



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΧΗΜΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ

Τεχνικοοικονομική Αξιολόγηση Συστημάτων Συμπαγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας σε Λειτουργία

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Αικατερίνη Γ. Παπαδημητρίου
Πολιτικός Μηχανικός ΑΠΘ

Δεκέμβριος 2022

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Z. Μαρούλης, Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)

E. Βουτσάς, Καθηγητής ΕΜΠ

M. Κροκίδα, Καθηγήτρια ΕΜΠ

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή

Z. Μαρούλης, Καθηγητής ΕΜΠ (Επιβλέπων)

E. Βουτσάς, Καθηγητής ΕΜΠ

M. Κροκίδα, Καθηγήτρια ΕΜΠ

K. Μαγουλάς, Καθηγητής ΕΜΠ

A. Τσακανίκας, Αναπληρωτής Καθηγητής ΕΜΠ

E. Τζαννίνη, Επίκουρος Καθηγήτρια ΕΜΠ

Δ. Ασημακόπουλος, Ομότιμος Καθηγητής ΕΜΠ

Αικατερίνη Παπαδημητρίου

Η έγκριση της διδακτορικής διατριβής από την Ανωτάτη Σχολή Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή γνώμων του συγγραφέα (N.5343/1932, Άρθρο 202).

Στον πατέρα μου, Γιώργο

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εκπόνηση της διδακτορικής διατριβής πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, κατά τη χρονική περίοδο 2012-2022, υπό την επίβλεψη του Καθηγητή κ. Ζαχαρία Μαρούλη.

Η ολοκλήρωση αυτής της διατριβής αποτελεί την επίτευξη ενός μεγάλου στόχου και το αποτέλεσμα προσωπικής δουλειάς, στοχοπροσήλωσης, αλλά και πολύτιμης συνεργασίας με ανθρώπους που ήμουν τυχερή να έχω στο πλευρό μου κατά τη διάρκεια αυτής της προσπάθειας.

Θερμές ευχαριστίες οφείλω στον Επιβλέποντα Καθηγητή μου, κ. Ζαχαρία Μαρούλη για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε από την αρχή με την ανάθεση του θέματος καθώς και για την υπομονή και επιμονή του προκειμένου να ολοκληρωθεί αυτή η προσπάθεια. Χωρίς τη συμβολή του θα ήταν ακατόρθωτη η διεκπεραίωση της διατριβής. Η καθοδήγησή του και η επιστημονική του προσέγγιση με βοήθησαν να εξελιχθώ προσωπικά και επαγγελματικά.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω και τα άλλα δύο μέλη της Συμβουλευτικής Επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Επαμεινώνδα Βουτσά, και την Καθηγήτρια κα. Μαγδαληνή Κροκίδα, για τις πολύτιμες συμβουλές και την υποστήριξή τους. Ευχαριστώ θερμά ακόμη όλα τα μέλη της επταμελούς εξεταστικής επιτροπής για τη βοήθειά τους.

Ευχαριστίες οφείλω επίσης στους συναδέλφους της εταιρίας ΗΛΙΟΣΤΑΤΗ ΕΠΕ, και συγκεκριμένα στον Δρ. κ. Χρήστο Κορρέ και στον μηχανικό Στάθη Μαραγκάκη για τη βοήθειά τους σε ότι αφορά στο σύστημα συμπαραγωγής του Νοσοκομείου «ΜΗΤΕΡΑ», αλλά και στους μηχανικούς και τους τεχνικούς της Τεχνικής Υπηρεσίας του Νοσοκομείου «ΜΗΤΕΡΑ» για την άψογη συνεργασία μας στην προσπάθειά μου να συγκεντρώσω τα απαιτούμενα στοιχεία για τη μελέτη. Ευχαριστώ επίσης τον αγαπητό συνάδελφο κ. Γιώργο Σκαρπέτη που με τη μακρόχρονη εμπειρία του και την επιστημονική του κατάρτιση με βοήθησε σημαντικά στην κατανόηση του αντικειμένου της συμπαραγωγής.

Εγκάρδιες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στην Καθηγήτρια κα. Ευγενία Τζαννίνη για τον πολύτιμο χρόνο που μου αφιέρωσε συμβάλλοντας στην διεύρυνση των γνώσεων μου σε θέματα σχετιζόμενα με το νομοθετικό πλαίσιο που διέπει την αγορά ενέργειας, και για την συνεχή υποστήριξη και ενθάρρυνση που μου προσέφερε σε τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε προσωπικό επίπεδο. Εγκάρδιες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω και στην έτερη «συμμαθήτρια», συνάδερφο και συνοδοιπόρο μου σε όλο αυτό το όμορφο ταξίδι, Δρ. Καλλιόπη Ταταράκη, η συμπαράσταση και η βοήθεια της οποίας συνέβαλαν καταλυτικά στην ολοκλήρωσή του.

Κλείνοντας τον Πρόλογο, θα ήθελα να ευχαριστήσω τη Σχολή Χημικών Μηχανικών και το Εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών που με δέχτηκαν στην ομάδα τους. Ευχαριστώ τέλος την οικογένειά μου και τους δικούς μου ανθρώπους για την πίστη τους σε εμένα και για την υποστήριξή τους σε κάθε προσπάθειά μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	1
1.1 Η εξεταζόμενη διεργασία	1
1.2 Λειτουργία συστήματος	3
1.3 Απόδοση συστήματος	5
1.4 Επιλογή συστήματος. Βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης και λειτουργίας συστήματος	6
1.5 Εφαρμογή στον τριτογενή τομέα. Νοσοκομεία	8
2. Βιβλιογραφική ανασκόπηση	11
2.1 Εισαγωγή	11
2.2 Η Συμπαραγωγή ως αντικείμενο έρευνας παγκοσμίως	11
2.3 Η Συμπαραγωγή ως αντικείμενο έρευνας στην Ελλάδα	20
3. Το αντικείμενο και οι στόχοι	23
4. Διείδυση συμπαραγωγής στην Ελλάδα. Σύγκριση με την Ευρώπη	27
4.1 Εισαγωγή	27
4.2 Νομοθετικό πλαίσιο	28
4.3 Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος και παραγωγής ενέργειας	30
4.4 Σύστημα Εγγυημένων Τιμών. Feed-in-Tariff	36
4.5 Μητρώο μονάδων	39
4.5.1 Μονάδες ΣΗΘΥΑ	39
4.5.2 Κατανεμόμενες Μονάδες	41
4.6 Κατηγοριοποίηση μονάδων	41
4.7 Η Συμπαραγωγή στην Ευρώπη	43
5. Οικονομική αξιολόγηση συστημάτων συμπαραγωγής σε λειτουργία	49
5.1 Εισαγωγή	49
5.2 Μεθοδολογία	52
5.2.1 Καταγραφή δεδομένων	52
5.2.2 Βασικοί δείκτες απόδοσης	53
5.2.3 Παραδοχές	57
5.3 Αποτελέσματα και σχολιασμός	58
5.3.1 Κόστος ενέργειας	58
5.3.2 Χαρακτηριστικά των έργων ΣΗΘ της Αθήνας	60

5.3.3 Απόδοση των έργων ΣΗΘ της Αθήνας	61
5.4 Συμπεράσματα	70
6. Τεχνοοικονομική αξιολόγηση απόδοσης συστήματος τριπαραγωγής σε λειτουργία	73
6.1 Εισαγωγή	73
6.2 Συλλογή δεδομένων και μεθοδολογία	76
6.2.1 Τεχνική περιγραφή συστήματος	76
6.2.2 Χαρακτηριστικά σχεδιασμού συστήματος CHP	78
6.2.3 Παρακολούθηση δεδομένων	79
6.2.4 Βασικοί δείκτες απόδοσης	80
6.3 Αποτελέσματα και σχολιασμός	84
6.3.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων	84
6.3.2 Παραγωγή ενέργειας συστήματος ΣΗΘ	86
6.3.3 Τεχνική απόδοση συστήματος	90
6.3.4 Οικονομική απόδοση συστήματος	101
6.4 Συμπεράσματα	102
7. Συμπεράσματα	107
Ονοματολογία	113
Βιβλιογραφία	115

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1.1. Διάγραμμα ροής μονάδας συμπαραγωγής.	4
Σχήμα 1.2. Διάγραμμα ροής μονάδας τριπαραγωγής.	4
Σχήμα 2.1. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά έτος.	12
Σχήμα 2.2. Αριθμός δημοσιεύσεων ανά έτος σχετικών με τη συμπαραγωγή γενικά, και με το θέμα του διδακτορικού ειδικά, με πορτοκαλί και μαύρο χρώμα αντίστοιχα	13
Σχήμα 2.3. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά περιοδικό.	14
Σχήμα 2.4. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά περιοδικό και ανά έτος.	14
Σχήμα 2.5. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά χώρα.	15
Σχήμα 2.6. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά ίδρυμα δημοσίευσης.	16
Σχήμα 2.7. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά ίδρυμα χρηματοδότησης.	16
Σχήμα 2.8. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά συγγραφέα.	17
Σχήμα 4.1. Διαχρονική εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος συμπαραγωγής στην Ελλάδα για το διάστημα 2006-2021, σε MW, σύμφωνα με τα στοιχεία του ΛΑΓΗΕ.	31
Σχήμα 4.2. Διαχρονική εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος συμπαραγωγής στην Ελλάδα για το διάστημα 2006-2019, σε MW, σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat.	31
Σχήμα 4.3. Διαχρονική εξέλιξη ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘΥΑ στην Ελλάδα, σε GWh, σύμφωνα με τα στοιχεία του ΛΑΓΗΕ.	32
Σχήμα 4.4. Διαχρονική εξέλιξη μηνιαίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘΥΑ και κατανεμόμενες ΣΗΘΥΑ στην Ελλάδα, σε GWh.	33
Σχήμα 4.5. Διαχρονική εξέλιξη ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ, για το διάστημα 2006-2019, σε TWh, σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat.	34
Σχήμα 4.6. Διαχρονική εξέλιξη μεριδίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ από ηλεκτροπαραγωγούς και από αυτοπαραγωγούς, και ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ, σε TWh, για το διάστημα 2006-2019, σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat.	34
Σχήμα 4.7. Διαχρονική εξέλιξη εθνικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, σε TWh, και ποσοστό κάλυψής της από ΣΗΘΥΑ, και από ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ συνολικά στην Ελλάδα.	35
Σχήμα 4.8. Διαχρονική εξέλιξη της εγγυημένης τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή στην Ελλάδα για το διάστημα 2007-2021, σε €/MWh.	38
Σχήμα 4.9. Σύγκριση εξέλιξης εγγυημένης τιμής και εξέλιξης εγκατεστημένου ισχύος στην Ελλάδα για το διάστημα 2006-2021. Στον αριστερό άξονα y παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς, σε MW, και στον δεξιό άξονα y η FiT, σε €/MWh.	39
Σχήμα 4.10. Διαχρονική εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος και γεωγραφικής κατανομής εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα για το διάστημα 2006-2020.	40
Σχήμα 4.11. Διαχρονική εξέλιξη ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος συστημάτων ΣΗΘΥΑ με χρήση φυσικού αερίου, με κατανομή ανά μέγεθος μηχανής, σε MW, για το διάστημα 2014-2021.	41

Σχήμα 4.12. Δεδομένα εγκατεστημένης ισχύος με βάση τον τύπο κινητήρα του συστήματος ΣΗΘ για το έτος 2015, σε MW.	42
Σχήμα 4.13. Διαχρονική εξέλιξη ετήσιων μεριδίων χρήσης διαφορετικών καυσίμων και συνολική ετήσια κατανάλωση καυσίμου στα συστήματα ΣΗΘ που είναι σε λειτουργία στην Ελλάδα, για το διάστημα 2006-2019.	43
Σχήμα 4.14. Ποσοστό συμμετοχής της ΣΗΘ στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ το 2019 στις χώρες της Ευρώπης. Στον αριστερό άξονα y παρουσιάζεται το ποσοστό συμμετοχής και στον δεξιό άξονα y η ηλεκτρική ενέργεια σε TWh.	44
Σχήμα 4.15. Διαχρονική εξέλιξη ποσοστού συμμετοχής της ΣΗΘ στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, για το διάστημα 2006-2019.	45
Σχήμα 4.16. Διαχρονική εξέλιξη συνολικής ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, σε TWh.	45
Σχήμα 4.17. Διαχρονική εξέλιξη ποσοστού κάλυψης της κατανάλωσης ηλεκτρικής και συνολικής ενέργειας από ΑΠΕ στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, για το διάστημα 2006-2019. Η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και η διακεκομμένη στη συνολική κατανάλωση ενέργειας.	46
Σχήμα 4.18. Διαχρονική εξέλιξη τιμών ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, για το διάστημα 2008-2020.	47
Σχήμα 5.1. Διάγραμμα ροής πληροφοριών των επιλεγμένων βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs).	56
Σχήμα 5.2. Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Εγγυημένη τιμή πώλησης ηλεκτρισμού για σύστημα ΣΗΘ (Feed-in Tariffs), Ελλάδα, 2002–2018.	59
Σχήμα 5.3. Λόγος τιμής ηλεκτρικής ενέργειας προς φυσικού αερίου (spark ratio), Ελλάδα, 2002–2018.	59
Σχήμα 5.4. Διαχρονική εξέλιξη των KPIs για τα οκτώ έργα CHP της Αθήνας: (α) Τα διαγράμματα της πρώτης στήλης παρουσιάζουν τον μηνιαίο συντελεστή χρησιμοποίησης έναντι του ημερολογιακού μήνα όπου με μαύρο δηλώνονται οι μηνιαίες μέσες τιμές και με κόκκινο οι μέσες τιμές για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας. (β) Τα διαγράμματα της δεύτερης στήλης παρουσιάζουν την εξέλιξη του συντελεστή χρησιμοποίησης έναντι του χρόνου λειτουργίας, όπου με μαύρο δηλώνεται ο κινητός μέσος όρος των 12 μηνών και με κόκκινο ο μέσος όρος για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας. (γ) Τα διαγράμματα της τρίτης στήλης παρουσιάζουν την εξέλιξη της ανάκτησης κεφαλαίου έναντι του χρόνου λειτουργίας τόσο για τις περιπτώσεις του συστήματος υποστήριξης FiT (μαύρη γραμμή) όσο και για την ιδιοκατανάλωση (μωβ γραμμή). Οι επισημασμένες κουκκίδες αντιπροσωπεύουν το σημείο εκκίνησης της καμπύλης ανάκτησης κεφαλαίου, το σημείο ισορροπίας (break-even point) και το συνολικό CR_T στο τέλος της περιόδου ανάλυσης, όπως υποδεικνύεται από τις διακεκομμένες γραμμές, για την περίπτωση του FiT.	62 - 63
Σχήμα 5.5. Εξέλιξη της συνολικής ανάκτησης κεφαλαίου CR_T συναρτήσει του χρόνου για τα οκτώ εξεταζόμενα έργα ΣΗΘ της Αθήνας.	67
Σχήμα 5.6 Εξέλιξη του χρόνου πραγματικής λειτουργίας συναρτήσει του συνολικού χρόνου για τα οκτώ εξεταζόμενα έργα ΣΗΘ της Αθήνας.	68
Σχήμα 5.7 Εξέλιξη της συνολικής ανάκτησης κεφαλαίου CR_T συναρτήσει του χρόνου πραγματικής λειτουργίας για τα οκτώ εξεταζόμενα έργα ΣΗΘ της Αθήνας.	68
Σχήμα 5.8. Καμπύλη ανάκτησης κεφαλαίου για το έργο H2 όταν η ηλεκτρική απόδοση κυμαίνεται μεταξύ -5% και +5%.	69

Σχήμα 5.9. Μέση επιστροφή της επένδυσης για το συνολικό διάστημα λειτουργίας (ROI_T) για +/-5% διακύμανση της ηλεκτρικής και θερμικής απόδοσης του συστήματος και της απόδοσης του συμβατικού λέβητα.	70
Σχήμα 6.1. Διάγραμμα ροής διεργασίας.	77
Σχήμα 6.2. Χαρακτηριστικά σχεδιασμού συστήματος ΣΗΘ σε λειτουργία μερικού φορτίου.	79
Σχήμα 6.3. Διάγραμμα ροής πληροφοριών των επιλεγμένων βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs)	84
Σχήμα 6.4. Μηνιαίος συνολικός χρόνος λειτουργίας της ΣΗΘ.	85
Σχήμα 6.5. Ωριαίες τιμές των ελεγχόμενων παραμέτρων για ένα τυπικό 24ωρο της περιόδου θέρμανσης και ένα αντίστοιχο της περιόδου ψύξης.	86
Σχήμα 6.6. Μηνιαίες τιμές της ανακτώμενης θερμότητας σε κάθε εναλλάκτη θερμότητας.	86
Σχήμα 6.7. Μέσες μηνιαίες τιμές των οικονομικών παραμέτρων.	87
Σχήμα 6.8. Μηνιαίο ενεργειακό ισοζύγιο της ΣΗΘ.	88
Σχήμα 6.9. Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΣΗΘ και μηνιαία αποφευγόμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.	88
Σχήμα 6.10. Μηνιαία ανακτώμενη θερμότητα από το σύστημα ΣΗΘ.	89
Σχήμα 6.11. Μηνιαία αποφευγόμενη κατανάλωση φυσικού αερίου.	89
Σχήμα 6.12. Μηνιαίο ποσοστό κάλυψης ενεργειακών αναγκών από το σύστημα ΣΗΘ.	90
Σχήμα 6.13. Τιμές του συντελεστή χρησιμοποίησης συναρτήσει του χρόνου. Στο διάγραμμα (α) παρουσιάζονται οι ημερήσιες τιμές του CF και στο διάγραμμα (β) οι μηνιαίες τιμές μαζί με τον χρόνο λειτουργίας ως ποσοστό του συνολικού χρόνου της εξεταζόμενης περιόδου.	91
Σχήμα 6.14. Ημερήσιες τιμές βαθμών απόδοσης όπως προκύπτουν από τα πραγματικά στοιχεία λειτουργίας.	92
Σχήμα 6.15. Ωριαίες τιμές βαθμών απόδοσης όπως προκύπτουν από τα πραγματικά στοιχεία λειτουργίας.	93
Σχήμα 6.16. Ηλεκτρικός, θερμικός και συνολικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ισχύος σε μερικό φορτίο. Σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές του κατασκευαστή.	95
Σχήμα 6.17. Ωριαία κατανάλωση της μονάδας ΣΗΘ και ανάκτηση θερμικής ενέργειας συναρτήσει της ισχύος λειτουργίας. Σύγκριση με τα δεδομένα του κατασκευαστή και υπολογισμός προσαρμοσμένης γραμμικής εξίσωσης.	97
Σχήμα 6.18. Καμπύλες ηλεκτρικού, θερμικού και συνολικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου. Σύγκριση με τις αντίστοιχες κατασκευαστικές καμπύλες.	97
Σχήμα 6.19. Μέσες ωριαίες τιμές ισχύος λειτουργίας, σε KW.	99
Σχήμα 6.20. Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας νερού ψύξης χιτωνίων.	99
Σχήμα 6.21. Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας νερού στην έξοδο του εναλλάκτη E1 (T8) και στην έξοδο του εναλλάκτη E2 (T14).	100
Σχήμα 6.22. Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας των καυσαερίων που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα (T5).	100
Σχήμα 6.23. Μηνιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη ΣΗΘ, κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας όταν η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για	

θέρμανση και κόστος όταν χρησιμοποιείται για ψύξη. Σύγκριση με το συμβατικό κόστος ηλεκτρισμού από το δίκτυο και με την εγγυημένη τιμή πώλησης (FiT).

102

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 4.1. Εξέλιξη της εξίσωσης εγγυημένων τιμών για τον υπολογισμό της τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή για ΣΗΘΥΑ με χρήση φυσικού αερίου και ισχύ μικρότερη του 1MW.	36
Πίνακας 4.2. Μονάδες ΣΗΘΥΑ του μητρώου ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ.	40
Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων έργων ΣΗΘ που βρίσκονται σε λειτουργία, 2019, Αθήνα, Ελλάδα.	60
Πίνακας 5.2. Απόδοση των οκτώ εξεταζόμενων έργων ΣΗΘ της Αθήνας.	66
Πίνακας 6.1. Χαρακτηριστικά σχεδιασμού συστήματος συμπαραγωγής σύμφωνα με τον κατασκευαστή.	78

Περίληψη

Η Συμπαραγωγή ενέργειας αποτελεί μια τεχνολογία παραγωγής ενέργειας ευρέως γνωστή και διαδεδομένη. Το σύστημα συμπαραγωγής ανακτά και αξιοποιεί τη θερμότητα που παράγεται σε διάφορα μέρη μίας μηχανής που παράγει ηλεκτρισμό, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση των ενεργειακών απωλειών και αύξηση της απόδοσης της διεργασίας. Τα κτίρια του τριτογενή τομέα και ιδιαίτερα τα νοσοκομεία παρουσιάζουν ιδανικές συνθήκες για την εφαρμογή του συστήματος. Ωστόσο, παρά τα σημαντικά περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη που προσφέρει η συμπαραγωγή, στην Ελλάδα τα επίπεδα διείσδυσης της τεχνολογίας παραμένουν πολύ χαμηλά.

Το επιστημονικό αντικείμενο της διατριβής αφορά στην τεχνικοοικονομική αξιολόγηση συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ΣΗΘ/CHP), ή και ψύξης (ΣΗΘΨ/CCHP), γνωστά ως συστήματα τριπαραγωγής, τα οποία βρίσκονται σε λειτουργία. Η διατριβή επικεντρώθηκε στη συλλογή και την ανάλυση των πραγματικών δεδομένων λειτουργίας και κατόπιν στην αξιολόγηση της απόδοσης σε σχέση και με τα δεδομένα σχεδιασμού. Παράλληλα, επιχειρήθηκε η διερεύνηση των αιτιών που εμποδίζουν τη διείσδυση της συμπαραγωγής στην Ελλάδα μέσα από την αξιολόγηση των υφιστάμενων έργων.

Στο πρώτο μέρος, διαμορφώθηκε μια συστηματική μέθοδος αξιολόγησης της οικονομικής λειτουργικής απόδοσης των υφιστάμενων συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP) ή και ψύξης (CCHP), η οποία βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα λειτουργίας. Για τον σκοπό αυτόν επιλέχθηκαν δύο βασικοί δείκτες απόδοσης για την αξιολόγηση τόσο της τεχνικής όσο και της οικονομικής απόδοσης, ο συντελεστής χρησιμοποίησης και η ανάκτηση κεφαλαίου. Η μέθοδος κατόπιν εφαρμόστηκε για την αξιολόγηση οκτώ έργων συμπαραγωγής που λειτουργούν στην Αθήνα. Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν με σκοπό να αποκαλυφθεί η τρέχουσα κατάσταση της ΣΗΘ στην Ελλάδα. Πραγματοποιήθηκε, επίσης, ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να ελεγχθεί η εγκυρότητα των βασικών παραδοχών και να ελεγχθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Από την ανάλυση

προέκυψαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα. Μόνο δύο από τα οκτώ έργα κατάφεραν να επιτύχουν πλήρη ανάκτηση κεφαλαίου σε λιγότερο από τέσσερα χρόνια από την έναρξη της λειτουργίας τους, ενώ σε πολλές περιπτώσεις παρατηρήθηκαν φαινόμενα υπερδιαστασιολόγησης που οδηγούσαν σε εξαιρετικά χαμηλούς συντελεστές χρησιμοποίησης. Η καθυστέρηση στην ανάκτηση κεφαλαίου είναι τελικά και ο βασικότερος λόγος που καθιστά μια τέτοια επένδυση λιγότερο ελκυστική.

Στο δεύτερο μέρος, παρουσιάστηκε η αξιολόγηση της τεχνοοικονομικής απόδοσης ενός συστήματος τριπαραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης (CCHP) που έχει εγκατασταθεί σε ένα νοσοκομείο στην Αθήνα. Στόχος ήταν η επαλήθευση των προτύπων απόδοσης και η αξιολόγηση της πραγματικής συμπεριφοράς, ενώ επισημάνθηκαν και τα οικονομικά οφέλη. Η απόδοση του συστήματος αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας πραγματικές μετρήσεις πεδίου διάρκειας ενός έτους. Τα δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν για τον υπολογισμό της ανακτημένης θερμότητας και της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, μοντελοποιήθηκε η απόδοση και συγκρίθηκε με τις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Η οικονομική αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε μέσω ανάλυσης κόστους ενέργειας για την επαλήθευση της βιωσιμότητας λειτουργίας του συστήματος, τόσο για την λειτουργία θέρμανσης όσο και ψύξης. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, συνολικά, μετά από οκτώ χρόνια λειτουργίας, η ενεργειακή απόδοση εξακολουθεί να είναι κοντά στα πρότυπα σχεδιασμού. Η ηλεκτρική απόδοση είναι συνεχώς πάνω από 30%, ενώ η θερμική απόδοση περίπου 40-45%. Η συνολική απόδοση είναι συνήθως πάνω από το όριο του 75% που χαρακτηρίζει το σύστημα ως πλήρως συμπαραγωγικό. Η ανάλυση επισήμανε, επίσης, την οικονομική αποτελεσματικότητα του συστήματος στην ελληνική αγορά ενέργειας. Τα αποτελέσματα επαλήθευσαν τις δυνατότητες ενός συστήματος CCHP για τη βελτίωση της ενεργειακής και οικονομικής απόδοσης ενός κτιρίου.

Από τις παραπάνω αναλύσεις προέκυψε το κύριο συμπέρασμα ότι το μέγεθος της μονάδας είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία του συστήματος. Επιπλέον, το πρόγραμμα λειτουργίας θα πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιείται ο συντελεστής χρησιμοποίησης. Έτσι, η μονάδα θα μπορεί να χρησιμοποιείται στο μέγιστο των δυνατοτήτων της εξασφαλίζοντας υψηλούς βαθμούς απόδοσης καθώς και τη μέγιστη δυνατή ανάκτηση κεφαλαίου, καθιστώντας την επένδυση οικονομικά συμφέρουσα.

Abstract

Cogeneration is a well-known and widespread energy production technology. The cogeneration system recovers and utilizes the heat generated in various parts of a machine that generates electricity. This significantly reduces energy losses and increases the efficiency of the energy production process. The buildings of the tertiary sector and especially the hospitals present ideal conditions for the implementation of the system. However, despite the significant environmental and economic benefits offered by cogeneration, the levels of technology penetration in Greece remain very low.

The scientific object of the thesis concerns the technical and economic evaluation of electricity and heat cogeneration systems (CHP) or electricity, heat and cooling cogeneration systems (CCHP), known as trigeneration systems, which are in operation. The thesis focused on the collection and analysis of actual operating data and afterwards on the evaluation of performance in relation to design data. At the same time, an attempt was made to investigate the causes that prevent the penetration of cogeneration in Greece, through the evaluation of existing projects.

In the first part, a systematic method to evaluate the economic operating performance of existing combined heat and power (CHP) or combined cooling heat and power (CCHP) generation systems was developed. Two key performance indicators were selected to evaluate both the technical and the economic performance, based on operating recording data; the capacity factor and the capital recovery. The method was then applied to evaluate eight cogeneration projects operating in Athens with the purpose to reveal the current situation of CHP in Greece and identify reasons that are hindering its penetration. A sensitivity analysis was also performed to check the validity of the key assumptions and to verify the accuracy of the results. Interesting conclusions were reached from the analysis. Only two out of the eight projects managed to achieve the break-even point in less than four years since the beginning of their operation, while oversizing phenomena were noticed in

many cases leading in extremely low capacity factors. Delay in capital recovery is ultimately the main reason that makes such an investment less attractive.

In the second part, the evaluation of the techno-economic efficiency of a combined power, heat and cooling system (CCHP) system that has been installed in a hospital in Athens was presented. The aim was to verify performance standards and evaluate actual behavior, while highlighting the financial benefits. System performance was evaluated using real one-year field measurements. The data were used to calculate the recovered heat and the produced electricity. In addition, the real performance was modeled and compared to the manufacturer's specifications. The economic evaluation was carried out through energy cost analysis to verify the viability of the system, both for heating and cooling functions. The results showed that, overall, after eight years of operation, energy efficiency is still close to design standards. The electrical efficiency is constantly over 30%, while the thermal efficiency is about 40-45%. The overall efficiency is usually above the 75% limit that characterizes the system as fully CHP. The analysis also pointed out the economic efficiency of the system in the Greek energy market. The results verified the potential of a CCHP system to improve the energy and economic efficiency of a building.

From the above analysis the main conclusion that emerged is that the size of the unit is vital to the success of the system. In addition, the operating schedule should be designed to maximize the capacity factor. Thus, the unit will be able to be used to its maximum potential ensuring high rates of return and the maximum possible return on capital, making the investment financially profitable.

1.

Εισαγωγή

1.1 Η εξεταζόμενη διεργασία

Η ενέργεια είναι ένα από τα βασικότερα και απαραίτητα αγαθά για την ανθρώπινη ύπαρξη και δραστηριότητα. Καθώς η ζήτηση ενέργειας αυξάνεται μαζί με τις ανησυχίες για την κλιματική αλλαγή, είναι επιτακτική η ανάγκη στροφής προς πιο βιώσιμα και φιλικά προς το περιβάλλον ενεργειακά συστήματα.

Ο κτιριακός και ειδικότερα ο τριτογενής τομέας είναι υπεύθυνος για το 32% της ενεργειακής κατανάλωσης παγκοσμίως [1]. Με την εξάντληση, ωστόσο, των πρώτων υλών παραγωγής ενέργειας κρίνεται απαραίτητη η εξοικονόμηση της ενεργειακής κατανάλωσης, η αποδοτικότερη αξιοποίηση των καυσίμων για την παραγωγή ενέργειας, καθώς και η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ανάγκη αυτή μεγαλώνει καθημερινά δεδομένης της οικονομικής κρίσης και της ανάγκης για ενεργειακή ανεξαρτησία.

Κατά τον συμβατικό τρόπο παραγωγής ηλεκτρικής ή μηχανικής ενέργειας καταναλώνεται μια ποσότητα καυσίμου, η οποία όμως αποδίδει μόνο κατά το ένα τρίτο ωφέλιμη ενέργεια ενώ η υπόλοιπη ενέργεια του καυσίμου αποβάλλεται στο περιβάλλον συνήθως με τη μορφή θερμότητας ή καυσαερίων. Με τη συμπαραγωγή ενέργειας, ένα μεγάλο μέρος αυτής της ενέργειας που δεν αξιοποιείται, μπορεί να ανακτηθεί και να

επαναχρησιμοποιηθεί για την κάλυψη άλλων ενεργειακών αναγκών, όπως θερμικών ή ψυκτικών [2, 3].

Η συμπαραγωγή ενέργειας, λοιπόν, δεν αποτελεί κάποια νέα τεχνολογία, ούτε σχετίζεται άμεσα με την εκμετάλλευση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Πρόκειται για μια σύνθετη ενεργειακή εφαρμογή, κατά την οποία επιτυγχάνεται με μία μόνο διεργασία ταυτόχρονη παραγωγή δύο ή περισσότερων μορφών ενέργειας αξιοποιώντας τις απώλειες από την παραγωγή μίας μορφής ενέργειας [4–6]. Αποτελεί μια πολύ καλή μέθοδο ενεργειακής μετατροπής, η οποία μας εξασφαλίζει την αξιοποίηση του ενεργειακού περιεχομένου του καυσίμου προς παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.

Η εφαρμογή της συμπαραγωγής, παρέχοντας τη δυνατότητα αξιοποίησης της μη ωφέλιμης ενέργειας που προκύπτει ως απώλεια κατά τη λειτουργία των συμβατικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, αυξάνει τον συνολικό βαθμό απόδοσης του ολοκληρωμένου συστήματος, ο οποίος από 30-45% που είναι κατά τη συμβατική παραγωγή, φτάνει με τη ΣΗΘ στο 80-85% [7–9]. Η σημαντική αυτή αύξηση της αποδοτικότητας προσφέρει οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, καθώς για την παραγωγή ίδιας ποσότητας ενέργειας επιτυγχάνεται εξοικονόμηση καυσίμων και μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων [10]. Η επιτόπια παραγωγή ενέργειας εξαλείφει τις απώλειες μεταφοράς και διανομής, με αποτέλεσμα επιπλέον εξοικονόμηση, ενώ παράλληλα προστατεύει από βλάβες στην παροχή ηλεκτρικού δικτύου [11–15]. Η παραγωγή ψύξης μπορεί να συμβάλει στην εκφόρτωση του εθνικού δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας, αναβάλλοντας τις επενδυτικές δαπάνες [16].

Επιπλέον, πέρα από την εξοικονόμηση που επιτυγχάνει, η εφαρμογή της ΣΗΘ προσφέρει και δυνατότητες οικονομικού κέρδους, αφού σε περίπτωση παραγωγής περίσσειας ηλεκτρικής ενέργειας αυτή μπορεί να πωλείται στο δίκτυο, κατόπιν συμφωνίας με την εταιρία παροχής, σε τιμή που ορίζεται στην ισχύουσα νομοθεσία. Σε αυτή την περίπτωση η σύνδεση με το δίκτυο είναι αμφίδρομη.

Η εφαρμογή συστήματος ΣΗΘ ως εφαρμογή εξοικονόμησης ενέργειας είναι σύμφωνη με τους στόχους της προστασίας του περιβάλλοντος και της εξασφάλισης ενεργειακού εφοδιασμού, όπως αναφέρεται, επίσης, στην Οδηγία 2018/2001/EK του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, τονίζοντας την αναγκαιότητα λήψης μέτρων που διασφαλίζουν την περαιτέρω αξιοποίηση του δυναμικού της συμπαραγωγής [17].

Ωστόσο, ορισμένα μειονεκτήματα εξακολουθούν να περιορίζουν την ευρεία διάδοση αυτών των συστημάτων. Τα κυριότερα είναι η αστάθεια των τιμών και το σχετικά υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, ειδικά όταν συνδυάζεται με αδύναμες χρηματοδοτικές ενισχύσεις ή διοικητικά εμπόδια [18–20].

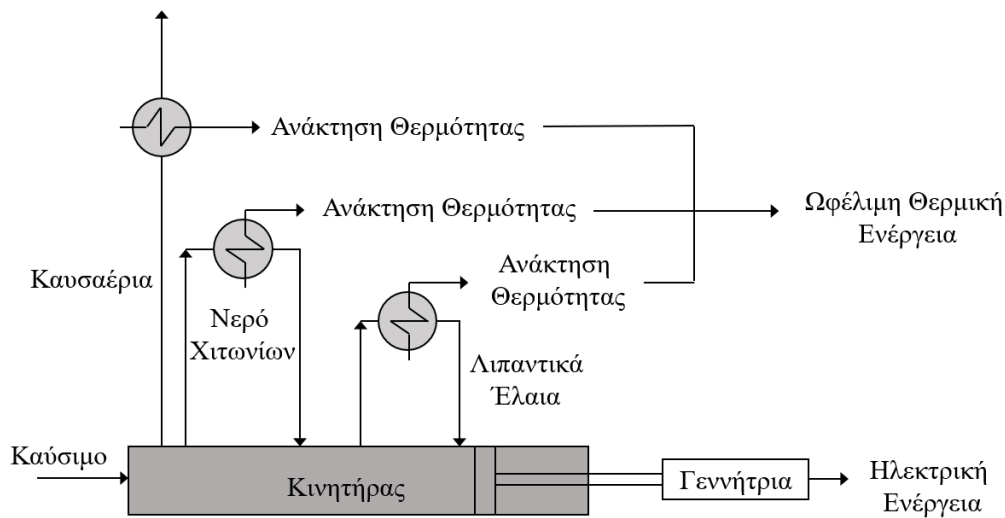
1.2 Λειτουργία συστήματος

Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας (ΣΗΘ) ορίζεται ως «Η ταυτόχρονη παραγωγή χρήσιμης θερμικής ενέργειας και ηλεκτρικής ή/και μηχανικής ενέργειας από την ίδια αρχική ενέργεια, στο πλαίσιο μόνο μίας διεργασίας», ενώ Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Αποδοτικότητας (ΣΗΘΥΑ) ορίζεται ως «Η συμπαραγωγή που εξασφαλίζει εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας σε ποσοστό τουλάχιστον 10%, σε σχέση με τη θερμική και ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται στο πλαίσιο διακριτών διαδικασιών, καθώς και η παραγωγή από Μονάδες Συμπαραγωγής Μικρής και Πολύ Μικρής Κλίμακας (με εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύ μικρότερη ή ίση του ενός MWe) που εξασφαλίζει εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας, ανεξάρτητα από το ποσοστό της εξοικονόμησης» [21].

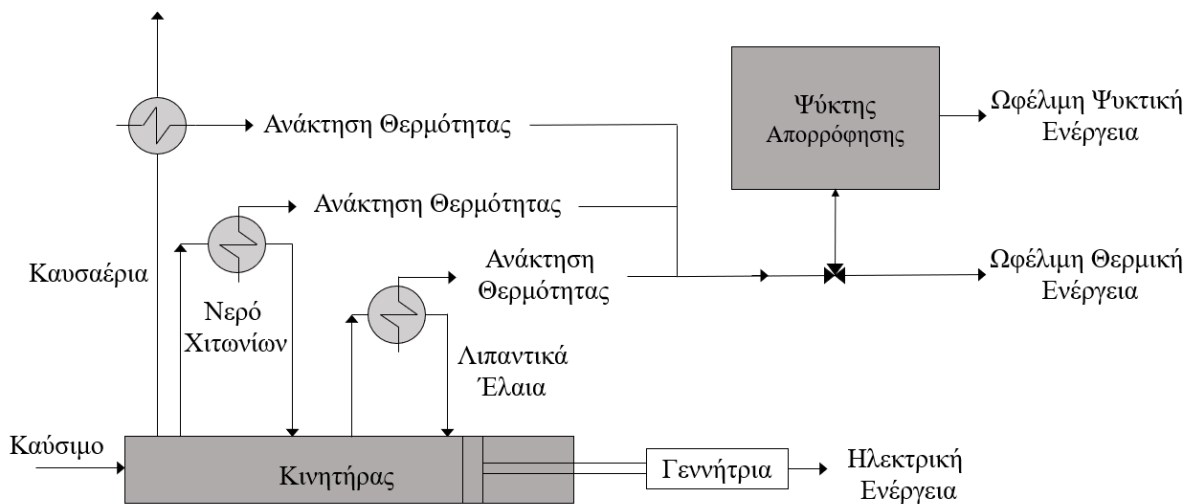
Η λειτουργία του συστήματος από μηχανική και ενεργειακή πλευρά έχει μελετηθεί εκτενώς στη βιβλιογραφία [22].

Ένα τυπικό σύστημα συμπαραγωγής αποτελείται από έναν κινητήρα, μία γεννήτρια και ένα σύστημα ανάκτησης θερμότητας. Ο κινητήρας παράγει μηχανικό έργο και θέτει σε λειτουργία τη γεννήτρια, η οποία μετατρέπει αυτό το μηχανικό έργο σε ηλεκτρική ενέργεια. Παράλληλα, η απορριπτόμενη θερμότητα των καυσαερίων και των υγρών της μηχανής ανακτάται μέσω εναλλακτών από το σύστημα ανάκτησης θερμότητας και αξιοποιείται για την κάλυψη των θερμικών αναγκών. Ένα τυπικό διάγραμμα ροής μίας μονάδας συμπαραγωγής παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Το σύστημα συμπαραγωγής ολοκληρώνεται με ένα σύστημα ελέγχου το οποίο παρακολουθεί και διασφαλίζει την αποτελεσματική λειτουργία της μονάδας [4, 7, 12, 23].

Στην περίπτωση της τριπαραγωγής, προστίθεται στο σύστημα και ένας ψύκτης απορρόφησης, ο οποίος παράγει ψυκτική ενέργεια, αξιοποιώντας την παραγόμενη από τον κινητήρα θερμότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.2 [3, 7, 23]. Η τριπαραγωγή (CCHP) έχει προσελκύσει μεγάλο ενδιαφέρον [24–26], ενώ από μελέτες συνάγεται το συμπέρασμα ότι, μέσα στις επόμενες δεκαετίες, οι τεχνολογίες αυτές μπορούν να ακμάσουν με τη συμβολή και τη συνεργασία των κυβερνήσεων, των σχετικών με την ενέργεια επιχειρήσεων, και των επαγγελματικών σωματείων [6]. Ειδικά στην περιοχή της Μεσογείου, όπου η ανάγκη για θέρμανση περιορίζεται στους χειμερινούς μήνες αλλά υπάρχει μια σημαντική ανάγκη για ψύξη την θερινή περίοδο, ο συνδυασμός της συμπαραγωγής με ψύκτες απορρόφησης για την κάλυψη και των φορτίων δροσισμού, μπορεί να αυξήσει κατά πολύ την απόδοση αυτών των συστημάτων και την τεχνική δυνατότητα της εφαρμογής τους σε κατοικίες και στον τριτογενή τομέα [10, 27, 28].



Σχήμα 1.1. Διάγραμμα ροής μονάδας συμπαραγωγής.



Σχήμα 1.2. Διάγραμμα ροής μονάδας τριπαραγωγής.

Εύλογα, οι μονάδες συμπαραγωγής κατατάσσονται ανάλογα με τον τύπο του κινητήρα, το είδος της γεννήτριας και το καύσιμο που καταναλώνεται. Η επιλογή του κατάλληλου κινητήρα είναι καθοριστική για την απόδοση και τη βέλτιστη λειτουργία του συστήματος. Το είδος και το μέγεθος των απαιτούμενων ενεργειακών φορτίων που προβλέπεται να καλύπτει το σύστημα είναι το βασικότερο στοιχείο που λαμβάνεται υπόψη [2]. Άλλοι παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή αυτή είναι η ποιότητα του διαθέσιμου καυσίμου, καθώς και η τιμή αγοράς και πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι πιο δημοφιλείς τύποι κινητήρων είναι οι μικροστρόβιλοι, οι μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), οι ατμοστρόβιλοι, οι αεροστρόβιλοι και τα συστήματα συνδυασμένου κύκλου [6, 29]. Σε εφαρμογές μικρο-συμπαγωγής, για φορτία δηλαδή μικρότερα από 35kWe, προτείνονται οι μικροστρόβιλοι, σε μεσαίες εφαρμογές χρησιμοποιούνται συνήθως ΜΕΚ, ενώ για μεγαλύτερα συστήματα πιο κατάλληλοι είναι οι ατμοστρόβιλοι και τα συστήματα συνδυασμένου κύκλου. Οι αεροστρόβιλοι χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές όπου το θερμικό φορτίο υπερβαίνει κατά πολύ το ηλεκτρικό, κυρίως στον βιομηχανικό τομέα. Στα συστήματα συμπαγωγής που χρησιμοποιούνται σήμερα σε εφαρμογές στον τριτογενή τομέα, ο κινητήρας είναι συνήθως μία μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) που καταναλώνει φυσικό αέριο. Όπου δεν υπάρχει δίκτυο φυσικού αερίου χρησιμοποιείται συνήθως μηχανή diesel [7, 21, 30].

1.3 Απόδοση συστήματος

Οι βαθμοί απόδοσης των συστημάτων συμπαγωγής ορίζονται ως:

$$n_e = \frac{E}{G} \quad (1.1)$$

$$n_{th} = \frac{Q}{G} \quad (1.2)$$

$$n_{tot} = n_e + n_{th} \quad (1.3)$$

όπου n_e (-) είναι η ηλεκτρική απόδοση, n_{th} (-) η θερμική απόδοση και n_{tot} (-) η συνολική απόδοση, ενώ E (kWh) είναι η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από συμπαγωγή, Q (kWh) η ωφέλιμη θερμική ενέργεια από συμπαγωγή και G (kWh) η κατανάλωση φυσικού αερίου συμπαγωγής [31].

Η αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων ΣΗΘ μπορεί να βασίζεται σε διάφορα κριτήρια τεχνικά, περιβαλλοντικά ή οικονομικά. Η τεχνική απόδοση αναλύεται ως προς την παραγωγή ενέργειας [32–39], ή σε άλλες περιπτώσεις, ως προς την ισχύ, βάσει του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου [24, 26, 33, 40, 41]. Τα περιβαλλοντικά κριτήρια μπορούν να λάβουν τη μορφή εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας και μείωσης των εκπομπών αερίων ρύπων [42–44], ενώ το λειτουργικό κόστος και ο απλός χρόνος αποπληρωμής είναι μερικά από τα κύρια οικονομικά κριτήρια [27, 45, 46]. Συχνά επιλέγεται ένας συνδυασμός των παραπάνω, αυξάνοντας την πολυπλοκότητα της ανάλυσης [47–53].

1.4 Επιλογή συστήματος. Βελτιστοποίηση διαστασιολόγησης και λειτουργίας συστήματος

Τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη της συμπαραγωγής είναι μεν σημαντικά, ωστόσο δεν μπορούν να εξασφαλίσουν την επιτυχία της επένδυσης. Για να θεωρηθεί μία επένδυση επιτυχής θα πρέπει τα έσοδα που αποφέρει να μπορούν να αποσβέσουν το αρχικό κόστος σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα.

Οι ανάγκες, βέβαια, διαφοροποιούνται σε κάθε εφαρμογή και πρέπει πολύ προσεκτικά να επιλεγθεί το σύστημα ΣΗΘ. Η επιλογή κατάλληλου συστήματος συμπαραγωγής για κάθε συγκεκριμένη εφαρμογή είναι μια σύνθετη διαδικασία, καθώς επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες. Αντίστοιχα, και η τελική απόδοση του συστήματος εξαρτάται από την επιλογή και την αλληλεπίδραση των μεμονωμένων στοιχείων. Η επιλογή τύπου κινητήρα, η σωστή διαστασιολόγηση της εγκατάστασης, η ρύθμιση του επιπέδου λειτουργίας, η ύπαρξη και ο τρόπος σύνδεσης με το δίκτυο ηλεκτρισμού, η ισχύουσα νομοθεσία και τιμολογιακή πολιτική, καθώς και το κόστος της εγκατάστασης, είναι παράγοντες ευμετάβλητοι που πρέπει να αξιολογηθούν κατά τον σχεδιασμό του συστήματος. Για αυτόν τον λόγο, κατά το στάδιο της προμελέτης εξετάζονται διάφορα σενάρια προκειμένου να βρεθεί το πιο κατάλληλο για την εκάστοτε εφαρμογή.

Οι πιο καθοριστικοί παράγοντες για την επιτυχία του συστήματος είναι οι ώρες λειτουργίας και τα φορτία που πρέπει να ικανοποιήσει. Η εμπειρία έχει δείξει ότι για να είναι συμφέρουσα μια επένδυση ΣΗΘ θα πρέπει η διαστασιολόγηση και ο σχεδιασμός της να είναι τέτοιος ώστε να δουλεύει όσο το δυνατόν περισσότερες ώρες ετησίως [54]. Σημαντικό είναι επίσης να μην υπάρχει μεγάλος ετεροχρονισμός μεταξύ των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων, καθώς αυτό θα απαιτούσε την ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης ενέργειας, το οποίο περιπλέκει τη λειτουργία, μειώνει τον συνολικό βαθμό απόδοσης και αυξάνει το κόστος της εγκατάστασης. Εάν δεν υπάρχει αποθήκευση, η ωφέλιμη ενέργεια που δεν αξιοποιείται αναγκαστικά απορρίπτεται στο περιβάλλον [2].

Η διαδικασία επιλογής μεγέθους της μηχανής είναι σημαντική και καθοριστική για την τελική απόδοση του συστήματος. Μια πολύ συντηρητική διαστασιολόγηση μειώνει τις δυνατότητες αποδιδόμενης ισχύος, άρα και τη συμβολή του συστήματος στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Αντίθετα, με την υπερδιαστασιολόγηση το σύστημα καταλήγει να δουλεύει συνεχώς σε μερικό φορτίο ή να απορρίπτει ενέργεια στο περιβάλλον με αποτέλεσμα να μειώνεται η απόδοση [35].

Πέρα από τα απαιτούμενα φορτία, η επιλογή μεγέθους και η τελική απόδοση του συστήματος εξαρτάται από τις τιμές των καυσίμων και την ενεργειακή πολιτική του κάθε κράτους, καθιστώντας ακόμα πιο σύνθετη τη διαδικασία επιλογής του βέλτιστου συστήματος. Η επιρροή των αρχικών παραμέτρων, που περιλαμβάνουν τις τεχνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους, τα ενεργειακά φορτία και τις παραμέτρους βελτιστοποίησης, καθορίζουν τις βέλτιστες μεταβλητές απόφασης και τις αποδόσεις του συστήματος. Η βαρύτητα που δίνεται στα κριτήρια απόφασης επηρεάζει άμεσα τα αποτελέσματα βελτιστοποίησης [38].

