermal Energy Storage systems, TES) για την όσο το δυνατόν μεγαλύτερη εξοικονόμηση ενέργειας. Με τον όρο TES δηλώνεται η προσωρινή αποθήκευση θερμικής ενέργειας υπό μορφή θερμών ή ψυχρών μαζών για μελλοντική χρήση. Τα συστήματα TES ταξινομούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες, ανάλογα με την μορφή της αποθήκευσης θερμικής ενέργειας: 1. συστήματα αποθήκευσης θερμότητας υπό αισθητή μορφή (Sensible Heat Storage systems), 2. συστήματα αποθήκευσης θερμότητας υπό λανθάνουσα μορφή (Latent Heat Storage systems) και 3. Συστήματα θερμοχημικής αποθήκευσης ενέργειας (Thermochemical Storage systems). Τα συστήματα αποθήκευσης θερμότητας υπό αισθητή μορφή είναι σχετικά λιγότερο ακριβά από τα άλλα δύο συστήματα και χρησιμοποιούνται στον οικιακό τομέα, στην τηλεθέρμανση και σε βιομηχανικές εφαρμογές [36].



Εικόνα 13. Σύστημα τριπαραγωγής με Αποθήκευση θερμικής ενέργειας.



Ένα τέτοιο σύστημα, που αποτελεί προέκταση των 3 σεναρίων, παρουσιάζεται στην εικόνα 13. Ο τρόπος λειτουργίας που συνίσταται είναι ο CHP priority [37]. Η ΜΕΚ, δηλαδή πρωτίστως, να καλύπτει τα θερμικά φορτία του συστήματος. Όταν η ΜΕΚ παράγει παραπάνω από την ζήτηση (λόγω τεχνικών ελαχίστων παραγωγής) τότε η περίσσεια θερμική ενέργεια αποθηκεύεται στον TES. Όποτε παρουσιαστεί έλλειμα παραγωγής από την ΜΕΚ σε σχέση με την ζήτηση θερμικής ενέργειας, τότε συμπληρώνει ο TES και αν υπάρχουν ακόμη ανικανοποίητά φορτία, τη λύση τη δίνει ο βοηθητικός λέβητας ΦΑ του συστήματος. Μία τέτοια επένδυση, προφανώς, έχει κάποιο αρχικό κόστος κτήσης, και συνίσταται για μεγαλύτερα θερμικά φορτία, από αυτά της τριώροφης πολυκατοικίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας, ώστε να είναι οικονομικά βιώσιμη.

Σε προέκταση του παραπάνω σεναρίου μπορεί να δοκιμαστεί επίσης και CTES (Cold Thermal Energy Storage system) για αποθήκευση ψυκτικής ενέργειας. Όλα αυτά, φυσικά, λόγω του αρχικού τους κόστους, συνιστώνται για περισσότερες από μία πολυκατοικία, π.χ. ένα συγκρότημα πολυκατοικιών, σε μία αποκεντρωμένη εφαρμογή παραγωγής ενέργειας, είτε για μεγαλύτερες εφαρμογές όπως ξενοδοχειακά συγκροτήματα, νοσοκομεία και αεροδρόμια.

Τέλος, τέτοια συστήματα οικιακής συμπαραγωγής μπορούν να δοκιμαστούν και με άλλες τεχνολογίες και καύσιμα, όπως παραδείγματος χάρη οι κυψέλες καυσίμου και η βιομάζα, αντίστοιχα.