Σε αρκετές περιπτώσεις, οι πιθανοί συνδυασμοί είναι πολλοί και έτσι έχουν αναπτυχθεί διάφορες μέθοδοι ανάλυσης και υπολογιστικά προγράμματα για την ανίχνευση του βέλτιστου συστήματος, τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους όσον αφορά στο εύρος εφαρμογής τους αλλά και στο βάθος της ανάλυσης. Ο μαθηματικός προγραμματισμός (Mathematical programming) και, ιδίως, τα γραμμικά πρότυπα προγραμματισμού είναι το παραδοσιακό εργαλείο, κυρίως στα προβλήματα ελαχιστοποίησης δαπανών που υπόκεινται σε συγκεκριμένους τεχνολογικούς, πολιτικούς και ενεργειακούς περιορισμούς. Στη βιβλιογραφία υπάρχει πληθώρα μελετών σχετικών με την ανάπτυξη μεθόδων επιλογής, διαστασιολόγησης και βελτιστοποίησης συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής [26, 35, 38, 39, 51, 55, 56].

Το σύστημα συμπαραγωγής μπορεί να σχεδιαστεί έχοντας ως προτεραιότητα την κάλυψη των ηλεκτρικών φορτίων ή την κάλυψη των θερμικών φορτίων. Στην πρώτη περίπτωση, ονομάζεται «σύστημα κορυφής» και η λειτουργία του ρυθμίζεται ώστε να παράγει ποσότητα ηλεκτρισμού ίση με το ηλεκτρικό φορτίο (following electric load – FEL). Η παραγόμενη θερμότητα αξιοποιείται για θέρμανση και ζεστό νερό. Αν δεν επαρκεί, προβλέπεται η χρήση ενός βοηθητικού λέβητα, ενώ αν περισσεύει μπορεί να αξιοποιηθεί και για ψύξη. Στη δεύτερη περίπτωση, το σύστημα ονομάζεται «σύστημα βάσης» και σχεδιάζεται έτσι ώστε να λειτουργεί όσο χρειάζεται για να παράγει θερμότητα ανάλογη με το θερμικό φορτίο (following thermal load – FTL). Η ηλεκτρική ενέργεια αξιοποιείται για να καλύψει το ηλεκτρικό φορτίο. Σε περίπτωση έλλειψης, οι ανάγκες συμπληρώνονται από το ηλεκτρικό δίκτυο, ενώ σε περίπτωση περίσσειας, η περισσευούμενη ηλεκτρική ενέργεια πωλείται στο δίκτυο. Το σύστημα αυτό είναι το καταλληλότερο για εφαρμογές στον τριτογενή τομέα βελτιστοποιώντας την ενεργειακή και οικονομική απόδοση. Εναλλακτικά, η μονάδα συμπαραγωγής μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να καλύπτει πλήρως και το ηλεκτρικό και το θερμικό φορτίο, προσφέροντας πλήρη ανεξαρτησία [2, 7, 21].

Ο αναλυτικός προγραμματισμός της λειτουργίας της μηχανής σε ωριαίο επίπεδο είναι απαραίτητος για τον ακριβή προσδιορισμό της απόδοσης του συστήματος και της εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους. Προκειμένου να ληφθούν οι βέλτιστες αποφάσεις σχετικά με την επένδυση και τη λειτουργία της συμπαραγωγής απαιτούνται λεπτομερή πρότυπα συστημάτων. Αυτά τα πρότυπα διατυπώνονται συχνά ως γραμμικά προβλήματα προγραμματισμού για να κρατήσουν τις υπολογιστικές δαπάνες και την πολυπλοκότητα σε μια λογική σειρά. Εντούτοις, τα συστήματα CHP έχουν πιο σύνθετη συμπεριφορά λόγω της διακύμανσης της απόδοσης σε μερικό φορτίο, η οποία μπορεί να είναι ακόμη και μη γραμμικής φύσης. Για να εφαρμόσουν τεχνολογίες CHP σε χρονικώς μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα, οι ερευνητές είτε χρησιμοποιούν σταθερές αποδόσεις για να απλοποιήσουν το πρότυπό τους και να το κρατήσουν γραμμικό, είτε εξετάζουν τις μη γραμμικές αποδόσεις με μη γραμμικά πρότυπα. Ενώ η πρώτη προσέγγιση μπορεί να οδηγήσει σε μη-βέλτιστα αποτελέσματα λόγω της υπεραπλοποίησης, η δεύτερη μπορεί να αυξήσει εντυπωσιακά τις υπολογιστικές δαπάνες ή να μην βρει λύση λόγω της πολυπλοκότητας του προτύπου [57].

Ένα βήμα περαιτέρω είναι η εφαρμογή προσομοιωτικών προγραμμάτων δυναμικής ανάλυσης της ενεργειακής συμπεριφοράς και απόδοσης των κτιρίων, σε συνδυασμό με μαθηματικές διαδικασίες βελτιστοποίησης για τον προσδιορισμό των ενεργειακών φορτίων και της τελικής απόδοσης του συστήματος. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο είναι το TRNSYS building energy simulation tool [26, 37].

1.5 Εφαρμογή στον τριτογενή τομέα. Νοσοκομεία

Η επιτυχία του συστήματος σχετίζεται στενά με τον αριθμό των ωρών λειτουργίας [58]. Τα κτίρια του τριτογενούς τομέα έχουν συνεχείς ενεργειακές απαιτήσεις καθημερινά και ετησίως, ενθαρρύνοντας έτσι την εφαρμογή συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής. Τα νοσοκομεία ανήκουν σε αυτή την κατηγορία λόγω της πολύωρης και απαιτητικής λειτουργίας τους [11, 59].

Τα νοσοκομεία που φιλοξενούν νοσηλεύμενους ασθενείς λειτουργούν, εκτός απρόοπτων, όλο το εικοσιτετράωρο και καθ' όλη τη διάρκεια του χρόνου με συνεχείς και ταυτόχρονες ανάγκες θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου. Τα φορτία αυτά δεν επηρεάζονται ιδιαίτερα από την πληρότητα, καθώς οι απαιτούμενες επικρατούσες συνθήκες μέσα στο νοσοκομείο είναι προκαθορισμένες, ενώ δεν παρουσιάζουν μεγάλη διαφορά χρονικής φάσης μεταξύ τους. Η συνεχής ανάγκη για θέρμανση και ηλεκτρισμό καθιστά, επίσης, απαραίτητη την ύπαρξη εφεδρικής γεννήτριας για την κάλυψη των αναγκών σε περίπτωση

διακοπής της παροχής λόγω βλάβης στο δίκτυο [15, 27, 60].

Με βάση τα παραπάνω, τα νοσοκομεία πληρούν τις βασικές προϋποθέσεις για την αποδοτική λειτουργία μιας μονάδας συμπαραγωγής. Το μέγεθος και η χρονική διασπορά των φορτίων εξασφαλίζουν την ανάγκη λειτουργίας της μονάδας πάνω από 4.000 ώρες ετησίως, ενώ ο πιθανός ετεροχρονισμός τους είναι τόσο μικρός που δεν απαιτεί την εγκατάσταση συστήματος αποθήκευσης ενέργειας. Η συμπαραγωγή, εφόσον σχεδιαστεί σωστά, θα μπορούσε να αποδεχτεί ιδανική λύση εξοικονόμησης ενέργειας και χρημάτων, ενώ τα έσοδα θα βοηθήσουν για τη βελτίωση των υπηρεσιών στους νοσηλευόμενους [5, 11, 26].

Σε πολλές περιπτώσεις στη διεθνή βιβλιογραφία εξετάζεται η εφαρμογή συστημάτων συμπαραγωγής και τριπαραγωγής σε νοσοκομεία [52, 53, 61, 62]. Οι Thilak Raj et al [12] επέλεξαν ένα νοσοκομείο για τη μελέτη τους με στόχο την ανάδειξη της βιωσιμότητας και των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων της συμπαραγωγής. Οι Lozano et al [27] εξέτασαν την περίπτωση εφαρμογής συστήματος τριπαραγωγής που θα εξυπηρετεί τις ανάγκες ενός νοσοκομείου 500 κλινών στη Σαραγόσα της Ισπανίας, στο πλαίσιο ενίσχυσης αποδοτικότερων ενεργειακών υπηρεσιών. Οι Renedo et al [63] μελέτησαν διάφορους τρόπους κάλυψης των ενεργειακών αναγκών ενός νοσοκομειακού συγκροτήματος στην Ισπανία, και εξέτασαν διάφορα συστήματα συμπαραγωγής με μηχανές αερίου, μηχανές diesel, και τουρμπίνες. Από τα αποτελέσματα προκύπτει ότι οι βασικοί παράγοντες επιρροής της ενεργειακής απόδοσης είναι το μέγεθος της εγκατάστασης και η στρατηγική λειτουργίας. Οι Ziher et al [60] διερεύνησαν από οικονομικής πλευράς την περίπτωση εφαρμογής συστήματος τριπαραγωγής με αεριοστρόβιλο και ψύκτες απορρόφησης σε ένα από τα μεγαλύτερα νοσοκομεία της Σλοβενίας. Ένα νοσοκομείο 714 κλινών στην ιταλική πόλη Πάρμα επέλεξαν οι Pagliarini et al [26] για την εγκατάσταση ενός συστήματος τριπαραγωγής, η διαστασιολόγηση του οποίου έγινε με τη βοήθεια του προσομοιωτικού προγράμματος TRNSYS. Οι Li et al [36] πραγματοποίησαν ανάλυση ευαισθησίας για να εξεταστεί ο βαθμός επιρροής της διακύμανσης των ενεργειακών αναγκών στην απόδοση ενός συστήματος CCHP που θα εξυπηρετεί ένα νοσοκομείο. Οι Ruan et al [59] έκαναν μία ανάλυση των χαρακτηριστικών κατανάλωσης ενέργειας τεσσάρων χαρακτηριστικών εμπορικών κτηρίων στην Ιαπωνία, και προσομοιώθηκαν οι ενεργειακές αποδόσεις τεσσάρων ευρέως υιοθετημένων ενεργειακών συστημάτων για διάφορους τρόπους λειτουργίας. Τα διάφορα σενάρια αξιολογήθηκαν και συγκρίθηκαν ως προς την αποδοτικότητα ενεργειακής αξιοποίησης, την εξοικονόμηση ενέργειας, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς επίσης και την οικονομική απόδοση. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα

ξενοδοχεία και τα νοσοκομεία είναι ελκυστικότερα για μια επένδυση συμπαραγωγής λόγω των σταθερών θερμικών απαιτήσεων τους και της ευνοϊκής αναλογίας φορτίων θερμότητας/ηλεκτρισμού, η οποία είναι η πιο συμβατή σε σχέση με τις διαθέσιμες τεχνολογίες. Οι Costa et al [56] ανέπτυξαν ένα μοντέλο προγραμματισμού και οικονομικής αξιολόγησης συστημάτων συμπαραγωγής με εφαρμογή σε νοσοκομεία, όπως και οι Silveira et al [64] που ανέπτυξαν ένα μοντέλο βελτιστοποίησης και αξιολόγησης για την εφαρμογή συμπαραγωγής σε ένα πανεπιστημιακό νοσοκομείο, με τη μέθοδο των thermoeconomics. Οι Bizzarri et al [65] παρουσίασαν μια θεωρητική ανάλυση των περιβαλλοντικών πλεονεκτημάτων που επιτυγχάνονται από την αντικατάσταση του συμβατικού τρόπου παραγωγής ενέργειας με διάφορα υβριδικά συστήματα συμπαραγωγής. Η μελέτη έγινε για ένα νοσοκομείο στη Φεράρα της Ιταλίας. Και οι Buonomano et al [66] μελέτησαν τελευταίας τεχνολογίας υβριδικά συστήματα πολυπαραγωγής με χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, και τις δυνατότητες εφαρμογής τους στα πλαίσια ενεργειακής αναβάθμισης ενός πανεπιστημιακού νοσοκομείου στη Νάπολη.

2.

Βιβλιογραφική ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

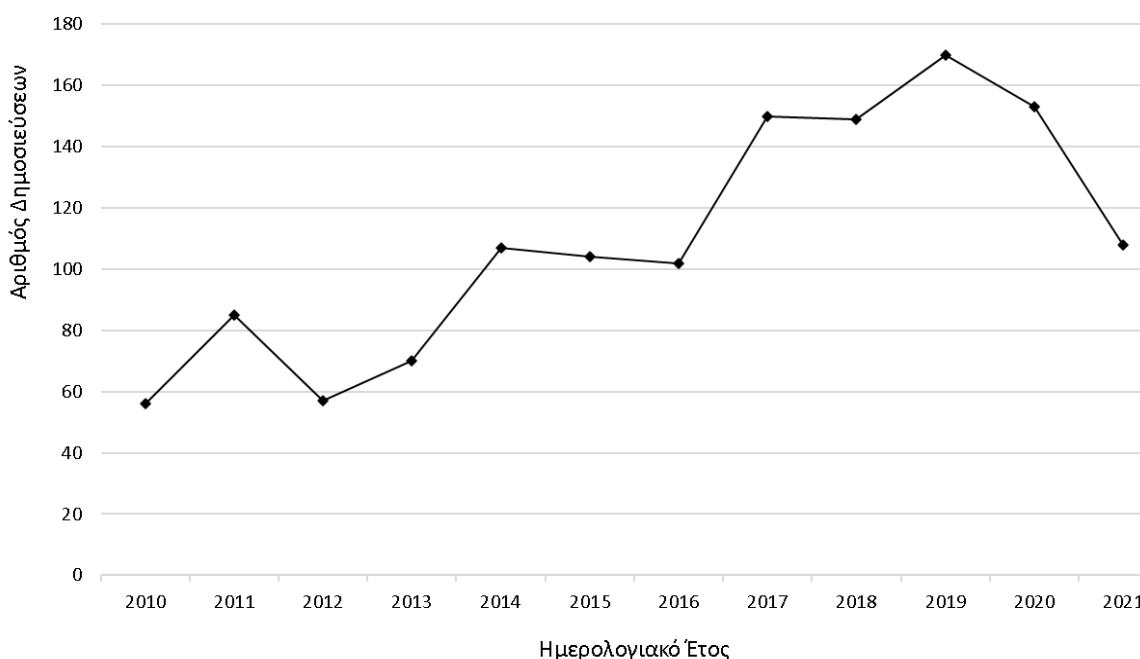
Η Συμπαραγωγή ως αντικείμενο ερευνάς είναι αρκετά δημοφιλής παρουσιάζοντας ιδιαίτερο ενδιαφέρον και αξιόλογες μελέτες. Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η ερευνητική τάση παγκοσμίως, αλλά και στην Ελλάδα, στον τομέα της συμπαραγωγής και πιο συγκεκριμένα στο αντικείμενο της τεχνικοοικονομικής αξιολόγησης συστημάτων, που αποτελεί το θέμα του διδακτορικού.

2.2 Η Συμπαραγωγή ως αντικείμενο έρευνας παγκοσμίως

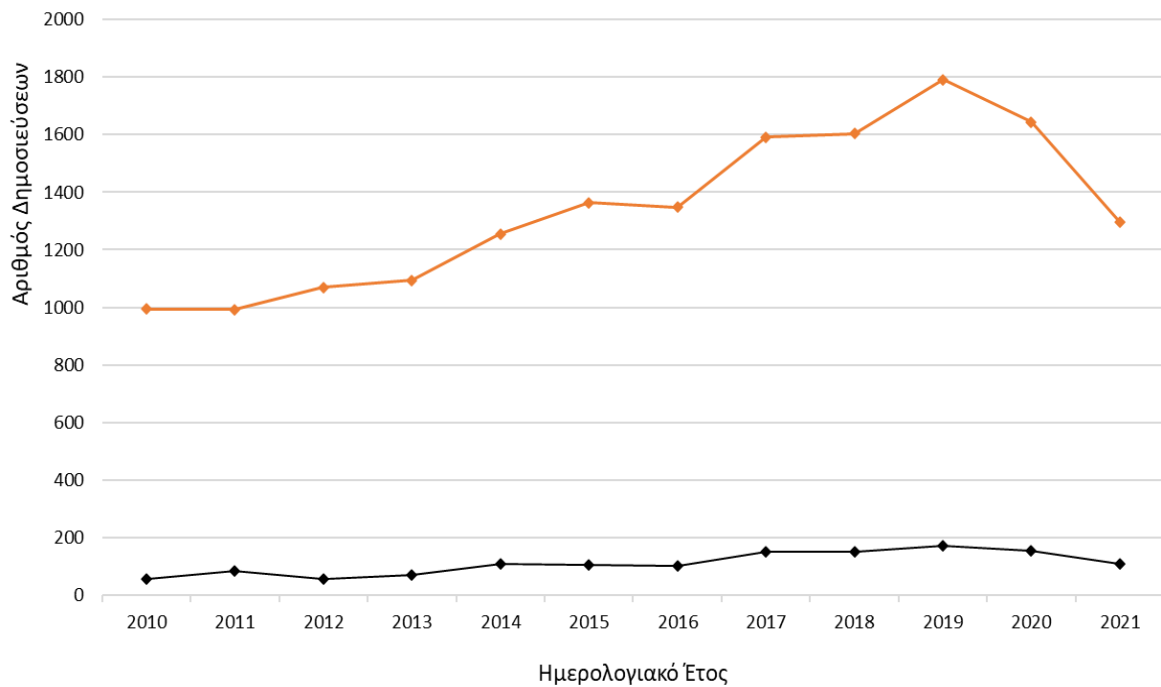
Μέσα από την βιβλιογραφική βάση δεδομένων “Scopus” πραγματοποιήθηκε η βιβλιογραφική ανασκόπηση και η ανάλυση των αποτελεσμάτων που παρουσιάζουν την ερευνητική τάση στον τομέα της συμπαραγωγής. Πιο συγκεκριμένα, μέσα από τη βάση προκύπτουν δεδομένα σχετικά με τα περιοδικά και τους συγγραφείς που ασχολούνται με συναφές αντικείμενο, με την ερευνητική δραστηριότητα ανά έτος και ανά χώρα, ενώ δίνονται και τα κέντρα τα οποία αποτελούν τις πιο συχνές πηγές χρηματοδότησης για σχετική έρευνα [67].

Επιλέγοντας τις κατάλληλες λέξεις-κλειδιά, σχετικές με το αντικείμενο μελέτης, και περιορίζοντας την αναζήτηση στο χρονικό διάστημα της τελευταίας δεκαετίας, η συνολική εικόνα που προέκυψε από την ανάλυση των αποτελεσμάτων απεικονίζεται στα Σχήματα 2.1– 2.8.

Στο Σχήμα 2.1, παρουσιάζεται ο αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά έτος, και στο Σχήμα 2.2 συγκρίνεται η ερευνητική δραστηριότητα που σχετίζεται με το θέμα του διδακτορικού με την ερευνητική δραστηριότητα γύρω από το ευρύτερο θέμα της συμπαραγωγής. Όπως φαίνεται, ένα μικρό μέρος, περίπου 10% της συνολικής ερευνητικής δραστηριότητας, απασχολείται με την αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων συμπαραγωγής σε λειτουργία. Η ερευνητική δραστηριότητα αυξάνεται διαχρονικά με περισσότερες από 100 δημοσιεύσεις ετησίως από το 2014, με κορύφωση το 2019 που ξεπέρασαν τις 160. Στο ευρύτερο αντικείμενο της συμπαραγωγής, το 2019 οι δημοσιεύσεις έφτασαν τις 1800.

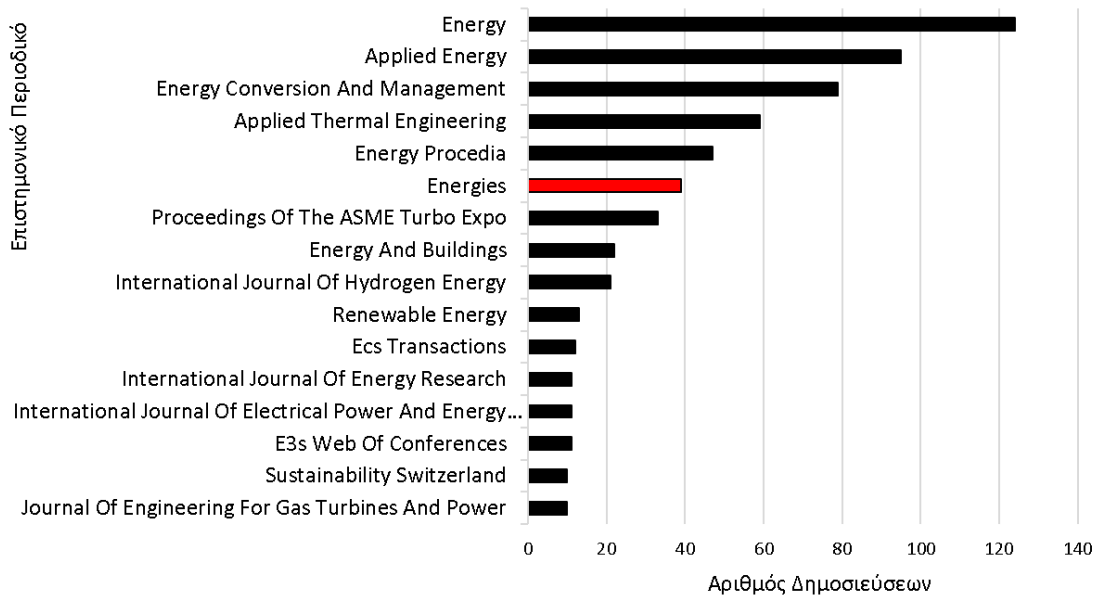


Σχήμα 2.1. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά έτος.

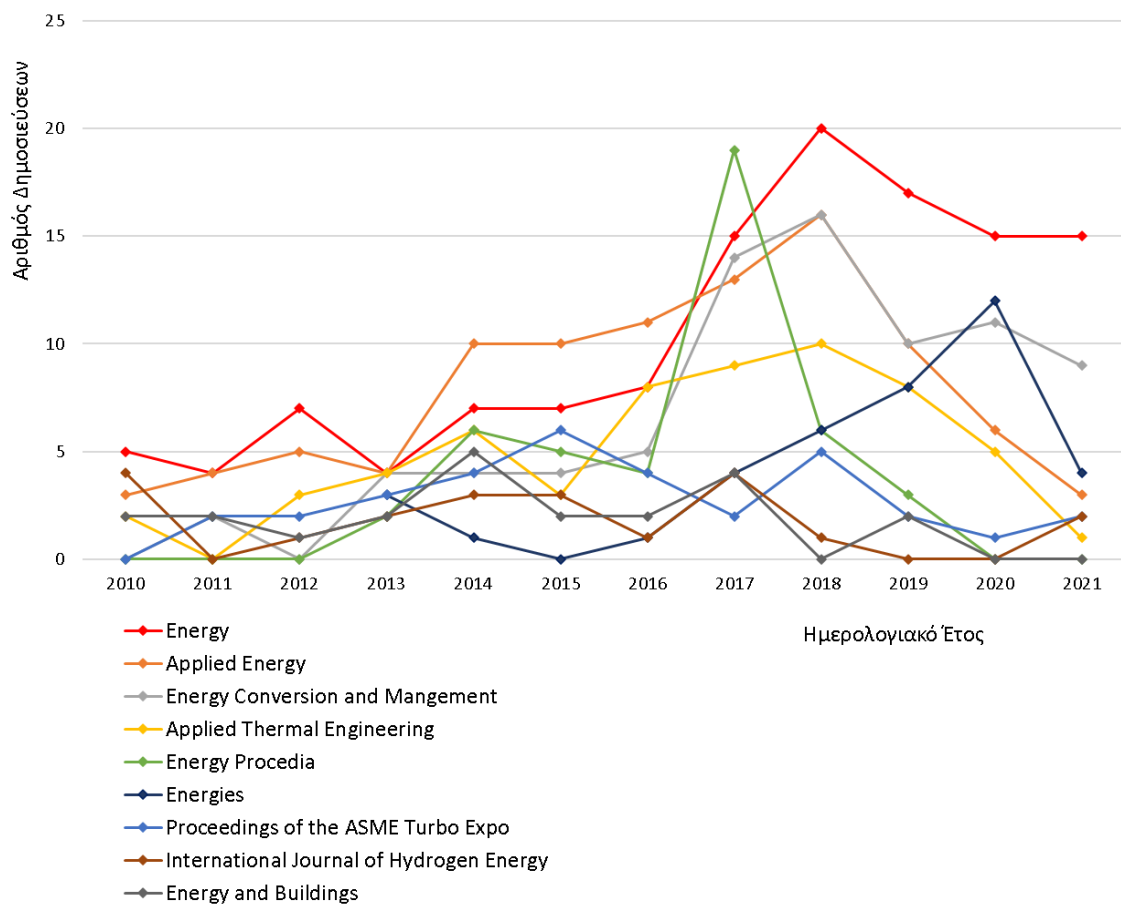


Σχήμα 2.2. Αριθμός δημοσιεύσεων ανά έτος σχετικών με τη συμπαραγωγή γενικά, και με το θέμα του διδακτορικού ειδικά, με πορτοκαλί και μαύρο χρώμα αντίστοιχα.

Τα περιοδικά όπου παρουσιάζονται οι περισσότερες δημοσιεύσεις σχετικά με τη συμπαραγωγή και συγκεκριμένα το θέμα του διδακτορικού παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.3 και αναλύονται ανά έτος στο Σχήμα 2.4. Τα έξι δημοφιλέστερα είναι τα Energy, Applied Energy, Energy Conversion and Management, Applied Thermal Engineering, Energy Procedia, και Energies. Το περιοδικό Energies επιλέχθηκε και για τη δημοσίευση των δύο ερευνητικών άρθρων σχετιζόμενων με το παρόν διδακτορικό. Οι δημοσιεύσεις αυξάνονται διαχρονικά φτάνοντας τις 20 ετησίως το 2018 στο περιοδικό Energy.

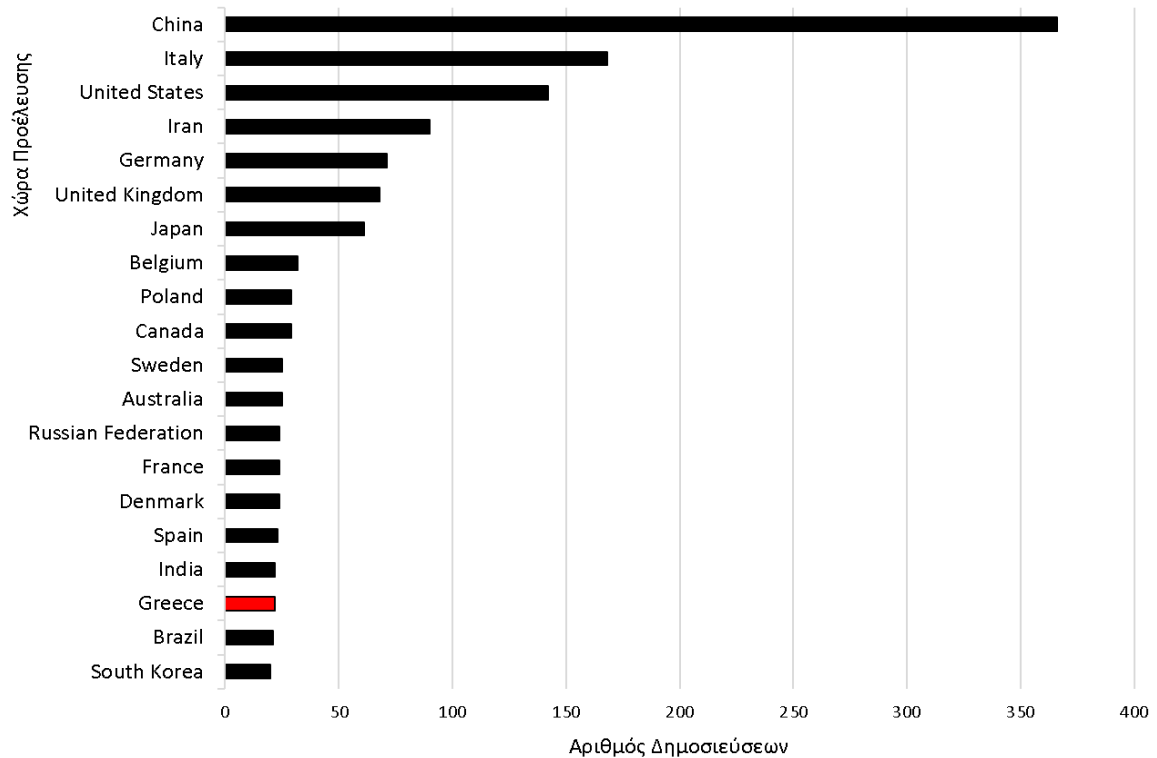


Σχήμα 2.3. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά περιοδικό.



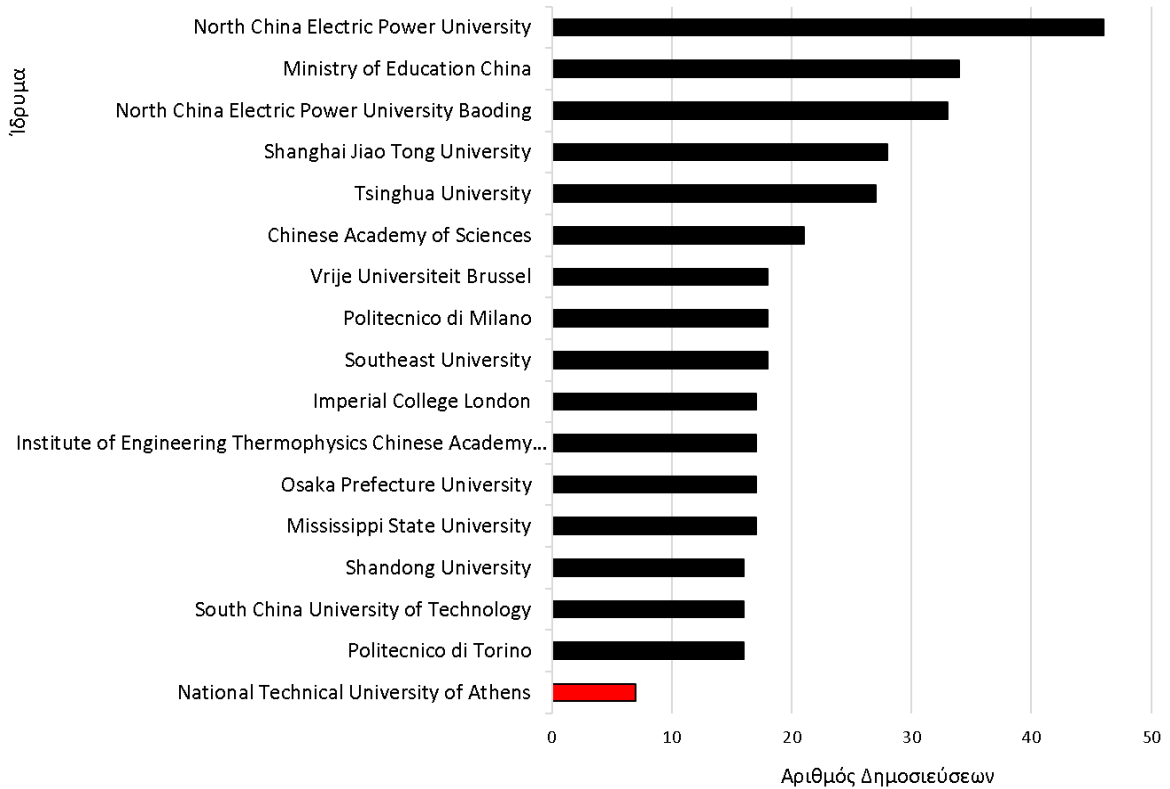
Σχήμα 2.4. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά περιοδικό και ανά έτος.

Στο Σχήμα 2.5, παρουσιάζεται ο αριθμός δημοσιεύσεων ανά χώρα την τελευταία δεκαετία. Τα πρωτεία κρατάει η Κίνα ξεπερνώντας τις 350 δημοσιεύσεις. Η Ιταλία φαίνεται ιδιαίτερα δραστήρια με περισσότερες από 150 δημοσιεύσεις, αναδεικνύοντας το ενδιαφέρον της εφαρμογής της συμπαραγωγής και τριπαραγωγής στην περιοχή της Μεσογείου. Πολύ κοντά είναι και οι ΗΠΑ. Η Ελλάδα βρίσκεται στη 18^η θέση με 22 δημοσιεύσεις που αφορούν στην αξιολόγηση της απόδοσης συστημάτων συμπαραγωγής σε λειτουργία.

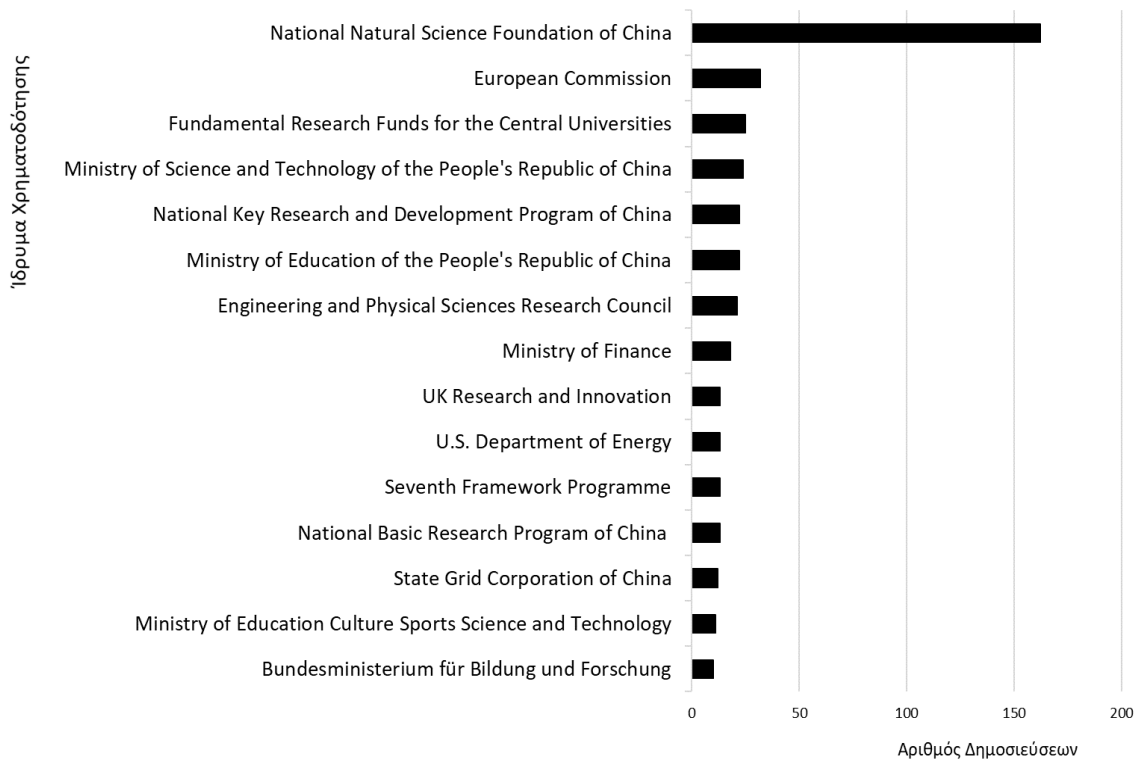


Σχήμα 2.5. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά χώρα.

Αναλυτικότερα, στο Σχήμα 2.6 και στο Σχήμα 2.7 φαίνεται ο αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το αντικείμενο του διδακτορικού για το διάστημα 2010-2021, ανά ίδρυμα που προέρχονται και ανά φορέα χρηματοδότησης αντίστοιχα. Εύλογα, στις πρώτες θέσεις βρίσκονται ιδρύματα από την Κίνα με κυρίαρχα τα πανεπιστήμια αλλά και το υπουργείο παιδείας. Στην 7^η θέση βρίσκονται πανεπιστήμια από τις Βρυξέλλες και την Ιταλία με 18 δημοσιεύσεις. Το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο είναι υπεύθυνο για 7. Αντίστοιχα, στους φορείς χρηματοδότησης στην πρώτη θέση με μεγάλη διαφορά είναι ερευνητικός φορέας από την Κίνα, ενώ στη δεύτερη θέση είναι η Ευρωπαϊκή Ένωση, η οποία έχει χρηματοδοτήσει την έρευνα για 32 άρθρα. Στις επόμενες θέσεις είναι εκπαιδευτικά κέντρα χρηματοδότησης ή ιδρύματα και υπουργεία από την Κίνα. Στην 7^η και την 9^η θέση βρίσκονται ιδρύματα από τη Μεγάλη Βρετανία τα οποία έχουν χρηματοδοτήσει την έρευνα για 34 συνολικά άρθρα.

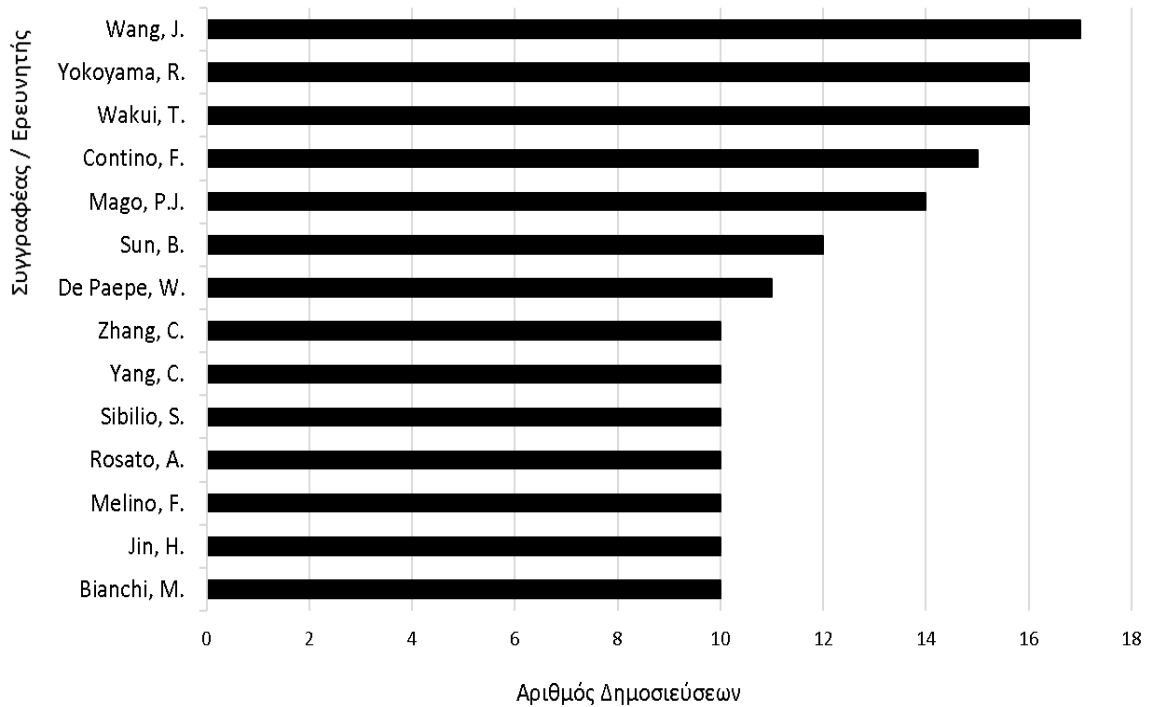


Σχήμα 2.6. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά ίδρυμα δημοσίευσης.



Σχήμα 2.7. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά ίδρυμα χρηματοδότησης.

Στο Σχήμα 2.8, παρουσιάζονται οι συγγραφείς με την πιο έντονη ερευνητική δραστηριότητα πάνω στο αντικείμενο της αξιολόγησης της απόδοσης συστημάτων συμπαραγωγής σε λειτουργία.



Σχήμα 2.8. Αριθμός δημοσιεύσεων σχετικών με το θέμα του διδακτορικού ανά συγγραφέα.

Ο Wang J. από την Κίνα και συγκεκριμένα από το School of Energy, Power and Mechanical Engineering, του North China Electric Power University με 17 σχετικές δημοσιεύσεις στο ενεργητικό του, ασχολείται κυρίως με πρόβλεψη και αβεβαιότητα φορτίου, με βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων, και με την επιλογή υβριδικών ενεργειακών συστημάτων που συνδυάζουν παραγωγή ψύξης, θερμότητας και ηλεκτρισμού αξιολογώντας τη λειτουργική ευελιξία που προσφέρουν. Παράλληλα, ερευνά και τη σύμπραξη συστημάτων συμπαραγωγής με συστήματα αποθήκευσης θερμότητας, αντλίες θερμότητας, συστήματα με βιομάζα, και συστήματα εκμετάλλευσης ηλιακής ενέργειας. Στο άρθρο του με τις περισσότερες αναφορές, το [68], η μελέτη στοχεύει στη βελτιστοποίηση της απόδοσης του κύκλου ζωής ενός υβριδικού συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας και ψύξης (CCHP) που ενσωματώνει αποθήκευση θερμότητας, ηλιακό φωτοβολταϊκό ή/και συλλέκτη θερμότητας. Προτείνεται μεθοδολογία για τη βελτιστοποίηση της διαμόρφωσης και της λειτουργίας του συστήματος CCHP σε λειτουργία μεταβλητού φορτίου με στόχο την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής. Τα αποτελέσματα

υποδεικνύουν ότι η στρατηγική λειτουργίας που ακολουθεί το θερμικό φορτίο (FTL) είναι ανώτερη από τη στρατηγική λειτουργίας που ακολουθεί το ηλεκτρικό (FEL).

Οι Ιάπωνες Yokoyama, R. και Wakui, T. από το τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών του Osaka Prefecture University συνεργάζονται και έχουν στο ενεργητικό τους 16 ερευνητικές δημοσιεύσεις, κυρίως σε συνέδρια, με κύριο αντικείμενο έρευνας τη βελτιστοποίηση συστημάτων παροχής ενέργειας και τη σύγκριση της απόδοσης των συστημάτων παροχής ενέργειας υπό αβέβαιες ενεργειακές απαιτήσεις. Η μεθοδολογία που ακολουθούν συνήθως για τον σχεδιασμό των ενεργειακών συστημάτων βασίζεται σε γραμμικό μοντέλο μικτού ακέραιου αριθμού. Αρκετές από τις δημοσιεύσεις τους με πολλαπλές αναφορές ασχολούνται με εφαρμογές συμπαραγωγής και τον βέλτιστο σχεδιασμό συστημάτων για τον οικιακό τομέα. Στην έρευνά τους με τις περισσότερες αναφορές, την [69], το αντικείμενο είναι η διαμόρφωση μεθόδου για τον βέλτιστο σχεδιασμό συστήματος παροχής ενέργειας χρησιμοποιώντας την ιεραρχική σχέση μεταξύ μεταβλητών σχεδιασμού και λειτουργίας. Στο ανώτερο επίπεδο, αναζητούνται οι βέλτιστες τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού, ενώ στο χαμηλότερο επίπεδο οι τιμές των μεταβλητών λειτουργίας βελτιστοποιούνται ανεξάρτητα σε κάθε περίοδο, σύμφωνα με τις τιμές των μεταβλητών σχεδιασμού που δόθηκαν προσωρινά κατά την αναζήτηση στο ανώτερο επίπεδο. Η εγκυρότητα και η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου εξετάζεται και επιβεβαιώνεται μέσα από επεξηγηματικές και πρακτικές μελέτες περιπτώσεων.

Ο Contino F. από το πανεπιστήμιο Vrije Universiteit των Βρυξελλών έχει ασχοληθεί εκτενώς με συστήματα συμπαραγωγής με μικροστρόβιλο αερίου. Πιο συγκεκριμένα, έχει μελετήσει σε πειραματικό επίπεδο τη συμπεριφορά της τεχνολογίας μικροϋγραντήρων με στρόβιλο αερίου, ερευνώντας την μονάδα που είναι εγκατεστημένη στο Πανεπιστήμιο Vrije των Βρυξελλών [70]. Αρχικά παρατηρεί ότι παρά το γεγονός ότι οι μικροαεριοστρόβιλοι (mGT) εμφανίστηκαν ως μια πολλά υποσχόμενη τεχνολογία για την απομακρυσμένη παραγωγή, δεν έχουν καταφέρει ακόμη να διεισδύσουν στην αγορά συμπαραγωγής μικρής κλίμακας. Ένας από τους βασικούς λόγους είναι ότι όταν δεν υπάρχουν επαρκή θερμικά φορτία, τα καυσαέρια απορρίπτονται, μειώνοντας έτσι τον συνολικό βαθμό απόδοσης του συστήματος. Η έγχυση νερού, που επιτυγχάνεται κατά τη μετατροπή του μικροαεριοστρόβιλου σε μικροϋγραντή με υγρό αέρα (mHAT), επιτρέπει τη χρήση της θερμότητας των καυσαερίων σε τέτοιες περιπτώσεις, αυξάνοντας έτσι τη συνολική απόδοση της τεχνολογίας και βελτιώνοντας τη σκοπιμότητά της. Αυτά είναι τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα ενός τέτοιου κινητήρα που λειτουργεί σε ονομαστικό φορτίο με έγχυση νερού, τα οποία και καταδεικνύουν τα πλεονεκτήματα της έγχυσης νερού στην απόδοση.

Ο Mago P. J. από το τμήμα των Μηχανολόγων Μηχανικών του Mississippi State University, των ΗΠΑ, ασχολείται κυρίως με αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας, και τον συνδυασμό της με αντλία θερμότητας, με διπλές μονάδες παραγωγής ενέργειας (dual power generation units) και με συστήματα αποθήκευσης θερμότητας. Ασχολείται, επίσης, και με τις επιδράσεις λειτουργικών μεθόδων που ακολουθούν το φορτίο, σε εφαρμογές μικρών κτιρίων, κάτω από διαφορετικές στρατηγικές λειτουργίας και αβεβαιότητας δεδομένων. Οι περισσότερες αναφορές έχουν γίνει στο άρθρο [71], όπου θίγεται το θέμα της αβεβαιότητας της πραγματικής απόδοσης ενός συστήματος ΣΗΘ σε σχέση με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων υπολογιστή και της επιρροής της στις τελικές αποφάσεις σχεδιασμού και λειτουργίας του συστήματος. Μέσω της ανάλυσης ενός μοντέλου συστήματος CCHP υπό διαφορετικές στρατηγικές λειτουργίας με αβεβαιότητα δεδομένων μοντέλου, παρουσιάζονται πρακτικές και νέες προσεγγίσεις για την εκτίμηση της αβεβαιότητας σε διάφορες παραμέτρους όπως το θερμικό φορτίο, οι τιμές φυσικού αερίου και οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας, και η απόδοση του κινητήρα. Η ανάλυση εφαρμόζεται σε ένα κτίριο γραφείων στην Ατλάντα δείχνοντας πώς επηρεάζεται η κατανάλωση πρωτογενούς ενέργειας, το λειτουργικό κόστος και οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα από την αβεβαιότητα που σχετίζεται με τις παραμέτρους εισόδου του μοντέλου. Επιπλέον, πολλές αναφορές έχουν γίνει και στο άρθρο [72], όπου μελετάται η επιρροή των διαφορετικών μεθόδων λειτουργίας που ακολουθούν το φορτίο στην τελική απόδοση συστήματος ΣΗΘ. Οι δύο βασικές μέθοδοι λειτουργίας που ακολουθούν το φορτίο είναι αυτή που ακολουθεί το θερμικό φορτίο (FTL) και αυτή που ακολουθεί το ηλεκτρικό φορτίο (FEL), και συγκρίνονται με μια υβριδική μέθοδο η οποία είτε ακολουθεί το θερμικό είτε το ηλεκτρικό φορτίο σε μια δεδομένη χρονική περίοδο, εντός συγκεκριμένου εύρους λειτουργίας, προκειμένου να ελαχιστοποιηθεί η ποσότητα της περίσσειας ηλεκτρικής ή θερμικής ενέργειας που παράγεται από το σύστημα ΣΗΘ. Οι μέθοδοι εφαρμόζονται σε ωριαία βάση σε κτίριο αναφοράς ένα μεγάλο ξενοδοχείο, σε 16 πόλεις που βρίσκονται σε διαφορετικές κλιματικές ζώνες χρησιμοποιώντας το λογισμικό προσομοίωσης κτιρίων EnergyPlus. Η υβριδική μέθοδος οδηγεί σε υψηλότερη συνολική απόδοση συστήματος CHP από τις μεθόδους FTL ή FEL. Η αναλογία ηλεκτρικού/θερμικού φορτίου είναι αυτή που καθορίζει την τελική δυνατή απόδοση, με τις χαμηλότερες τιμές της αναλογίας να δίνουν μεγαλύτερους βαθμούς απόδοσης. Η μέθοδος εφαρμόζεται και σε μηνιαία βάση δίνοντας αποτελέσματα παρόμοια με αυτά της ωριαίας βάσης.

2.3 Η Συμπαραγωγή ως αντικείμενο έρευνας στην Ελλάδα

Η συμπαραγωγή έχει τραβήξει το ενδιαφέρον και των Ελλήνων ερευνητών και καταγράφονται μελέτες για εφαρμογή συστημάτων συμπαραγωγής, ειδικά σε νοσοκομεία. Οι Alexis et al [14] επέλεξαν το Τζάνειο Νοσοκομείο, στην περιοχή του Πειραιά, για τη μελέτη και την επιλογή συστήματος συμπαραγωγής για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών. Αφού υπολογίστηκαν οι ενεργειακές καταναλώσεις και το κόστος για τη κάλυψή τους με τον συμβατικό τρόπο, εξετάστηκαν σενάρια εφαρμογής συμπαραγωγής με διάφορα μεγέθη μηχανών και προγράμματα λειτουργίας. Σε όλες τις περιπτώσεις είναι συμφέρουσα η πρόταση αντικατάστασης του συμβατικού συστήματος, επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση ενέργειας και χρημάτων μέχρι και 30%, μείωση κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας κατά 28% και περιορισμό περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Οι Manrotas et al [54] εξέτασαν την ενεργειακή αναβάθμιση ενός νοσοκομείου στην Αθήνα με την εγκατάσταση συστήματος τριπαραγωγής για παραγωγή ηλεκτρικής, θερμικής και ψυκτικής ενέργειας. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι όσο περισσότερο συμμετέχει η συμπαραγωγή στην κάλυψη των αναγκών τόσο μειώνονται τα συνολικά ενεργειακά έξοδα.

Σε επίπεδο πανεπιστημιακών εργασιών, η εφαρμογή συστημάτων συμπαραγωγής έχει μελετηθεί σε πτυχιακό και διδακτορικό επίπεδο. Ο Μουζακίτης [73] μελέτησε στην διπλωματική του εργασία την σκοπιμότητα εγκατάστασης συστήματος συμπαραγωγής στο Νοσοκομείο ΚΑΤ, η αξιολόγηση της οποίας έγινε με διάφορα οικονομοτεχνικά κριτήρια που περιλαμβάνουν την απλή περίοδο αποπληρωμής της επένδυσης, την καθαρή παρούσα αξία, και την απόδοση κεφαλαίου. Συμπερασματικά, κρίνεται συμφέρουσα η επένδυση αφού επιτυγχάνεται σημαντική μείωση ενέργειας και ενεργειακού κόστους, καθώς και οικονομικά και περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα από τη χρήση φυσικού αερίου. Αντίστοιχα, η Μπαλάνου [15] μελέτησε τις δυνατότητες εφαρμογής συμπαραγωγής στο Σισμανόγλειο Νοσοκομείο Αθηνών. Πιο συγκεκριμένα εξετάστηκε η οικονομική βιωσιμότητα ενός συστήματος συμπαραγωγής, βάσει συγκεκριμένων οικονομικών παραμέτρων, με παράλληλη εγκατάσταση ψύκτη απορρόφησης. Η επένδυσης μονάδας συμπαραγωγής με καύση φυσικού αερίου κρίνεται τελικώς συμφέρουσα υπό διάφορα σενάρια λειτουργίας. Ο Κατσάνης [74] μελέτησε τα ηλεκτρικά και θερμικά φορτία σε ελληνικά νοσοκομεία και ανέπτυξε υπολογιστικό πρόγραμμα, το οποίο βασιζόμενο στην προτεινόμενη μέθοδο, έχει τη δυνατότητα υπολογισμού των κυριότερων ηλεκτρικών και θερμικών καταναλώσεων στα ελληνικά νοσοκομεία σε μηνιαία και ετήσια βάση, και μπορεί να αξιοποιηθεί για την μελέτη σκοπιμότητας εγκατάστασης συστήματος συμπαραγωγής. Πιο πρόσφατα, ο Καββαδίας [51] πραγματοποίησε στη διατριβή του μια βαθύτερη ανάλυση της λειτουργίας συστημάτων

τριπαραγωγής και καταλήγει στην πρόταση μίας μεθόδου αριστοποίησής τους. Η μελέτη επικεντρώθηκε στη μαθηματική προτυποποίηση του συστήματος, την πολυστοχική αριστοποίηση, την ποσοτικοποίηση της αβεβαιότητας και την ανάπτυξη εμπειρικών κανόνων, προτύπων και παραμέτρων ελέγχου, και κατέληξε στη δημιουργία αναλυτικού ωριαίου προτύπου που προσομοιάζει τις ενεργειακές ροές και τη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος. Η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόστηκε για την περίπτωση γνωστού νοσοκομείου στην Αθήνα. Τέλος, η Ταταράκη [75] ασχολήθηκε με την οικονομική βιωσιμότητα συστημάτων τριπαραγωγής (ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης) σε σύγκριση με εναλλακτικές ανταγωνιστικές τεχνολογίες και τις δυνατότητες της εφαρμογής των συστημάτων σε θερμοκηπιακές εγκαταστάσεις. Η οικονομική βιωσιμότητα εξετάστηκε με το Σταθμισμένο Κόστος Παραγωγής Ηλεκτρικής Ενέργειας (LCOE), λαμβάνοντας υπόψη τη θερμική ή ψυκτική ενέργεια που υποκαθιστά το σύστημα. Η επίδραση των τιμών ενέργειας αποδεικνύεται καθοριστική για το αποτέλεσμα, με το μικρότερο LCOE να επιτυγχάνεται στην περίπτωση υποκατάστασης λέβητα φυσικού αερίου και ηλεκτρικό ψύκτη, ενώ η αντλία θερμότητας προκύπτει ως η πιο ανταγωνιστική τεχνολογία. Παράλληλα, προτάθηκε ένα μαθηματικό μοντέλο για τον σχεδιασμό μονάδων συμπαραγωγής, με σκοπό την κάλυψη των ενεργειακών φορτίων σύγχρονου θερμοκηπίου υψηλής ενεργειακής έντασης, το οποίο εφαρμόστηκε για τον σχεδιασμό νέας αλλά και υφιστάμενης εγκατάστασης θερμοκηπίου με αξιολόγηση σε οικονομικό, ενεργειακό και περιβαλλοντικό επίπεδο. Η συμπαραγωγή προκύπτει μία οικονομικά αποδοτική λύση, με ιδιαίτερη ευαισθησία, ωστόσο, στις κλιματικές συνθήκες και τις προδιαγραφές καλλιέργειας.

Τέλος, αξίζει να τονιστεί ότι το Εργαστήριο Σχεδιασμού και Ανάλυσης Διεργασιών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου έχει εμπειρία σε εφαρμογές ΣΗΘ σε νοσοκομεία, καθώς είναι υπεύθυνο για τη μελέτη, τον σχεδιασμό, την αριστοποίηση, την επιδότηση και την εγκατάσταση μίας πρότυπης επιδεικτικής μονάδας συμπαραγωγής στο Νοσοκομείο Μητέρα, η οποία αποτέλεσε το αντικείμενο έρευνας και για το παρόν διδακτορικό.

3.

Το αντικείμενο και οι στόχοι

Αντικείμενο της παρούσας διατριβής αποτελεί η τεχνικοοικονομική αξιολόγηση συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας τα οποία βρίσκονται σε λειτουργία. Η ανάλυση περιλαμβάνει δύο στάδια: (α) Διαμόρφωση συστηματικής μεθόδου για την αξιολόγηση της οικονομικής απόδοσης υφιστάμενων συστημάτων παραγωγής θερμότητας και ισχύος (ΣΗΘ) ή συνδυασμένης ψύξης θερμότητας και ισχύος (CCHP) και (β) Τεχνικοοικονομική αξιολόγηση απόδοσης συστήματος τριπαραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης (CCHP). Τα κτίρια του τριτογενή τομέα επιλέγονται ως πεδίο εφαρμογής της ανάλυσης και η μηχανή εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ) επιλέγεται ως κινητήρας του συστήματος, λόγω της ευρείας χρήσης της στις εφαρμογές του τριτογενή τομέα. Η Ελλάδα αποτελεί την περιοχή εφαρμογής.

Στο πλαίσιο του πρώτου σταδίου, στόχος είναι να πραγματοποιηθεί από τεχνική και οικονομική άποψη μία συστηματική ανάλυση της απόδοσης των υπαρχόντων συστημάτων συμπαραγωγής από την εγκατάστασή τους σε μακροοικονομικό επίπεδο, με σκοπό να αποκαλύψει την τρέχουσα κατάσταση της ΣΗΘ στην Ελλάδα και να εντοπίσει τους λόγους που εμποδίζουν τη διεύρυσή της. Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας ολοκληρωμένης και συγκριτικής παρουσίασης οκτώ έργων CHP/CCHP που βρίσκονται σε λειτουργία στην Αθήνα.

Στην τεχνικοοικονομική αξιολόγηση απόδοσης συγκεκριμένου συστήματος τριπαραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης, σκοπός είναι η επαλήθευση των προτύπων απόδοσης και η ανάδειξη της αποδοτικότητάς του όσον αφορά στη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους. Παράλληλος στόχος είναι η αξιολόγηση της βιωσιμότητας λειτουργίας του συστήματος, τόσο για τη λειτουργία θέρμανσης όσο και για τη λειτουργία ψύξης. Τα δεδομένα λειτουργίας συγκρίνονται με τα τεχνικά δεδομένα του κατασκευαστή και χρησιμοποιούνται περαιτέρω για τον προσδιορισμό της ενεργειακής συμπεριφοράς υπό λειτουργία μερικού φορτίου.

Πιο αναλυτικά, οι επιμέρους στόχοι της διατριβής διαμορφώνονται ως εξής:

- Διαμόρφωση συστηματικής μεθόδου για την αξιολόγηση της οικονομικής απόδοσης υφιστάμενων συστημάτων παραγωγής θερμότητας και ισχύος (ΣΗΘ) ή συνδυασμένης ψύξης θερμότητας και ισχύος (CCHP), με μηχανή εσωτερικής καύσης.
- Εφαρμογή της μεθόδου για την αξιολόγηση υφιστάμενων συστημάτων που είναι σε λειτουργία στην Ελλάδα και συγκεκριμένα στην Αττική.
- Παρακολούθηση και αναλυτική καταγραφή της λειτουργίας και των ενεργειακών καταναλώσεων του συστήματος τριπαραγωγής που είναι εγκατεστημένο στο Νοσοκομείο ΜΗΤΕΡΑ.
- Αξιολόγηση της τεchnοοικονομικής απόδοσης του συστήματος τριπαραγωγής του Νοσοκομείου ΜΗΤΕΡΑ με σκοπό να αποκαλυφθούν πιθανές αποκλίσεις από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος και τους στόχους σχεδιασμού, αλλά και να εκτιμηθεί η βιωσιμότητα λειτουργίας του συστήματος.
- Μελέτη ενεργειακής πολιτικής και δυνατοτήτων διείσδυσης συμπαραγωγής στην Ελλάδα.

Η συνεισφορά της διατριβής έγκειται στα παρακάτω:

- Επεκτείνεται η έρευνα σχετικά με την αξιολόγηση συστημάτων συμπαραγωγής βάσει πραγματικών δεδομένων λειτουργίας, με ιδιαίτερο ενδιαφέρον λόγω της μακρόχρονης καταγραφής των δεδομένων, κάτι το οποίο σπανίως συναντάται στη βιβλιογραφία.
- Με την αξιολόγηση της απόδοσης της διάρκειας ζωής των έργων, βάσει πραγματικών δεδομένων λειτουργίας, αποκαλύπτεται η τρέχουσα κατάσταση της CHP στην

Ελλάδα. Παράλληλα, αναδεικνύονται σχεδιαστικές και λειτουργικές αστοχίες σε εν λειτουργία συστήματα.

- Η αξιοποίηση των πραγματικών δεδομένων λειτουργίας είναι πολύ σημαντική και στην περίπτωση του συγκεκριμένου συστήματος, γιατί μπορεί να επισημάνει τις διαφορές μεταξύ της πραγματικής απόδοσης και της απόδοσης σχεδιασμού.

Τα αποτελέσματα αυτής της έρευνας προβλέπεται να συντελέσουν στην αριστοποίηση σχεδιασμού και λειτουργίας συστημάτων συμπαραγωγής, καθώς και στη μείωση κατανάλωσης ενέργειας στα κτίρια του τριτογενή τομέα, και κυρίως στα νοσοκομεία, και στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσής τους.

4.

Διείσδυση συμπαραγωγής στην Ελλάδα. Σύγκριση με την Ευρώπη

4.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό πραγματοποιείται μία αποτύπωση της υπάρχουσας κατάστασης της συμπαραγωγής στην ελληνική αγορά ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, αρχικά παρουσιάζεται το νομοθετικό πλαίσιο που καθορίζει τη συμπαραγωγή στην Ελλάδα και στη συνέχεια η διαχρονική εξέλιξη της διείσδυσης της συμπαραγωγής στην ελληνική αγορά ενέργειας, με διερεύνηση της εγκατεστημένης ισχύος και της παραγωγής ενέργειας από συμπαραγωγή, μέσω των στοιχείων του Λειτουργού της Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, ΛΑΓΗΕ [76] και της στατιστικής υπηρεσίας της Ευρωπαϊκής Ένωσης, Eurostat [77]. Τέλος, γίνεται σύγκριση με την υπάρχουσα κατάσταση και τα επίπεδα διείσδυσης της συμπαραγωγής στην Ευρώπη.

4.2 Νομοθετικό πλαίσιο

Το 1994, με τον Ν.2244, ρυθμίζονται για πρώτη φορά θέματα ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές και από συμβατικά καύσιμα. Στον νόμο αυτόν ορίζεται η έννοια της συμπαραγωγής ενέργειας στη βιομηχανία και οι όροι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή, καθώς και η διαδικασία αδειοδότησης. Προσδιορίζεται, επίσης, η τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή που θα πωλείται στο δίκτυο, μέσω της εγγυημένης τιμής.

Το 1999, με τον Ν.2773 για την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, προσδιορίζεται η ισχύς προτεραιότητας παραγωγών και αυτοπαραγωγών ΣΗΘ, καθορίζονται τα ελάχιστα κριτήρια απόδοσης για μονάδες συμπαραγωγής και εισάγονται νέες ρυθμίσεις σχετικά με την τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας προερχόμενης από ΑΠΕ ή ΣΗΘ.

Στον Ν.3175, το 2003, καθορίζεται η διαδικασία διανομής θερμικής ενέργειας σε τρίτους, καθώς και η διαδικασία αδειοδότησης για δίκτυα διανομής θερμότητας που σχετίζονται με εγκαταστάσεις ΣΗΘ. Στον Ν.3426, το 2005, γίνεται πρόβλεψη για παραγωγό ΣΗΘ με πώληση της θερμικής ενέργειας προς τρίτους και ορίζεται η αντίστοιχη ισχύς προτεραιότητας.

Με τον Ν.3468, το 2006, ορίζεται η Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης (ΣΗΘΥΑ) και επιχειρείται η προώθηση, κατά προτεραιότητα, της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από μονάδες ΣΗΘΥΑ στην εσωτερική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, με κανόνες και αρχές. Επαναπροσδιορίζεται η τιμολόγηση ενέργειας από ΣΗΘΥΑ, η οποία έχει πλέον σταθερή τιμή και απλοποιείται η αδειοδοτική διαδικασία.

Το 2009, με τον καθοριστικό για την προώθηση της συμπαραγωγής Ν.3734, συμπληρώνεται το νομικό πλαίσιο που αφορά στην συμπαραγωγή δύο ή περισσότερων χρήσιμων μορφών ενέργειας και προωθείται η συμπαραγωγή βάσει της ζήτησης για χρήσιμη θερμότητα. Καθορίζεται επίσης η μέθοδος υπολογισμού ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή και ο υπολογισμός αποδοτικότητας συμπαραγωγής. Ορίζονται εγγυήσεις προέλευσης ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘΥΑ, ενώ προβλέπεται και κατηγοριοποίηση των μονάδων ανάλογα με το μέγεθός τους.

Το 2010, καθορίζεται για πρώτη φορά ο εθνικός στόχος για τη διείσδυση των ΑΠΕ με τον Ν.3851, τροποποιούνται διατάξεις για την αποτελεσματικότερη αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και προβλέπεται σύσταση αυτοτελούς υπηρεσίας ΑΠΕ. Επαναπροσδιορίζεται η διαδικασία αδειοδότησης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από

ΑΠΕ ή ΣΗΘΥΑ, ευνοώντας την εγκατάσταση μονάδων ≤ 1 MWe. Παράλληλα, τροποποιείται εκ νέου η τιμολόγηση ενέργειας ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ με τον ορισμό νέου τρόπου υπολογισμού της εγγυημένης τιμής για ΣΗΘΥΑ, ο οποίος εισάγει και το κόστος του φυσικού αερίου στον υπολογισμό.

Την ίδια χρονιά, με τον Ν.3855, επιχειρείται η άρση των φραγμών και των ατελειών της αγοράς που παρεμποδίζουν την αποδοτική τελική χρήση της ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, καθορίζονται εθνικοί στόχοι εξοικονόμησης ενέργειας, θεσπίζεται το απαραίτητο θεσμικό και νομικό πλαίσιο και προβλέπονται οι αναγκαίοι μηχανισμοί ενεργειακής απόδοσης. Παράλληλα, δημιουργούνται οι συνθήκες για την ανάπτυξη και την προώθηση της αγοράς ενεργειακών υπηρεσιών και άλλων μέτρων βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης στον τελικό καταναλωτή, οι οποίες ορίζονται αναλυτικότερα σε σχετική υπουργική απόφαση (ΥΑ Δ6/13280).

Με τον Ν.4001, το 2011, ορίζονται οι δραστηριότητες της παραγωγής, της προμήθειας, της αγοράς, της μεταφοράς και της διανομής Φυσικού Αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας και η ίδρυση της ΡΑΕ, ενώ επαναπροσδιορίζεται η προτεραιότητα ΣΗΘΥΑ. Το 2012, με σχετική υπουργική απόφαση (ΥΑ Δ5/15641), γίνεται ο καθορισμός της λεπτομερούς μεθόδου υπολογισμού της ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή και της αποδοτικότητας της συμπαραγωγής, καθώς επίσης και της τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή κατά το μέρος που δεν χαρακτηρίζεται ΣΗΘΥΑ.

Στις αρχές του 2012, ορίζεται ο Κώδικας Διαχείρισης του Ελληνικού Συστήματος Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας και το Σύστημα συναλλαγών διαχείρισης ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο εισάγεται η έννοια της Κατανεμόμενης Μονάδας ΣΗΘΥΑ. Ορίζεται η ποσότητα προτεραιότητας κατανεμόμενης μονάδας ΣΗΘΥΑ, οι ειδικοί λειτουργικοί όροι για την έγκρισή της και η τιμολόγηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Το 2014, με τον Ν.4254, ορίζεται νέος τρόπος τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘΥΑ, φέρνοντας περικοπές των εγγυημένων τιμών, αλλάζουν ξανά οι όροι προτεραιότητας και γίνεται για πρώτη φορά αναλυτική κατηγοριοποίηση των μονάδων ΣΗΘΥΑ ανάλογα με το μέγεθος και την τεχνολογία της μηχανής.

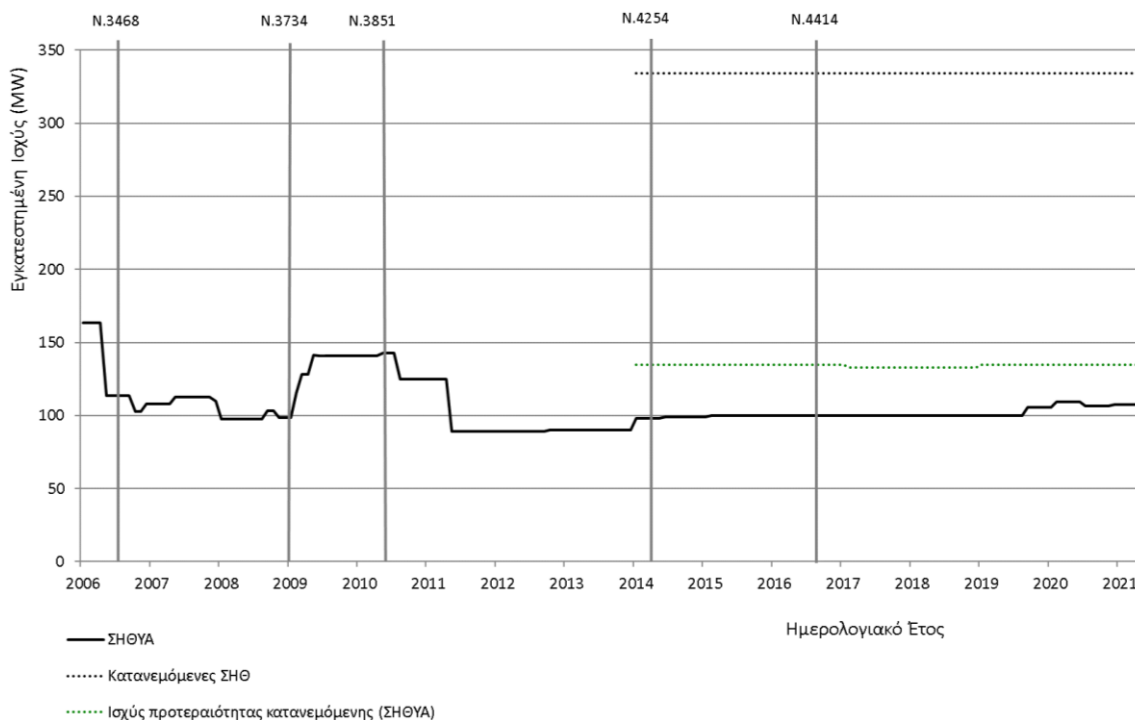
Τέλος, το 2016, με τον Ν. 4414, ορίζεται νέο καθεστώς στήριξης, σύμφωνα με το οποίο οι νέοι σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ εντάσσονται σε καθεστώς στήριξης, με τη μορφή πλέον Λειτουργικής Ενίσχυσης μέσω μιας Διαφορικής Τιμής Αποζημίωσης για την ηλεκτρική ενέργεια που παράγουν και η οποία απορροφάται από το Δίκτυο. Σε ό,τι αφορά στην ΣΗΘΥΑ, δεν προκύπτουν αλλαγές καθώς ο υπολογισμός της Τιμής Αναφοράς, στη βάση της οποίας υπολογίζεται μηνιαίως η Λειτουργική Ενίσχυση,

παραμένει όμοιος με αυτόν της εγγυημένης τιμής του Ν.4254. Επιπλέον, σταθμοί ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ εγκατεστημένης ισχύος ή Μέγιστης ισχύος <500KW εξαιρούνται από το σύστημα Λειτουργικής Ενίσχυσης Διαφορικής Προσαύξησης και εντάσσονται στο σύστημα Λειτουργικής Ενίσχυσης Σταθερής Τιμής.

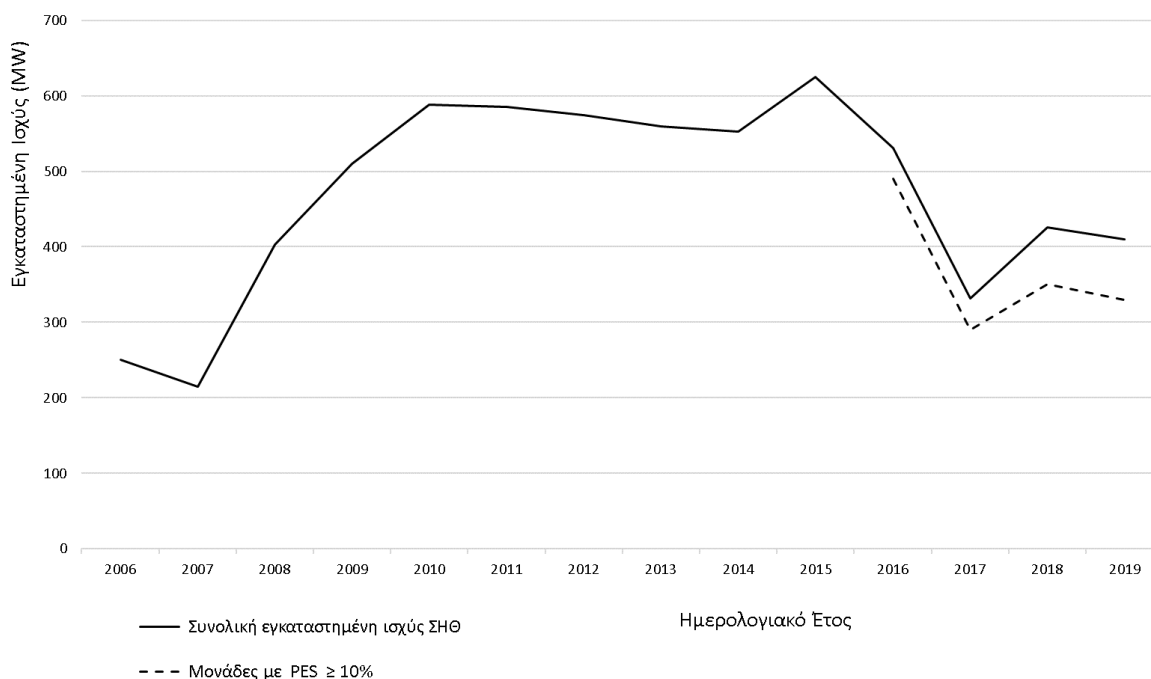
4.3 Εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος και παραγωγής ενέργειας

Στο Σχήμα 4.1, παρουσιάζεται η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος μονάδων συμπαραγωγής στην Ελλάδα για το διάστημα 2006-2020, σύμφωνα με τα στοιχεία που δημοσιεύονται από τον ΛΑΓΗΕ. Σημειώνεται ότι ο τρόπος καταγραφής των μονάδων υπολογίζει μόνο τους ηλεκτροπαραγωγούς, τις μονάδες ΣΗΘΥΑ δηλαδή που αποζημιώνονται από τον λειτουργό αγοράς, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι αυτοπαραγωγοί. Η εγκαταστημένη ισχύς κυμαίνεται σταθερά γύρω στα 100 MW, με εξαίρεση τη διετία 2009-2010, όπου παράλληλα με την εφαρμογή του Ν.3734 για την Προώθηση της Συμπαραγωγής δύο ή περισσότερων χρήσιμων μορφών ενέργειας, σημειώνεται αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος στα 150 MW. Από τα μέσα του 2019 παρουσιάζεται μικρή αύξηση. Το 2014 δόθηκε η πρώτη, και μοναδική μέχρι σήμερα, άδεια λειτουργίας κατανεμόμενης μονάδας συμπαραγωγής με συνολική ισχύ 330 MW και ισχύ προτεραιότητας, ισχύ δηλαδή που θεωρείται ΣΗΘΥΑ, στα 130 MW.

Στο Σχήμα 4.2, παρουσιάζεται η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος μονάδων συμπαραγωγής στην Ελλάδα για το διάστημα 2006-2019, σύμφωνα με τα στοιχεία που δημοσιεύονται από την Eurostat [77]. Στα στοιχεία αυτά λαμβάνονται υπόψη και οι ηλεκτροπαραγωγοί και οι αυτοπαραγωγοί, οπότε και η εγκαταστημένη ισχύς είναι υψηλότερη σε σχέση με τα στοιχεία του ΛΑΓΗΕ. Η ισχύς παρουσιάζει συνεχή αύξηση από το 2007 έως το 2010 φτάνοντας τα 600 MW. Παραμένει σταθερή μέχρι το 2014 και έκτοτε μειώνεται απότομα σχεδόν κατά 50% μέχρι το 2017. Το 2019, η ισχύς κυμαίνεται στα 400 MW. Από το 2016, καταγράφεται το ποσοστό των μονάδων που θεωρούνται υψηλής απόδοσης (ΣΗΘΥΑ) και όπως φαίνεται αποτελούν τη συντριπτική πλειοψηφία του συνόλου της εγκατεστημένης ισχύος. Συγκρίνοντας με τα στοιχεία του Σχήματος 4.1, διαπιστώνεται ότι οι όποιες διακυμάνσεις στην εγκατεστημένη ισχύ οφείλονται σε ενέργειες αυτοπαραγωγών.

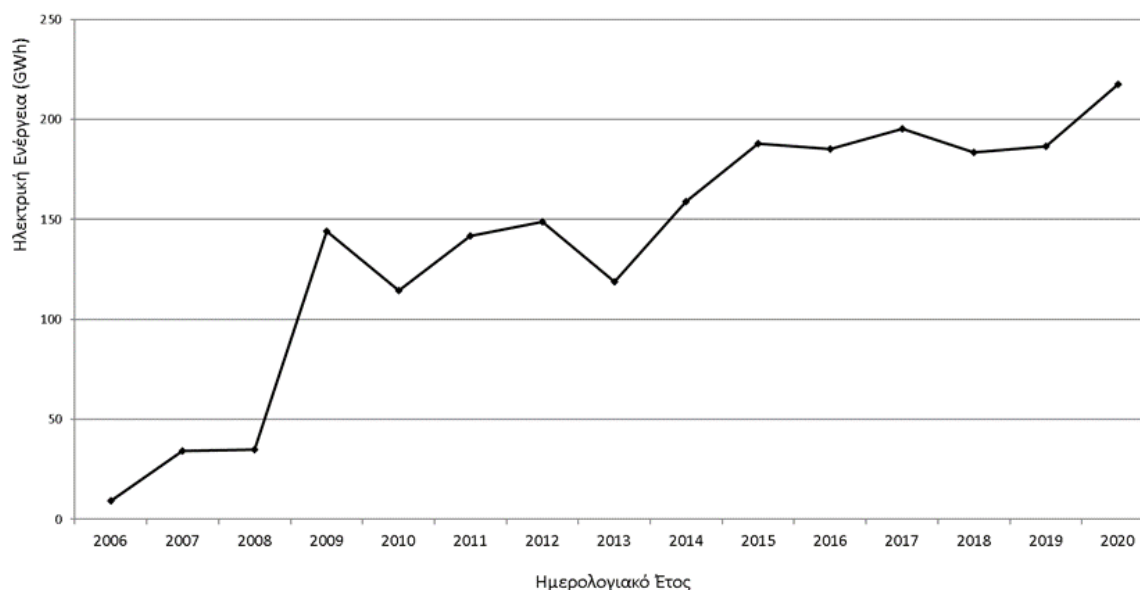


Σχήμα 4.1. Διαχρονική εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος συμπαραγωγής στην Ελλάδα για το διάστημα 2006-2021, σε MW, σύμφωνα με τα στοιχεία του ΛΑΓΗΕ.

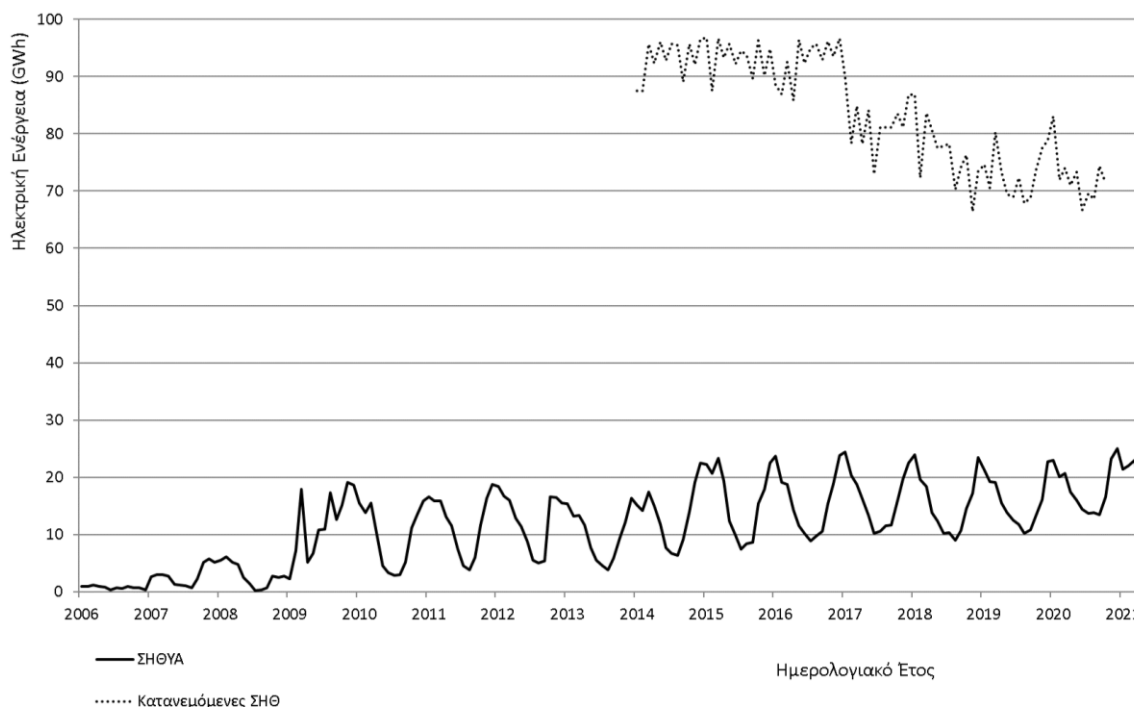


Σχήμα 4.2. Διαχρονική εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος συμπαραγωγής στην Ελλάδα για το διάστημα 2006-2019, σε MW, σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat.

Στο Σχήμα 4.3, παρουσιάζεται η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘΥΑ και στο Σχήμα 4.4 η μηνιαία παραγωγή από ΣΗΘΥΑ και από κατανεμόμενες ΣΗΘ για το διάστημα 2006-2020, σύμφωνα με τα στοιχεία του ΛΑΓΗΕ. Στην ετήσια παραγωγή σημειώνεται σταδιακή αύξηση έως το 2015. Το 2020, η παραγωγή σημειώνει την υψηλότερη τιμή ξεπερνώντας τις 200 GWh. Η μείωση της εγκατεστημένης ισχύος στις αρχές του 2011 δεν φαίνεται να επηρέασε τη συνολική παραγωγή. Σε επίπεδο μήνα, η παραγωγή φαίνεται να κάνει έναν σταθερό ετήσιο κύκλο, με τις μέγιστες τιμές να σημειώνονται τους χειμερινούς μήνες και τις ελάχιστες τους καλοκαιρινούς, με μοναδική εξαίρεση το 2009 που ο κύκλος παραγωγής ήταν πιο ασταθής. Η παραγωγή της κατανεμόμενης μονάδας δεν παρουσιάζει ανάλογη εποχιακή διακύμανση, αλλά παρατηρούνται σχετικές αυξομειώσεις κάθε μήνα, με τις τιμές να κυμαίνονται γύρω στις 95GWh έως το 2016, οπότε και παρουσιάζουν σημαντική μείωση. Έκτοτε, οι τιμές παρουσιάζουν μεγαλύτερη διακύμανση και κυμαίνονται στις 70-80 GWh.



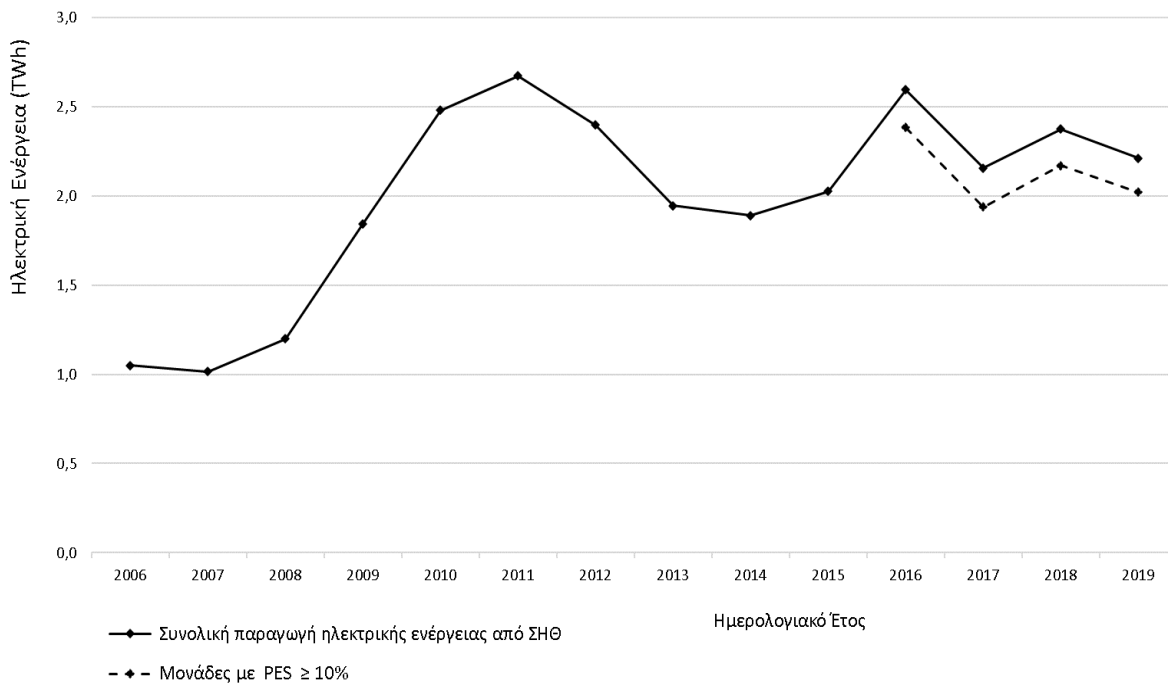
Σχήμα 4.3. Διαχρονική εξέλιξη ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘΥΑ στην Ελλάδα, σε GWh, σύμφωνα με τα στοιχεία του ΛΑΓΗΕ.



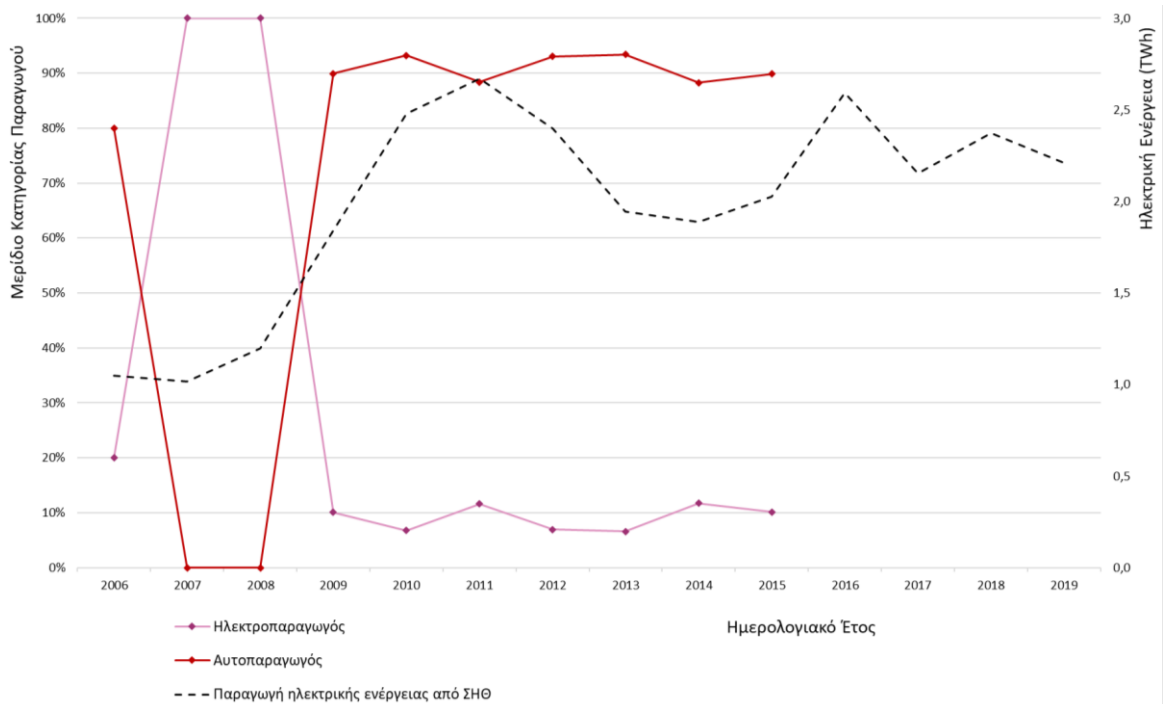
Σχήμα 4.4. Διαχρονική εξέλιξη μηνιαίας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘΥΑ και κατανεμόμενες ΣΗΘΥΑ στην Ελλάδα, σε GWh, σύμφωνα με τα στοιχεία του ΛΑΓΗΕ.

Στα Σχήματα 4.5 και 4.6, παρουσιάζεται η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ για το διάστημα 2006-2019 σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat [77]. Η παραγωγή ενέργειας είναι πολύ υψηλότερη σε σχέση με τα στοιχεία του ΛΑΓΗΕ, καθώς στα στοιχεία περιλαμβάνεται η παραγωγή ενέργειας από αυτοπαραγωγούς. Η παραγωγή ενέργειας ακολουθεί την καμπύλη της εγκαταστημένης ισχύος, παρουσιάζοντας συνεχή αύξηση από το 2007 έως το 2011, ξεπερνώντας τις 2,5 TWh. Έως το 2014 μειώνεται και αυξάνεται εκ νέου ξεπερνώντας πάλι τις 2,5 TWh το 2016. Το 2019, καταγράφεται ετήσια παραγωγή 2,3 TWh. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής προέρχεται από μονάδες που θεωρούνται υψηλής απόδοσης (ΣΗΘΥΑ). Από το 2006 έως το 2015, καταγράφεται ξεχωριστά η ενέργεια από ηλεκτροπαραγωγούς και από αυτοπαραγωγούς. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.6, από το 2009 σχεδόν το 90% της συνολικής ενέργειας παράγεται από αυτοπαραγωγούς, επιβεβαιώνοντας τη διαφορά στις τιμές που προκύπτει σε σχέση με τα στοιχεία του Σχήματος 4.3.

Κεφάλαιο 4

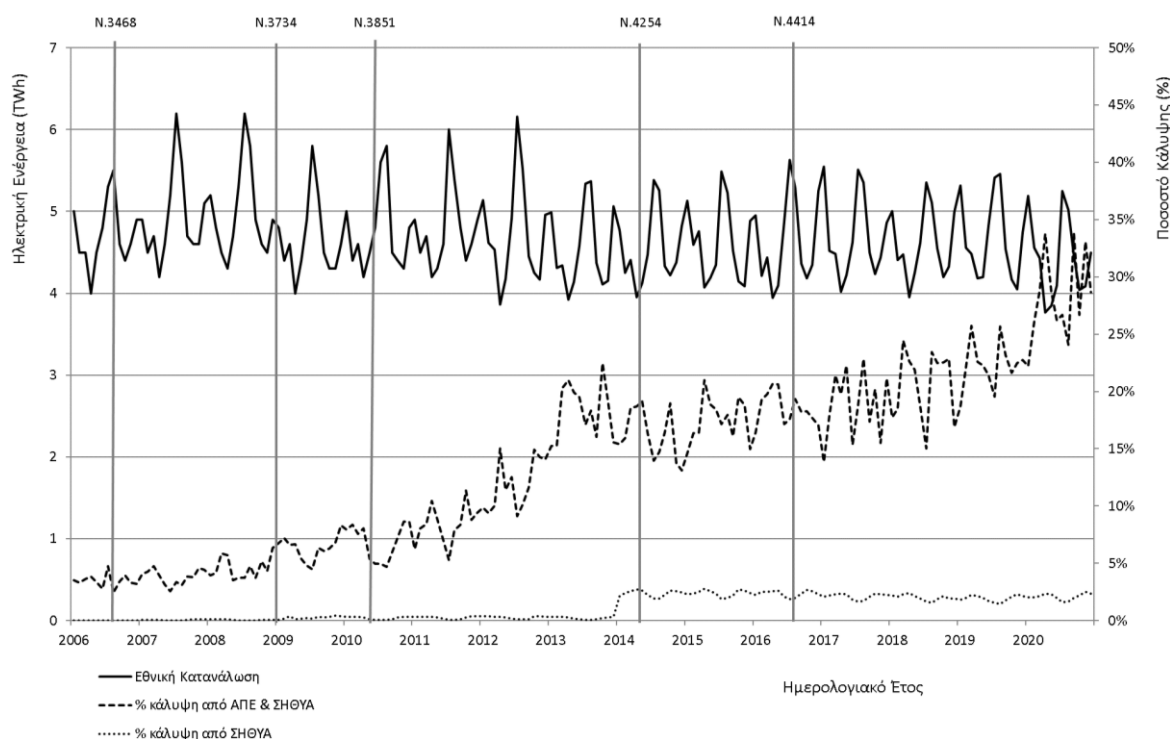


Σχήμα 4.5. Διαχρονική εξέλιξη ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ, για το διάστημα 2006-2019, σε TWh, σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat.



Σχήμα 4.6. Διαχρονική εξέλιξη μεριδίων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ από ηλεκτροπαραγωγούς και από αυτοπαραγωγούς, και ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ, σε TWh, για το διάστημα 2006-2019, σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat.

Στο Σχήμα 4.7, παρουσιάζεται η εξέλιξη της μηνιαίας εθνικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, σε TWh, και το ποσοστό κάλυψής της από ΣΗΘΥΑ και από ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ συνολικά [76]. Η συνολική κατανάλωση ηλεκτρισμού παραμένει σχετικά σταθερή από το 2006 έως και το 2020, με μικρότερες εποχιακές διακυμάνσεις μετά το 2012, ενώ το ποσοστό κάλυψής της από ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ σημειώνει σταδιακή αύξηση ξεπερνώντας το 15% στις αρχές του 2016 και φθάνοντας σχεδόν στο 35% το 2020. Ο στόχος της Ελλάδας ήταν να φτάσει η διείσδυση στο 40% μέχρι το 2020, όπως ορίστηκε στον Εθνικό Ενεργειακό Σχεδιασμό του 2012 [78], ωστόσο η καθυστέρηση πληρωμών από τον ΛΑΓΗΕ, λόγω του ελλείματος του Ειδικού Λογαριασμού των ΑΠΕ σε συνδυασμό με την οικονομική κρίση παρεμπόδισαν την επίτευξη του στόχου. Το ποσοστό κάλυψης από ΣΗΘΥΑ παραμένει πολύ χαμηλό, σχεδόν μηδενικό, μέχρι το 2014, ενώ έκτοτε κυμαίνεται κοντά στο 2.5%, λόγω της μείωσης της συνολικής κατανάλωσης σε συνδυασμό με την αύξηση της παραγωγής ΣΗΘΥΑ από την έναρξη λειτουργίας της κατανεμόμενης μονάδας.



Σχήμα 4.7. Διαχρονική εξέλιξη εθνικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, σε TWh, και ποσοστό κάλυψής της από ΣΗΘΥΑ, και από ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ συνολικά στην Ελλάδα.

4.4 Σύστημα Εγγυημένων Τιμών. Feed-in-Tariff

Το βασικό σύστημα το οποίο εφαρμόστηκε στην Ελλάδα ως μέσο στήριξης των επενδύσεων σε ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ είναι το σύστημα εγγυημένων τιμών, σύμφωνα με το οποίο η ηλεκτρική ενέργεια ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ τίθεται εκτός του ανταγωνισμού της αγοράς ενέργειας, εγγέται κατά προτεραιότητα στο Σύστημα ή Δίκτυο μεταφοράς ενέργειας και εξασφαλίζει σταθερή τιμή πώλησης ανεξάρτητη από την οποιαδήποτε διακύμανση της οριακή τιμής συστήματος [20].

Στον Πίνακα 4.1, αποτυπώνεται η εξέλιξη της εξίσωσης εγγυημένων τιμών για τον υπολογισμό της τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή. Οι τιμές ισχύουν για συστήματα ισχύος έως 1 MW, με χρήση φυσικού αερίου. Για μηχανές μεγαλύτερης ισχύος ή πιο εξειδικευμένης τεχνολογίας διαφοροποιούνται ελαφρώς οι βαθμοί απόδοσης, άρα και η τελική τιμή αποζημίωσης. Όπως φαίνεται, η εξίσωση υπολογισμού εγγυημένων τιμών στην εξέλιξή της γίνεται όλο και πιο σύνθετη, προκειμένου να λαμβάνει υπόψιν κατά τον υπολογισμό την απόδοση της εκάστοτε μηχανής, αλλά και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την αγορά ενέργειας, όπως η τιμή του φυσικού αερίου και το κόστος των ρύπων.

Πίνακας 4.1. Εξέλιξη της εξίσωσης εγγυημένων τιμών για τον υπολογισμό της τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή για ΣΗΘΥΑ με χρήση φυσικού αερίου και ισχύ μικρότερη του 1MW.