5. Βιβλιογραφία

- [1] Κ. Πιριπίτση, "Σύγχρονα ενεργειακά ζητήματα, σημασία των ΑΠΕ και ΕΞΕ, τρόποι εξοικονόμησης ενέργειας," 2010. Available: [http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/All/7FCCCC67119C7A3AC2257586003AC345/\\$file/CE%A3%CE%A5%CE%A7%CE%A1%CE%9F%CE%9D%CE%91%20%CE%95%CE%9D%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%95%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%91%20%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%92%CE%9B%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%91%CE%91%CE%A0%CE%9B%CE%9F%CE%99%20%CE%A4%CE%A1%CE%9F%CE%A0%CE%9F%CE%99%20%CE%95%CE%9E%CE%9F%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%9D%CE%9F%CE%9C%CE%97%CE%A3%CE%97%CE%A3%20%CE%95%CE%9D%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%95%CE%99%CE%91%CE%A3.pdf](http://www.mcit.gov.cy/mcit/mcit.nsf/All/7FCCCC67119C7A3AC2257586003AC345/$file/CE%A3%CE%A5%CE%A7%CE%A1%CE%9F%CE%9D%CE%91%20%CE%95%CE%9D%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%95%CE%99%CE%91%CE%9A%CE%91%20%CE%A0%CE%A1%CE%9F%CE%92%CE%9B%CE%97%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%91%CE%91%CE%A0%CE%9B%CE%9F%CE%99%20%CE%A4%CE%A1%CE%9F%CE%A0%CE%9F%CE%99%20%CE%95%CE%9E%CE%9F%CE%99%CE%9A%CE%9F%CE%9D%CE%9F%CE%9C%CE%97%CE%A3%CE%97%CE%A3%20%CE%95%CE%9D%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%95%CE%99%CE%91%CE%A3.pdf)
- [2] Σ. Δ. ΠΕΡΔΙΟΣ, "ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΤΙΡΙΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΚΗΠΙΩΝ ΣΕ ΔΩΜΑΤΑ," 2006. Available: http://library.tee.gr/digital/books_notee/book_60757/book_60757_perdios.pdf
- [3] Ν. Χονδράκης, "Εγκαταστάσεις ψύξης-Ψυκτικός κύκλος," (in greek), Φεβρουάριος 2015.
- [4] "Αναλυτικές εθνικές προδιαγραφές παραμέτρων για τον υπολογισμό της ενεργειακής απόδοσης κτιρίων και την έκδοση του πιστοποιητικού ενεργειακής απόδοσης," presented at the Τεχνικό επιμελητήριο Ελλάδος, Απρίλιος 2012. Available: <http://portal.tee.gr/portal/page/portal/tptee/totee/TOTEE-20701-1-Final-%D4%C5%C5-2nd.pdf>
- [5] WADE. *GUIDE TO DECENTRALIZED ENERGY TECHNOLOGIES*. Available: <http://www.bioturbine.org/Publications/PDF/WADEDETechnologies.pdf>
- [6] Σ. Κ. Ε. ΚΑΚΑΡΑΣ, *Διασπαρμένη Παραγωγή Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας*. Athens: Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, Μάρτιος 2016.
- [7] "International Energy Agency. Combined heat and power: evaluating the benefits of greater global investment," 2008. Available: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/chp_report.pdf
- [8] Y. S. M. Liu, F.Fang, "Combined cooling, heating and power systems: A survey," (in english), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 35, pp. 1–22, March 2014 1–22.
- [9] P. M. G. Chicco, "From Cogeneration to Trigeneration: Profitable Alternatives in a Competitive Market," *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 21, no. 1, March 2006.
- [10] Available: <http://www.desmie.gr/ape-sithya/adeiodotiki-diadikasia-kodikopoiisi-nomothesis-ape/periechomena/sithya-mikro-symparagogi/mikro-symparagogi-micro-chp/>
- [11] "Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης: εγκαταστάσεις σε κτίρια," presented at the ΤΕΧΝΙΚΗ ΟΔΗΓΙΑ ΤΕΧΝΙΚΟΥ ΕΠΙΜΕΛΗΤΗΡΙΟΥ ΕΛΛΑΔΑΣ Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-5/2010, Μάρτιος 2017.
- [12] Available: <http://www.ypeka.gr/rescampaign2008/sith-symparagogh-sthn-ellada.html>
- [13] A. D. S. H. Cho, P. Mago, "Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization," (in english), *Applied Energy*, vol. 136, pp. 168-185, August 2014.
- [14] J. K. V. Kuhn, I. Bulatov, "MicroCHP: Overview of selected technologies, products and field test results," *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, no. 16, pp. 2039-2048, November 2008.
- [15] W. G. H. Ren, "Economic and environmental evaluation of micro-CHP systems with different operating modes for residential buildings in Japan," *Energy Build*, vol. 42, pp. 853-861, 2010.
- [16] M. A. L. A. D. Hawkes, "Cost-effective operating strategy for residential microcombined heat and power," *Energy* vol. 32, pp. 711-723, 2007.