	Τιμή Ενέργειας (€/MWh)							
	Διασυνδεδεμένο σύστημα	Μη διασυνδεδεμένα Νησιά						
N.2773/22-12-1999	χρέωση Ενέργειας το 70% του σκέλους ενέργειας του εκάστοτε ισχύοντος τιμολογίου	χρέωση Ενέργειας το 90%						
N.3468/27-06-2006	73	84.6						
N.3851/04-06-2010	87.85*ΣΡ	99.45*ΣΡ						
	$\Sigma P = 1 + (MT\Phi A_{\mu} - 26) / (100 * \eta_e)$							
N. 4254/07-04-2014	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%; text-align: center;">XE</td> <td style="width: 50%; text-align: center;">ME</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">καινούργια μονάδα 92+ΠΤ</td> <td style="text-align: center;">80+ΠΤ</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">υπάρχουσα μονάδα 100+ΠΤ</td> <td style="text-align: center;">85+ΠΤ</td> </tr> </table>	XE	ME	καινούργια μονάδα 92+ΠΤ	80+ΠΤ	υπάρχουσα μονάδα 100+ΠΤ	85+ΠΤ	
XE	ME							
καινούργια μονάδα 92+ΠΤ	80+ΠΤ							
υπάρχουσα μονάδα 100+ΠΤ	85+ΠΤ							
	$\Pi T = ((1 - ((\eta - \eta_e) / \eta_{hr})) / \eta_e) \times (MT\Phi A_r - 26)$							

XE: Υλοποίηση της επένδυσης χωρίς τη χρήση δημόσιας ενίσχυσης

ME: Υλοποίηση της επένδυσης με χρήση δημόσιας ενίσχυσης

Πιο αναλυτικά, μέχρι το 2010 η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ ήταν σταθερή και ίδια για όλους τους παραγωγούς, ανεξάρτητα από τις συνθήκες της αγοράς. Πρώτη φορά το 2010 λαμβάνεται υπόψιν ότι η επένδυση σε ΣΗΘ είναι άμεσα συνδεδεμένη με την τιμή του φυσικού αερίου, καθώς αυτό είναι το κύριο καύσιμο που χρησιμοποιείται, και για να γίνει ανταγωνιστική θα πρέπει να εξετάζεται η τιμή αγοράς του καυσίμου σε σχέση με την τιμή πώλησης της ενέργειας που παράγει. Έτσι, εισέρχεται ο όρος ΣΡ στην εξίσωση, ο οποίος συσχετίζει την τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας με την τιμή αγοράς του φυσικού αερίου και με τον συντελεστή απόδοσης σε ηλεκτρισμό. Η αλλαγή αυτή ήταν μεγάλο ζητούμενο των παραγωγών ΣΗΘ καθώς θα βοηθούσε στην προώθηση της τεχνολογίας.

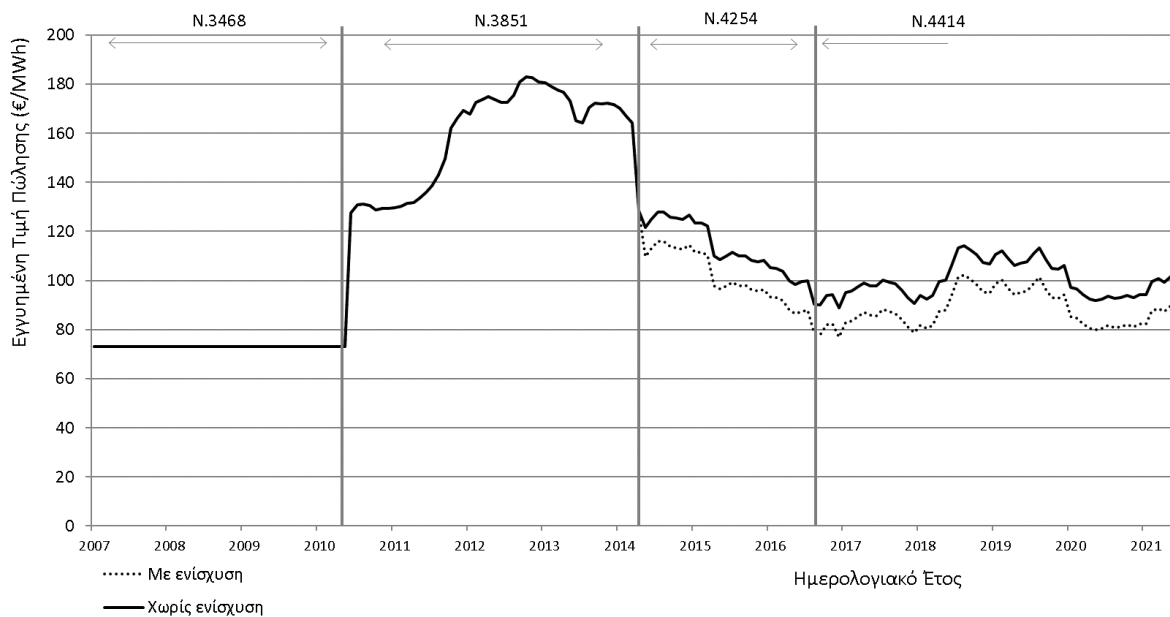
Η νέα εξίσωση που ισχύει από τον Ιούνιο του 2014, εισάγει έναν νέο όρο που ονομάζεται ΠΤ (προσαρμογή τιμής φυσικού αερίου), στον υπολογισμό του οποίου περιλαμβάνεται και το κόστος μεταφοράς του καυσίμου, αλλά και το κόστος εκπομπών CO₂, στοιχείο το οποίο εισέρχεται για πρώτη φορά στον υπολογισμό. Επίσης, μέσω του όρου ΠΤ υπολογίζεται αναλυτικότερα και η απόδοση της μηχανής, μέσω του βαθμού απόδοσης σε ηλεκτρισμό, σε θερμότητα, αλλά και σε χωριστή παραγωγή. Η κατηγοριοποίηση των μονάδων ΣΗΘ γίνεται ανάλογα με τη διεργασία, το καύσιμο και το μέγεθος της μηχανής.

Το 2016, με τον Ν. 4414, ορίζεται νέο καθεστώς στήριξης, σύμφωνα με το οποίο εφαρμόζεται Λειτουργική Ενίσχυση για την αποζημίωση της συμβατικής ποσότητας ηλεκτρικής ενέργειας ΣΗΘΥΑ. Η τιμή της ενίσχυσης προκύπτει από τις Τιμές Αναφοράς (ΤΑ), για τον υπολογισμό των οποίων εξακολουθεί να υπάρχει το σκέλος της Προσαρμογής Τιμής (ΠΤ). Για τη συμπαραγωγή, η εξίσωση που προκύπτει είναι όμοια με αυτή του Ν. 4254, ενώ ορίζονται προσαυξήσεις που δυνητικά επιβάλλονται κατά περίπτωση στο Σταθερό Σκέλος της ΤΑ των μονάδων ΣΗΘΥΑ.

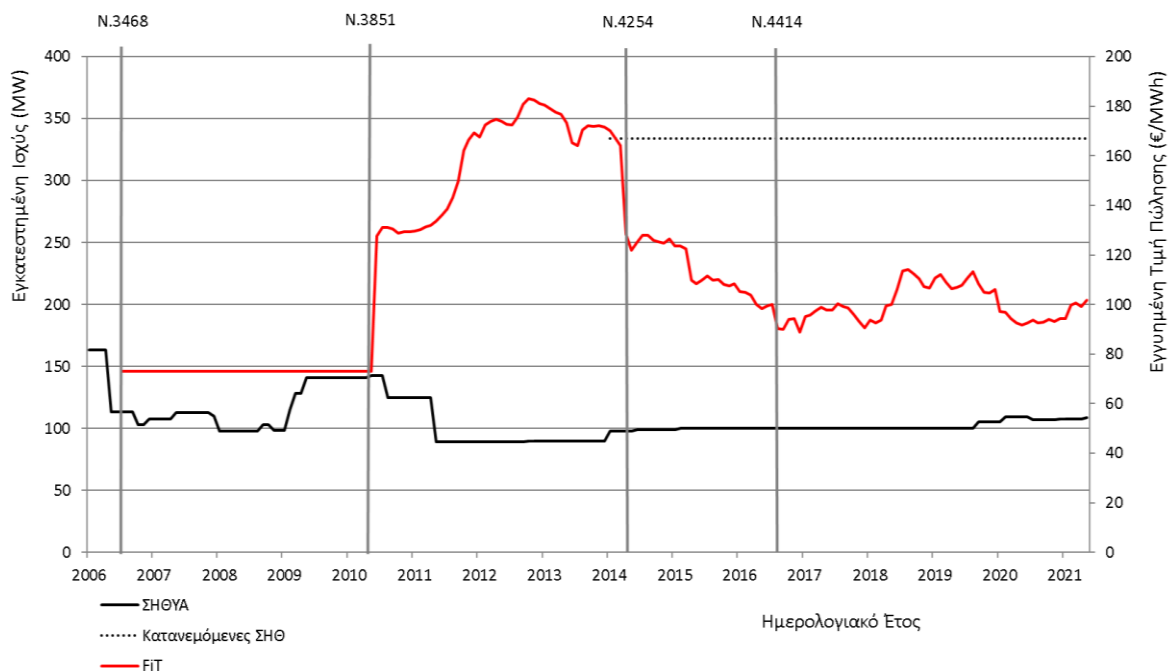
Στο Σχήμα 4.8, παρουσιάζεται η εξέλιξη της μηνιαίας εγγυημένης τιμής πώλησης από το 2007 έως το 2020. Η χαμηλότερη τιμή ήταν 73€ και ίσχυε σταθερά μέχρι το 2010, ενώ οι υψηλότερες τιμές σημειώθηκαν κατά τη διάρκεια εφαρμογής του Ν.3851 και συγκεκριμένα το διάστημα 2012-2014 που η τιμή κυμαινόταν πάνω από τα 160 €/MWh, με κορυφή τα 180 €/MWh στο τέλος του 2012. Με την εφαρμογή του Ν.4254, η τιμή μειώθηκε απότομα και συνέχισε να μειώνεται ελαφρώς φτάνοντας τα 100 €/MWh το 2016, και έκτοτε κυμαίνεται στα 100-115 €/MWh. Οι λόγοι που οδήγησαν στην απότομη μείωση των εγγυημένων τιμών και την αποδυνάμωση του μέτρου στήριξης σχετίζονται με την δημιουργία μεγάλου ελλείματος στον Ειδικό Λογαριασμό ΑΠΕ επιφέροντας αδυναμία πληρωμών, λόγω επιθετικής πολιτικής και υψηλών εγγυημένων τιμών που εφαρμοστήκαν από το 2006 σε

τεχνολογίες όπως τα φωτοβολταϊκά, με σκοπό την ταχεία διείσδυσή τους και την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ [20].

Στο Σχήμα 4.9, μελετάται η εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος σε σχέση με την εξέλιξη της εγγυημένης τιμής και παρατηρείται πολύ μικρή επίδραση, ακόμα και μετά την εντυπωσιακή αύξηση της FiT το 2011. Από την αρχή της εφαρμογής του, το σύστημα εγγυημένων τιμών δεν έχει καταφέρει να λειτουργήσει ως κίνητρο για την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, η οποία κινείται σταθερά στα 100 MW τα τελευταία 10 χρόνια, με μοναδική εξαίρεση το διάστημα 2009-2011 που πλησίασε τα 150 MW.



Σχήμα 4.8. Διαχρονική εξέλιξη της εγγυημένης τιμής πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή στην Ελλάδα για το διάστημα 2007-2021, σε €/MWh.



Σχήμα 4.9. Σύγκριση εξέλιξης εγγυημένης τιμής και εξέλιξης εγκατεστημένου ισχύος στην Ελλάδα για το διάστημα 2006-2021. Στον αριστερό άξονα y παρουσιάζεται η εγκατεστημένη ισχύς, σε MW, και στον δεξιό άξονα y η FiT, σε €/MWh.

4.5 Μητρώο μονάδων

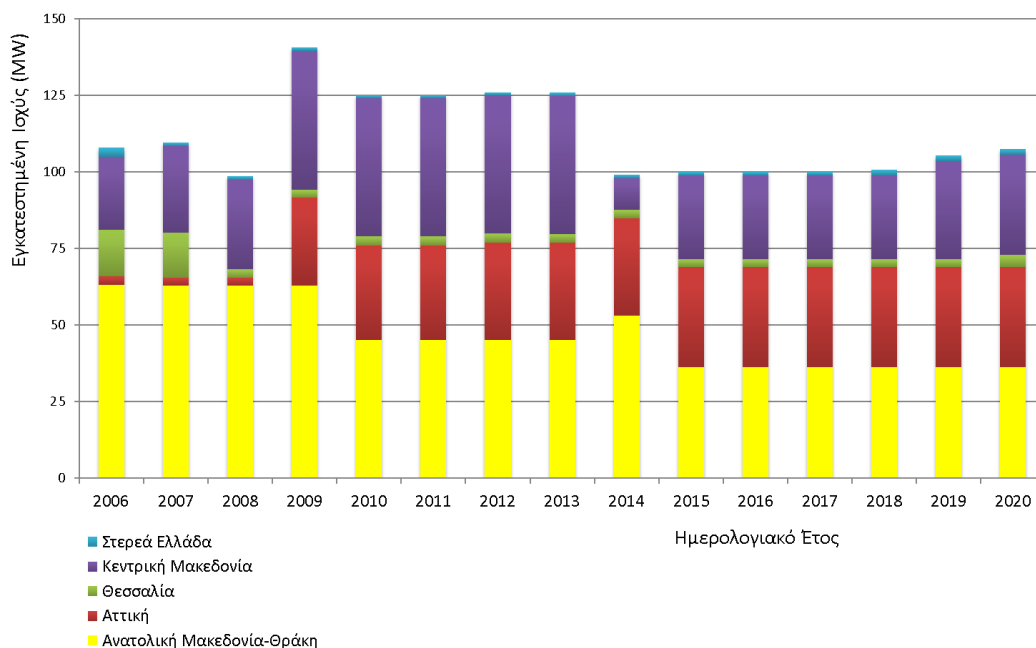
4.5.1 Μονάδες ΣΗΘΥΑ

Στον Πίνακα 4.2, παρουσιάζονται οι εγγεγραμμένες στο μητρώο μονάδες ΣΗΘΥΑ με καύσιμο φυσικό αέριο και η εγκατεστημένη ισχύς τους, σύμφωνα με τα μητρώα των ΛΑΓΗΕ και ΑΔΜΗΕ [76, 79]. Ο τρόπος καταγραφής των μονάδων από τον ΛΑΓΗΕ, λαμβάνει μόνο τις μονάδες ΣΗΘΥΑ με σύμβαση πώλησης ηλεκτρισμού στο δίκτυο που αποζημιώνονται από τον λειτουργό αγοράς, χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι αυτοπαραγωγοί. Το ένα τρίτο της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος είναι εγκαταστημένο στον βιομηχανικό τομέα, ενώ στον αγροτικό τομέα αντιστοιχεί το 18%. Στον τριτογενή και εμπορικό τομέα αντιστοιχεί μικρότερο ποσοστό, καθώς είναι εγκατεστημένα συστήματα χαμηλότερης ισχύος.

Πίνακας 4.2. Μονάδες ΣΗΘΥΑ του μητρώου ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ.

ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)
ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑ ΦΩΣΦΟΡΙΚΩΝ ΛΙΠΑΣΠΑΤΩΝ	21,22
ΚΕΡΑΜΟΠΟΪΑ ΚΟΘΑΛΗ Α.Ε.	1,13
ΓΕΝΕΣΙΣ ΜΑΙΕΥΤΙΚΗ-ΓΥΝΑΙΚΟΛΟΓΙΚΗ ΚΛΙΝΙΚΗ ΘΕΣ/ΝΙΚΗΣ ΑΕ	0,73
ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΔΡΑΜΑΣ Α.Ε.	4,80
ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝ/ΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ	2,72
ΕΛΦΙΚΟ ΑΕΕ	1,20
ΑΓΚΡΙΤΕΧ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ Α.Ε.	4,97
ΘΕΡΜΗ ΣΕΡΡΩΝ Α.Ε.	16,00
ΕΛΛΗΝΙΚΑ ΠΕΤΡΕΛΑΙΑ Α.Ε.	5,50
ΜΠΡΑΪΤ ΕΙΔΙΚΟΣ ΦΩΤΙΣΜΟΣ Α.Ε.	0,13
ΕΥΔΑΠ	12,90
ΔΕΣΦΑ ΑΕ	13,00
Π.Α.Π. ΧΟΤΕΛΣ ΚΟΡΠ Α.Ε.	0,07
ΔΕΛΤΑ ΑΝΩΝΥΜΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΚΑΙ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ ΤΡΟΦΙΜΩΝ	2,00
LAMDA ΔΟΜΗ Ανώνυμη Εταιρεία Υπηρεσιών και Αξιοποίησης Ακινήτων	2,00
WONDERPLANT	8,00
ΘΕΡΜΟΚΗΠΙΑ ΣΑΒΒΙΔΗ Α.Ε.	1,00
Μ.Ι. ΜΑΪΛΛΗΣ ΑΝΩΝΥΜΟΣ ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΕΤΑΙΡΕΙΑ – ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΣΥΣΚΕΥΑΣΙΑΣ	0,70
ΚΗΠΟΙ ΚΑΡΔΙΤΣΑΣ Α.Ε.	4,00

Γεωγραφικά παρατηρείται ότι οι εγκαταστάσεις συγκεντρώνονται κυρίως στη Μακεδονία και την Αττική, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.10.



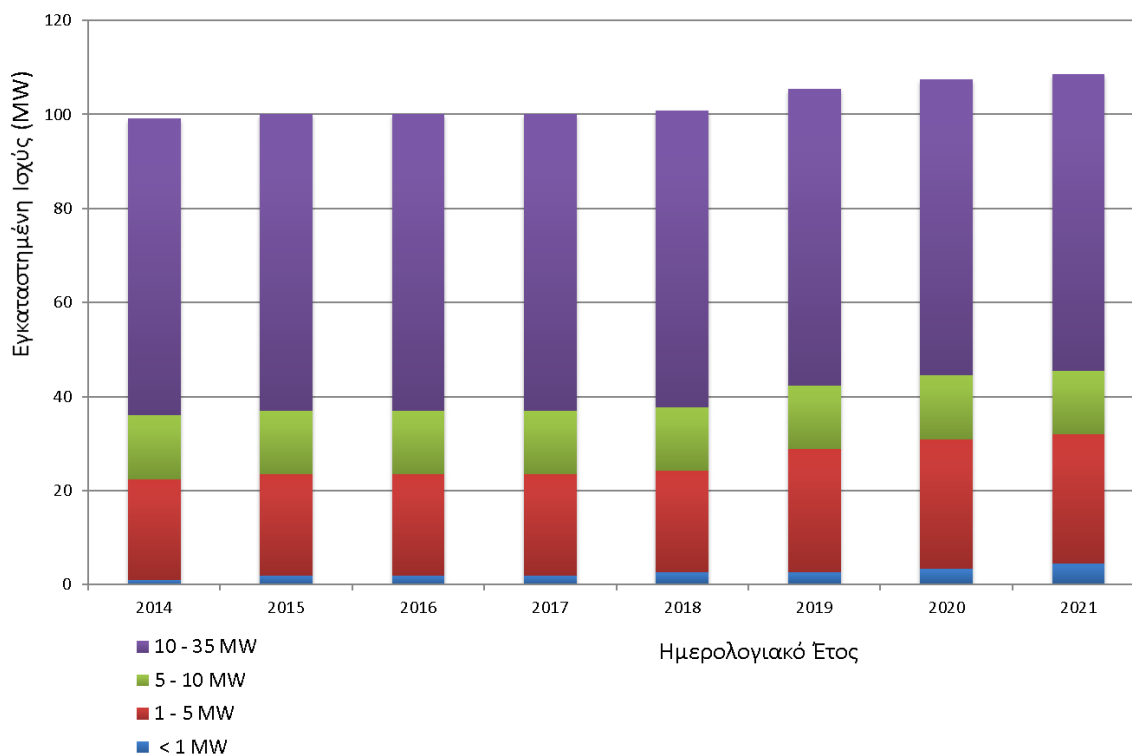
Σχήμα 4.10. Διαχρονική εξέλιξη εγκατεστημένης ισχύος και γεωγραφικής κατανομής εγκατεστημένης ισχύος στην Ελλάδα για το διάστημα 2006-2020.

4.5.2 Κατανεμόμενες Μονάδες

Η μοναδική εταιρία με άδεια λειτουργίας κατανεμόμενης μονάδας είναι η ΑΛΟΥΜΙΝΙΟ Α.Ε. με συνολική εγκατεστημένη ισχύ 334 MW και εγκατεστημένη ισχύ που θεωρείται υψηλής απόδοσης 134 MW.

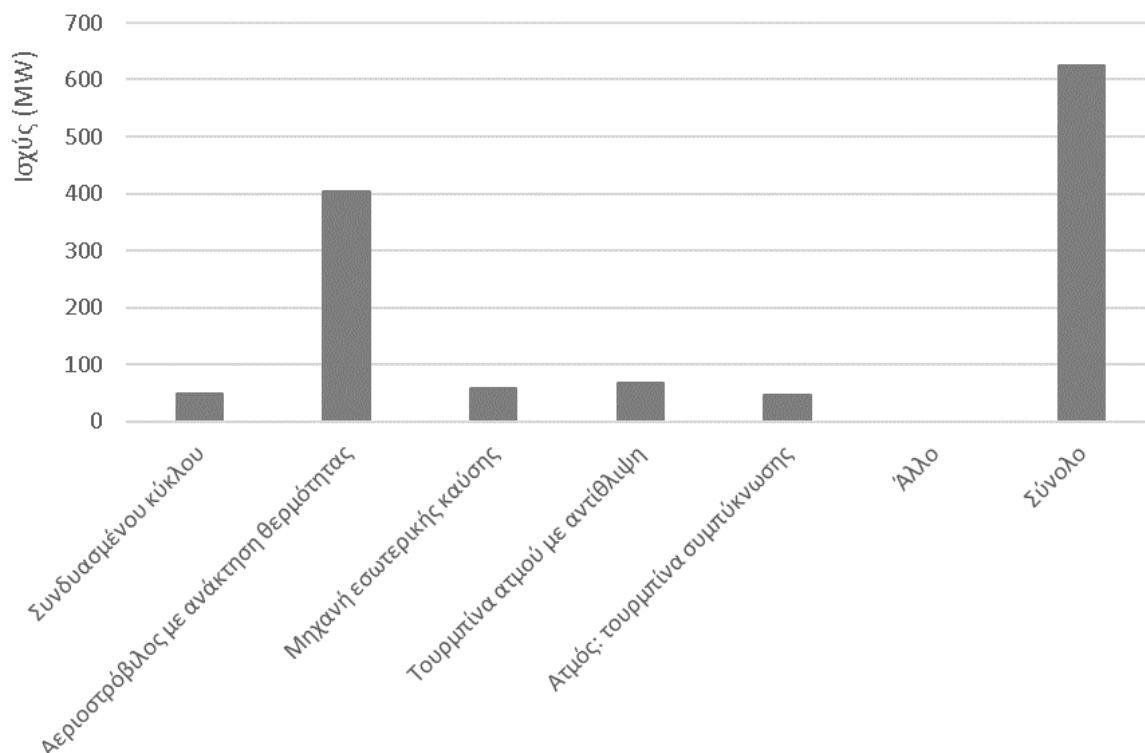
4.6 Κατηγοριοποίηση μονάδων

Στο Σχήμα 4.11, παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των μονάδων ανάλογα με το μέγεθος της μηχανής, σύμφωνα με τα στοιχεία του ΛΑΓΗΕ για τα έτη 2014-2021. Η κατανομή αυτή είναι με βάση τη συνολική εγκαταστημένη ισχύ κάθε κατηγορίας, όπως ισχύει στο κλείσιμο του εκάστοτε έτους. Είναι εμφανές ότι κυρίαρχες είναι οι μεγάλες μονάδες με μέγεθος από 10-35 MW. Οι μικρές μονάδες, με μέγεθος μικρότερο του 1 MW, παρουσιάζουν σταδιακά μικρή, αλλά συνεχή αύξηση ετησίως. Αύξηση στην εγκατεστημένη ισχύ παρουσιάζουν από το 2019 και οι μονάδες με μέγεθος 1-5 MW.



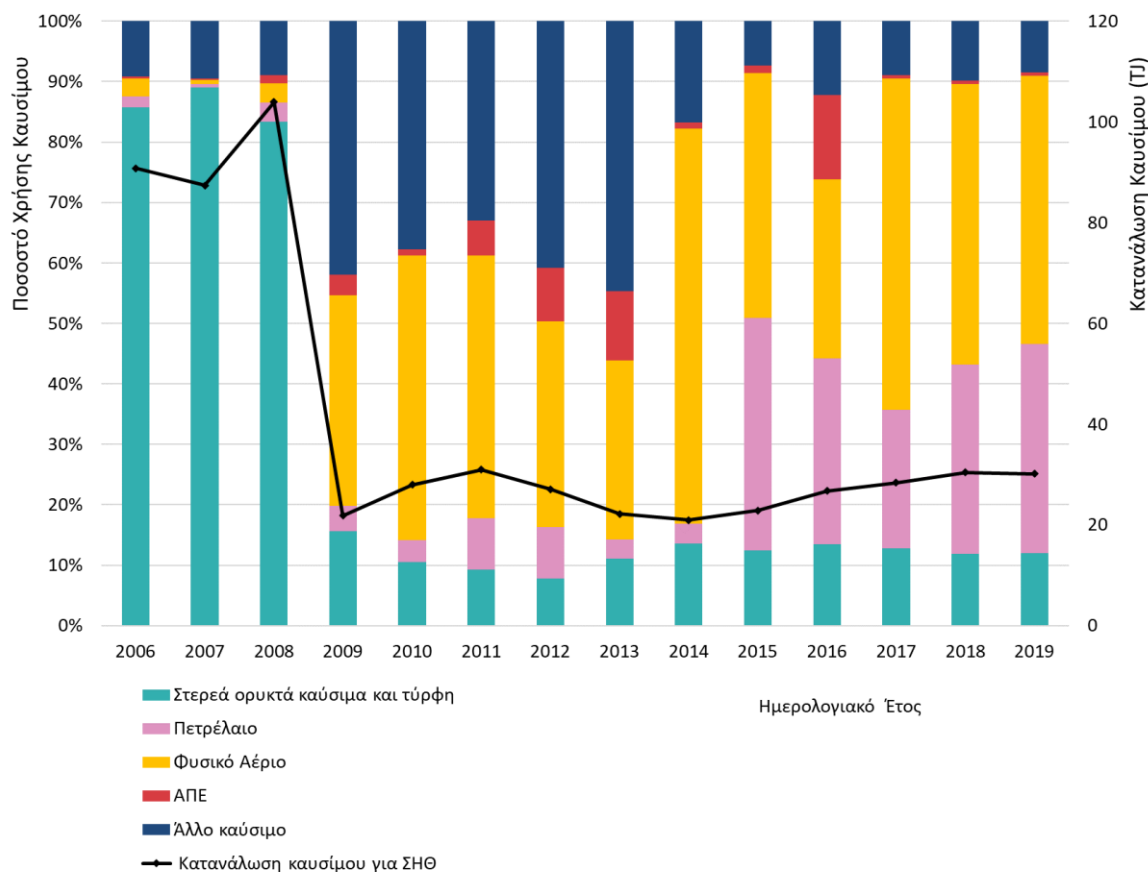
Σχήμα 4.11. Διαχρονική εξέλιξη ετήσιας εγκατεστημένης ισχύος συστημάτων ΣΗΘΥΑ με χρήση φυσικού αερίου, με κατανομή ανά μέγεθος μηχανής, σε MW, για το διάστημα 2014-2021.

Στο Σχήμα 4.12, παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των μονάδων ανάλογα με τον τύπο κινητήρα του συστήματος ΣΗΘ, με βάση την εγκατεστημένη ισχύ για το έτος 2015, σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat [80]. Όπως φαίνεται, η κυρίαρχη τεχνολογία είναι ο αεριοστρόβιλος με ανάκτηση θερμότητας. Η συνολική εγκατεστημένη ισχύς ανέρχεται γύρω στα 620 MW.



Σχήμα 4.12. Δεδομένα εγκατεστημένης ισχύος με βάση τον τύπο κινητήρα του συστήματος ΣΗΘ για το έτος 2015, σε MW.

Τέλος, στο Σχήμα 4.13, παρουσιάζεται η κατηγοριοποίηση των μονάδων ανάλογα με τον τύπο καυσίμου, σύμφωνα με τα στοιχεία της Eurostat [77]. Συγκεκριμένα, παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη των ετήσιων μεριδίων χρήσης διαφορετικών καυσίμων και η συνολική ετήσια κατανάλωση καυσίμου στα συστήματα ΣΗΘ που είναι σε λειτουργία στην Ελλάδα, για το διάστημα 2006-2019. Το 2006, το κυρίαρχο καύσιμο ήταν στερεά ορυκτά, ενώ σταδιακά από το 2009 εισέρχεται το φυσικό αέριο και από το 2015 και το πετρέλαιο. Το 2019, τα κύρια καύσιμα είναι το φυσικό αέριο με ποσοστό χρήσης 44% και το πετρέλαιο με 35%. Η συνολική κατανάλωση καυσίμου μειώθηκε απότομα το 2009 με την εμφάνιση των εναλλακτικών καυσίμων έναντι των στερεών ορυκτών καυσίμων, και έκτοτε κυμαίνεται γύρω στα 30 TJ ετησίως.

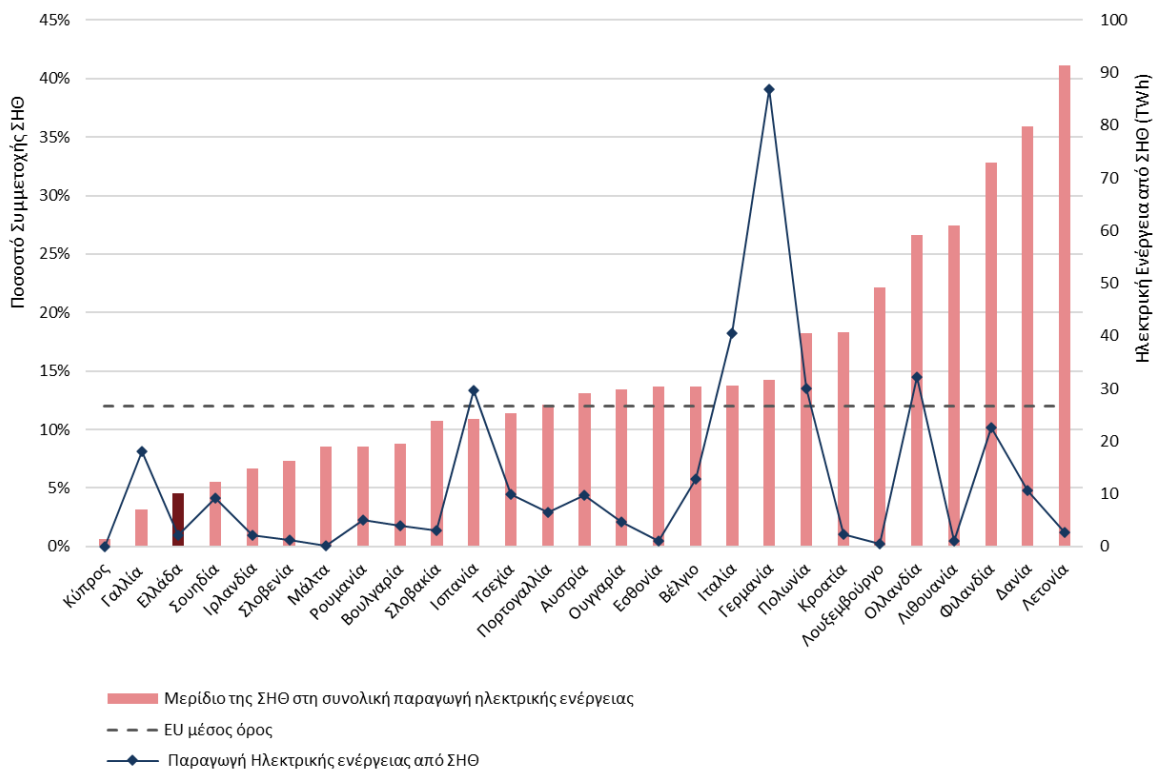


Σχήμα 4.13. Διαχρονική εξέλιξη ετήσιων μεριδίων χρήσης διαφορετικών καυσίμων και συνολική ετήσια κατανάλωση καυσίμου στα συστήματα ΣΗΘ που είναι σε λειτουργία στην Ελλάδα, για το διάστημα 2006-2019.

4.7 Η Συμπαραγωγή στην Ευρώπη

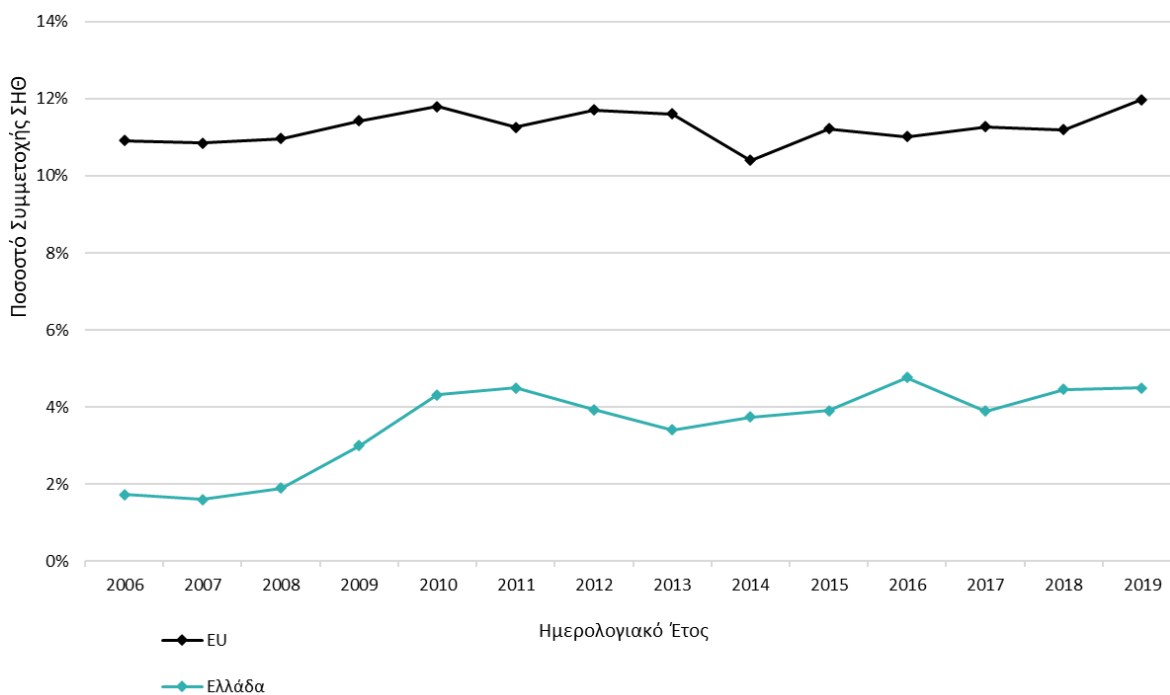
Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται η ισχύουσα κατάσταση της συμπαραγωγής στην Ευρώπη και γίνεται σύγκριση με την Ελλάδα.

Στο Σχήμα 4.14, παρουσιάζεται το ποσοστό συμμετοχής της ΣΗΘ στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ το 2019 στις χώρες της Ευρώπης [77]. Ο ευρωπαϊκός μέσος όρος κυμαίνεται στο 12%. Τα υψηλότερα ποσοστά παρατηρούνται στη Λετονία με ποσοστό συμμετοχής που ξεπερνά το 40% και ακολουθούν η Δανία, η Φινλανδία, η Λιθουανία και η Ολλανδία με ποσοστά από 25% έως 35%. Η Ελλάδα, με ποσοστό συμμετοχής μόλις 5%, εντάσσεται στη χαμηλότερη κατηγορία. Σε ό,τι αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ, η υψηλότερη παρατηρείται στη Γερμανία με ετήσια παραγωγή ενέργειας σχεδόν 90 TWh και ακολουθούν η Ιταλία με παραγωγή 40 TWh, και η Ολλανδία, η Ισπανία και η Πολωνία με παραγωγή κοντά στις 30 TWh.

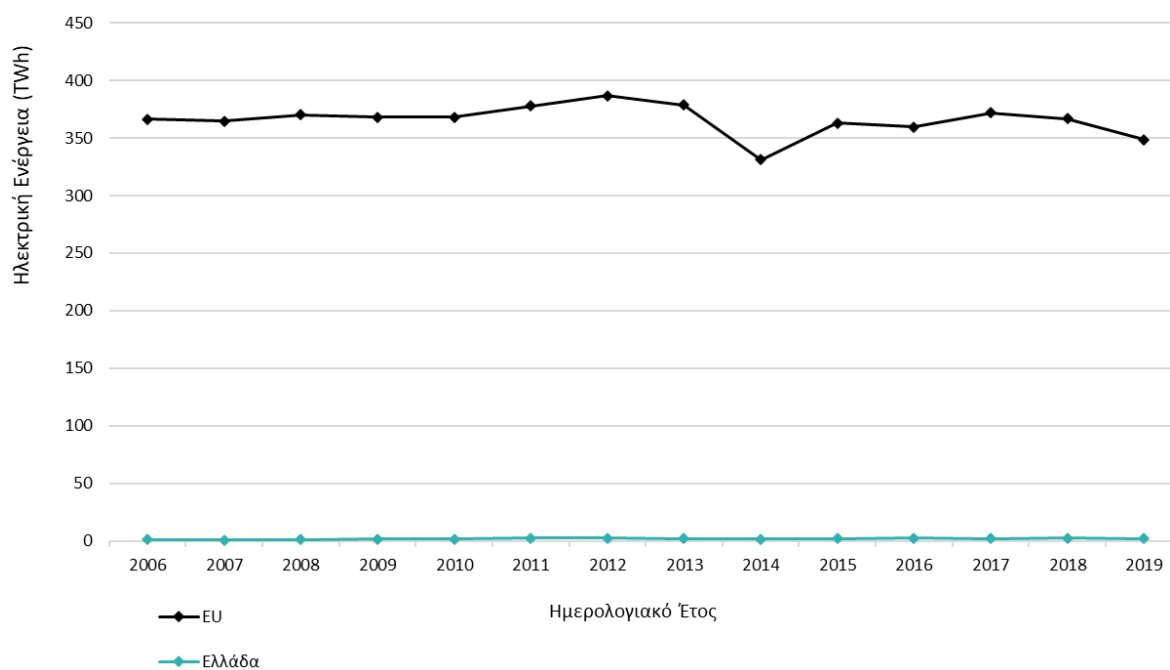


Σχήμα 4.14. Ποσοστό συμμετοχής της ΣΗΘ στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ το 2019 στις χώρες της Ευρώπης. Στον αριστερό άξονα y παρουσιάζεται το ποσοστό συμμετοχής και στον δεξιό άξονα y η ηλεκτρική ενέργεια σε TWh.

Η διαχρονική εξέλιξη του ποσοστού συμμετοχής της ΣΗΘ στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, και της συνολικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ από το 2006 στην Ευρώπη και την Ελλάδα παρουσιάζεται στα Σχήματα 4.15 και 4.16 [77]. Σε σχέση με τις μέσες τιμές του ποσοστού συμμετοχής της ΣΗΘ στην συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας της Ευρώπης, που κυμαίνονται κοντά στο 11%, η Ελλάδα κυμαίνεται πολύ χαμηλότερα. Για πολλά χρόνια, το ποσοστό ήταν σταθερά κοντά στο 2%, αλλά την τελευταία δεκαετία παρουσίασε σημαντική αύξηση φτάνοντας στο 4%. Διαχρονικά, η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ δεν παρουσιάζει μεγάλη διακύμανση, με τιμές που κυμαίνονται γύρω στις 2 TWh στην Ελλάδα και 370 TWh στην Ευρώπη. Στην Ευρώπη, φαίνεται πως η αγορά της συμπαραγωγής έχει φτάσει σε ένα σημείο ισορροπίας και δεν έχει αναπτυχθεί ιδιαίτερα την τελευταία δεκαετία.

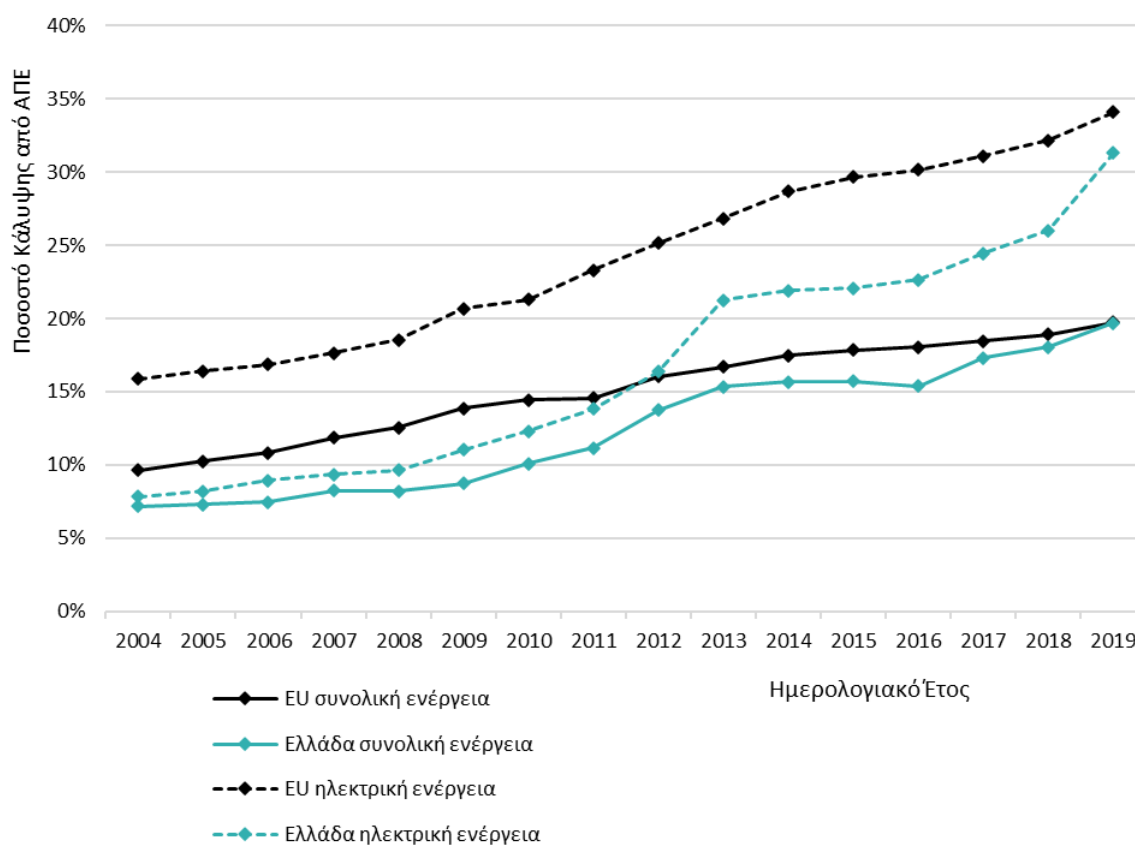


Σχήμα 4.15. Διαχρονική εξέλιξη ποσοστού συμμετοχής της ΣΗΘ στη συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, για το διάστημα 2006-2019.



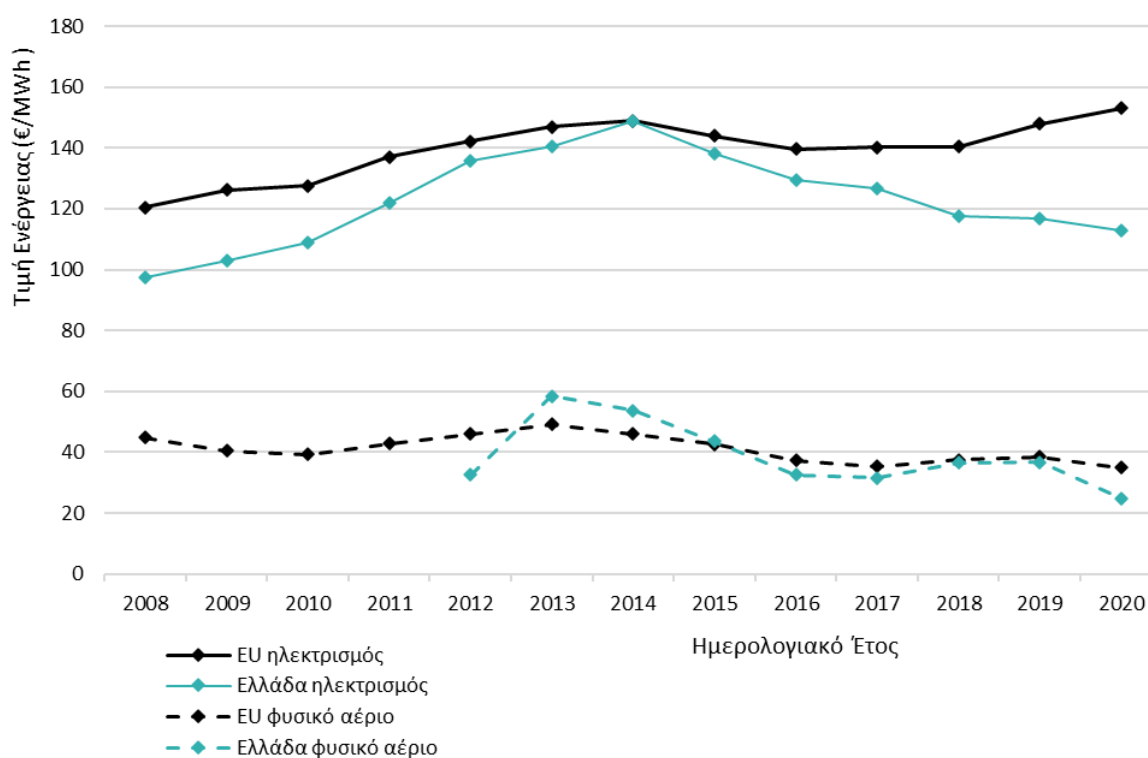
Σχήμα 4.16. Διαχρονική εξέλιξη συνολικής ετήσιας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΣΗΘ στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, σε TWh.

Στο Σχήμα 4.17, εξετάζονται στο σύνολό τους οι ΑΠΕ και συγκρίνεται η εξέλιξη του ποσοστού κάλυψης της κατανάλωσης ηλεκτρικής και συνολικής ενέργειας από ΑΠΕ [81]. Συμπεραίνεται ότι η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών στην Ελλάδα είναι ικανοποιητική, καθώς οι τιμές κυμαίνονται αρκετά κοντά στον μέσο όρο των Ευρωπαϊκών χωρών, ειδικά σε ό,τι αφορά στη συνολική κατανάλωση ενέργειας. Με σταθερά ανοδική πορεία από το 2004, οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας κάλυπταν το 15% της ενεργειακής κατανάλωσης στην Ελλάδα το 2013, ενώ αποτέλεσε ευρωπαϊκό στόχο και δέσμευση το ποσοστό αυτό να φτάσει το 20% έως το 2020. Όπως φαίνεται, ο στόχος σχεδόν επιτεύχθηκε το 2019 με ποσοστό 19,6% συγκλίνοντας οριακά με τον μέσο όρο της Ευρώπης. Σε ό,τι αφορά στην ηλεκτρική ενέργεια, και εδώ το ποσοστό κάλυψης παρουσιάζει συνεχή ανοδική πορεία από το 2004 σε Ελλάδα και Ευρώπη, με την Ελλάδα να παραμένει χαμηλότερα του ευρωπαϊκού μέσου ορού. Παρουσιάζοντας, ωστόσο, από το 2012 υψηλότερους ρυθμούς αύξησης κατάφερε το 2019 να ξεπεράσει το 30% και να πλησιάσει αρκετά το ευρωπαϊκό ποσοστό.



Σχήμα 4.17. Διαχρονική εξέλιξη ποσοστού κάλυψης της κατανάλωσης ηλεκτρικής και συνολικής ενέργειας από ΑΠΕ στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, για το διάστημα 2006-2019. Η συνεχής γραμμή αντιστοιχεί στην κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και η διακεκομμένη στη συνολική κατανάλωση ενέργειας.

Στο Σχήμα 4.18, παρουσιάζεται η διαχρονική εξέλιξη τιμών ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, για το διάστημα 2008-2020 [82]. Η τιμή του ηλεκτρισμού είναι αρκετά μεγαλύτερη αυτής του φυσικού αερίου. Στην Ευρώπη φαίνεται διαχρονικά να αυξάνεται η διαφορά των τιμών, καθώς αυξάνεται συνεχώς η τιμή του ηλεκτρισμού. Στην Ελλάδα, η τιμή του ηλεκτρισμού ήταν σταθερά αυξανόμενη από το 2008 έως το 2016 που έφτασε τη μέγιστη τιμή της, σχεδόν 150 €/MWh, και έκτοτε μειώνεται φτάνοντας στα 115 €/MWh το 2020. Η τιμή του φυσικού αερίου, από τα 60€/MWh που ήταν το 2013, μειώνεται σταδιακά φτάνοντας σχεδόν τα 20 €/MWh το 2020. Η διαφορά τους φαίνεται να διατηρείται σχετικά σταθερή, στοιχείο που ευνοεί την ανάπτυξη της ΣΗΘ.



Σχήμα 4.18. Διαχρονική εξέλιξη τιμών ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου στην Ευρώπη και στην Ελλάδα, για το διάστημα 2008-2020.

5.

Οικονομική αξιολόγηση συστημάτων συμπαραγωγής σε λειτουργία

5.1 Εισαγωγή

Η πραγματική απόδοση ενός συστήματος CHP διαφέρει από την απόδοση σχεδιασμού για τεχνικούς και οικονομικούς λόγους. Οι τεχνικοί λόγοι αναφέρονται σε αλλαγές φορτίου σε σχέση με τις παραδοχές σχεδιασμού και οι οικονομικοί λόγοι αναφέρονται στην αστάθεια των τιμών της ενέργειας (καύσιμο και ηλεκτρικό ρεύμα), η οποία ποικίλλει από χώρα σε χώρα και αποτελεί ένα κρίσιμο ζήτημα για τους ιδιοκτήτες συμπαραγωγής, καθώς περικλείει υψηλό κίνδυνο και επηρεάζει τη διαδικασία λήψης αποφάσεων σχετικά με την επένδυση και τη λειτουργία της μονάδας. Η επίδραση της διακύμανσης των τιμών της ενέργειας στην οικονομική αποδοτικότητα και η σχέση μεταξύ της ηλεκτρικής ενέργειας και της τιμής του φυσικού αερίου έχουν εξεταστεί από διάφορους συγγραφείς, στην προσπάθεια ανάπτυξης μιας μεθόδου που μπορεί να υποδείξει τις συνθήκες υπό τις οποίες επενδύει ή/και λειτουργεί μια μονάδα CHP οικονομικά βιώσιμη [18, 19, 83, 84]. Ορισμένοι από αυτούς προτείνουν τη

διαφορά μεταξύ της ηλεκτρικής ενέργειας και της τιμής καυσίμου ως τον κατάλληλο δείκτη [84], ενώ άλλοι δείχνουν την αναλογία τους ως πιο κατάλληλη [18].

Η ανάλυση των συστημάτων συμπαραγωγής έχει εξεταστεί ευρέως στη βιβλιογραφία. Με τη χρήση νέων υπολογιστικών εργαλείων και αναλυτικών τεχνικών, η λειτουργία μιας μονάδας CHP μπορεί να προσομοιωθεί σε υψηλό επίπεδο ακρίβειας και, σε αυτόν τον τομέα, υπάρχει πληθώρα μελετών [85–89]. Ωστόσο, η πρόσβαση σε πραγματικά δεδομένα λειτουργίας είναι πάντα ένα πολύτιμο εργαλείο που μπορεί να παρέχει χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του συστήματος και τις επιλογές βελτιστοποίησης, ενώ μπορεί επίσης να αποκαλύψει λανθασμένες υποθέσεις και παραδοχές που πολλές φορές υιοθετούνται κατά τη φάση σχεδιασμού, τόσο σε τεχνικό όσο και σε οικονομικό επίπεδο. Προς αυτή την κατεύθυνση, οι Badami et al [90] πραγματοποίησαν μια τεχνοοικονομική αξιολόγηση 11 μονάδων παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος CHP με διαφορετικούς κινητήρες, που λειτουργούσαν στην Ιταλία. Η ενεργειακή και οικονομική συμπεριφορά αξιολογήθηκε με τον δείκτη πρωτογενούς εξοικονόμησης ενέργειας (PES) και την απλή περίοδο αποπληρωμής (SPB), αντίστοιχα, και οι δείκτες υπολογίστηκαν χρησιμοποιώντας τα δεδομένα σχεδιασμού και τα πραγματικά δεδομένα μετά από ένα έτος λειτουργίας της εγκατάστασης. Εξήλθε το συμπέρασμα ότι το υπολογιζόμενο SPB από τα πραγματικά δεδομένα λειτουργίας ήταν σημαντικά υψηλότερο από το εκτιμώμενο SPB κατά το στάδιο του σχεδιασμού. Έτσι, προκύπτει ότι τα επίπεδα απόδοσης μπορεί να είναι πιο απρόβλεπτα όταν τα συστήματα λειτουργούν σε πραγματικά κτίρια και σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας. Ομοίως, οι Li et al [91] παρουσίασαν μια μελέτη περίπτωσης ενός λειτουργικού συστήματος συμπαραγωγής εγκατεστημένου σε ένα πανεπιστήμιο της Κίνας. Ανέλυσαν τη χρήση ενέργειας και έδειξαν την αναποτελεσματική χρήση της μονάδας, καθώς η υπολογισμένη συνολική απόδοση του συστήματος CHP ήταν χαμηλότερη από την απόδοση σχεδιασμού και μόνο ελαφρώς υψηλότερη από το 60%. Οι Kuhn et al [41] παρουσίασαν τα αποτελέσματα πολλών επιτόπιων δοκιμών που διεξήχθησαν σε διαφορετικές χώρες σε ολόκληρη την Ευρώπη, προκειμένου να διερευνηθεί το δυναμικό των τεχνολογιών micro-CHP πριν από την επίσημη κυκλοφορία τους σε ενεργειακές αγορές, τονίζοντας τη σημασία της αξιολόγησης υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, οι οποίες μπορούν να βοηθήσουν προς την περαιτέρω βελτίωση των συστημάτων και τη διεύθυνσή τους στις συγκεκριμένες αγορές ενέργειας για τις οποίες προορίζονται. Επιπλέον, οι Magnani et al [92] ανέλυσαν τη μελέτη περίπτωσης ενός micro-CHP εγκατεστημένου σε ένα μικρό βιομηχανικό κτίριο στην Ιταλία και χρησιμοποίησαν τα πειραματικά δεδομένα προκειμένου να αναδείξουν την επίδραση της εποχιακής διακύμανσης και, ιδιαίτερα, των αλλαγών θερμοκρασίας στην

απόδοση και στην κατανάλωση αερίου, αλλά και να συγκρίνουν τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού με τα πραγματικά δεδομένα λειτουργίας. Τέλος, σε μια μελέτη περίπτωσης ενός μεγαλύτερου συστήματος με πιο εκτεταμένο σύνολο δεδομένων, οι Paine et al [93] χρησιμοποίησαν ένα εξαετές σύνολο δεδομένων από τη λειτουργία ενός δικτύου θέρμανσης υπό την καθοδήγηση CHP που συλλέχθηκε από μια τοπική αρχή στο Ηνωμένο Βασίλειο για την αξιολόγηση της διαχείρισης του συστήματος και των εξόδων του. Σε μια προσπάθεια απλοποίησης της διαδικασίας αξιολόγησης, υπέδειξαν μια απλή μέθοδο που χρησιμοποιεί και εμφανίζει σε γραφήματα βασικά επιχειρησιακά σύνολα δεδομένων, όπως η κατανάλωση αερίου και η εισαγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από το εθνικό δίκτυο, προκειμένου να παράσχουν πληροφορίες σχετικά με τις στρατηγικές διαχείρισης και τις επιδόσεις του συστήματος.

Η συμπαραγωγή, ως ένα βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον ενεργειακό σύστημα, έχει προωθηθεί από την Ευρωπαϊκή Ένωση μαζί με τη χρήση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) και CHP / CCHP, προκειμένου να επιτευχθούν οι περιβαλλοντικοί στόχοι και η ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού. Στην Ελλάδα, αυτή η προώθηση υποστηρίχθηκε μέσω της εισαγωγής νέας νομοθεσίας από το 2006 και μετά, όπου τα συστήματα συμπαραγωγής εξομοιώθηκαν με τα συστήματα ΑΠΕ και έλαβαν επενδυτικά κίνητρα και υψηλότερες τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες οριστικοποιήθηκαν με το target model το 2016. Η διείσδυση της συμπαραγωγής στο ελληνικό ενεργειακό σύστημα συμπεριλήφθηκε, επίσης, στον μακροπρόθεσμο εθνικό ενεργειακό σχεδιασμό του Εθνικού Συμβουλίου Ενεργειακής Στρατηγικής το 2012, όπου ένας από τους πυλώνες για το 2050 ήταν η ανάπτυξη συστημάτων microCHP και τριπαραγωγής στον τριτογενή τομέα [94].

Ωστόσο, παρόλο που αυτές οι μεταρρυθμίσεις ήταν επιτυχείς στην αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα, με μια εκρηκτική σιγμοειδή διείσδυση των φωτοβολταϊκών [95] και μεγάλη διέγερση της αιολικής ενέργειας [95–97], η διείσδυση της συμπαραγωγής στην ελληνική αγορά ενέργειας παραμένει πολύ περιορισμένη. Από την έναρξή του, φαίνεται ότι ο μηχανισμός στήριξης της τιμολόγησης ενέργειας μέσω των εγγυημένων τιμών Feed-in-Tariff (FiT) δεν κατάφερε να λειτουργήσει ως κίνητρο για την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος, παρά τα γενναιόδωρα τιμολόγια που είναι ανάλογα με την τιμή του φυσικού αερίου, ώστε να εξαλείφουν τον κίνδυνο των κυμαινόμενων τιμών αερίου. Σε γενικές γραμμές, η καθυστερημένη ανάκαμψη κεφαλαίου είναι αυτή που συνιστά μια τέτοια επένδυση μη ελκυστική, και αυτό συνήθως αποδίδεται είτε σε λανθασμένο αρχικό σχεδιασμό συστήματος, το οποίο οδηγεί σε χαμηλούς δείκτες χρησιμοποίησης και δεν

προσφέρει την προβλεπόμενη οικονομική εξοικονόμηση [98], είτε στην αβεβαιότητα της τιμής της ενέργειας. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η κακή διαχείριση μπορεί επίσης να προκαλέσει αρνητικά αποτελέσματα [99]. Το βασικό ερώτημα για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής είναι τί δεν πήγε καλά στην περίπτωση της Ελλάδας και πώς εξελίχθηκαν τα λίγα υπάρχοντα έργα. Το κεφάλαιο αυτό φιλοδοξεί να δώσει την απάντηση σε αυτήν την ερώτηση.

Αυτό επιτυγχάνεται μέσω μιας ολοκληρωμένης και συγκριτικής παρουσίασης οκτώ έργων CHP/CCHP, τα οποία βρίσκονται σε λειτουργία στην Αθήνα. Προς αυτήν την κατεύθυνση, εφαρμόζεται μια απλή και αποτελεσματική μέθοδος. Με βάση τις συνολικές μηνιαίες καταναλώσεις καυσίμου [100], την εξέλιξη των τιμών της ενέργειας στη χώρα και ορισμένες παραδοχές όπως η λειτουργία σε ονομαστικό φορτίο και οι μέσες τιμές του κόστους επένδυσης, προσδιορίζονται και διερευνώνται τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού των συστημάτων. Η συγκριτική αξιολόγηση της απόδοσης για τη διάρκεια ζωής των οκτώ έργων CHP/CCHP πραγματοποιείται χρησιμοποιώντας δύο βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs): τον συντελεστή χρησιμοποίησης (CF) της μονάδας και την ανάκτηση κεφαλαίου (CR) για την τεχνική και οικονομική αξιολόγηση, αντίστοιχα.

Στο πλαίσιο αυτό, ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να αποκαλύψει την τρέχουσα κατάσταση της CHP στην Ελλάδα αναλύοντας από τεχνική και οικονομική άποψη την απόδοση των υπάρχοντων συστημάτων συμπαραγωγής από την εγκατάστασή τους σε μακροοικονομικό επίπεδο. Η καινοτομία της μελέτης είναι η αξιολόγηση της διάρκειας ζωής των έργων, βάσει πραγματικών δεδομένων λειτουργίας, μέσω μιας μεθόδου που απαιτεί μόνο δεδομένα κατανάλωσης αερίου.

5.2 Μεθοδολογία

5.2.1 Καταγραφή δεδομένων

Γενικά, για μια τέτοια ανάλυση και αξιολόγηση ενός συστήματος συμπαραγωγής σε λειτουργία, είναι απαραίτητο να καταγράφονται τα παρακάτω δεδομένα συναρτήσει του χρόνου:

- (1) E (MWh) η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από συμπαραγωγή,
- (2) Q (MWh) η ωφέλιμη θερμική ενέργεια από συμπαραγωγή,
- (3) G (MWh) η κατανάλωση φυσικού αερίου συμπαραγωγής.

Παράλληλα, πρέπει επίσης να καταγράφονται και τα παρακάτω οικονομικά δεδομένα και η εξέλιξή τους:

- (1) C_g (€/MWh) η τιμή του φυσικού αερίου,
- (2) C_e (€/MWh) η τιμή του ηλεκτρισμού,
- (3) C_m (€/MWh) το κόστος συντήρησης.

Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας E και η ανακτώμενη θερμική ενέργεια Q μπορούν είτε να καταγράφονται από κάποιο σύστημα παρακολούθησης της μονάδας ή να υπολογιστούν σύμφωνα με την κατανάλωση φυσικού αερίου της μονάδας G και τους βαθμούς απόδοσης σχεδιασμού του συστήματος:

$$E = \eta_e G \quad (5.1)$$

$$Q = \eta_{th} G \quad (5.2)$$

όπου η_e (-) είναι η ηλεκτρική απόδοση και η_{th} (-) είναι η θερμική απόδοση του συστήματος συμπαραγωγής.

Η κατανάλωση φυσικού αερίου G καταγράφεται τακτικά από την εταιρεία διανομής αερίου για σκοπούς τιμολόγησης.

Η απόδοση της ΣΗΘ (η ηλεκτρική η_e και η θερμική η_{th}) είναι γνωστή είτε από τα δεδομένα των κατασκευαστών είτε από συγκεκριμένα πειράματα που διενεργούνται στη φάση του σχεδιασμού χρησιμοποιώντας τις Εξισώσεις (5.1) και (5.2). Για μηχανές εσωτερικής καύσης (ΜΕΚ), οι αποδόσεις συνήθως παραμένουν σταθερές για λειτουργία σε ονομαστική ισχύ ή μεταβάλλονται ελαφρώς κατά τη λειτουργία σε μερικό φορτίο. Ωστόσο, η συνολική απόδοση αναμένεται να παραμείνει σχεδόν στα ίδια επίπεδα.

5.2.2 Βασικοί δείκτες απόδοσης

Οι Βασικοί δείκτες απόδοσης ή αλλιώς Key Performance Indicators (KPIs) είναι θεμελιώδεις δείκτες για την αξιολόγηση της λειτουργίας των εγκαταστάσεων και μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με την πραγματική τους απόδοση σε σύγκριση με τις προδιαγραφές σχεδιασμού. Επιλέγονται δύο KPIs, προκειμένου να αξιολογηθούν (α) οι τεχνικές και (β) οι οικονομικές επιδόσεις λειτουργίας ενός συστήματος CHP: (α) ο συντελεστής χρησιμοποίησης CF και (β) η ανάκτηση κεφαλαίου CR , αντίστοιχα.

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης CF_j ενός συστήματος CHP κατά τη διάρκεια του μήνα j ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται E_j (MWh) κατά τη διάρκεια του μήνα j προς τη δυνητική παραγωγή του εάν λειτουργεί σε ονομαστική ισχύ P (MW) συνεχώς όλο τον μήνα j , δηλαδή:

$$CF_j = \frac{E_j}{Pt_j} = \frac{\eta_e G_j}{Pt_j} \quad (5.3)$$

όπου t_j (h) είναι οι συνολικές ημερολογιακές ώρες του μήνα j , G_j (MWh) είναι η κατανάλωση φυσικού αερίου από τη μονάδα για τον μήνα j και η_e είναι η ηλεκτρική απόδοση του συστήματος.

Συνήθως, ο συντελεστής χρησιμοποίησης CF_j παρουσιάζει εποχιακή διακύμανση ανάλογα με τα θερμικά φορτία (θέρμανση χώρου, ψύξη χώρου, θέρμανση νερού για ζεστό νερό χρήσης), ενώ ο δωδεκάμηνος κινούμενος μέσος όρος απαλείφει την οποιαδήποτε εποχιακή διακύμανση και φανερώνει τη μακροχρόνια τάση.

Επιπροσθέτως, ο μέσος συντελεστής χρησιμοποίησης CF_T για τη συνολική περίοδο λειτουργίας (διάρκεια ζωής) του συστήματος υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$CF_T = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M CF_j \quad (5.4)$$

όπου M είναι το σύνολο των μηνών που το σύστημα βρίσκεται σε λειτουργία.

Ο CF_T , όταν συγκρίνεται με την τιμή σχεδιασμού CF_D , αξιολογεί την τεχνική απόδοση του συστήματος CHP. Ο CF_D προσδιορίζεται στο στάδιο σχεδιασμού με βάση το μέγεθος/την ικανότητα του συστήματος. Τεχνικά, ένα σωστά σχεδιασμένο σύστημα λειτουργεί με συντελεστή χρησιμοποίησης κοντά στο 1 κάποιους μήνες του έτους. Συστηματική λειτουργία σε χαμηλό συντελεστή χρησιμοποίησης αποκαλύπτει ένα υπερδιαστασιοποιημένο σύστημα, ενώ τιμές κοντά στο 1 για όλη τη διάρκεια του έτους μπορεί να κρύβουν ένα υποδιαστασιοποιημένο σύστημα.

Η ανάκτηση κεφαλαίου CR_j για τον μήνα λειτουργίας j προσδιορίζεται ως η επιστροφή του κεφαλαίου που εξασφαλίζεται κατά τη διάρκεια του μήνα j :

$$CR_j = \frac{(C_{e,j} - C_{op,j})CF_j t_j}{C_{eq}} \quad (5.5)$$

όπου $C_{e,j}$ (€/MWh) είναι η συμβατική τιμή του ηλεκτρισμού από το δίκτυο για τον μήνα j , $C_{op,j}$ (€/MWh) είναι το λειτουργικό κόστος ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρισμού για τον μήνα j και C_{eq} (M€/MW) είναι το κόστος εξοπλισμού της εγκατεστημένης μονάδας. Στην

Εξίσωση (5.5), ο αριθμητής υπολογίζει τα κέρδη της διεργασίας (προ τόκων, φόρων και αποσβέσεων), ενώ ο παρονομαστής αντιπροσωπεύει το κόστος επένδυσης.

Το λειτουργικό κόστος ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρισμού $C_{op,j}$ (€/MWh) κατά τη διάρκεια του μήνα j , το οποίο χρησιμοποιείται στην Εξίσωση (5.5), υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$C_{op,j} = \frac{C_{g,j}}{\eta_e} - \left(\frac{\eta_{th}}{\eta_b}\right) \frac{C_{g,j}}{\eta_e} + C_m \quad (5.6)$$

όπου $C_{g,j}$ (€/MWh) είναι η τιμή του φυσικού αερίου για χρήση συμπαραγωγής για τον μήνα j , και C_m (€/MWh) είναι το κόστος συντήρησης ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρισμού, το οποίο μπορεί να θεωρηθεί σταθερό και ανεξάρτητο από τον εκάστοτε μήνα λειτουργίας. Παρομοίως, οι αποδόσεις του συστήματος (ηλεκτρική η_e , θερμική η_{th} , και του συμβατικού λέβητα η_b) μπορούν επίσης να θεωρηθούν σταθερές και ανεξάρτητες από τον εκάστοτε μήνα λειτουργίας. Στην Εξίσωση (5.6) ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει το κόστος καυσίμου για την παραγωγή μιας μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα, ο δεύτερος όρος αντιπροσωπεύει το κόστος που αποφεύγεται από την παραγωγή θερμότητας από τη ΣΗΘ ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρισμού και ο τρίτος όρος αντιπροσωπεύει το κόστος συντήρησης.

Επιπροσθέτως, η συνολική ανάκτηση κεφαλαίου CR_T κατά τη διάρκεια της συνολικής περιόδου λειτουργίας του συστήματος (διάρκεια ζωής) υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$CR_T = \sum_{j=1}^M CR_j \quad (5.7)$$

Ο CR_T παρακολουθείται και καταγράφεται σε σχέση με τον χρόνο και εκφράζει την οικονομική αξιολόγηση του έργου.

Όταν ο CR_T φτάσει την τιμή 1, το έργο έχει φτάσει στο σημείο ισορροπίας (break-even point, BEP), δηλαδή το χρονικό σημείο στο οποίο έχει ανακτηθεί το αρχικό κεφάλαιο. Η Απλή Περίοδος Αποπληρωμής σχεδιασμού (SPB_D) είναι η περίοδος η οποία θεωρείται, κατά τη φάση του σχεδιασμού, ότι θα χρειαστεί ώστε ο CR_T να φτάσει στο BEP . Η SPB_D αποτελεί τον οικονομικό στόχο για τη βιώσιμη λειτουργία του έργου και σε έργα που σχετίζονται με την ενέργεια είναι συνήθως 4-5 χρόνια [101]. Αφού το έργο φτάσει στο BEP , η πραγματική Απλή Περίοδος Αποπληρωμής SPB_T συνεχίζει να συγκρίνεται με την SPB_D . Η SPB_T υπολογίζεται από την Εξίσωση (5.8) λαμβάνοντας υπόψη τη συνολική περίοδο λειτουργίας του συστήματος. Έτσι, σε σύγκριση με το BEP , η SPB_T μπορεί να εμφανιστεί

χαμηλότερη εάν το σύστημα είχε καλύτερη απόδοση κατά την περίοδο μετά το BEP ή υψηλότερη εάν είχε λιγότερο αποτελεσματική απόδοση κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

$$SPB_T = \frac{1}{ROI_T} \quad (5.8)$$

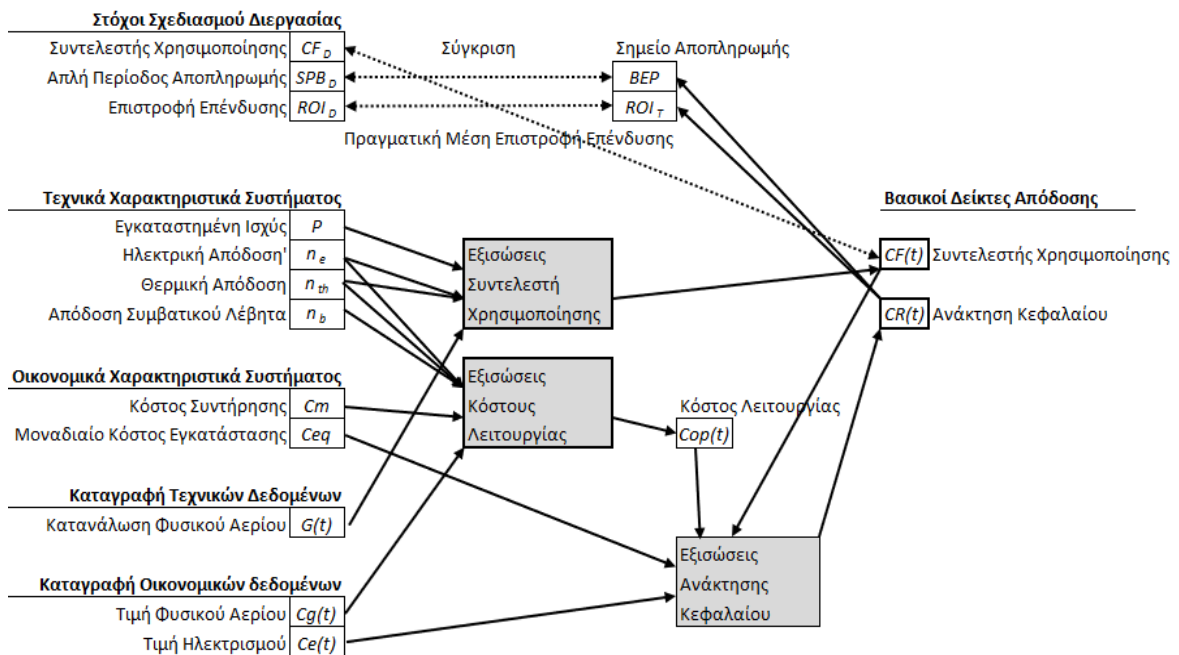
όπου ROI_T είναι η πραγματική μέση Επιστροφή της Επένδυσης η οποία υπολογίζεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$ROI_T = \frac{CR_T}{M/12} \quad (5.9)$$

όπου M είναι ο συνολικός αριθμός μηνών λειτουργίας.

Η πραγματική ROI_T μπορεί να συγκριθεί και με την τιμή σχεδιασμού ROI_D για την επικύρωση των στόχων σχεδιασμού της διεργασίας.

Η παραπάνω ανάλυση συνοψίζεται στο διάγραμμα ροής πληροφοριών του Σχήματος 5.1.



Σχήμα 5.1. Διάγραμμα ροής πληροφοριών των επιλεγμένων βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs).

5.2.3 Παραδοχές

Όπως περιγράφεται στο διάγραμμα ροής, η ακόλουθη ανάλυση των οκτώ συστημάτων συμπαραγωγής που λειτουργούν στην Αθήνα βασίζεται σε δεδομένα κατανάλωσης φυσικού αερίου [100] και σε τεχνικές τιμές σχεδιασμού συστήματος. Οι υπόλοιπες τιμές δεδομένων λειτουργίας και τα οικονομικά χαρακτηριστικά του συστήματος ορίζονται ή υπολογίζονται με βάση τις ακόλουθες παραδοχές, επειδή δεν υπάρχουν δημοσίως διαθέσιμα δεδομένα ανά έργο.

Οι βαθμοί απόδοσης θεωρούνται σταθεροί και ίσοι με τις τιμές σχεδιασμού, οι οποίες βασίζονται στις προδιαγραφές σχεδιασμού που προκύπτουν από τα δεδομένα του κατασκευαστή για τα συγκεκριμένα μοντέλα που έχουν εγκατασταθεί, σύμφωνα με τις μελέτες που υποβλήθηκαν στην εταιρεία διανομής αερίου. Υποτίθεται ότι οι μονάδες λειτουργούν σε πλήρες φορτίο και ότι όλη η ανακτηθείσα θερμότητα είναι χρήσιμη για το κτίριο. Ο συνολικός χρόνος λειτουργίας του μηχανήματος που είναι ισοδύναμος με την ονομαστική λειτουργία $t_{op,e}$ (h) του συστήματος CHP χρησιμοποιείται στην ανάλυση. Αναφέρεται στην πραγματική διάρκεια ζωής και μπορεί να εκτιμηθεί από την εξίσωση:

$$t_{op,e} = \frac{\eta_e G_T}{P} \quad (5.10)$$

όπου G_T είναι η συνολική κατανάλωση φυσικού αερίου από την αρχή της λειτουργίας του έργου.

Εάν η μονάδα λειτουργούσε σε μερικό φορτίο, θα λειτουργούσε για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, αλλά σε χαμηλότερη ισχύ, οπότε η συνολική παραγωγή ενέργειας δεν θα πρέπει να είναι πολύ διαφορετική. Ωστόσο, δεδομένου ότι η λειτουργία υπό πραγματικές συνθήκες μπορεί να είναι πιο απρόβλεπτη, πραγματοποιήθηκε μια ανάλυση ευαισθησίας προκειμένου να ελεγχθεί η εγκυρότητα της υπόθεσης και να ελεγχθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Όσον αφορά στο κόστος εγκατάστασης της μονάδας και στο κόστος συντήρησης, έχουν καθοριστεί ενδεικτικές τιμές αντιπροσωπευτικές της ελληνικής αγοράς. Οι τιμές προέρχονται από τις τυπικές τιμές παραμέτρων για την ανάπτυξη εγκαταστάσεων CHP/CCHP στην Ελλάδα βάσει του τρέχοντος εθνικού συστήματος υποστήριξης για ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ, και κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με την εγκατεστημένη ισχύ [102]. Παρόλο που κάθε έργο έχει διαφορετικό κόστος σύμφωνα με τα δικά του χαρακτηριστικά, οι τιμές των συστημάτων CHP στην Ελλάδα παρέμειναν σχεδόν σταθερές κατά την περίοδο ανάλυσης, σε αντίθεση με τις τιμές των φωτοβολταϊκών ή των αιολικών έργων, οπότε για

τον σκοπό της συγκριτικής ανάλυσης αυτής της μελέτης οι ενδεικτικές τιμές θεωρήθηκαν αποδεκτές.

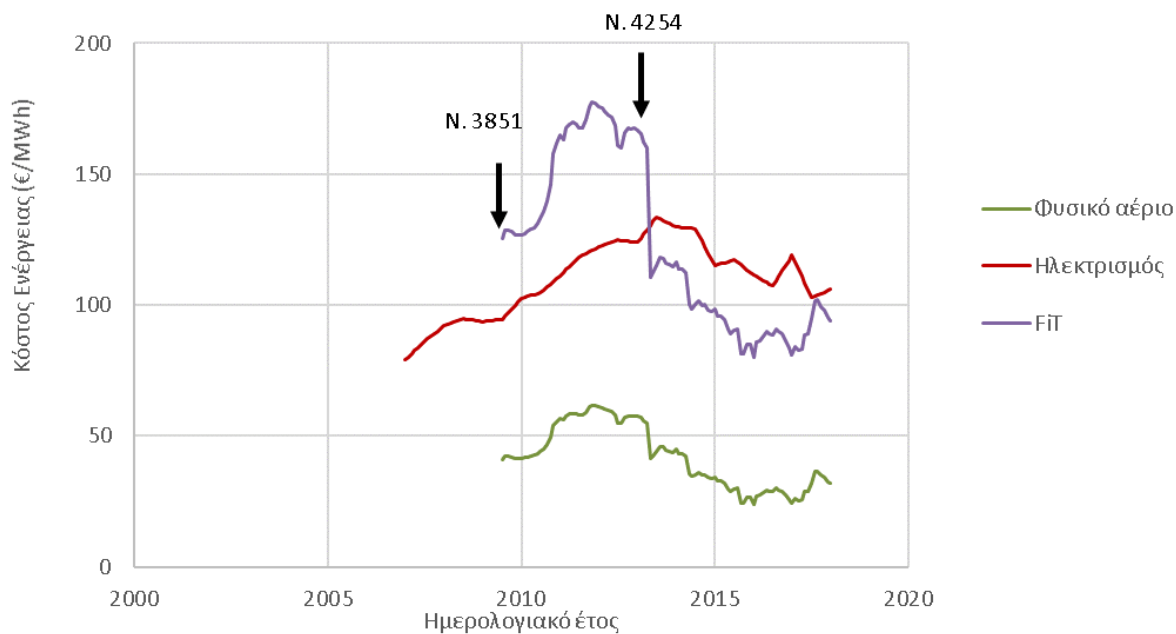
Οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου βασίζονται στην εξέλιξη των τιμών της ενέργειας στην Ελλάδα.

5.3 Αποτελέσματα και σχολιασμός

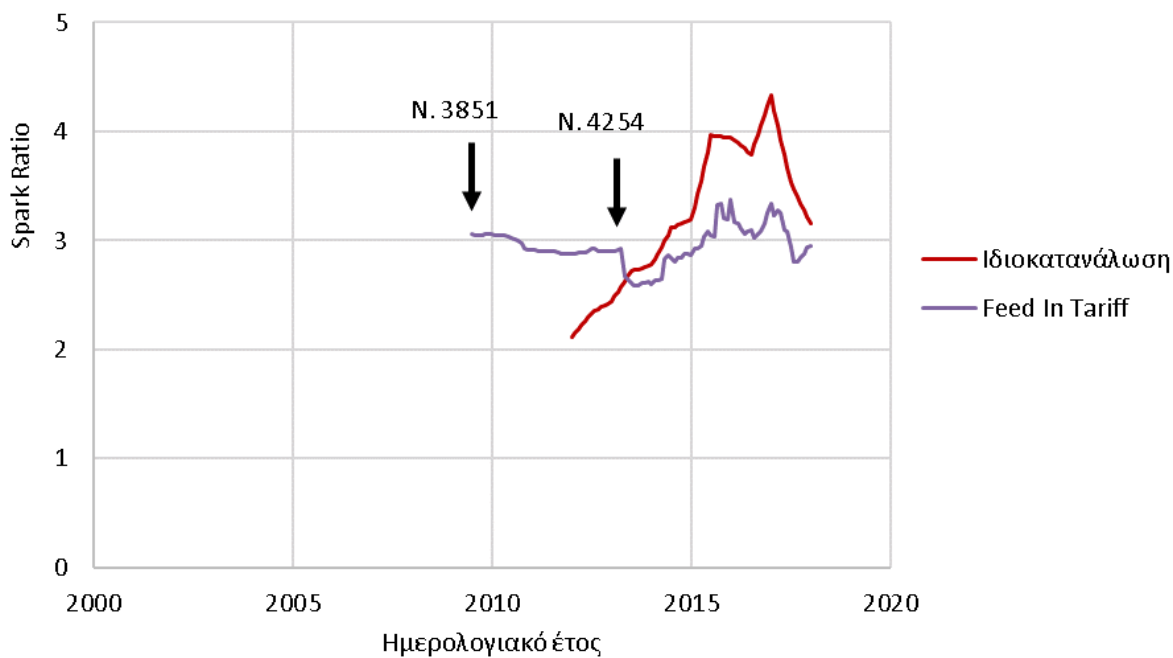
5.3.1 Κόστος ενέργειας

Το οικονομικό περιβάλλον που επηρεάζει την απόδοση ενός συστήματος ΣΗΘ καθορίζεται από τις τιμές φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας. Το Σχήμα 5.2 παρουσιάζει την εξέλιξη των τιμών φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα τα τελευταία 17 χρόνια, από το 2002 έως το 2018. Στο ίδιο σχήμα, παρουσιάζεται για σύγκριση η εξέλιξη των εγγυημένων τιμών (FiT) που εφαρμόστηκαν από τις ελληνικές αρχές για τη στήριξη της CHP. Ο νόμος 3851 (2010) εισήγαγε την έννοια του υπολογισμού του FiT ως συνάρτηση της μέσης τιμής του φυσικού αερίου προκειμένου να εξαλειφθεί ο κίνδυνος μεταβλητότητας των τιμών του αερίου. Ο νόμος 4254 (2013) εξακολουθεί να ακολουθεί την ίδια λογική, αλλά με χαμηλότερες τελικές τιμές.

Ο αντίστοιχος λόγος τιμής ηλεκτρικής ενέργειας προς τιμή φυσικού αερίου (spark ratio) υπολογίζεται στο Σχήμα 5.3. Σύμφωνα με έναν γνωστό κανόνα, λόγος μεγαλύτερος από 3 διασφαλίζει τη βιωσιμότητα του έργου [103]. Προφανώς, η υποστηρικτική πολιτική προσπαθεί να διατηρήσει το spark ratio ίσο με το 3 (Νόμοι 3851 και 4254). Από την άλλη πλευρά, η ιδιοκατανάλωση μπορεί να προσφέρει οικονομικές ευκαιρίες για τα έτη μετά το 2015.



Σχήμα 5.2. Τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Εγγυημένη τιμή πώλησης ηλεκτρισμού για σύστημα ΣΗΘ (Feed-in Tariffs), Ελλάδα, 2002–2018.



Σχήμα 5.3. Λόγος τιμής ηλεκτρικής ενέργειας προς φυσικού αερίου (spark ratio), Ελλάδα, 2002–2018.

5.3.2 Χαρακτηριστικά των έργων ΣΗΘ της Αθήνας

Στην Αθήνα, με περισσότερους από 3 εκατομμύρια κατοίκους, έχουν υλοποιηθεί μόνο λίγα έργα ΣΗΘ τα τελευταία 20 χρόνια, από την εισαγωγή του φυσικού αερίου. Πιο συγκεκριμένα, 10 έργα θεωρούνται ενεργά σήμερα (Δεκέμβριος 2019), σύμφωνα με τα αρχεία της εταιρείας διανομής φυσικού αερίου [100], οκτώ εκ των οποίων περιλαμβάνονται στη μελέτη. Όλα τα συστήματα είναι εγκατεστημένα σε κτίρια του τριτογενούς τομέα και διαθέτουν κινητήρες εσωτερικής καύσης (ICE) ως κινητήρες κίνησης, οι οποίοι τροφοδοτούνται από φυσικό αέριο.

Τα χαρακτηριστικά των έργων συνοψίζονται στον Πίνακα 5.1, ταξινομημένα από το παλαιότερο προς το νεότερο. Ο χρόνος λειτουργίας των έργων κυμαίνεται από 17 χρόνια το παλαιότερο έως τρία χρόνια το νεότερο. Η εγκατεστημένη ισχύς κυμαίνεται από 0,13 MW έως 2 MW. Ο Πίνακας 5.1 παρουσιάζει, επίσης, το μοναδιαίο κόστος εγκατάστασης (αρχική επένδυση), το κόστος συντήρησης, καθώς και την απόδοση της CHP και του λέβητα. Οι βαθμοί απόδοσης της CHP είναι οι τιμές που λαμβάνονται υπόψη στο στάδιο του σχεδιασμού για κάθε έργο. Τα υπόλοιπα δεδομένα είναι μέσες τιμές, αντιπροσωπευτικές της ελληνικής αγοράς [102]. Όσον αφορά στους τύπους κτιρίων, οι μονάδες συμπαραγωγής στην Αθήνα είναι όλες εγκατεστημένες σε κτίρια του τριτογενούς τομέα και κυρίως εγκαθίστανται σε νοσοκομεία, καθώς αυτή είναι μια από τις καταλληλότερες χρήσεις του συστήματος λόγω των συνεχών φορτίων κατά τη διάρκεια της ημέρας και καθ' όλη τη διάρκεια του έτους. Τα έργα με κωδικούς ονομασίας H1, H2 και H3 είναι νοσοκομεία, τα O1 και O2 είναι κτίρια γραφείων, το M είναι εμπορικό κέντρο, το L είναι ξενοδοχείο και το S είναι σχολείο.

Πίνακας 5.1. Χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων έργων ΣΗΘ που βρίσκονται σε λειτουργία, 2019, Αθήνα, Ελλάδα.

Κωδικός Έργου		O1	H1	H2	O2	M	L	S	H3
Εγκατεστημένη Ισχύς	P	0,53	0,50	0,56	0,13	2,00	0,34	0,60	1,40 MW
Μοναδιαίο Κόστος Εγκατάστασης	Ceq	1,20	1,20	1,20	1,20	1,30	1,20	1,20	1,30 Μ€/MW
Κόστος Συντήρησης	Cm	10,0	10,0	10,0	10,0	9,5	10,0	10,0	9,5 €/MWh
Ηλεκτρική Απόδοση	η_e	0,36	0,32	0,35	0,34	0,41	0,32	0,41	0,35 -
Θερμική Απόδοση	η_{th}	0,49	0,55	0,50	0,56	0,44	0,55	0,44	0,50 -
Απόδοση Συμβατικού Λέβητα	η_b	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75 -
Εναρξή Λειτουργίας	t0	8-2002	3-2008	2-2009	2-2009	12-2011	2-2014	2-2016	5-2016 month-year
Έτη Λειτουργίας	t _{op}	16,67	11,08	10,17	10,17	7,33	5,17	3,17	2,92 y

5.3.3 Απόδοση των έργων ΣΗΘ της Αθήνας

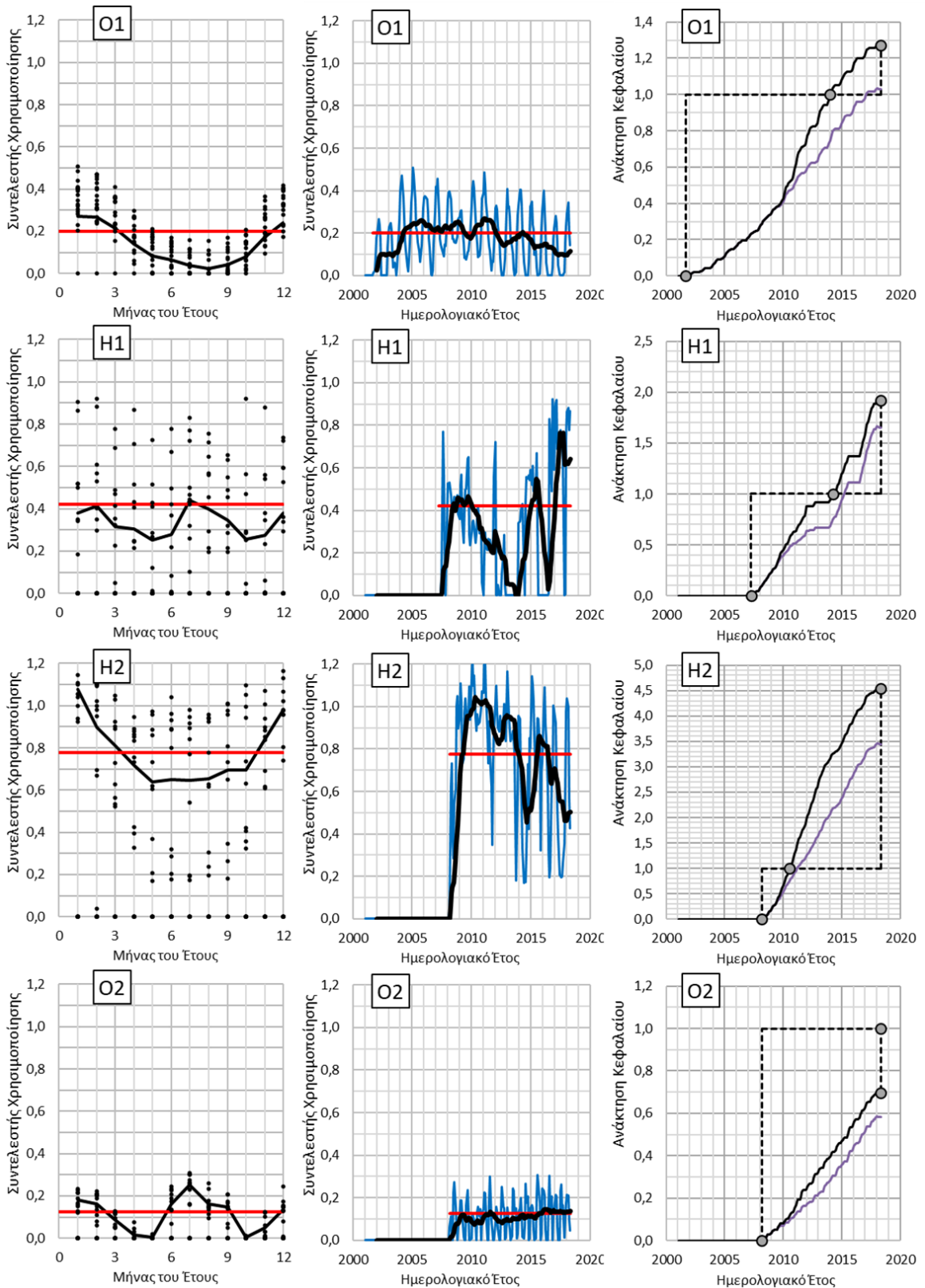
Το Σχήμα 5.4, παρουσιάζει την εξέλιξη των KPIs με την πάροδο των ετών λειτουργίας για τα οκτώ έργα CHP της Αθήνας:

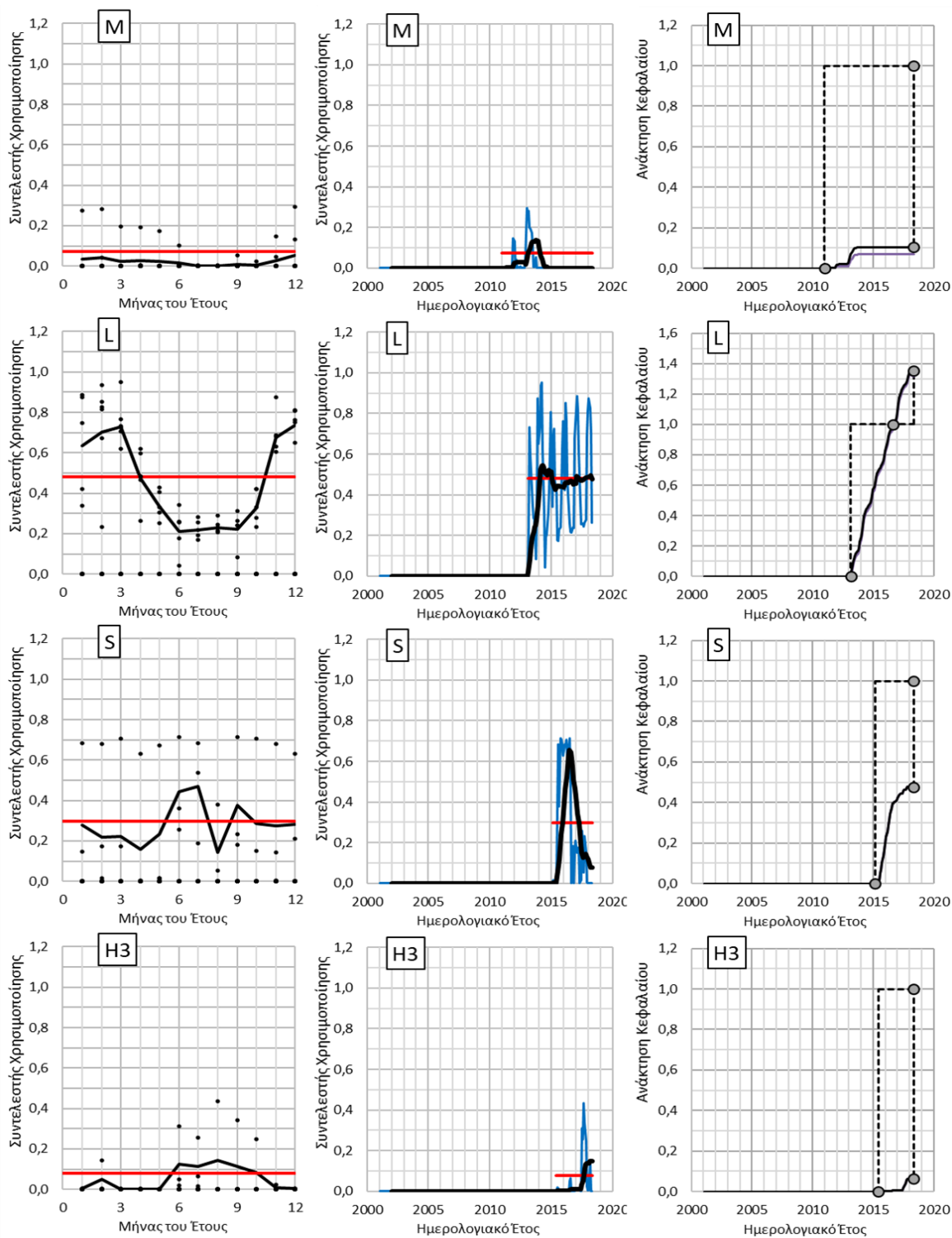
(α) Τα διαγράμματα της πρώτης στήλης παρουσιάζουν για κάθε έργο την εξέλιξη του μηνιαίου συντελεστή χρησιμοποίησης έναντι του ημερολογιακού μήνα, αποκαλύπτοντας την εποχιακή διακύμανση λειτουργίας. Αναφέρονται επίσης οι μηνιαίες μέσες τιμές και οι μέσες τιμές για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας.

(β) Τα διαγράμματα της δεύτερης στήλης παρουσιάζουν για κάθε έργο την εξέλιξη του συντελεστή χρησιμοποίησης έναντι του χρόνου λειτουργίας. Δηλώνεται επίσης ο κινητός μέσος όρος των 12 μηνών για την εξάλειψη της εποχιακής διακύμανσης.

(γ) Τέλος, τα διαγράμματα της τρίτης στήλης παρουσιάζουν την εξέλιξη της ανάκτησης κεφαλαίου έναντι του χρόνου λειτουργίας τόσο για τις περιπτώσεις του συστήματος υποστήριξης FiT όσο και για την ιδιοκατανάλωση.

Στα διαγράμματα υπάρχουν τρεις επισημασμένες κουκκίδες που αντιπροσωπεύουν το σημείο εκκίνησης της καμπύλης ανάκτησης κεφαλαίου, το σημείο ισορροπίας (break-even point) και το συνολικό CR_T στο τέλος της περιόδου ανάλυσης, όπως υποδεικνύεται από τις διακεκομμένες γραμμές, για την περίπτωση του FiT. Έτσι, το Σχήμα 5.4 αποκαλύπτει την πραγματική τεχνική και οικονομική απόδοση κάθε έργου.





Σχήμα 5.4. Διαχρονική εξέλιξη των KPIs για τα οκτώ έργα CHP της Αθήνας: (α) Τα διαγράμματα της πρώτης στήλης παρουσιάζουν τον μηνιαίο συντελεστή χρησιμοποίησης έναντι του ημερολογιακού μήνα όπου με μαύρο δηλώνονται οι μηνιαίες μέσες τιμές και με κόκκινο οι μέσες τιμές για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας. (β) Τα διαγράμματα της δεύτερης στήλης παρουσιάζουν την εξέλιξη του συντελεστή χρησιμοποίησης έναντι του χρόνου λειτουργίας, όπου με μαύρο δηλώνεται ο κινητός μέσος όρος των 12 μηνών και με κόκκινο ο μέσος όρος για τη συνολική διάρκεια λειτουργίας. (γ) Τα διαγράμματα της τρίτης στήλης παρουσιάζουν την εξέλιξη της ανάκτησης κεφαλαίου έναντι του χρόνου λειτουργίας τόσο για τις περιπτώσεις του συστήματος υποστήριξης FiT (μαύρη γραμμή) όσο και για την ιδιοκατανάλωση (μωβ γραμμή). Οι επισημασμένες κουκκίδες αντιπροσωπεύουν το σημείο εκκίνησης της καμπύλης ανάκτησης κεφαλαίου, το σημείο ισορροπίας (break-even point) και το συνολικό CR_T στο τέλος της περιόδου ανάλυσης, όπως υποδεικνύεται από τις διακεκομμένες γραμμές, για την περίπτωση του FiT.