- [17] K. G. I. Staffell, K. Kendall, "Cost targets for domestic fuel cell CHP," *J Power Sources*, vol. 181, pp. 339-349, 2008.
- [18] M. N. A. D. Peacock, "Impact of micro-CHP systems on domestic CO₂ emissions," *Appl Therm Energy*, vol. 25, pp. 2653-2676, 2005.
- [19] C. P. R. P. A. Pilavachi, S. Minett, N.H. Afgan, "Multi-criteria evaluation for CHP system options," *Energy Convers Manage*, vol. 47, pp. 3519-3529, 2006.
- [20] "New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO), Move to a distributed generation in Germany," NEDO Oversea Report, Japan2003.
- [21] G. J. T. Crozier-Cole, "The potential market for micro CHP in the UK," Report to the Energy Saving Trust2002.
- [22] R. T. D. Lempereur, "A macro market for micro-CHP," *Home Energy*, 2008.
- [23] Κ. Ρακόπουλος, *Αρχές Εμβολοφόρων ΜΕΚ*. Αθήνα: Εκδόσεις Γρηγόριος Φούντας, 1988.
- [24] Χ. Βασιλείου, "Τεχνοοικονομική αξιολόγηση εγκατάστασης συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής σε υφιστάμενα ξενοδοχεία της Κύπρου," Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, 2013.
- [25] A. S. F. C. D. Aussant, V. Ismet Ugursal, H. Taherian, "Residential application of internal combustion engine based cogeneration in cold climate-Canada. ," *Energy and Buildings*, no. 1288-1298, July 2009.
- [26] *How to use an absorption chiller*. Available: <http://goldman.com.au/energy/company-news/how-does-an-absorption-chiller-work>
- [27] Κ. Φοίφας, "Οικονομοτεχνική αξιολόγηση ηλιακών συστημάτων συνσυστασμένης θέρμανσης και ψύξης με αντλία θερμότητας και προσρόφηση," Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ιούλιος 2017.
- [28] Φ. Ρ. Τσαούση, "Τεχνοοικονομική ανάλυση για την διαστασιολόγηση μικρών αποκεντρωμένων συστημάτων τηλεθέρμανσης με συμπαραγωγή," Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Απρίλιος 2016.
- [29] A. A. P. Arbabi, Z. Mansoori, M. Seyfi, "Joint Numerical-Technical Analysis and Economical Evaluation of Applying Small Internal Combustion Engines in Combined Heat and Power (CHP)," *Applied Thermal Engineering*, vol. 113, pp. 694-704, February 2017.
- [30] Wärtsilä. Available: <https://www.wartsila.com/energy/learning-center/technical-comparisons/combustion-engine-vs-gas-turbine-part-load-efficiency-and-flexibility> Wärtsilä
- [31] Σ. Κ. Ε. Κακαράς, Π. Βουρλιώτης, Π. Γραμμέλης, Π. Πάλλης, Ε. Καραμπίνης, "Σύγκριση κόστους θέρμανσης από διάφορες τεχνολογίες," Εργαστήριο Ατμοκινητήρων & Λεβήτων, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Ινστιτούτο Χημικών Διεργασιών και Ενεργειακών Πόρων, Εθνικό Κέντρο Έρευνας και Τεχνολογικής Ανάπτυξης, Αθήνα Νοέμβριος 2016, Available: <http://www.lsbtp.mech.ntua.gr/sites/default/files/NTUA%20Study%20November%202016.pdf>.
- [32] *Φυσικό αέριο Αττικής*. Available: <https://www.aerioattikis.gr/el/timi-eksikonomisi-timi-sesxi-me-alla-kafsima>
- [33] (2017). *EUROSTAT*. Available: <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>
- [34] *Νόμος 4414*, Αύγουστος 2017.
- [35] *Λ.Α.Γ.Η.Ε*. Available: http://www.lagie.gr/fileadmin/groups/EDSHE/MiniaiaDeltiaEL/04_2017_Miniaio_Deltio_APE_SITHYA_v1.0_14.06.2017.pdf
- [36] I. R. E. A. (IRENA), "Thermal Energy Storage Technology Brief," ed.
- [37] J. M. Sala, "Thermal energy storage (TES) systems for cogeneration and trigeneration systems," *Advances in Thermal Energy Storage Systems*.