Τα κύρια συμπεράσματα, ξεχωριστά για κάθε έργο, συνοψίζονται ως εξής:

(O1) Το κτίριο γραφείων O1 είναι το παλαιότερο έργο της Αθήνας. Λειτουργεί 17 χρόνια, από το 2002. Ο συντελεστής χρησιμοποίησης αποκαλύπτει μια σταθερή λειτουργία με εποχιακή διακύμανση και μια ελαφρά μακροχρόνια απόκλιση. Δεδομένου ότι ο μέγιστος μηνιαίος συντελεστής χρησιμοποίησης είναι 50%, συνάγεται το συμπέρασμα ότι είναι πολύ μεγάλο το μέγεθος της μηχανής, επομένως το *BEP* έχει επιτευχθεί μετά από 12,5 χρόνια λειτουργίας χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό υποστήριξης FiT. Ένα μέγεθος στο 1/3 της σχεδιασμένης ισχύος θα ήταν αρκετό.

(H1) Το νοσοκομείο H1 εμφανίζει ασταθή λειτουργία δεδομένης της καταγεγραμμένης τυχαίας εποχιακής και μακροχρόνιας διακύμανσης. Το χρονοδιάγραμμα λειτουργίας θα πρέπει να αλλάζει όλα αυτά τα χρόνια, ενώ η εποχιακή διακύμανση και ο αυξημένος συντελεστής χρησιμοποίησης κατά τους καλοκαιρινούς μήνες επιβεβαιώνουν ότι το σύστημα είναι τριπαραγωγή, άρα υπάρχει και η επιλογή ψύξης. Το επίπεδο του συντελεστή χρησιμοποίησης που επιτυγχάνεται υποδηλώνει ότι το σύστημα είναι υπερδιαστασιοποιημένο, όχι όμως ιδιαίτερα, καθώς έχουν καταγραφεί και υψηλές τιμές, πλησιέστερες στο 1. Έφτασε στο σημείο ισορροπίας μετά από επτά χρόνια λειτουργίας.

(H2) Το νοσοκομείο H2 παρουσιάζει τυχαία εποχιακή διακύμανση και απόκλιση στη μακροχρόνια απόδοση. Είναι σωστά διαστασιοποιημένο και φτάνει στο *BEP* μετά από 2,5 χρόνια λειτουργίας. Ωστόσο, από τη μείωση των τιμών του CF_j κατά τα τελευταία έτη λειτουργίας μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι ο χρόνος λειτουργίας έχει μειωθεί. Μέχρι τώρα, έχει καλύψει το αρχικό κεφάλαιο πάνω από 4 φορές.

(O2) Το κτίριο γραφείων O2 δείχνει μια πολύ σταθερή λειτουργία τόσο εποχιακά όσο και διαχρονικά. Προφανώς περιλαμβάνει και λειτουργία ψύξης, καθώς οι υψηλότερες τιμές του CF_j εμφανίζονται το καλοκαίρι. Τα φορτία δεν επιτρέπουν τη χρήση του συστήματος κατά τη διάρκεια των μεταβατικών περιόδων μεταξύ της περιόδου θέρμανσης και ψύξης, μειώνοντας τον συνολικό χρόνο λειτουργίας. Δυστυχώς, είναι αρκετά υπερδιαστασιοποιημένο, με μέγεθος ίσως και πέντε φορές μεγαλύτερο από το απαραίτητο, και ως εκ τούτου δεν έχει φτάσει ακόμη στο *BEP* μετά από 10 χρόνια λειτουργίας.

(M) Το εμπορικό κέντρο M είναι μια αποτυχημένη περίπτωση, πιθανώς λόγω υπερβολικής υπερδιαστασιολόγησης. Δεν παρουσιάζει κανονική λειτουργία. Μετά από περισσότερα από επτά χρόνια λειτουργίας, κατά τη διάρκεια των οποίων η μονάδα απασχολήθηκε μόνο για 27 μήνες, επιτεύχθηκε ένας μέσος συντελεστής χρησιμοποίησης μόλις 7%. Η μονάδα δεν λειτουργεί τα τελευταία τέσσερα χρόνια. Ίσως το μεγάλο μέγεθος

της μονάδας αναγκάζει τη λειτουργία σε μερικό φορτίο, καθιστώντας την ακόμα λιγότερο κερδοφόρα.

(L) Το Ξενοδοχείο L είναι, αντίθετα, μια επιτυχημένη περίπτωση. Δείχνει σταθερή εποχιακή και διαχρονική λειτουργία, φθάνοντας στο *BEP* μετά από σχεδόν 3,5 χρόνια.

(S) Το σχολείο S δείχνει μια ασταθή λειτουργία. Ξεκίνησε με συντελεστή χρησιμοποίησης περίπου 70% για 1,5 χρόνο και στη συνέχεια ο χρόνος λειτουργίας περιορίστηκε δραστικά μειώνοντας τον συντελεστή σε περίπου 15%. Η μονάδα είναι τριπαραγωγή σύμφωνα με την εποχιακή διακύμανση της λειτουργίας και φαίνεται να χρησιμοποιείται κυρίως κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού για ψύξη. Η παρούσα ανάκτηση κεφαλαίου είναι περίπου 50% μετά από περισσότερα από τρία χρόνια λειτουργίας.

(H3) Το νοσοκομείο H3 είναι το νεότερο έργο με λιγότερα από 3 χρόνια σε λειτουργία και έναν πολύ μικρό συντελεστή χρησιμοποίησης, στο 8%, που έχει καλύψει το αρχικό κεφάλαιο κατά περίπου 6%. Προφανώς υπάρχει και εδώ η επιλογή ψύξης και φαίνεται να είναι η κύρια λειτουργία του συστήματος CCHP, καθώς η μονάδα σχεδόν δεν χρησιμοποιείται κατά τους χειμερινούς μήνες. Το μέγεθος της μονάδας μπορεί να ήταν κατάλληλο αν είχε σχεδιαστεί για να καλύψει θερμικές ανάγκες, ωστόσο, για το τρέχον προφίλ λειτουργίας η μονάδα είναι προφανώς μεγάλη.

Τα παραπάνω αποτελέσματα συνοψίζονται και συγκρίνονται στον Πίνακα 5.2 και στο Σχήμα 5.5. Ο Πίνακας 5.2 συνοψίζει τα συνολικά KPIs, δηλαδή τον μέσο συντελεστή χρησιμοποίησης για όλο το διάστημα λειτουργίας CF_T και τη συνολική ανάκτηση κεφαλαίου σε όλο το διάστημα λειτουργίας CR_T , για κάθε έργο. Επιπλέον, παρουσιάζεται η μέση επιστροφή της επένδυσης ROI_T και η αντίστοιχη απλή περίοδος αποπληρωμής SPB_T , καθώς και το σημείο ισορροπίας *BEP*.

Το Σχήμα 5.5 συγκρίνει την εξέλιξη της ανάκτησης κεφαλαίου συναρτήσει του χρόνου για όλα τα έργα. Τα κύρια συμπεράσματα είναι τα εξής:

Μόνο δύο από τα οκτώ έργα επιτυγχάνουν μια αποδεκτή απλή περίοδο αποπληρωμής, σε λιγότερο από τέσσερα χρόνια (έργα H2 και L), και άλλα δύο σε λιγότερο από 10 χρόνια (έργα H1 και O1). Τέσσερα έργα έχουν ήδη φτάσει στο *BEP*. Το έργο O2 είναι αρκετά υπερδιαστασιοποιημένο, αλλά η λειτουργία του είναι σταθερή και το *BEP* θα επιτευχθεί σε λίγα χρόνια. Αντίθετα, το έργο M απέτυχε, ενώ η ανάλυση δεν είναι σε θέση να προβλέψει την απόδοση των έργων S και H3.

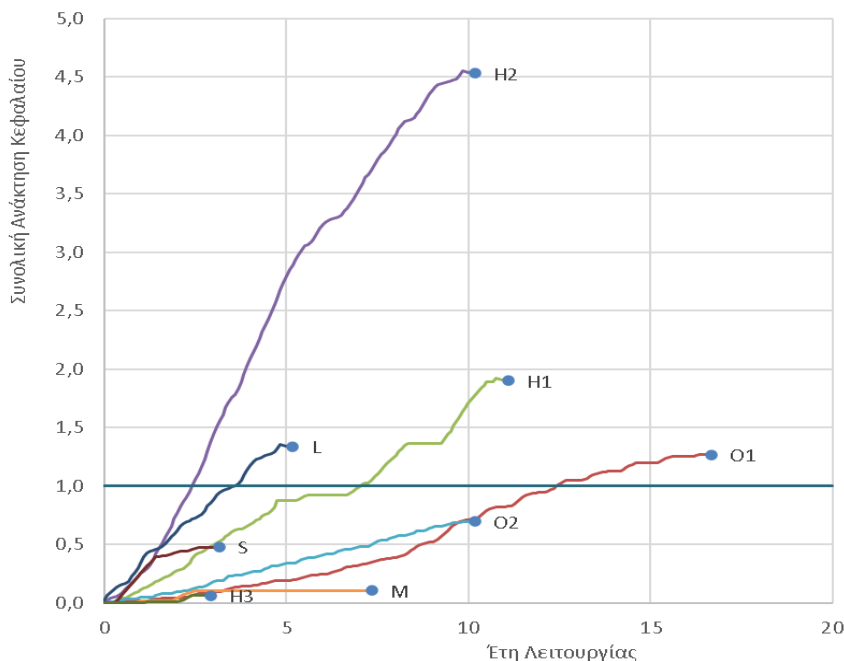
Όλες οι μονάδες είναι εγκατεστημένες σε κτίρια του τριτογενούς τομέα και οι πιο επιτυχημένες περιπτώσεις είναι σε νοσοκομείο και ξενοδοχείο. Τα μισά από τα έργα είναι συστήματα τριπαραγωγής που παρέχουν και λειτουργία ψύξης προκειμένου να επιτρέπεται

μεγαλύτερη χρήση του συστήματος για όλη τη διάρκεια του έτους. Αυτά τα συστήματα, ωστόσο, παρουσιάζουν χαμηλότερα ποσοστά ανάκτησης κεφαλαίου, ενώ φαίνεται, επίσης, ότι μειώνουν σταδιακά τη λειτουργία τους κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, καθιστώντας την ψύξη την εξέχουσα χρήση του συστήματος.

Τα έργα δεν επιτυγχάνουν καλές τιμές συντελεστή χρησιμοποίησης, είτε λόγω κακών επιλογών σχεδιασμού είτε λόγω αποτυχίας των εκτιμήσεων θερμικού φορτίου. Το πιο συνηθισμένο πρόβλημα φαίνεται να είναι η υπερδιαστασιολόγηση της μονάδας, η οποία περιορίζει τον χρόνο λειτουργίας ή την αναγκάζει να λειτουργεί σε μερικά φορτία, με αποτέλεσμα χαμηλότερο CF από το αναμενόμενο. Η ασταθής λειτουργία είναι, επίσης, αρκετά συνηθισμένη, πιθανώς λόγω των χαμηλότερων επιτευχθέντων αποδόσεων που επιβάλλουν τη συνεχή επανεκτίμηση των χρονοδιαγραμμάτων λειτουργίας ή τη μετάβαση προς αποδοτικότερα ή οικονομικότερα για τις τρέχουσες συνθήκες ενεργειακά συστήματα. Η σχετική ανάκτηση κεφαλαίου δεν είναι επαρκώς αποδεκτή, κυρίως λόγω του χαμηλού CF , αλλά και λόγω αλλαγών στις τιμές της ενέργειας, οι οποίες έχουν περιορίσει σταδιακά το περιθώριο κερδοφορίας. Η πραγματική περίοδος SPB_T εμφανίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις πολύ μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη SPB_D των τεσσάρων ετών.

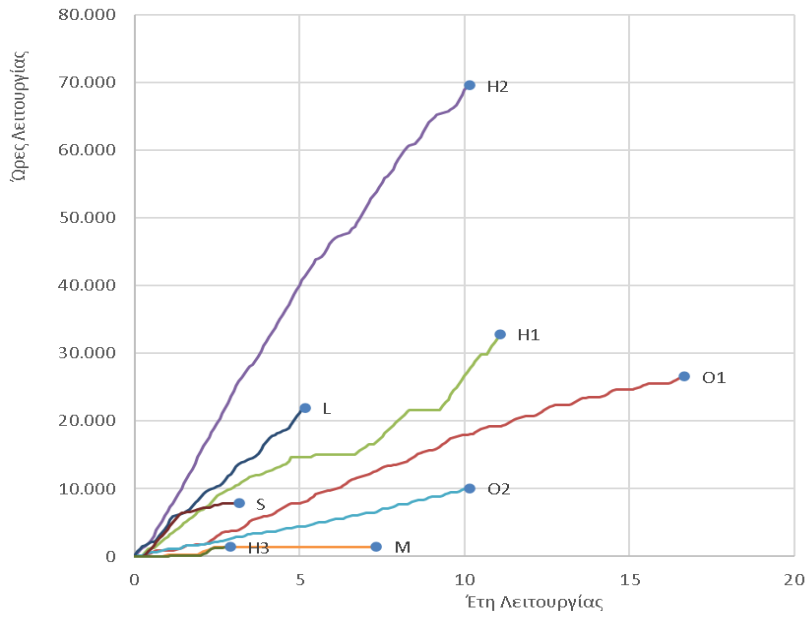
Πίνακας 5.2. Απόδοση των οκτώ εξεταζόμενων έργων ΣΗΘ της Αθήνας.

Κωδικός Έργου		O1	H1	H2	O2	M	L	S	H3
Εγκατεστημένη Ισχύς	P	0,53	0,50	0,56	0,13	2,00	0,34	0,60	1,40 MW
Έτη Λειτουργίας	t_{op}	16,7	11,1	10,2	10,2	7,33	5,17	3,17	2,92 y
Συνολικές Ώρες Λειτουργίας	t_{opE}	26.556	32.825	69.563	10.051	1.440	21.958	7.844	1.414 h
Μέσος Συνολικός Συντελεστής Χρησιμοποίησης	CF_T	0,20	0,42	0,78	0,13	0,07	0,48	0,30	0,08 -
Μέση Συνολική Απλή Περίοδος Αποπληρωμής	SPB_T	13,1	5,77	2,24	14,6	70,4	3,82	6,63	46,2 y
Σημείο Αποπληρωμής	BEP	12,33	7,00	2,33			3,50		y
Μέση Συνολική Επιστροφή Επένδυσης	ROI_T	0,08	0,17	0,45	0,07	0,01	0,26	0,15	0,02 -
Συνολική Ανάκτηση Κεφαλαίου	CR_T	1,27	1,92	4,55	0,70	0,10	1,35	0,48	0,06 -

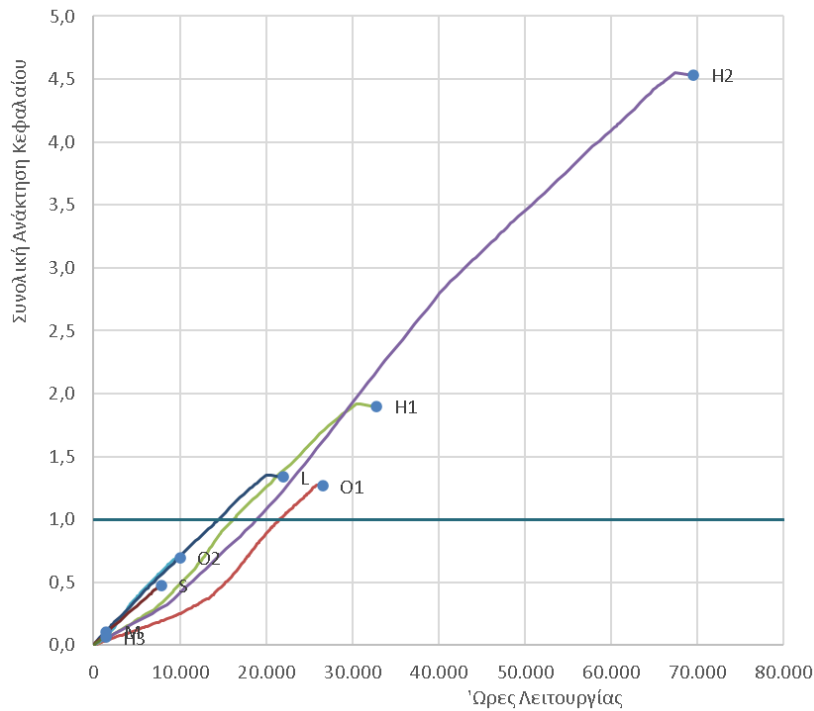


Σχήμα 5.5. Εξέλιξη της συνολικής ανάκτησης κεφαλαίου CR_T συναρτήσει του χρόνου για τα οκτώ εξεταζόμενα έργα ΣΗΘ της Αθήνας.

Τα Σχήματα 5.6 και 5.7 παρουσιάζουν την εξέλιξη του χρόνου πραγματικής λειτουργίας συναρτήσει του συνολικού χρόνου και την εξέλιξη της συνολικής ανάκτησης κεφαλαίου CR_T συναρτήσει του χρόνου πραγματικής λειτουργίας για τα οκτώ εξεταζόμενα έργα ΣΗΘ της Αθήνας, προκειμένου να διερευνηθεί η επίδραση αυτών των παραγόντων. Κοιτώντας σε αντιπαράθεση το Σχήμα 5.5 και το Σχήμα 5.6 είναι εμφανές ότι οι καμπύλες είναι σχεδόν πανομοιότυπες, αποκαλύπτοντας ότι οι ώρες λειτουργίας είναι ένας από τους καθοριστικότερους παράγοντες στην ανάκτηση κεφαλαίου. Στο Σχήμα 5.7 φαίνεται ότι η σχέση αυτή είναι σχεδόν ανάλογη.

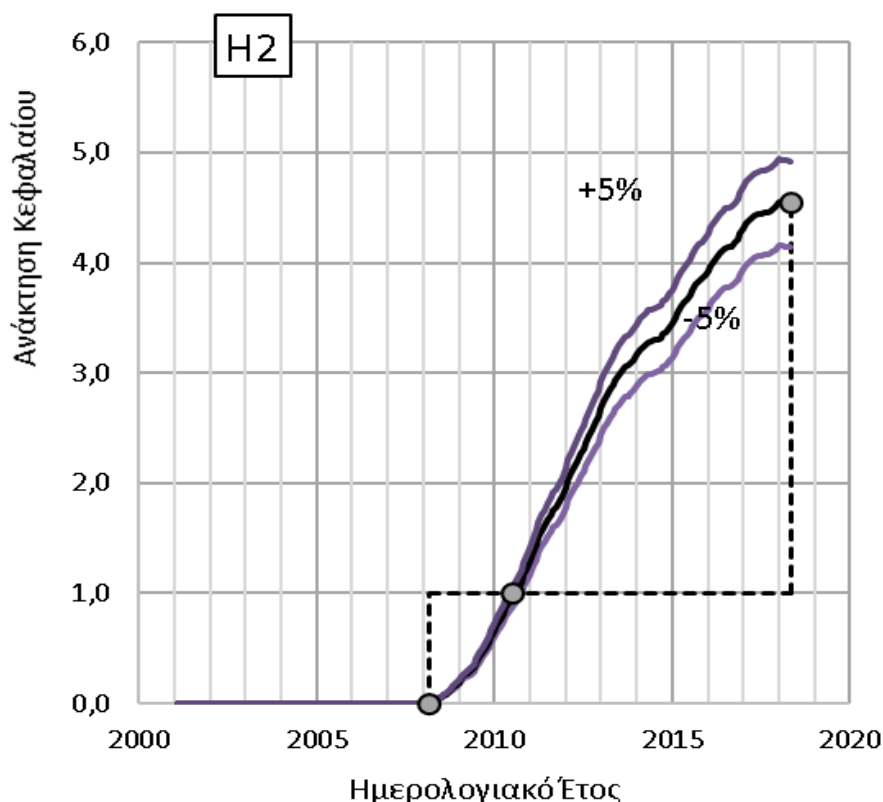


Σχήμα 5.6 Εξέλιξη του χρόνου πραγματικής λειτουργίας συναρτήσει του συνολικού χρόνου για τα οκτώ εξεταζόμενα έργα ΣΗΘ της Αθήνας.

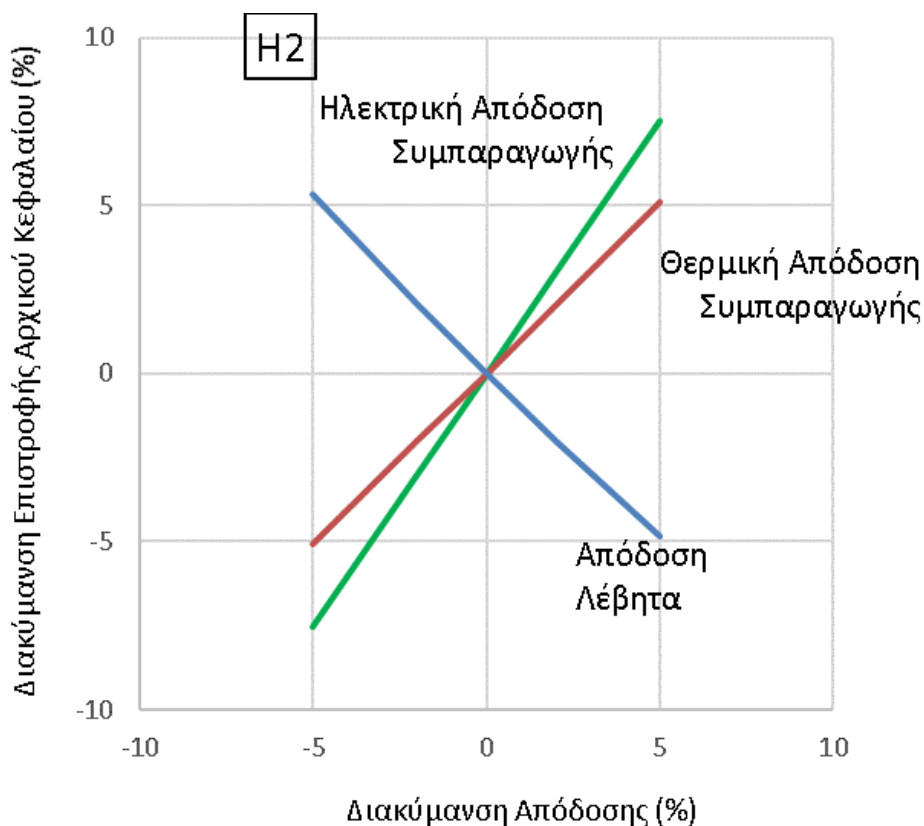


Σχήμα 5.7 Εξέλιξη της συνολικής ανάκτησης κεφαλαίου CR_T συναρτήσει του χρόνου πραγματικής λειτουργίας για τα οκτώ εξεταζόμενα έργα ΣΗΘ της Αθήνας.

Επιπλέον, προκειμένου να ελεγχθεί η εγκυρότητα των βασικών παραδοχών και να ελεγχθεί η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, πραγματοποιήθηκε ανάλυση ευαισθησίας. Τα αποτελέσματα για το έργο H2, το οποίο φαίνεται να είναι το πιο επιτυχημένο, παρουσιάζονται στα Σχήματα 5.8 και 5.9. Το Σχήμα 5.8 αντιπροσωπεύει την καμπύλη ανάκτησης κεφαλαίου για το έργο H2, όταν η ηλεκτρική απόδοση κυμαίνεται μεταξύ -5% και +5%. Τα αποτελέσματα δείχνουν ανάλογη διαφορά της τάξεως του 7,5% στην ανάκτηση κεφαλαίου για αλλαγή 5% στην απόδοση ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπλέον, η ακρίβεια της μέσης επιστροφής της επένδυσης για το συνολικό διάστημα λειτουργίας (ROI_T) αναλύεται περαιτέρω στο Σχήμα 5.9, για +/-5% διακύμανση της ηλεκτρικής και θερμικής απόδοσης του συστήματος καθώς και της απόδοσης του συμβατικού λέβητα. Μια αλλαγή στην απόδοση του συστήματος, έχει ως αποτέλεσμα μια ανάλογη αλλαγή στην επιστροφή επένδυσης (ROI), δείχνοντας ελαφρώς μεγαλύτερη ευαισθησία στην ηλεκτρική απόδοση. Οι αλλαγές στην απόδοση του λέβητα οδηγούν σε αντιστρόφως ανάλογες αλλαγές στην επιστροφή επένδυσης (ROI).



Σχήμα 5.8. Καμπύλη ανάκτησης κεφαλαίου για το έργο H2 όταν η ηλεκτρική απόδοση κυμαίνεται μεταξύ -5% και +5%.



Σχήμα 5.9. Μέση επιστροφή της επένδυσης για το συνολικό διάστημα λειτουργίας (ROI_T) για $\pm 5\%$ διακύμανση της ηλεκτρικής και θερμικής απόδοσης του συστήματος και της απόδοσης του συμβατικού λέβητα.

5.4 Συμπεράσματα

Μια ολοκληρωμένη και συγκριτική ανάλυση και αξιολόγηση των έργων CHP/CCHP που λειτουργούν επί του παρόντος στην Αθήνα διενεργήθηκε, προκειμένου να επισημάνει τις διαφορές μεταξύ της πραγματικής απόδοσης και της απόδοσης σχεδιασμού των συστημάτων, που οφείλονται σε τεχνικούς και οικονομικούς λόγους, καθώς και να αναδείξει τους λόγους που εμποδίζουν τη διεύρυνση της συμπαραγωγής στην Ελλάδα.

Μια απλή και αποτελεσματική μέθοδος ανάλυσης που βασίζεται σε πραγματικά δεδομένα της κατανάλωσης φυσικού αερίου, που καλύπτουν όλη την περίοδο λειτουργίας, διαμορφώθηκε και εφαρμόστηκε με επιτυχία σε οκτώ έργα CHP/CCHP, με αποτέλεσμα την παρουσίαση των τεχνικών και οικονομικών αποδόσεων για όλο το διάστημα της λειτουργίας τους, από την εγκατάστασή τους. Τα δύο KPIs που επιλέχθηκαν για την αξιολόγηση της πραγματικής απόδοσης (α) ο συντελεστής χρησιμοποίησης, για την αξιολόγηση της τεχνικής απόδοσης, και (β) η ανάκτηση κεφαλαίου, για την αξιολόγηση της οικονομικής

απόδοσης, αποδείχθηκαν αμφότερα αποτελεσματικά στην ανάλυση, καθώς μπόρεσαν να δείξουν σαφώς τη στρατηγική λειτουργίας και την αποτελεσματικότητά της για κάθε έργο.

Η εξέλιξη των KPIs κατά τη διάρκεια λειτουργίας των εγκαταστάσεων παρουσίασε μεγαλύτερες διακυμάνσεις από ό,τι θα έπρεπε, αποδεικνύοντας ότι οι αναλύσεις που βασίζονται σε δεδομένα λειτουργίας από μια σύντομη περίοδο μπορεί να είναι παραπλανητικές όσον αφορά στη μελλοντική λειτουργία μιας εγκατάστασης. Η ανάλυση ευαισθησίας εξέτασε την κύρια παραδοχή, η οποία ήταν η λειτουργία σε ονομαστικό φορτίο, και επικύρωσε την ακρίβεια των αποτελεσμάτων, δείχνοντας ότι το συνολικό συμπέρασμα έχει εξαχθεί με ασφάλεια και συνεπώς η υπόθεση μπορεί να εισαχθεί στη μέθοδο για την απλοποίησή της αλλά και για λόγους ευρύτερης εφαρμογής.

Η ανάλυση απέδειξε ότι τρία έργα θα μπορούσαν να θεωρηθούν επιτυχημένα, δύο είναι τεχνικά αποδεκτά, αλλά λόγω της υπερδιαστασιολόγησης μειώνεται η οικονομική απόδοσή τους, ένα έργο απέτυχε και τα υπόλοιπα δύο έργα παρουσιάζουν δυσκολίες που εμποδίζουν τη σαφή αξιολόγηση. Έξι στα οκτώ έργα θεωρήθηκαν υπερδιαστασιολογημένα. Οι πιο επιτυχημένες περιπτώσεις ήταν σε νοσοκομείο και ξενοδοχείο, ενώ τα συστήματα τριπαραγωγής παρουσίασαν χαμηλότερα ποσοστά ανάκτησης κεφαλαίου σε σύγκριση με τα συστήματα συμπαραγωγής.

Παράλληλα, η εξέλιξη των τιμών του φυσικού αερίου και της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα έδειξε ότι το περιθώριο κερδοφορίας έχει συρρικνωθεί μετά το 2013, ενώ η υποστηρικτική πολιτική προσπαθεί να διατηρήσει τον λόγο της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας προς την τιμή του φυσικού αερίου (spark ratio) περίπου ίση με 3. Η αυτοκατανάλωση μπορεί να προσφέρει μεγαλύτερες οικονομικές ευκαιρίες μετά το 2015.

Συνολικά, τα έργα επιτυγχάνουν χαμηλές τιμές συντελεστή χρησιμοποίησης, είτε λόγω κακών επιλογών σχεδιασμού είτε λόγω αποτυχίας των εκτιμήσεων θερμικού φορτίου. Το πιο κοινό πρόβλημα φαίνεται να είναι η υπερδιαστασιολόγηση της μονάδας. Η σχετική ανάκτηση κεφαλαίου δεν είναι επαρκώς αποδεκτή, κυρίως λόγω του χαμηλού CF αλλά και λόγω αλλαγών στις τιμές της ενέργειας, οι οποίες έχουν περιορίσει σταδιακά το περιθώριο κερδοφορίας. Η πραγματική περίοδος αποπληρωμής SPB_T εμφανίζεται στις περισσότερες περιπτώσεις πολύ μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη SPB_D των τεσσάρων ετών. Η καθυστέρηση στην ανάκτηση του κεφαλαίου είναι ο κύριος λόγος για τον οποίο μια τέτοια επένδυση δεν είναι τελικά ελκυστική.

Η μέθοδος που εφαρμόστηκε για την ανάλυση της απόδοσης των υπαρχόντων συστημάτων είναι απλή, αποτελεσματική και μπορεί να βασιστεί μόνο σε δεδομένα καταγραφής της κατανάλωσης αερίου.

ΣΥΜΒΟΛΑ

CF_T	Μέσος συντελεστής χρησιμοποίησης συστήματος συμπαραγωγής για τη συνολική περίοδο λειτουργίας (διάρκεια ζωής) (-)
CF_j	Συντελεστής χρησιμοποίησης συστήματος συμπαραγωγής για τον μήνα j (-)
CR_T	Συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για το συνολικό διάστημα λειτουργίας του συστήματος συμπαραγωγής (διάρκεια ζωής) (-)
CR_j	Συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου για τον μήνα j (-)
$C_{e,j}$	Λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για τον μήνα j (€/MWh)
C_{eq}	Κόστος εξοπλισμού συμπαραγωγής (M€/MWe)
$C_{g,j}$	Λιανική τιμή φυσικού αερίου συμπαραγωγής για τον μήνα j (€/MWh)
C_m	Κόστος συντήρησης ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρισμού (€/MWh)
$C_{op,j}$	Το λειτουργικό κόστος ανά παραγόμενη μονάδα ηλεκτρισμού για τον μήνα j (€/MWh)
E_j	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από συμπαραγωγή για τον μήνα j (MWh)
G_j	Κατανάλωση φυσικού αερίου από συμπαραγωγή για τον μήνα j (MWh)
j	Αριθμός του μήνα του έτους, j=1,2,...12
ROI_D	Επιστροφή της Επένδυσης σχεδιασμού (-)
ROI_T	Πραγματική μέση Επιστροφή της Επένδυσης (-)
SPB_D	Απλή Περίοδος Αποπληρωμής σχεδιασμού (y)
SPB_T	Πραγματική Απλή Περίοδος Αποπληρωμής (y)
t_j	Συνολικές ημερολογιακές ώρες του μήνα j (h)
$t_{op,e}$	Συνολικός χρόνος λειτουργίας του μηχανήματος που είναι ισοδύναμος με την ονομαστική λειτουργία (h)
t_{op}	Συνολικός χρόνος λειτουργίας (διάρκεια ζωής) (y)
η_b	Θερμική απόδοση συμβατικού συστήματος θέρμανσης (λέβητα) (-)
η_e	Ηλεκτρική απόδοση συμπαραγωγής (-)
η_{th}	Θερμική απόδοση συμπαραγωγής (-)
E	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από συμπαραγωγή (MWh)
G	Κατανάλωση φυσικού αερίου συμπαραγωγής (MWh)
M	Συνολικός αριθμός των μηνών λειτουργίας (-)
P	Ονομαστική ηλεκτρική ισχύς συμπαραγωγής (MW)
Q	Ωφέλιμη θερμική ενέργεια που παράγει το σύστημα συμπαραγωγής (MWh)

6.

Τεχνοοικονομική αξιολόγηση απόδοσης συστήματος τριπαραγωγής σε λειτουργία

6.1 Εισαγωγή

Η Συμπαραγωγή έχει αποδειχθεί ότι είναι μια αποτελεσματική εφαρμογή εξοικονόμησης ενέργειας, συμβατή με τις σύγχρονες ανάγκες προστασίας του περιβάλλοντος. Ωστόσο, η διεύθυνσή της παραμένει χαμηλή για οικονομικούς κυρίως λόγους που σχετίζονται με το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, την αβεβαιότητα της τιμολογιακής ενεργειακής πολιτικής και την έλλειψη χρηματοδοτικών κινήτρων [18–20].

Ένα βασικό κριτήριο επιτυχίας είναι ο υψηλός χρόνος λειτουργίας σε ονομαστικό φορτίο [58], οπότε και τα κτίρια του τριτογενούς τομέα, ειδικά τα νοσοκομεία, έχουν αποδειχθεί ιδανικά για την εφαρμογή συμπαραγωγής λόγω των συνεχών ενεργειακών απαιτήσεών τους [52, 53, 60, 61]. Οι εφαρμογές τριπαραγωγής είναι ακόμα πιο συμφέρουσες σε περιοχές με θερμό κλίμα, όπου πέρα από την ανάγκη θέρμανσης τον χειμώνα υπάρχει έντονη και η ανάγκη ψύξης το καλοκαίρι [10, 28]. Στην Ελλάδα, αρκετές μελέτες έχουν διερευνήσει τη σκοπιμότητα εφαρμογής συστημάτων τριπαραγωγής στα νοσοκομεία [14, 45, 104]. Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το συνολικό ενεργειακό κόστος προβλέπεται να μειωθεί, ενώ θα επιτευχθούν

περαιτέρω οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη από τη χρήση φυσικού αερίου. Ως εκ τούτου, η εφαρμογή κρίνεται συμφέρουσα.

Η αξιολόγηση της απόδοσης των συστημάτων ΣΗΘ μπορεί να βασίζεται σε διάφορα κριτήρια τεχνικά, περιβαλλοντικά ή οικονομικά.

Ανεξάρτητα από τα κριτήρια, η ακρίβεια των μετρήσεων ροής ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την αξιολόγηση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, η έρευνα είναι πειραματική και βασίζεται σε ένα σύστημα που έχει κατασκευαστεί και λειτουργεί σε ένα εργαστήριο, το οποίο μπορεί να είναι δαπανηρό και χρονοβόρο [105–107]. Εναλλακτικά, δημιουργούνται λεπτομερή μοντέλα θερμοδυναμικών συστημάτων με βάση λειτουργικά δεδομένα από πραγματικά συστήματα [34, 47], ή με τη χρήση προγραμμάτων προσομοίωσης για δυναμική ανάλυση ενεργειακής συμπεριφοράς και απόδοσης κτιρίου, σε συνδυασμό με μαθηματικές διαδικασίες βελτιστοποίησης, για τον προσδιορισμό των φορτίων ενέργειας και της τελικής απόδοσης του συστήματος [109–111]. Όταν δεν υπάρχει διαθέσιμη πραγματική μονάδα, η αξιολόγηση βασίζεται σε δεδομένα που παρέχονται από τον κατασκευαστή [47].

Σε λίγες μόνο περιπτώσεις, τα δεδομένα προέρχονται από πραγματικά συστήματα, που έχουν εγκατασταθεί σε ένα πραγματικό κτίριο και λειτουργούν υπό κανονικές συνθήκες. Μια τέτοια περίπτωση παρουσιάστηκε από τους Dillon et al [112], όπου πολλές μονάδες microCHP (5kWe) εγκατεστημένες σε μικρά εμπορικά κτίρια παρακολουθούνταν για τη μέτρηση και την αξιολόγηση των δεδομένων απόδοσης. Τα δεδομένα συγκρίθηκαν με τις αποδόσεις που δηλώθηκαν από τον κατασκευαστή και αποδεικνύονται συνεπή. Μια υπάρχουσα μονάδα ΣΗΘ σε συνδυασμό με τηλεθέρμανση στο Πανεπιστήμιο της Περούτζια στην Ιταλία αναλύθηκε από τους Bidini et al [113] ως προς την τεχνική και οικονομική απόδοσή της, χρησιμοποιώντας δεδομένα από τους πρώτους 15 μήνες λειτουργίας. Μετά τον πρώτο χρόνο λειτουργίας πραγματοποιήθηκε ανάλυση κόστους-οφέλους για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης με βασικό στόχο τη μείωση του κόστους. Η ενεργειακή απόδοση ήταν το κριτήριο βελτιστοποίησης, καθώς συνδέεται στενά με τις δυνατότητες οικονομικής ωφέλειας σύμφωνα με την ιταλική νομοθεσία. Οι Li et al [114] υπογραμμίζουν τη σημασία της διενέργειας τόσο της ενεργειακής όσο και της εξεργειακής ανάλυσης απόδοσης ενός συστήματος ΣΗΘ για την απόκτηση λεπτομερούς εικόνας της απόδοσης του συστήματος και τον εντοπισμό δυνατοτήτων βελτιστοποίησης. Τα αποτελέσματα απόδοσης συγκρίθηκαν με τις προδιαγραφές του συστήματος. Η ηλεκτρική απόδοση αποδεικνύεται σύμφωνη με τα πρότυπα του κατασκευαστή, αν και η θερμική απόδοση είναι χαμηλότερη λόγω μεγαλύτερων θερμικών απωλειών. Ομοίως, ένα από τα πολλά εργοστάσια βιομάζας

με σύστημα CHP που εγκαταστάθηκαν στο Τιρόλο της Ιταλίας παρακολούθηθηκε από τους Prando et al [115] για να εξεταστεί η απόδοση υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας και να συγκριθεί με την ονομαστική. Επιπλέον, ένα θερμοδυναμικό μοντέλο βαθμονομημένο με τα πειραματικά δεδομένα χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό πιθανών βελτιώσεων με την πρόβλεψη της απόδοσης υπό διαφορετικές στρατηγικές λειτουργίας. Οι Verhaert et al [116] συζητούν την πρόκληση του βέλτιστου σχεδιασμού και λειτουργίας ενός microCHP εγκατεστημένου σε ένα κτίριο, με στόχο την επίτευξη της ονομαστικής απόδοσης υπό μεγάλες διακυμάνσεις της ζήτησης θερμότητας και ηλεκτρικής ενέργειας. Το επίκεντρο της εργασίας ήταν κυρίως η συμπεριφορά έναρξης-διακοπής και η λειτουργία υπό μερικό φορτίο διαφορετικών τεχνολογιών micro-CHP. Η ανάλυση βασίστηκε σε επιτόπιες μετρήσεις στην περιοχή της Φλάνδρας του Βελγίου και τα αποτελέσματα δείχνουν μεγάλες αποκλίσεις μεταξύ της αναφερόμενης και της πραγματικής απόδοσης, υπογραμμίζοντας τη σημασία της αξιολόγησης των πραγματικών μελετών περιπτώσεων.

Προς αυτήν την κατεύθυνση, το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει την τεχνική και οικονομική αξιολόγηση ενός συστήματος τριπαραγωγής που έχει εγκατασταθεί και λειτουργεί σε νοσοκομείο της Αθήνας. Τα δεδομένα λειτουργίας συγκρίνονται με τα τεχνικά δεδομένα του κατασκευαστή και χρησιμοποιούνται περαιτέρω για τον προσδιορισμό της ενεργειακής συμπεριφοράς υπό λειτουργία μερικού φορτίου. Η ανάλυση κόστους ενέργειας επαληθεύει τη βιωσιμότητα λειτουργίας του συστήματος, τόσο για τη θέρμανση όσο και για τη λειτουργία ψύξης.

Η αξιολόγηση της απόδοσης διεξάγεται με τη χρήση τριών βασικών δεικτών απόδοσης: (α) ο συντελεστής χρησιμοποίησης CF και (β) οι ενεργειακές αποδόσεις - συγκεκριμένα η ηλεκτρική απόδοση n_e και η θερμική απόδοση n_{th} , σχετίζονται με την τεχνική απόδοση, ενώ (γ) το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα συμπαραγωγής $C_{e, chp}$ χρησιμοποιείται για την ανάλυση της οικονομικής απόδοσης. Η τεχνική αξιολόγηση αναμένεται να αποκαλύψει πιθανές αποκλίσεις από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος και τους στόχους σχεδιασμού, ενώ η οικονομική αξιολόγηση υποδεικνύει τη βιωσιμότητα λειτουργίας του συστήματος.

Έτσι, ο σκοπός αυτού του κεφαλαίου είναι να επαληθεύσει τα πρότυπα απόδοσης ενός εγκατεστημένου συστήματος CCHP και να αναδείξει την αποδοτικότητά του όσον αφορά στη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας και κόστους.

6.2 Συλλογή δεδομένων και μεθοδολογία

6.2.1 Τεχνική περιγραφή συστήματος

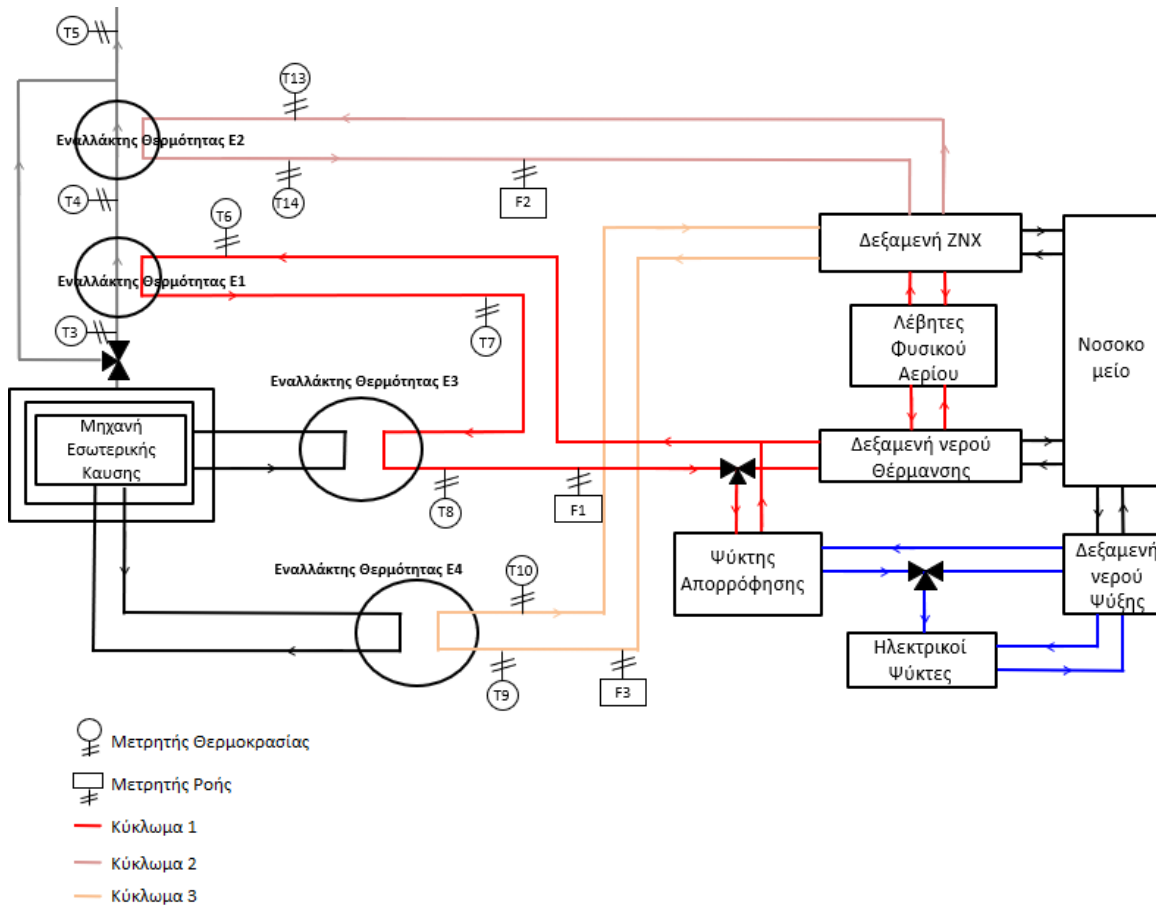
Το σύστημα τριπαραγωγής είναι εγκατεστημένο στη μαιευτική κλινική ΜΗΤΕΡΑ, η οποία στεγάζεται σε ένα κτίριο 11 ορόφων και συνολικά 30.000 m² στην Αθήνα. Οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια καλύπτονται μέσω του εθνικού δικτύου, ενώ δύο συμβατικοί λέβητες που χρησιμοποιούν φυσικό αέριο καλύπτουν τις θερμικές ανάγκες. Η εγκατάσταση πραγματοποιήθηκε τον Ιούνιο του 2008, με στόχο τη μείωση του κόστους ενέργειας. Το σύστημα περιλαμβάνει μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και θερμικής ενέργειας 500KWe με κινητήρα μηχανή εσωτερικής καύσης (MEK) με χρήση φυσικού αερίου και ψύκτη απορρόφησης θερμού νερού μονής δράσης ισχύος 629KW. Αυτή ήταν η πρώτη εφαρμογή CCHP σε νοσοκομείο στην Ελλάδα.

Το διάγραμμα ροής της διεργασίας παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.1. Η γεννήτρια παράγει ηλεκτρική ενέργεια με καύση φυσικού αερίου. Η συμπαραγόμενη θερμότητα ανακτάται μέσω τριών κυκλωμάτων. Το κύκλωμα 1 περιλαμβάνει τον εναλλάκτη θερμότητας E3, ο οποίος ανακτά θερμότητα από την ψύξη των χιτωνίων του κινητήρα και τον εναλλάκτη θερμότητας E1, ο οποίος ανακτά τη θερμότητα από τα καυσαέρια που παράγονται κατά την καύση. Το κύκλωμα 2 περιλαμβάνει τον εναλλάκτη θερμότητας E4, ο οποίος ανακτά θερμότητα μέσω της ψύξης των λιπαντικών υγρών και του ψυγείου και το κύκλωμα 3 περιλαμβάνει τον εναλλάκτη θερμότητας E2, ο οποίος ανακτά θερμότητα με περαιτέρω ψύξη των καυσαερίων στην έξοδο του E1. Η θερμική ενέργεια από το κύκλωμα 1 αξιοποιείται για την κάλυψη των αναγκών θέρμανσης ή ψύξης του χώρου και η θερμότητα από τα κυκλώματα 2 και 3 αξιοποιείται για την κάλυψη των αναγκών ζεστού νερού χρήσης (ZNX).

Ένα ροόμετρο (μετρητής ροής 4-20mA) είναι εγκατεστημένο σε κάθε ένα από τα τρία κυκλώματα και αισθητήρες θερμοκρασίας (PT100 για αισθητήρες νερού και αέρα και θερμοστοιχείο TYPE-K για αισθητήρες αερίου) μετρούν τη θερμοκρασία του νερού στην είσοδο και στην έξοδο κάθε εναλλάκτη θερμότητας. Παράλληλα, διακόπτες ροής είναι εγκατεστημένοι για να επιβλέπουν τη ροή του νερού. Οι μετρήσεις θερμοκρασίας και ροής νερού καταγράφονται ανά λεπτό από ένα σύστημα παρακολούθησης SCADA. Οι μετρητές που είναι απαραίτητοι για τη διαδικασία της ενεργειακής ανάλυσης εμφανίζονται στο Σχήμα 6.1.

Ένας προγραμματιζόμενος λογικός ελεγκτής (PLC) ελέγχει διάφορα μέρη του συστήματος και δίνει τις αντίστοιχες εντολές για τη λειτουργία και την ασφάλειά του,

σύμφωνα με τα καθορισμένα όρια. Εάν η θερμοκρασία ξεπεράσει ένα προκαθορισμένο όριο ή αν ανιχνευθεί χαμηλή ροή νερού, ο κινητήρας μπαίνει σε κατάσταση λειτουργίας έκτακτης ανάγκης.



Σχήμα 6.1. Διάγραμμα ροής διεργασίας.

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια καταναλώνεται επιτόπου και η συμπαραγόμενη θερμότητα χρησιμοποιείται κυρίως για θέρμανση και δευτερευόντως για ψύξη. Η λειτουργία ακολουθεί το θερμικό φορτίο, καθώς δεν υπάρχει σύστημα αποθήκευσης θερμότητας. Κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης, όλη η ανακτώμενη θερμική ενέργεια χρησιμοποιείται για θέρμανση. Κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης, η θερμική ενέργεια από το κύκλωμα 1 μεταφέρεται μέσω της τρίοδης βαλβίδας στον ψύκτη απορρόφησης και χρησιμοποιείται για ψύξη. Οι υπόλοιπες ανάγκες ψύξης καλύπτονται από ηλεκτρικούς ψύκτες.

Όσον αφορά στο συμβατικό σύστημα θέρμανσης, η θερμοκρασία του νερού στις δεξαμενές νερού ενεργοποιεί τη λειτουργία του. Η λειτουργία του συμβατικού λέβητα ενεργοποιείται με θερμοκρασίες χαμηλότερες των 75°C στη δεξαμενή νερού θέρμανσης, και χαμηλότερες των 55°C στη δεξαμενή ζεστού νερού. Η λειτουργία της μονάδας ΣΗΘ έχει προτεραιότητα και υποστηρίζεται από το συμβατικό σύστημα.

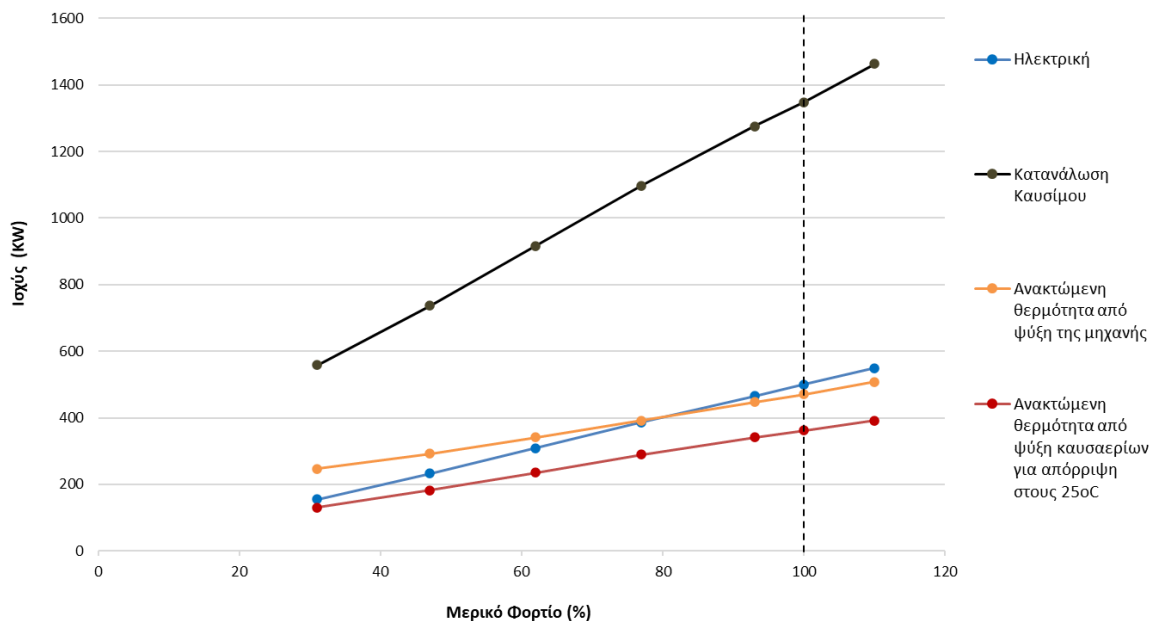
Από το 2008 έως το 2013, η μονάδα ΣΗΘ λειτουργούσε εν μέρει. Τον Δεκέμβριο του 2014, η μονάδα προγραμματίστηκε ώστε να λειτουργεί τις εργάσιμες ημέρες (Δευτέρα–Παρασκευή) κατά τις ώρες των υψηλότερων τιμών ηλεκτρικής ενέργειας (07:00 έως 23:00). Στο τέλος της περιόδου θέρμανσης το 2015, λόγω των ικανοποιητικών οικονομικών αποτελεσμάτων, αποφασίστηκε η συνεχής λειτουργία από τη Δευτέρα στις 07:00 έως την Παρασκευή στις 23:00.

6.2.2 Χαρακτηριστικά σχεδιασμού συστήματος CHP

Τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού, όπως ορίζονται από τον κατασκευαστή Waukesha, συνοψίζονται στον Πίνακα 6.1. Χαρακτηριστικά σχεδιασμού συστήματος συμπαραγωγής σύμφωνα με τον κατασκευαστή, και παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.2.

Πίνακας 6.1. Χαρακτηριστικά σχεδιασμού συστήματος συμπαραγωγής σύμφωνα με τον κατασκευαστή.

Load	%	31	47	62	77	93	100	110
Power	KW	155	233	309	387	465	500	550
Fuel Consumption	KW	558	737	917	1097	1276	1348	1463
Heat from Jacket Water	KW	207	243	279	315	351	365	388
Heat from Lube Oil	KW	32	34	36	37	39	40	41
Heat from Intercooler	KW	8	15	26	40	57	65	79
Exhaust Gas Flow	t/h	1.02	1.39	1.76	2.15	2.53	2.69	2.94
Exhaust Temperature after Turbine	°C	406	419	427	432	432	432	429
Total Energy from Exhaust Gas for Rejection at 25°C	KW	131	182	236	290	342	362	392
Electrical Efficiency	-	0.28	0.32	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38
Max Thermal Efficiency	-	0.68	0.64	0.63	0.62	0.62	0.62	0.62
Max Thermal Efficiency from Exhaust Gas	-	0.23	0.25	0.26	0.26	0.27	0.27	0.27
Max Thermal Efficiency from Engine Cooling	-	0.44	0.40	0.37	0.36	0.35	0.35	0.35



Σχήμα 6.2. Χαρακτηριστικά σχεδιασμού συστήματος ΣΗΘ σε λειτουργία μερικού φορτίου.

6.2.3 Παρακολούθηση δεδομένων

Η ανάλυση καλύπτει περίοδο ενός έτους από τον Ιούλιο του 2015 έως και τον Ιούνιο του 2016.

Οι ενεργειακές ροές, η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια και η ανακτημένη θερμότητα υπολογίζονται με βάση τις μετρήσεις που καταγράφονται από το σύστημα παρακολούθησης SCADA. Οι ωριαίες καταναλώσεις φυσικού αερίου παρακολουθούνται από την εταιρεία διανομής αερίου. Οι τιμές της ενέργειας καταγράφονται μέσω των τιμολογίων από τις εταιρείες κοινής ωφέλειας.

Τα ακόλουθα δεδομένα καταγράφονται σε ωριαία βάση:

- | | | | |
|-----|-------|-------|--|
| (1) | E | (kWh) | παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, |
| (2) | G | (kWh) | κατανάλωση φυσικού αερίου, |
| (3) | t | (h) | χρόνος λειτουργίας, |
| (4) | F_1 | (t/h) | ροή νερού στο κύκλωμα 1, |
| (5) | F_2 | (t/h) | ροή νερού στο κύκλωμα 2, |
| (6) | F_3 | (t/h) | ροή νερού στο κύκλωμα 3, |
| (7) | T_6 | (°C) | θερμοκρασία νερού στην είσοδο του εναλλάκτη E3, |
| (8) | T_7 | (°C) | θερμοκρασία νερού στην έξοδο του εναλλάκτη E3
και στην είσοδο του εναλλάκτη E1, |
| (9) | T_8 | (°C) | θερμοκρασία νερού στην έξοδο του εναλλάκτη E1, |

(10)	T_9	(°C)	θερμοκρασία νερού στην είσοδο του εναλλάκτη E4,
(11)	T_{10}	(°C)	θερμοκρασία νερού στην έξοδο του εναλλάκτη E4,
(12)	T_{13}	(°C)	θερμοκρασία νερού στην είσοδο του εναλλάκτη E2,
(13)	T_{14}	(°C)	θερμοκρασία νερού στην έξοδο του εναλλάκτη E2.

Παράλληλα, τα ακόλουθα οικονομικά δεδομένα καταγράφονται σε μηνιαία βάση:

(1)	C_g	(€/MWh)	τιμή φυσικού αερίου για θέρμανση,
(2)	$C_{g,c}$	(€/MWh)	τιμή φυσικού αερίου για συμπαραγωγή,
(3)	C_e	(€/MWh)	τιμή ηλεκτρισμού,
(4)	C_m	(€/MWh)	κόστος συντήρησης.

Το σύστημα παρακολούθησης καταγράφει μόνο τη λειτουργία της ΣΗΘ. Έτσι, η αξιολόγηση της λειτουργίας του ψύκτη και ο υπολογισμός της πραγματικής απόδοσής του μπορούν να γίνουν μόνο με επιτόπιες μετρήσεις. Για αυτόν τον λόγο, η απόδοση της λειτουργίας της ψύξης δεν εξετάστηκε αναλυτικά στην παρούσα έρευνα. Το COP του συστήματος ψύξης μετρήθηκε από επιτόπιες μετρήσεις κατά τη διάρκεια μιας τυπικής ημέρας της περιόδου ψύξης και ήταν 0,7.

6.2.4 Βασικοί δείκτες απόδοσης

Οι βασικοί δείκτες απόδοσης (KPIs) είναι θεμελιώδεις δείκτες για την αξιολόγηση της λειτουργίας του συστήματος. Το σύστημα ΣΗΘ αξιολογείται σύμφωνα με τις τεχνικές και οικονομικές επιδόσεις του βάσει απλών ενεργειακών και οικονομικών ισοζυγίων. Οι βασικοί δείκτες απόδοσης που χρησιμοποιούνται στην παρούσα ανάλυση της διεργασίας και σχετίζονται με τις τεχνικές αποδόσεις είναι (α) ο συντελεστής χρησιμοποίησης (CF) και (β) οι ενεργειακές αποδόσεις, συγκεκριμένα η ηλεκτρική απόδοση n_e και η θερμική απόδοση n_{th} , ενώ (γ) το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα συμπαραγωγής $C_{e, chp}$ χρησιμοποιείται για την ανάλυση της οικονομικής απόδοσης.

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης (CF) ενός συστήματος ΣΗΘ είναι δείκτης του πλήρους δυναμικού του συστήματος σε σύγκριση με την τρέχουσα λειτουργία. Ορίζεται ως ο λόγος της πραγματικής ηλεκτρικής ενέργειας E που παράγεται κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου προς τη δυνητική παραγωγή του εάν λειτουργούσε συνεχώς και σε ονομαστική ισχύ P_{nom} , και υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$CF = \frac{E}{P_{nom} t'} \quad (6.1)$$

όπου t' (h) είναι το σύνολο των ωρών της εξεταζόμενης περιόδου.

Η ανακτώμενη θερμική ενέργεια σε κάθε εναλλάκτη θερμότητας Q_i υπολογίζεται από τον ρυθμό ροής και τη διαφορά θερμοκρασίας του διερχόμενου νερού, σύμφωνα με την εξίσωση (6.2).

$$Q_i = F_i C_p (T_{out} - T_{in}) \quad (6.2)$$

$$Q_1 = F_1 C_p (T_8 - T_7) \quad (6.3)$$

$$Q_2 = F_1 C_p (T_7 - T_6) \quad (6.4)$$

$$Q_3 = F_2 C_p (T_{14} - T_{13}) \quad (6.5)$$

$$Q_4 = F_3 C_p (T_{10} - T_9) \quad (6.6)$$

όπου C_p (kWh/ t) είναι η ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού.

Η εξίσωση για τη συνολική ανακτώμενη θερμότητα Q του συστήματος είναι:

$$Q = \sum Q_i = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (6.7)$$

Οι βαθμοί απόδοσης υπολογίζονται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$n_e = \frac{E}{G} \quad (6.8)$$

$$n_{th} = \frac{Q}{G} \quad (6.9)$$

$$n_{th,g} = \frac{Q_2 + Q_3}{G} \quad (6.10)$$

$$n_{th,w} = \frac{Q_1 + Q_4}{G} \quad (6.11)$$

όπου n_e (-) είναι η ηλεκτρική απόδοση, n_{th} (-) είναι η θερμική απόδοση, $n_{th,g}$ (-) είναι η θερμική απόδοση από την ψύξη των καυσαερίων, $n_{th,w}$ (-) είναι η θερμική απόδοση από

την ψύξη των χιτωνίων της μηχανής και G (kWh) είναι η κατανάλωση του φυσικού αερίου του συστήματος.

Η αποφευγόμενη κατανάλωση φυσικού αερίου από τον λέβητα G_a και η αποφευγόμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τους ηλεκτρικούς ψύκτες E_a υπολογίζονται από τις Εξισώσεις (6.12) και (6.13):

$$G_a = (1 - f) \frac{n_{th}}{n_b} G \quad (6.12)$$

$$E_a = f \frac{n_{th} COP_a}{COP_e} G \quad (6.13)$$

όπου n_b (-) είναι η θερμική απόδοση του λέβητα του συμβατικού συστήματος θέρμανσης, COP_a (-) είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς του ψύκτη απορρόφησης, και COP_e (-) είναι ο συντελεστής συμπεριφοράς του συμβατικού συστήματος ψύξης.

Στις παραπάνω εξισώσεις, ο παράγοντας f αντιπροσωπεύει το ποσοστό της ανακτώμενης θερμότητας που χρησιμοποιείται για ψύξη και υπολογίζεται ως εξής:

$$f = \frac{a (Q_1 + Q_2)}{Q} \quad (6.14)$$

όπου a είναι το μέρος της ανακτώμενης θερμότητας που χρησιμοποιείται για ψύξη, με $a=0$ για την περίοδο θέρμανσης και $a=1$ για την περίοδο ψύξης, ενώ $Q_1 + Q_2$ (kWh) είναι η ανακτώμενη θερμότητα από το κύκλωμα 1, η οποία αξιοποιείται για θέρμανση του χώρου.

Το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα συμπαραγωγής $C_{e,chp}$ υπολογίζεται σύμφωνα με την Εξίσωση (6.15). Ο όρος $C_{e,h}$ αντιπροσωπεύει το κόστος όταν όλη η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για θέρμανση και ο όρος $C_{e,c}$ αντιπροσωπεύει το κόστος όταν όλη η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για ψύξη. Στις Εξισώσεις (6.16) και (6.17), ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει το κόστος φυσικού αερίου που καταναλώνεται από τη συμπαραγωγή, ο δεύτερος όρος το αποφευγόμενο κόστος από την υποκατάσταση ενέργειας από το συμβατικό σύστημα και ο τρίτος όρος το κόστος συντήρησης.

$$C_{e,chp} = (1 - f) C_{e,h} + f C_{e,c} \quad (6.15)$$

$$C_{e,h} = \left(\frac{C_{g,c}}{n_e} - \frac{n_{th}}{n_e n_b} C_g + C_m \right) \quad (6.16)$$

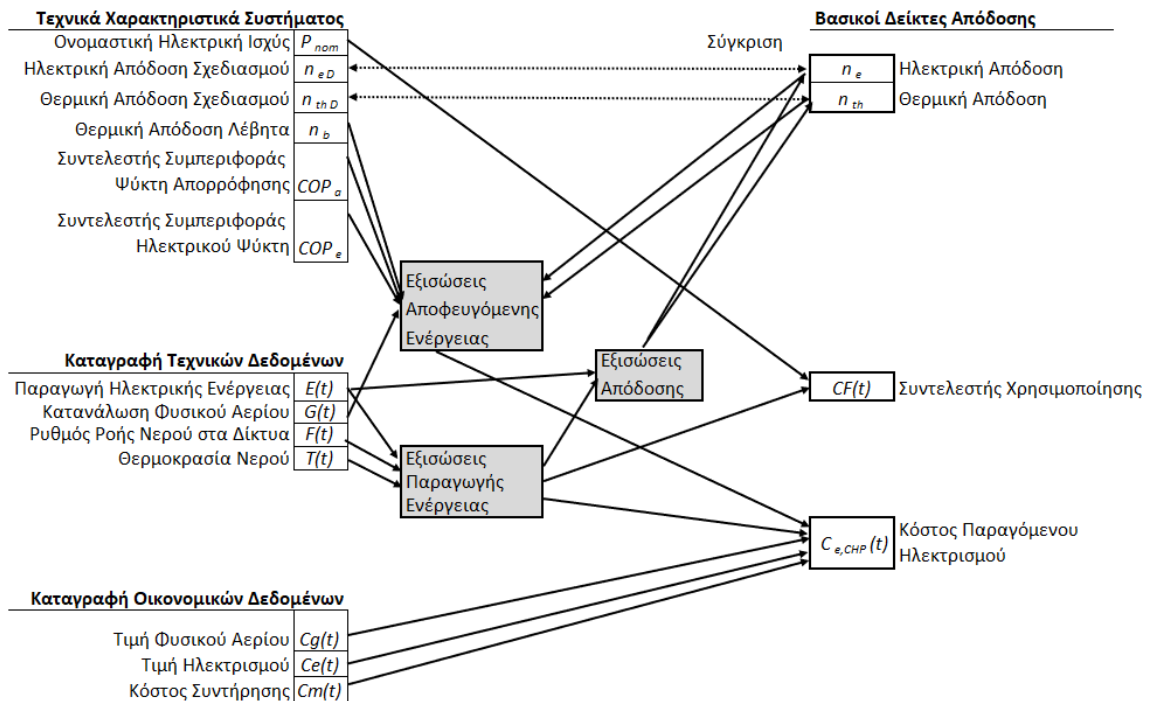
$$C_{e,c} = \left(\frac{C_{g,c}}{n_e} - \frac{n_{th} COP_a}{n_e COP_e} C_e + C_m \right) \quad (6.17)$$

Η συνθήκη που προσδιορίζει την οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος συμπαραγωγής προσδιορίζεται συγκρίνοντας το κόστος της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα συμπαραγωγής με τη λιανική τιμή του ηλεκτρισμού, τον συμβατικό δηλαδή τρόπο κάλυψης των αναγκών. Οι συνθήκες που διαμορφώνονται για λειτουργία σε θέρμανση και λειτουργία σε ψύξη ορίζονται στις Εξισώσεις (6.18) και (6.19) αντίστοιχα:

$$C_e \geq C_{e,h} \quad (6.18)$$

$$C_e \geq C_{e,c} \quad (6.19)$$

Η παραπάνω ανάλυση συνοψίζεται στο διάγραμμα ροής πληροφοριών στο Σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3. Διάγραμμα ροής πληροφοριών των επιλεγμένων βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs).

6.3 Αποτελέσματα και σχολιασμός

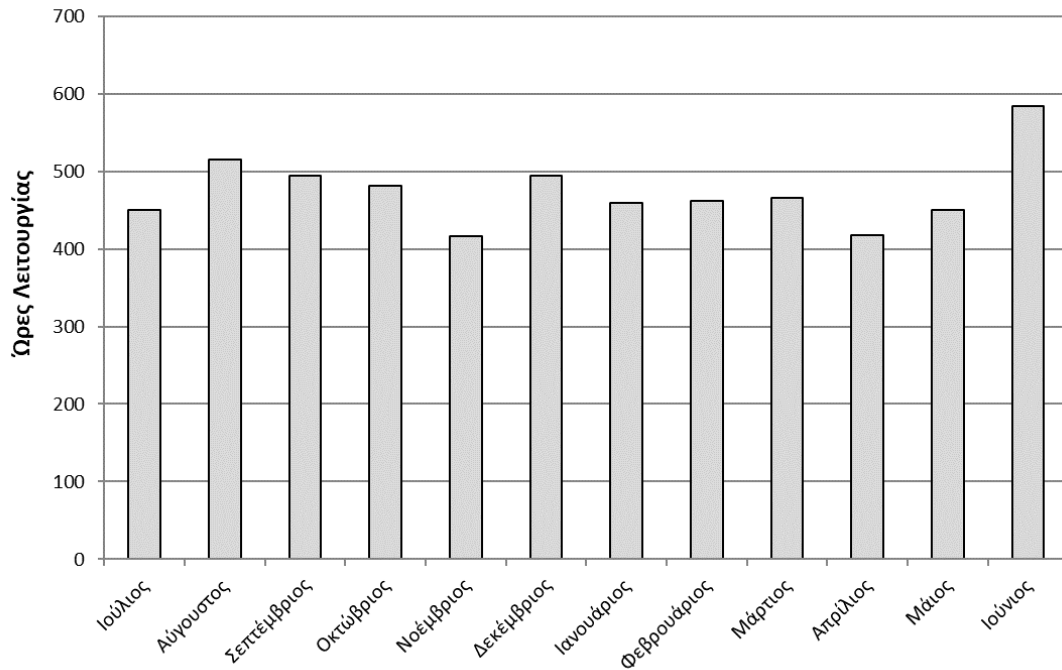
6.3.1 Ανάλυση αποτελεσμάτων

Στο Σχήμα 6.4, παρουσιάζεται ο μηνιαίος συνολικός χρόνος λειτουργίας. Είναι προφανές ότι το σύστημα ΣΗΘ δεν έχει συνεχή λειτουργία, με τον συνολικό χρόνο λειτουργίας να καλύπτει το 65% της εξεταζόμενης περιόδου. Το πρόγραμμα λειτουργίας κατά την εξεταζόμενη περίοδο είναι από Δευτέρα στις 07:00 έως Παρασκευή στις 23:00.

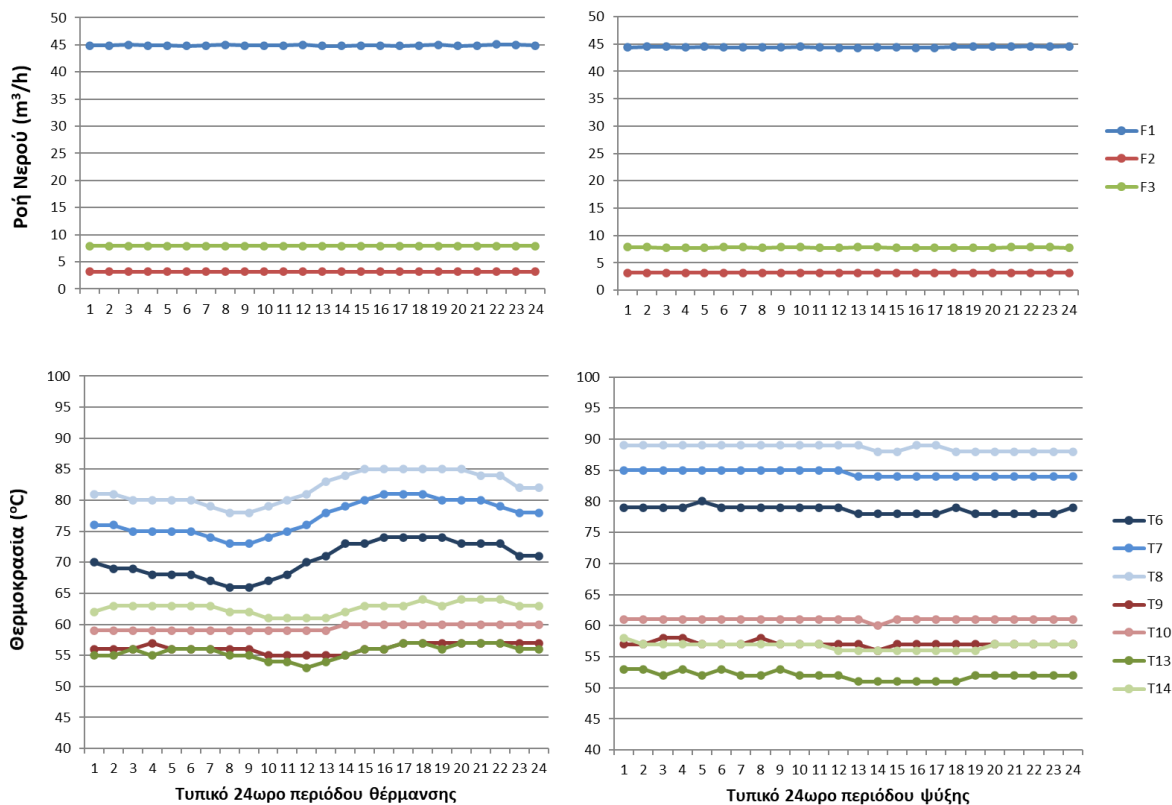
Το Σχήμα 6.5 παρουσιάζει τις ωριαίες τιμές των ελεγχόμενων θερμοκρασιών και ροών για μία τυπική ημέρα της περιόδου θέρμανσης και μία αντίστοιχη της περιόδου ψύξης. Οι θερμοκρασίες παρουσιάζουν διακυμάνσεις, ειδικά κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης. Κατά τη διάρκεια της περιόδου ψύξης, οι θερμοκρασίες στο κύκλωμα 1 είναι υψηλότερες. Οι ροές διατηρούνται σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια των 24 ωρών. Στο κύκλωμα 1, η ροή είναι πολύ υψηλότερη δίνοντας μεγαλύτερο περιθώριο για ανάκτηση θερμότητας.

Οι μηνιαίες τιμές της ανακτώμενης θερμότητας σε κάθε εναλλάκτη παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.6. Οι τιμές είναι υψηλότερες στο κύκλωμα 1, όπου συμπεριλαμβάνονται οι εναλλάκτες θερμότητας 1 και 3, που προορίζονται για θέρμανση χώρου. Ωστόσο, η ανάκτηση θερμότητας στο κύκλωμα 1 μειώνεται μετά τον Δεκέμβριο (2015) και ειδικά κατά την περίοδο ψύξης του 2016. Το σύστημα θα πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να δίνει προτεραιότητα στη ΣΗΘ.

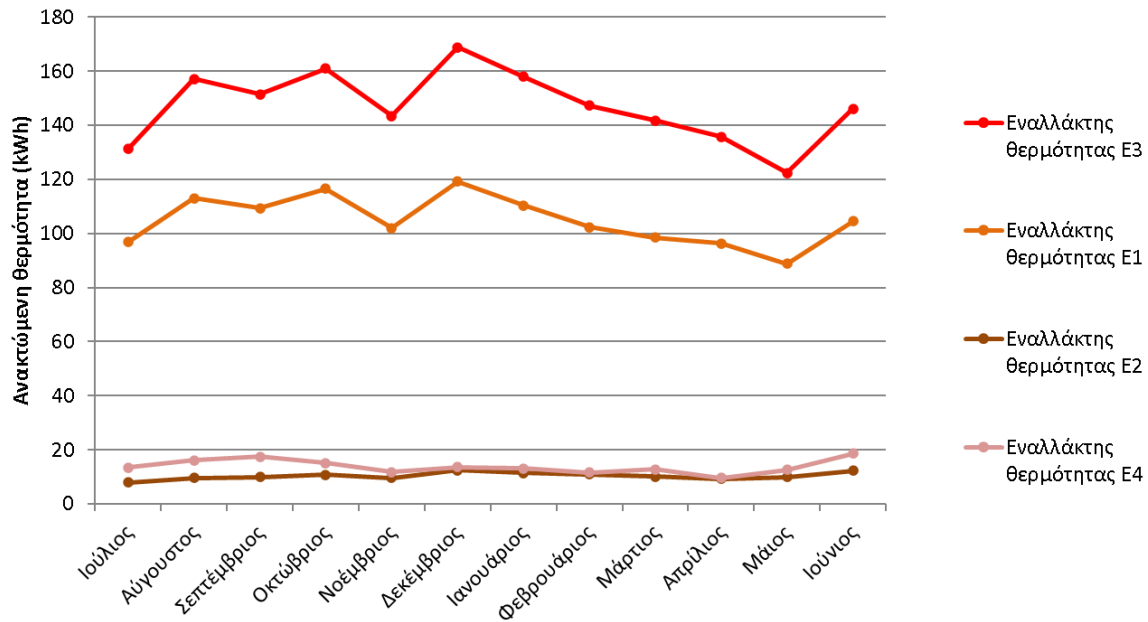
Οι μέσες μηνιαίες τιμές όλων των οικονομικών παραμέτρων παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.7. Τον Ιούνιο (2016), οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζονται από την απόφαση του νοσοκομείου να αλλάξει εταιρεία παροχής. Παράλληλα, παρουσιάζεται και η εγγυημένη τιμή - Feed-in Tariff (FIT) που εφαρμόζει η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας για τη στήριξη της ΣΗΘ ώστε να αναλυθεί οικονομικά και αυτό το σενάριο, παρόλο που η ενέργεια δεν πωλείται στο δίκτυο. Η FiT, σύμφωνα με την ελληνική νομοθεσία, υπολογίζεται μηνιαίως ως συνάρτηση της μέσης τιμής του φυσικού αερίου προκειμένου να εξαλειφεται ο κίνδυνος αστάθειας των τιμών του φυσικού αερίου.



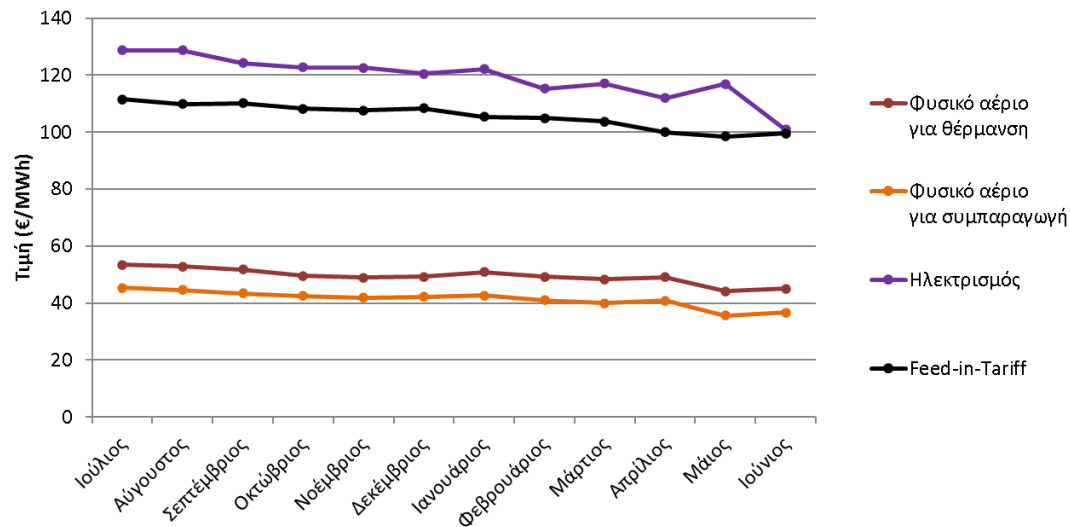
Σχήμα 6.4. Μηνιαίος συνολικός χρόνος λειτουργίας της ΣΗΘ.



Σχήμα 6.5. Ωριαίες τιμές των ελεγχόμενων παραμέτρων για ένα τυπικό 24ωρο της περιόδου θέρμανσης και ένα αντίστοιχο της περιόδου ψύξης.



Σχήμα 6.6. Μηνιαίες τιμές της ανακτώμενης θερμότητας σε κάθε εναλλάκτη θερμότητας.



Σχήμα 6.7. Μέσες μηνιαίες τιμές των οικονομικών παραμέτρων.

6.3.2 Παραγωγή ενέργειας συστήματος ΣΗΘ

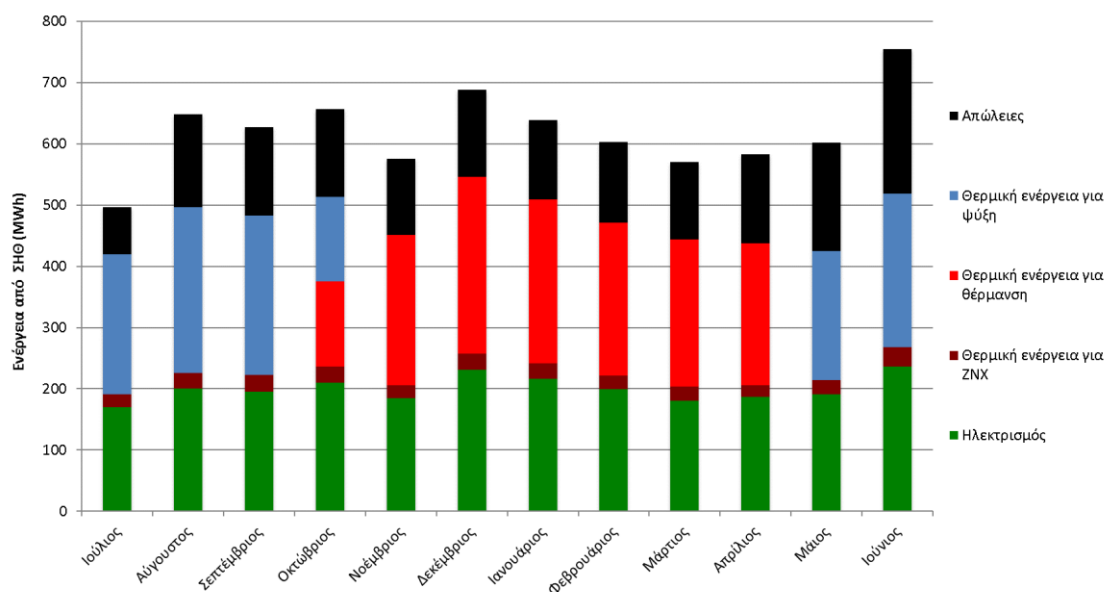
Το Σχήμα 6.8 παρουσιάζει τη μηνιαία κατανάλωση αερίου της ΣΗΘ και το μηνιαίο ενεργειακό ισοζύγιο. Η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για θέρμανση ή ψύξη χώρου, καθώς και για θέρμανση νερού. Πιο συγκεκριμένα, η ανακτώμενη θερμότητα από τα κυκλώματα 2 και 3 χρησιμοποιείται για θέρμανση νερού για ΖΝΧ, ενώ η ανακτώμενη θερμότητα από το κύκλωμα 1 χρησιμοποιείται για θέρμανση χώρου κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης (15 Οκτωβρίου – 30 Απριλίου) και για ψύξη χώρου κατά την περίοδο

ψύξης (1 Μαΐου - 15 Οκτωβρίου), όπου η θερμική ενέργεια από το κύκλωμα 1 μεταφέρεται στον ψύκτη απορρόφησης μέσω της τρίοδης βαλβίδας. Η ωφέλιμη παραγωγή θερμότητας είναι υψηλότερη κατά τους χειμερινούς μήνες, ενώ η μηνιαία παραγωγή ενέργειας για ZNX είναι αρκετά σταθερή. Και στις δύο περιπτώσεις η παραγωγή θερμότητας ακολουθεί το φορτίο. Οι ενεργειακές απώλειες υπολογίζονται ως η εναπομένουσα ενέργεια από την ενέργεια καυσίμου.

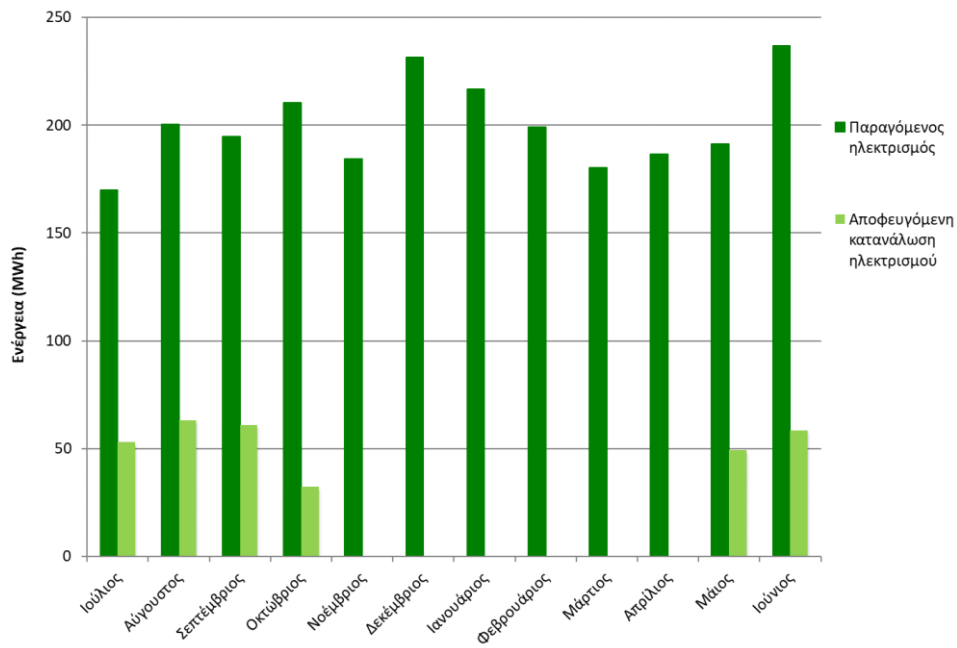
Το Σχήμα 6.9 παρουσιάζει τη μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΣΗΘ και τη μηνιαία αποφυγή κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, που αντιστοιχεί στην ενέργεια που θα χρησιμοποιούνταν για την ψύξη του χώρου από το συμβατικό ηλεκτρικό σύστημα ψύξης.

Το Σχήμα 6.10 παρουσιάζει την ανακτώμενη θερμότητα από ΣΗΘ και το Σχήμα 6.11 παρουσιάζει τη μηνιαία αποφευγόμενη κατανάλωση φυσικού αερίου. Η ανακτηθείσα θερμική ενέργεια είναι η συνολική ανακτώμενη θερμότητα Q , ενώ η αποφευγόμενη κατανάλωση φυσικού αερίου αντιστοιχεί στην ποσότητα υποκατεστημένης θερμικής ενέργειας από το συμβατικό σύστημα θέρμανσης. Όπως ήταν αναμενόμενο, η θερμική ενέργεια που αποφεύγεται είναι μεγαλύτερη κατά τη διάρκεια του χειμώνα, όταν οι ανάγκες σε θέρμανση και η παραγωγή ενέργειας από ΣΗΘ είναι υψηλότερες.

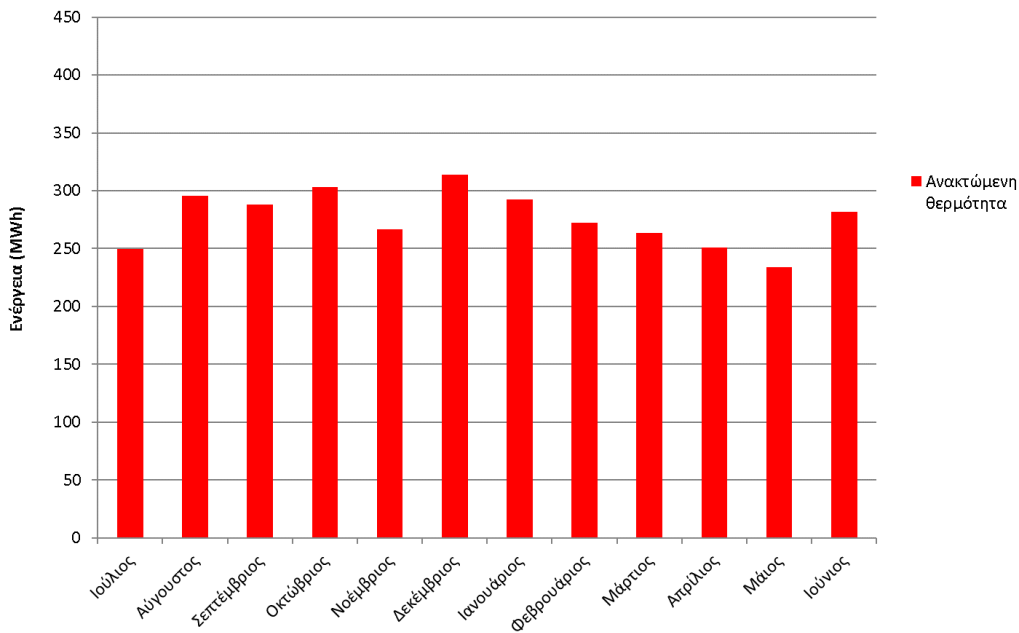
Σύμφωνα με το ποσοστό κάλυψης ενεργειακών αναγκών από ΣΗΘ, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.12, η συμπαραγωγή θερμότητας καλύπτει περίπου το 50% των ενεργειακών αναγκών του νοσοκομείου. Ωστόσο, κατά την περίοδο ψύξης, η κάλυψη φορτίου είναι χαμηλή, 25% κατά μέσον όρο.



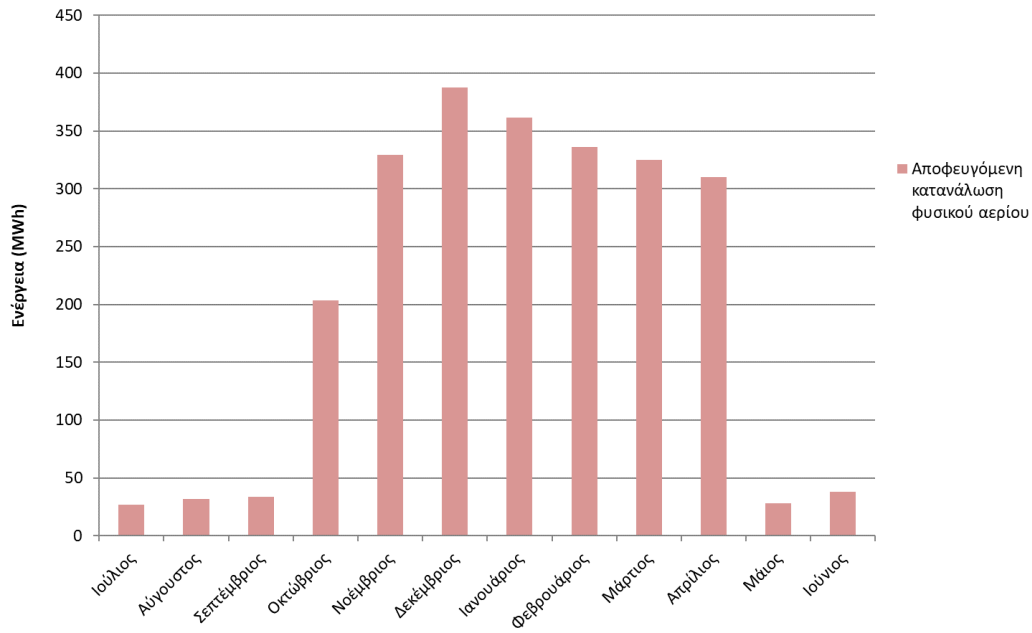
Σχήμα 6.8. Μηνιαίο ενεργειακό ισοζύγιο της ΣΗΘ.



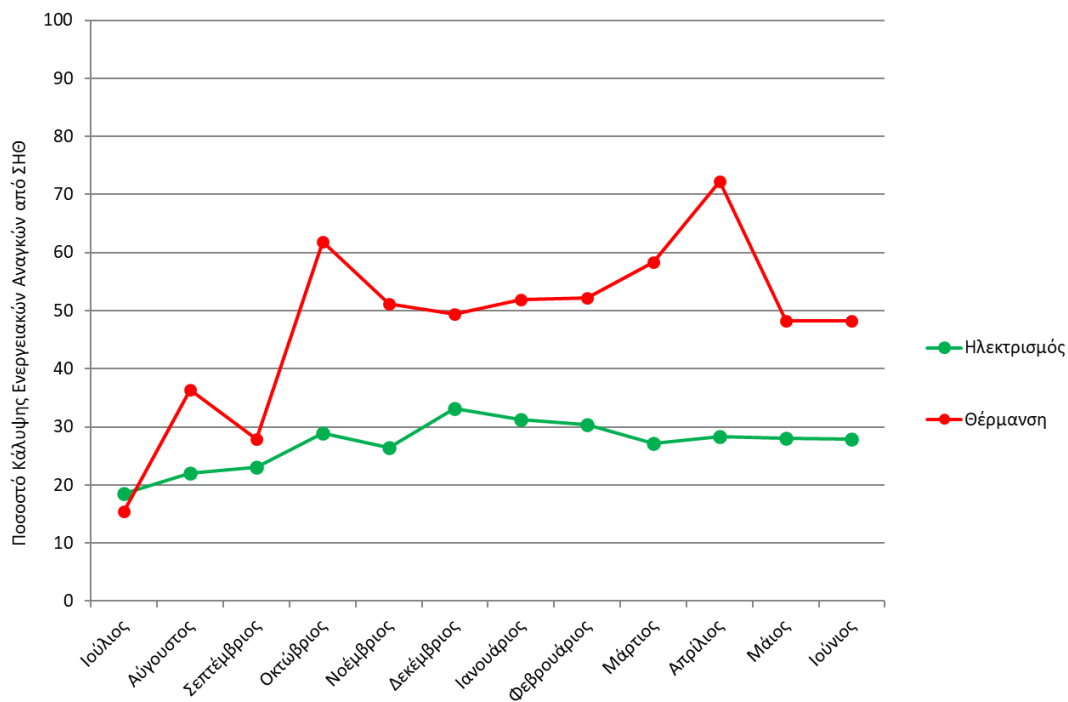
Σχήμα 6.9. Μηνιαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τη ΣΗΘ και μηνιαία αποφευγόμενη κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 6.10. Μηνιαία ανακτώμενη θερμότητα από το σύστημα ΣΗΘ.



Σχήμα 6.11. Μηνιαία αποφευγόμενη κατανάλωση φυσικού αερίου.



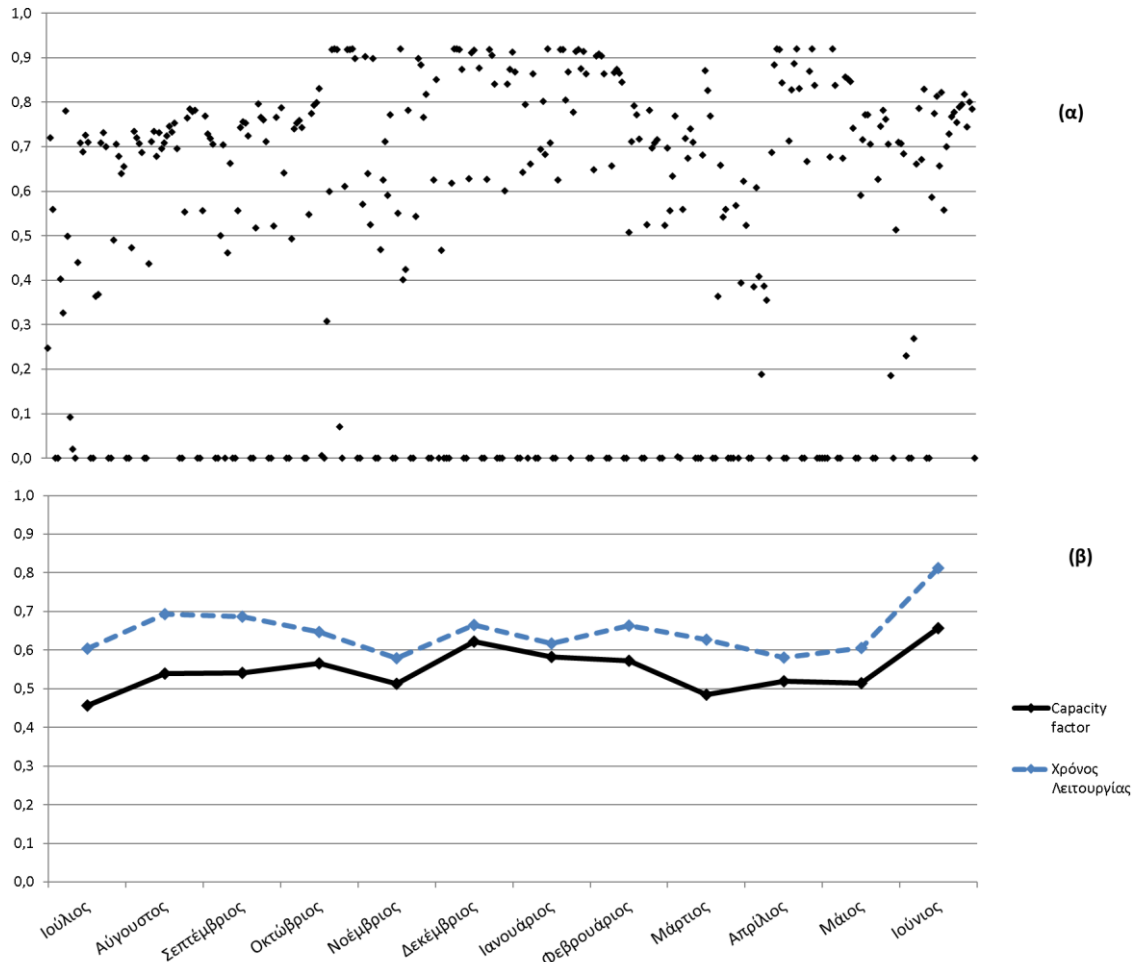
Σχήμα 6.12. Μηνιαίο ποσοστό κάλυψης ενεργειακών αναγκών από το σύστημα ΣΗΘ.

6.3.3 Τεχνική απόδοση συστήματος

Η αξιολόγηση της τεχνικής απόδοσης διεξάγεται χρησιμοποιώντας δύο βασικούς δείκτες απόδοσης (KPIs): (α) τον συντελεστή χρησιμοποίησης (CF) και (β) την ενεργειακή απόδοση (ηλεκτρική n_e και θερμική n_{th}).

6.3.3.1 Συντελεστής χρησιμοποίησης

Ο συντελεστής χρησιμοποίησης (CF) είναι ένας δείκτης της αποδοτικής αξιοποίησης της μονάδας και του υπολειπόμενου δυναμικού λειτουργίας. Στο Σχήμα 6.13, παρουσιάζονται οι ημερήσιες και μηνιαίες τιμές του συντελεστή χρησιμοποίησης συναρτήσει του χρόνου. Συμπεραίνεται ότι το μέγεθος της μονάδας είναι σωστό, καθώς συχνά επιτυγχάνονται ημερήσιες τιμές πάνω από 0,8, ειδικά κατά τη διάρκεια της περιόδου θέρμανσης. Ωστόσο, η μονάδα επιτυγχάνει μόνο 55% CF κατά μέσον όρο στο συνολικό εξεταζόμενο διάστημα, υποδεικνύοντας ότι το σύστημα δεν αξιοποιείται στο μέγιστο των δυνατοτήτων του. Οι τιμές αναφέρονται στον συνολικό χρόνο της εξεταζόμενης περιόδου, όχι μόνο στον χρόνο λειτουργίας. Από την ανάλυση της καθημερινής λειτουργίας έχει παρατηρηθεί ότι αν και η ισχύς λειτουργίας είναι γενικά υψηλή, δεν φτάνει ποτέ στην ονομαστική της τιμή. Επιπλέον, με βάση το πρόγραμμα λειτουργίας, η μονάδα χρησιμοποιείται μόνο στο 65% του συνολικού χρόνου, όπως φαίνεται στο διάγραμμα (β), όπου και γίνεται εμφανές ότι ο συντελεστής χρησιμοποίησης σχετίζεται άμεσα με τον συνολικό χρόνο λειτουργίας. Με βάση την κάλυψη θερμικού φορτίου από τη ΣΗΘ, όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.11, η μονάδα θα μπορούσε να χρησιμοποιείται περισσότερο.



Σχήμα 6.13. Τιμές του συντελεστή χρησιμοποίησης συναρτήσει του χρόνου. Στο διάγραμμα (α) παρουσιάζονται οι ημερήσιες τιμές του CF και στο διάγραμμα (β) οι μηνιαίες τιμές μαζί με τον χρόνο λειτουργίας ως ποσοστό του συνολικού χρόνου της εξεταζόμενης περιόδου.

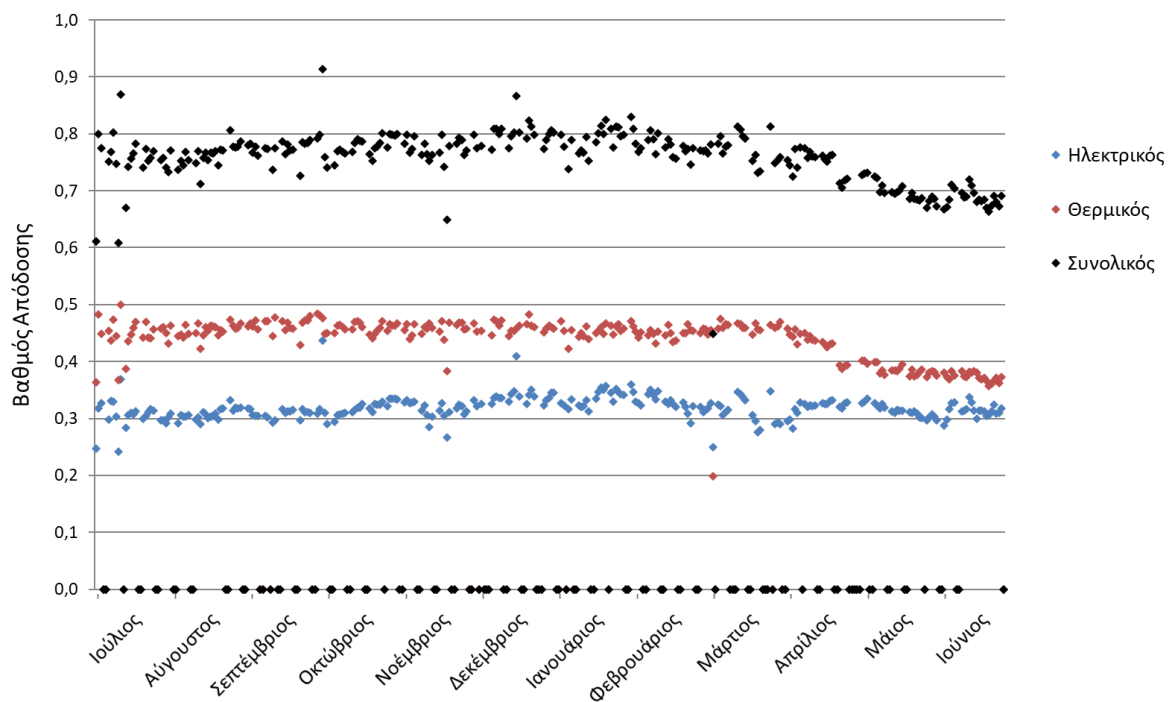
6.3.3.2 Βαθμός απόδοσης

6.3.3.2.1 Βαθμός απόδοσης με βάση τα πραγματικά στοιχεία λειτουργίας

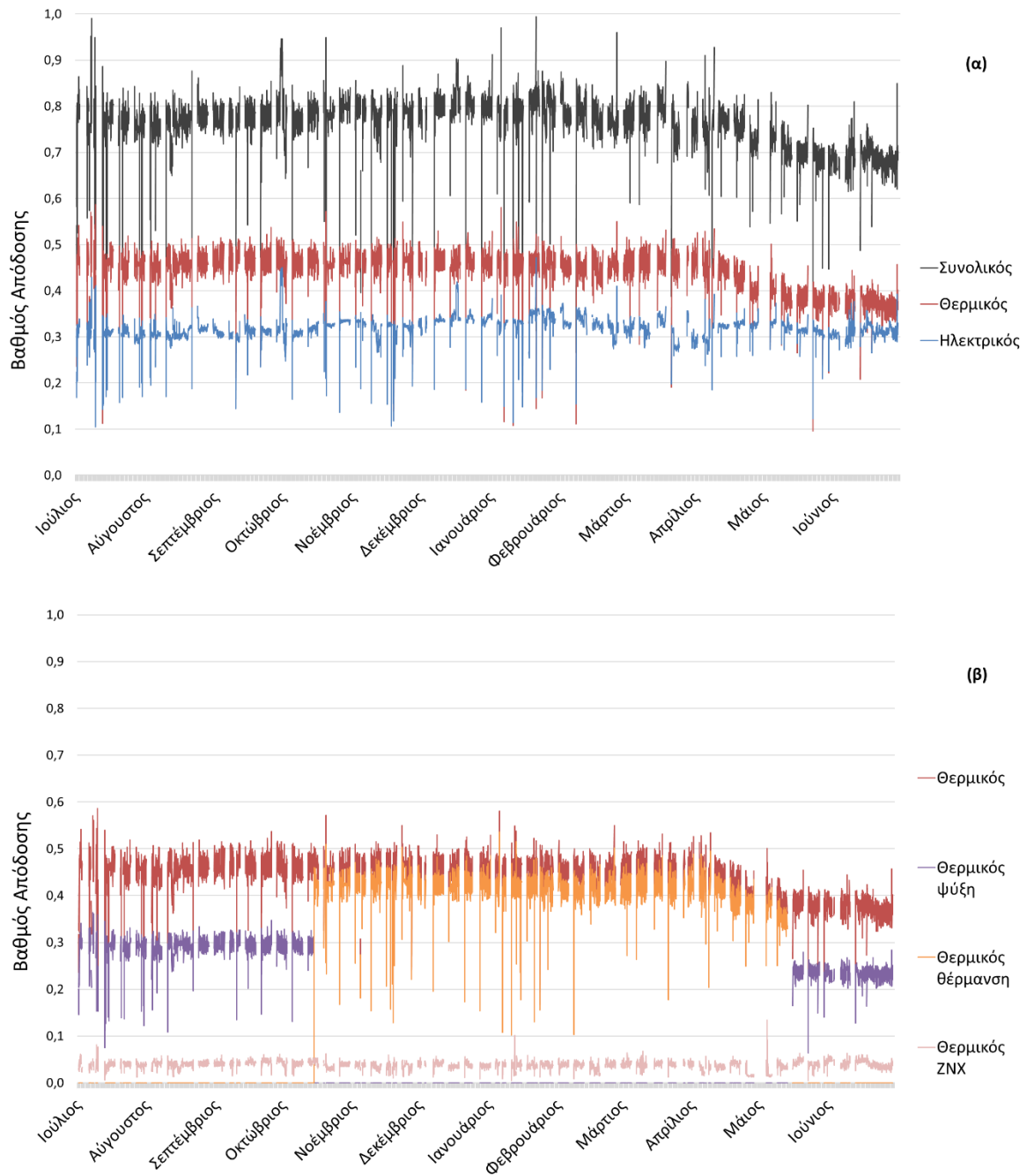
Τα Σχήματα 6.14 και 6.15 παρουσιάζουν την τεχνική απόδοση όπως προκύπτει από τα πραγματικά στοιχεία λειτουργίας. Στο Σχήμα 6.14, παρουσιάζονται οι ημερήσιες τιμές ηλεκτρικής, θερμικής και συνολικής απόδοσης συναρτήσει του χρόνου. Η ηλεκτρική απόδοση n_e είναι συνεχώς πάνω από 30% και κυμαίνεται εντός των τιμών σχεδιασμού, από 30 έως 35%, ενώ η θερμική απόδοση n_{th} είναι σταθερότερη, περίπου 46%, έως τον Μάιο του 2016 οπότε και παρουσιάζει μείωση, η οποία σχετίζεται έντονα με τη μείωση του ρυθμού ροής στο κύκλωμα 1, περιορίζοντας το περιθώριο ανάκτησης θερμότητας στους εναλλάκτες και συνεπώς τη θερμική απόδοση. Η συνολική απόδοση είναι συνήθως πάνω από 70%, χαρακτηρίζοντας τη λειτουργία του συστήματος πλήρως συμπαραγωγική, οπότε

και σε περίπτωση πώλησης του πλεονάσματος της ηλεκτρικής ενέργειας θα μπορούσε να αποζημιωθεί ως ενέργεια συμπαραγωγής με βάση το σύστημα εγγυημένων τιμών [N 2773/99]. Τον Μάιο του 2016 παρουσιάζεται μείωση, ακολουθώντας την καμπύλη θερμικής απόδοσης και πέφτοντας ελαφρώς κάτω από το 70%.

Στο Σχήμα 6.15, παρουσιάζονται στο διάγραμμα (α) οι ωριαίες τιμές απόδοσης – ηλεκτρικής n_e , θερμικής n_{th} , και συνολικής n_{chp} . Οι τιμές παρουσιάζουν μεγάλη διακύμανση, ειδικά κατά την αρχή και το τέλος των διαστημάτων λειτουργίας. Η θερμική απόδοση αναλύεται περαιτέρω στο διάγραμμα (β) όσον αφορά τη θερμική απόδοση που χρησιμοποιείται για σκοπούς θέρμανσης χώρου, ψύξης χώρου και θέρμανσης νερού, ανάλογα με το πώς χρησιμοποιείται η ανακτημένη θερμότητα. Είναι προφανές ότι η απόδοση μειώνεται στη λειτουργία ψύξης λόγω του COP του ψύκτη απορρόφησης, ο οποίος είναι 0,7. Η θερμική απόδοση για χρήση θέρμανσης νερού (ZNX) είναι σταθερή όλο το χρόνο και οι τιμές παρουσιάζουν λιγότερες διακυμάνσεις.



Σχήμα 6.14. Ημερήσιες τιμές βαθμών απόδοσης όπως προκύπτουν από τα πραγματικά στοιχεία λειτουργίας.



Σχήμα 6.15. Ωριαίες τιμές βαθμών απόδοσης όπως προκύπτουν από τα πραγματικά στοιχεία λειτουργίας.

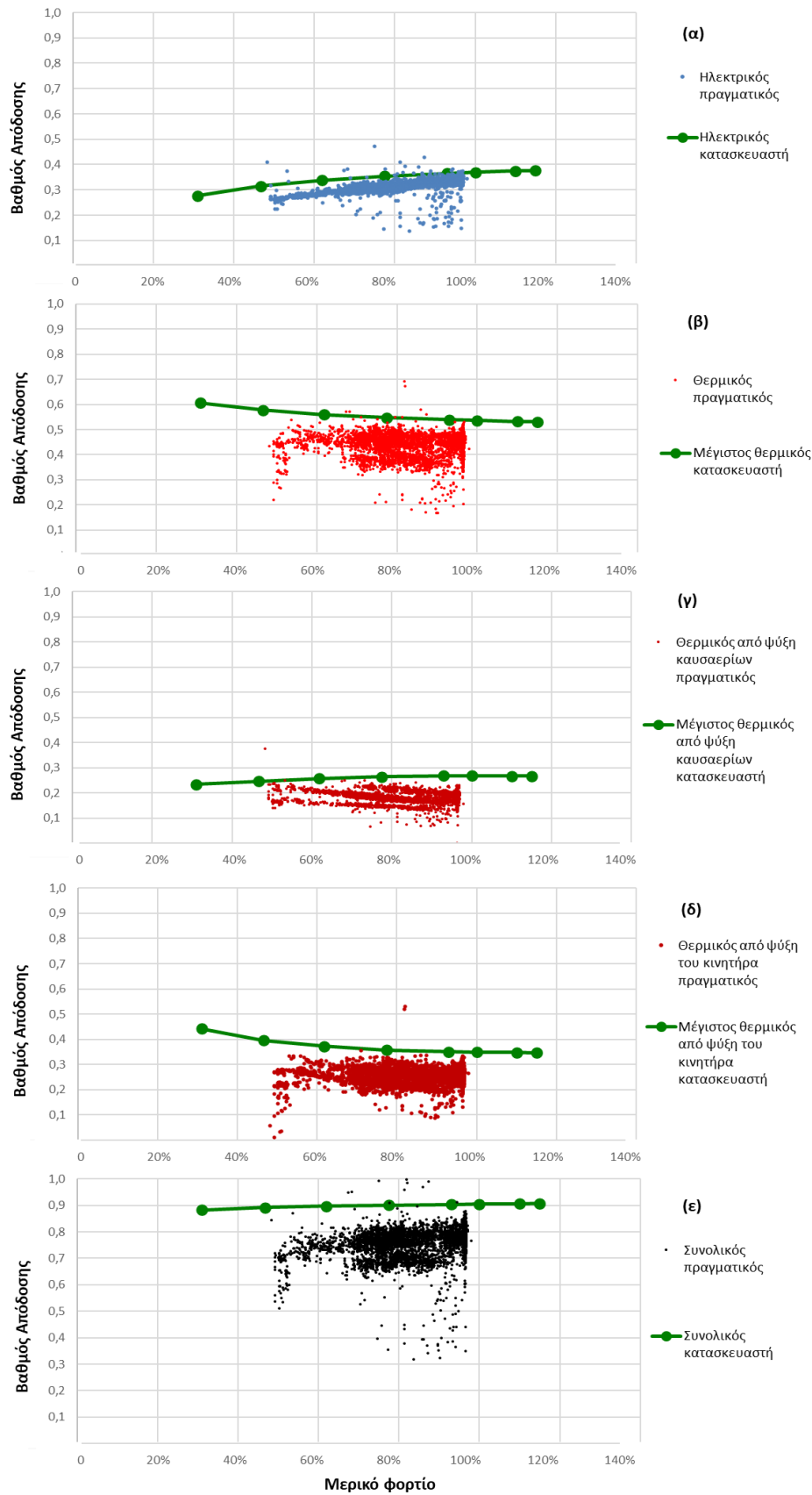
6.3.3.2 Απόδοση σε μερικό φορτίο. Σύγκριση με κατασκευαστικά δεδομένα

Οι ωριαίες τιμές απόδοσης συναρτήσκει του φορτίου παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.16 και συγκρίνονται με την καμπύλη λειτουργίας που προκύπτει από τα δεδομένα του κατασκευαστή, όπως παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 6.1. Η ηλεκτρική απόδοση φαίνεται στο διάγραμμα (α), η θερμική απόδοση στο διάγραμμα (β) και αναλύεται περαιτέρω όσον αφορά στη θερμική απόδοση από τα καυσαέρια στο διάγραμμα (γ) και τη θερμική απόδοση από την ψύξη του κινητήρα στο διάγραμμα (δ), ενώ η συνολική απόδοση φαίνεται στο διάγραμμα (ε).

Οι τιμές ηλεκτρικής απόδοσης είναι πολύ κοντά στην καμπύλη σχεδιασμού, ειδικά για φορτία κοντά στην ονομαστική ισχύ. Επιβεβαιώνεται ότι σε χαμηλότερη ισχύ λειτουργίας, η απόδοση είναι επίσης χαμηλότερη.

Οι τιμές θερμικής απόδοσης είναι χαμηλότερες από τις μέγιστες τιμές που παρουσιάζονται στα δεδομένα του κατασκευαστή, επιβεβαιώνοντας ότι σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, το σύστημα ανακτά λιγότερη θερμική ενέργεια και έχει μεγαλύτερες ενεργειακές απώλειες. Η καμπύλη είναι, επίσης, διαφορετική παρουσιάζοντας μια ανάλογη σχέση μεταξύ απόδοσης και ισχύος, αντί για αντιστρόφως ανάλογη. Η θερμική απόδοση από τα καυσαέρια είναι πιο κοντά στα δεδομένα του κατασκευαστή. Τα καυσαέρια απορρίπτονται σε μέση θερμοκρασία 118°C από τον εναλλάκτη θερμότητας E3 προς τον E2, και στους 59°C από τον εναλλάκτη θερμότητας E2 στο περιβάλλον, σε θερμοκρασία δηλαδή η οποία είναι υψηλότερη από τη θερμοκρασία που προκύπτει από τα δεδομένα του κατασκευαστή. Η θερμική απόδοση από την ψύξη του κινητήρα μειώνεται σημαντικά σε χαμηλότερα φορτία. Είναι προφανές ότι θα μπορούσε να ανακτηθεί περισσότερη θερμική ενέργεια από την ψύξη του κινητήρα.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης αγγίζει το 70%. Με βάση τα χαρακτηριστικά σχεδιασμού, σε μερικά φορτία η ηλεκτρική απόδοση μειώνεται, ενώ η θερμική απόδοση αυξάνεται, διατηρώντας έτσι τη συνολική απόδοση σταθερή. Ωστόσο, εδώ, η απόδοση μειώνεται σημαντικά σε χαμηλότερη ισχύ λειτουργίας, λόγω μείωσης και της θερμικής απόδοσης.



Σχήμα 6.16. Ηλεκτρικός, θερμικός και συνολικός βαθμός απόδοσης συναρτήσει της ισχύος σε μερικό φορτίο. Σύγκριση με τις αντίστοιχες τιμές του κατασκευαστή.

6.3.3.2.3 Μοντέλο λειτουργίας σε μερικό φορτίο

Το Σχήμα 6.17 παρουσιάζει την ωριαία κατανάλωση της μονάδας και την ανάκτηση θερμικής ενέργειας συναρτήσει της ισχύος λειτουργίας. Και οι δύο παράμετροι παρουσιάζονται μαζί σε ένα γράφημα και συγκρίνονται με τα δεδομένα του κατασκευαστή. Στο διάγραμμα περιλαμβάνεται και η προσαρμοσμένη γραμμική εξίσωση. Για λειτουργία σε συγκεκριμένο επίπεδο ισχύος, η κατανάλωση είναι υψηλότερη και η θερμική ανάκτηση χαμηλότερη σε σύγκριση με τα δεδομένα του κατασκευαστή, με τις τιμές ωστόσο να παραμένουν κοντά. Καθώς ο βαθμός απόδοσης της ΣΗΘ εξαρτάται από την καταναλισκόμενη και την παραγόμενη ενέργεια, εξετάζεται πρώτα η σχέση μεταξύ αυτών και της ισχύος λειτουργίας. Οι εξισώσεις της κατανάλωσης φυσικού αερίου G και της ανακτώμενης θερμικής ενέργειας Q της ΣΗΘ συναρτήσει της ισχύος, για ωριαία λειτουργία, είναι:

$$G = 2.03P + 456 \quad (6.19)$$

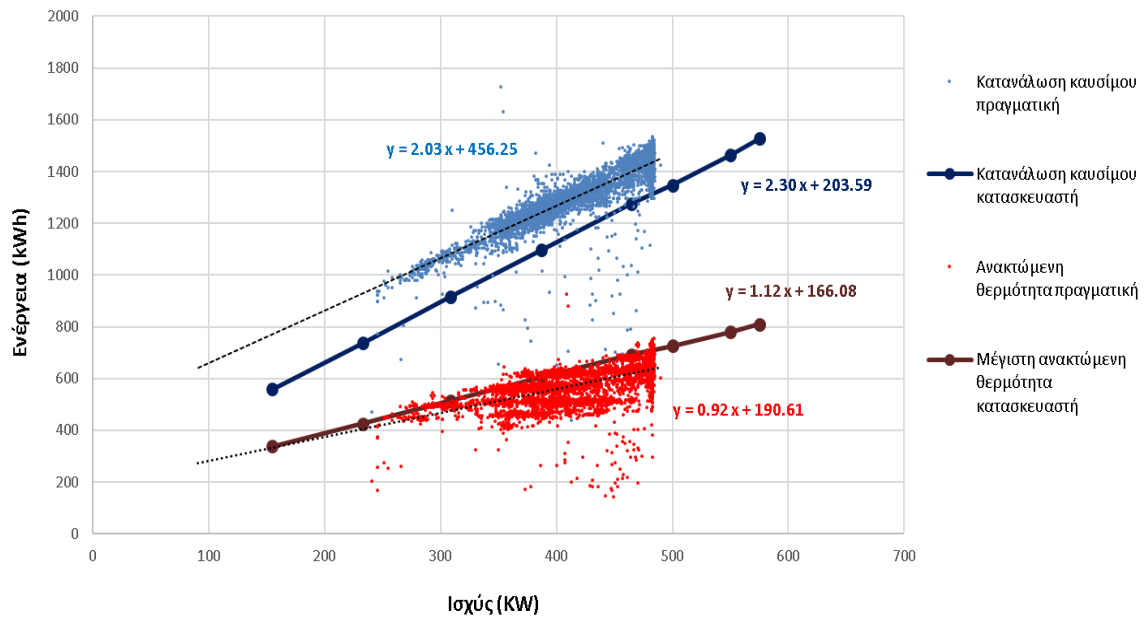
$$Q = 0.92P + 191 \quad (6.20)$$

Οι παραγόμενες εξισώσεις που περιγράφουν το μοντέλο λειτουργίας και υπολογίζουν τους βαθμούς απόδοσης βάσει της ισχύος λειτουργίας είναι:

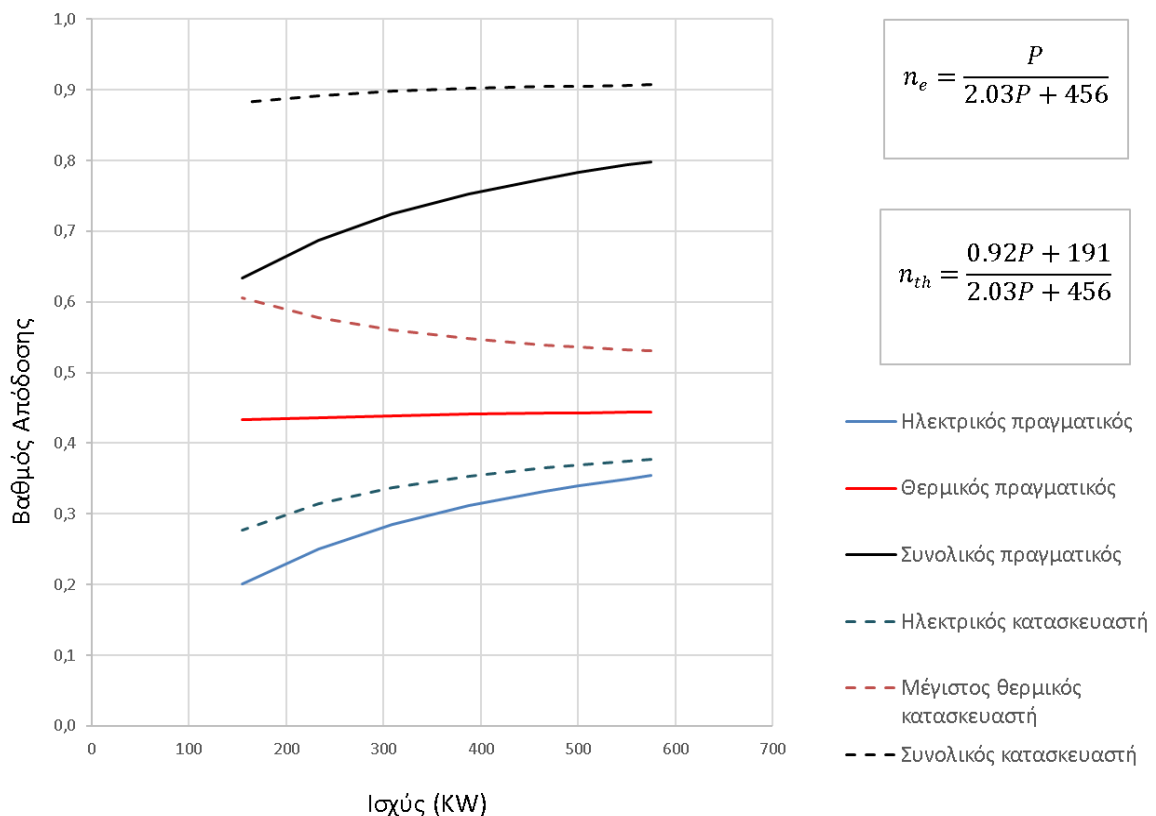
$$n_e = \frac{E}{G} = \frac{P}{2.03P + 456} \quad (6.21)$$

$$n_{th} = \frac{Q}{G} = \frac{0.92P + 191}{2.03P + 456} \quad (6.22)$$

Οι καμπύλες που προκύπτουν παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.18 και συγκρίνονται με τα δεδομένα του κατασκευαστή. Η διαφορά στην επιτευχθείσα απόδοση αυξάνεται όσο μειώνεται η ισχύς λειτουργίας, τόσο για την ηλεκτρική όσο και για τη θερμική απόδοση, όπως επισημαίνεται επίσης και στο Σχήμα 6.16. Για λειτουργία σε ισχύ άνω των 260 KWe, η συνολική απόδοση είναι υψηλότερη από 70%, άρα το σύστημα θεωρείται πλήρως ΣΗΘ.



Σχήμα 6.17. Ωριαία κατανάλωση της μονάδας ΣΗΘ και ανάκτηση θερμικής ενέργειας συναρτήσει της ισχύος λειτουργίας. Σύγκριση με τα δεδομένα του κατασκευαστή και υπολογισμός προσαρμοσμένης γραμμικής εξίσωσης.



Σχήμα 6.18. Καμπύλες ηλεκτρικού, θερμικού και συνολικού βαθμού απόδοσης συναρτήσει του φορτίου. Σύγκριση με τις αντίστοιχες κατασκευαστικές καμπύλες.

6.3.3.2.4 Παράγοντες λειτουργίας που επηρεάζουν την απόδοση συστήματος

Οι βασικοί παράγοντες λειτουργίας του συστήματος που μπορεί να επηρεάζουν την απόδοση εξετάστηκαν προκειμένου να εντοπιστούν πρακτικές που ενδέχεται να επηρεάζουν την ενεργειακή συμπεριφορά και τη συνολική απόδοση. Η ισχύς λειτουργίας και η μείωση ισχύος επηρεάζουν την ηλεκτρική απόδοση, ενώ η μείωση ισχύος και η απόρριψη θερμότητας επηρεάζουν τη θερμική απόδοση.

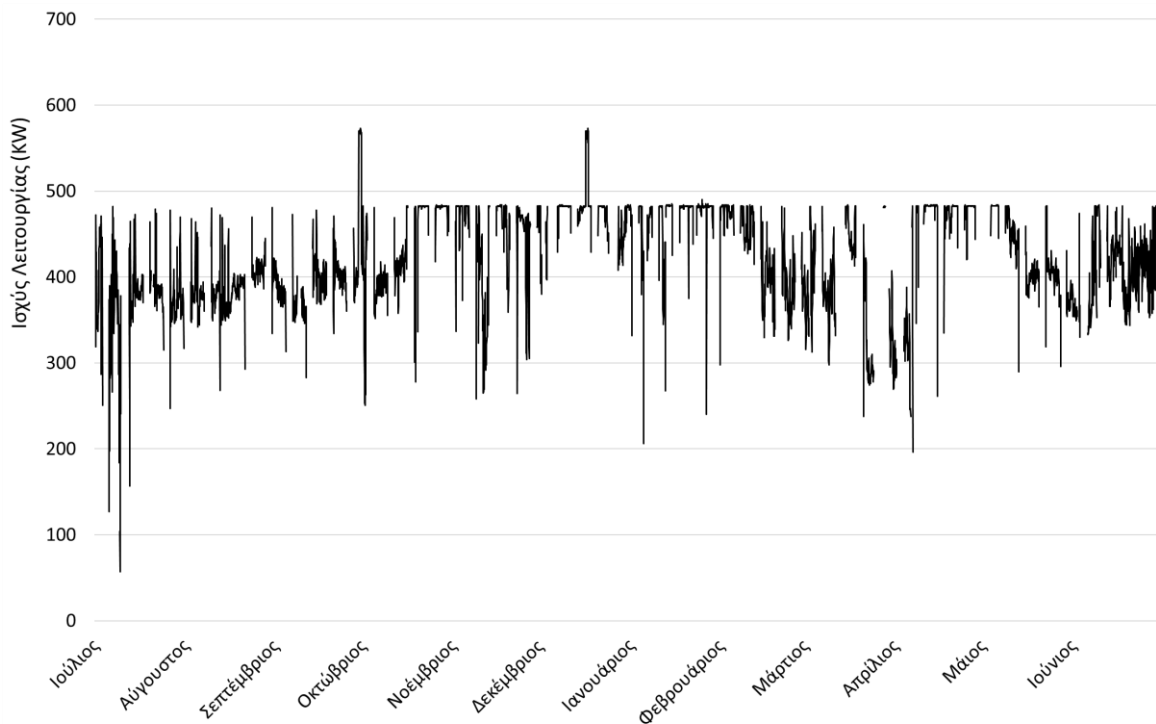
Το Σχήμα 6.19 δείχνει τις μέσες ωριαίες τιμές της ισχύος λειτουργίας για την εξεταζόμενη περίοδο. Οι περισσότερες τιμές συγκεντρώνονται στη ζώνη των 300 έως 500 KW. Χαμηλότερες τιμές παρατηρούνται κυρίως κατά τον χρόνο εκκίνησης. Επιβεβαιώνεται επίσης ότι η ισχύς δεν φτάνει την ονομαστική τιμή.

Η ισχύς λειτουργίας του κινητήρα μειώνεται όταν οι θερμοκρασίες σε συγκεκριμένα σημεία μέτρησης είναι υψηλότερες από τις κανονικές τιμές, προκειμένου να αποφευχθεί η υπερθέρμανση. Το κύριο σημείο ελέγχου είναι η θερμοκρασία νερού ψύξης των χιτωνίων, με σημείο ρύθμισης στους 90°C. Οι μέσες ωριαίες τιμές αυτής της θερμοκρασίας παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.20. Μπορεί να παρατηρηθεί αμέσως ότι το όριο των 90°C ξεπερνιέται συχνά. Μέσω της παρακολούθησης και ανάλυσης των δεδομένων καθημερινής λειτουργίας, παρατηρήθηκε ότι κατά την ταυτόχρονη λειτουργία CHP και λέβητα αυτή η θερμοκρασία κυμαινόταν σε υψηλότερα επίπεδα, ενώ ο ρυθμός ροής νερού του κυκλώματος ανάκτησης θερμότητας FM1 μειώνονταν, μειώνοντας περαιτέρω το περιθώριο ανταλλαγής θερμότητας στον εναλλάκτη και προκαλώντας συνεπώς μείωση της ισχύος.

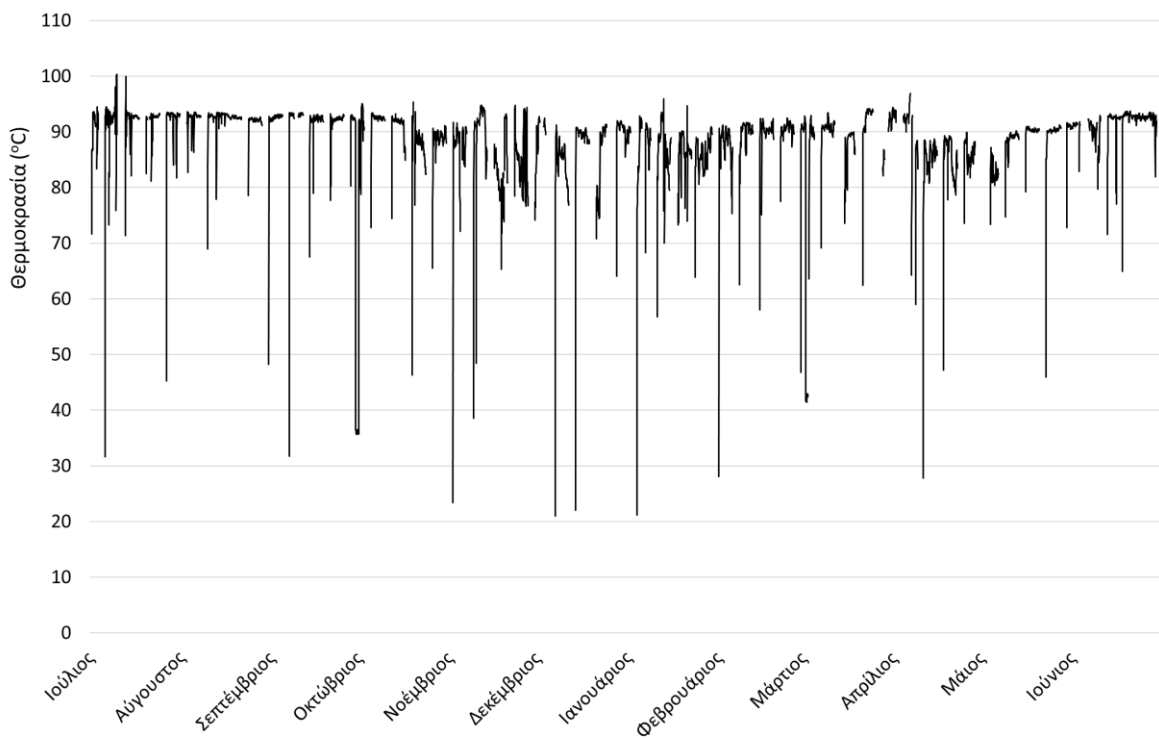
Η απόρριψη θερμότητας επιτρέπεται μέσω της απόρριψης καυσαερίων και συγκεκριμένα μέσω της βαλβίδας TM-W, η οποία, εάν ενεργοποιηθεί, διοχετεύει όλο τον όγκο των καυσαερίων στην εκκένωση της καπνοδόχου, παρακάμπτοντας τους εναλλάκτες θερμότητας καυσαερίων. Η βαλβίδα ελέγχεται από τις θερμοκρασίες T_8 και T_{14} με σημεία ρύθμισης στους 90°C και 85°C, αντίστοιχα. Το Σχήμα 6.21 δείχνει τις μέσες ωριαίες τιμές του T_8 . Οι τιμές σπάνια ξεπερνούν τους 90°C, ωστόσο τιμές χαμηλότερες από 75°C υποδηλώνουν ανεπάρκεια της ΣΗΘ, καθώς απαιτεί τη λειτουργία του συμβατικού συστήματος θέρμανσης. Η υψηλότερη καταγεγραμμένη τιμή για το T_{14} ήταν 68°C, επομένως δεν εξετάστηκε περαιτέρω.

Η θερμοκρασία των καυσαερίων που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα, η οποία αποτελεί ένδειξη της ποσότητας θερμότητας που πραγματικά ανακτάται από τα καυσαέρια, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.22. Οι θερμοκρασίες κυμαίνονται από 50-65°C και παραμένουν πάντα χαμηλότερες των 70°C, αποδεικνύοντας ότι ανακτάται ένα μεγάλο ποσοστό της

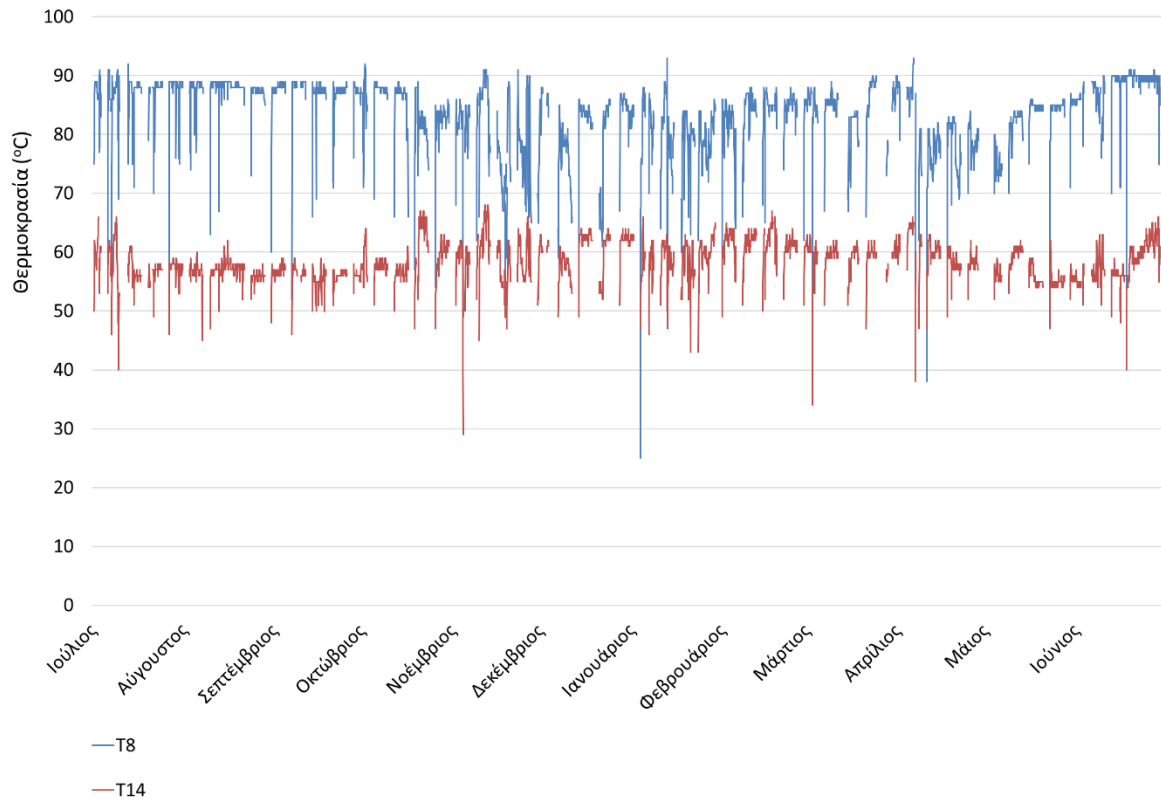
θερμότητάς τους, όχι όμως το μέγιστο δυνατό, καθώς στα πειράματα του κατασκευαστή η θερμοκρασία απόρριψης των καυσαερίων είναι στους 25°C.



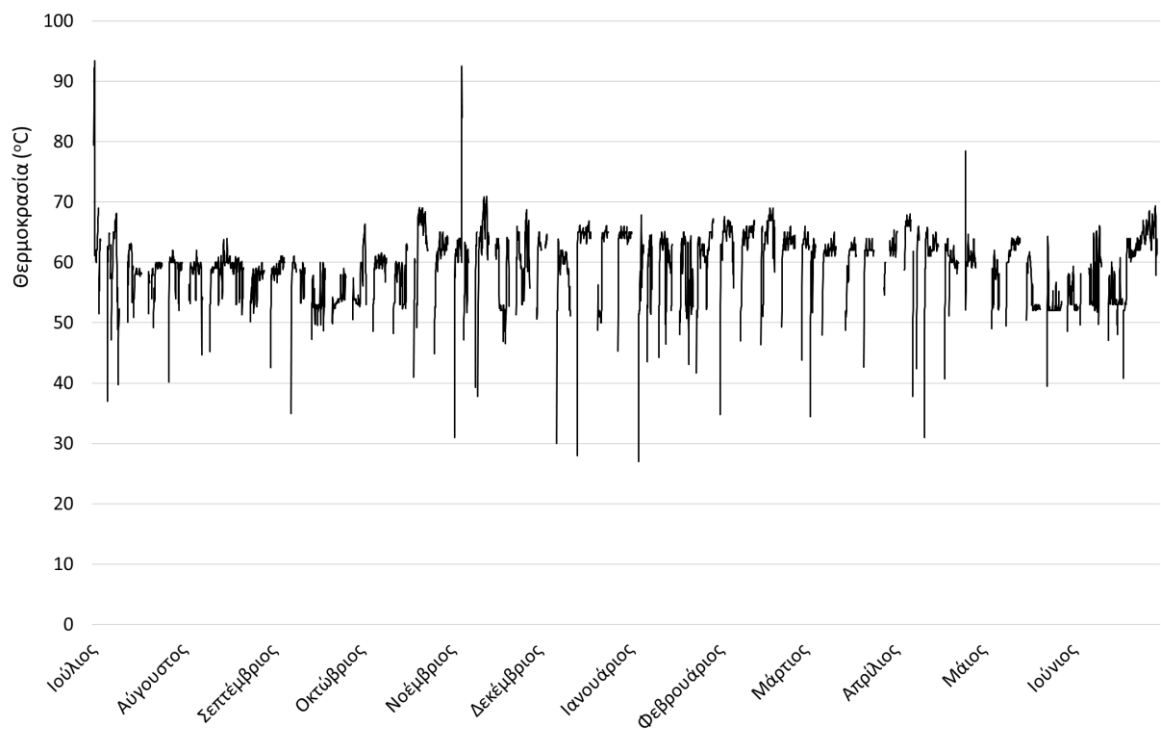
Σχήμα 6.19. Μέσες ωριαίες τιμές ισχύος λειτουργίας, σε KW.



Σχήμα 6.20. Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας νερού ψύξης χιτωνίων.



Σχήμα 6.21. Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας νερού στην έξοδο του εναλλάκτη E1 (T_8) και στην έξοδο του εναλλάκτη E2 (T_{14}).

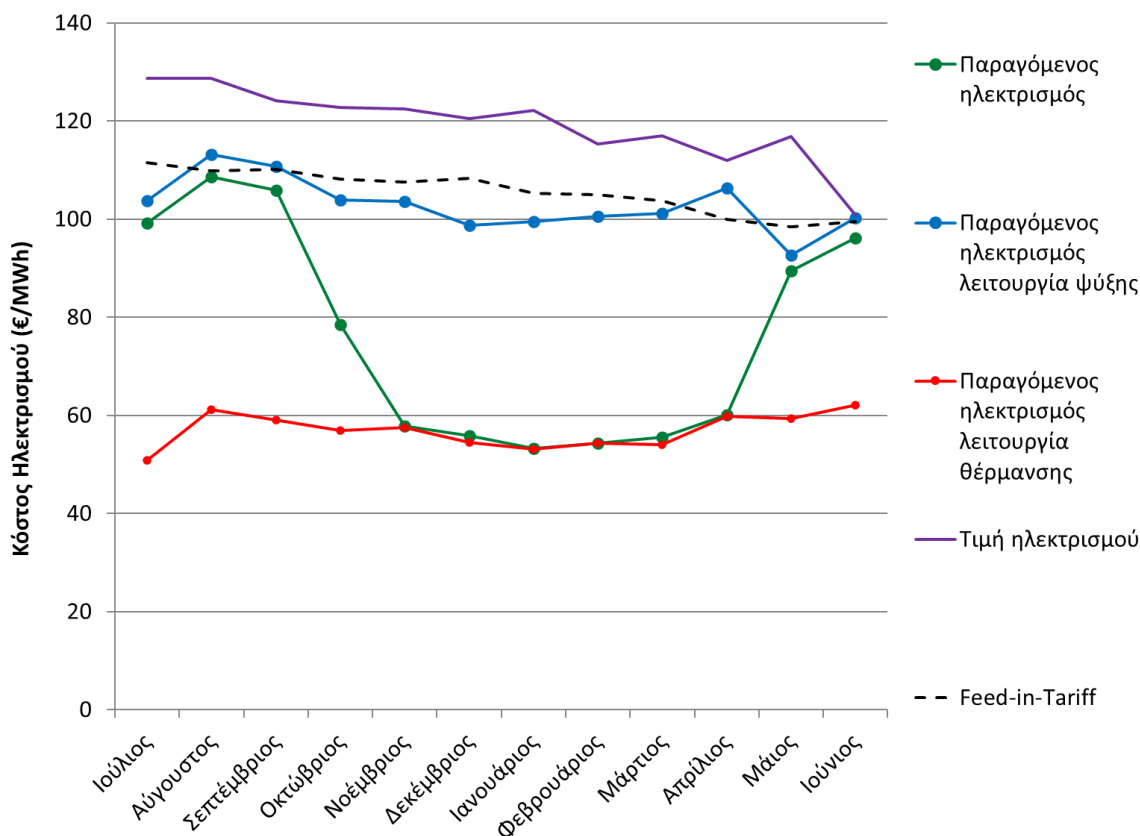


Σχήμα 6.22. Μέσες ωριαίες τιμές θερμοκρασίας των καυσαερίων που απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα (T_5).

6.3.4 Οικονομική απόδοση συστήματος

Οι οικονομικές αποδόσεις αξιολογούνται χρησιμοποιώντας το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας ως βασικό δείκτη απόδοσης.

Το μηνιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη ΣΗΘ, $C_{e,chp}$, παρουσιάζεται στο Σχήμα 6.23, μαζί με το συμβατικό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο και την εγγυημένη τιμή πώλησης ηλεκτρισμού (Feed-in-Tariff). Παρουσιάζονται, επίσης, και αναλύονται ξεχωριστά, το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας όταν η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για θέρμανση $C_{e,h}$ και το κόστος όταν χρησιμοποιείται για ψύξη $C_{e,c}$. Το επιτευχθέν κόστος παρουσιάζει υψηλές διακυμάνσεις, ανάλογα με τη χρήση της λειτουργίας ψύξης, με μέση τιμή 75 €/MWh. Η βέλτιστη λειτουργία είναι από τον Νοέμβριο έως τον Απρίλιο, κατά τη λειτουργία θέρμανσης. Η χρήση της λειτουργίας ψύξης μειώνει τη συνολική απόδοση και έτσι, όπως ήταν αναμενόμενο, το κόστος είναι χαμηλότερο κατά τους χειμερινούς μήνες και υψηλότερο τους καλοκαιρινούς. Σε σύγκριση με το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζεται από το δίκτυο, το κόστος ηλεκτρικής ενέργειας από την CHP είναι πάντα χαμηλότερο. Επιπλέον, τόσο οι τιμές $C_{e,h}$ όσο και $C_{e,c}$ είναι χαμηλότερες από την C_e , επομένως, η χρήση του CCHP παραμένει κερδοφόρα και στις δύο περιπτώσεις λειτουργίας. Εάν η ηλεκτρική ενέργεια δεν χρησιμοποιούνταν επί τόπου, θα πωλούνταν στο δίκτυο στην τιμή του FiT, όπως ορίζεται στην ελληνική νομοθεσία. Η χρήση της ΣΗΘ εξακολουθεί να είναι συμφέρουσα και σε αυτήν την περίπτωση. Ωστόσο, το περιθώριο κέρδους περιορίζεται σταδιακά καθώς το FiT μειώνεται.



Σχήμα 6.23. Μηνιαίο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από τη ΣΗΘ, κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας όταν η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για θέρμανση και κόστος όταν χρησιμοποιείται για ψύξη. Σύγκριση με το συμβατικό κόστος ηλεκτρισμού από το δίκτυο και με την εγγυημένη τιμή πώλησης (FiT).

6.4 Συμπεράσματα

Η ανάλυση και η αξιολόγηση της ενεργειακής και οικονομικής απόδοσης ενός εγκατεστημένου συστήματος CCHP που λειτουργεί σε ένα νοσοκομείο επαλήθευσαν τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος και ανέδειξαν την επιτυχία του συστήματος στην κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του νοσοκομείου επιτυγχάνοντας εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους.

Συνολικά, το σύστημα ΣΗΘ επιτυγχάνει ικανοποιητικό βαθμό απόδοσης όσον αφορά στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, δείχνοντας αποτελέσματα που είναι κοντά σε αυτά που παρουσιάζει ο κατασκευαστής. Αυτό το αποτέλεσμα μπορεί να θεωρηθεί ασφαλές και ακριβές, καθώς προκύπτει με βάση τα δεδομένα των παρόχων ενέργειας, τις επί τόπου μετρήσεις, τις μετρήσεις του συστήματος SCADA και απλές εξισώσεις ενεργειακού ισοζυγίου. Η ηλεκτρική απόδοση n_e είναι συνεχώς πάνω από 30% και εντός των τιμών σχεδιασμού.

Η θερμική ενέργεια ανακτάται μέσω της ενέργειας των καυσαερίων και μέσω της ψύξης του κινητήρα. Η μονάδα συμπαραγωγής επιτυγχάνει σημαντική ανάκτηση θερμότητας, ωστόσο υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας δεν επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή ανάκτηση θερμότητας, όπως αυτή παρουσιάζεται στα δεδομένα του κατασκευαστή. Η θερμική απόδοση n_{th} κυμαίνεται στο 45%. Η συνολική απόδοση είναι συνήθως πάνω από το όριο του 70% που χαρακτηρίζει το σύστημα ως πλήρως ΣΗΘ.

Η απόδοση σχετίζεται άμεσα με την ισχύ λειτουργίας και σε χαμηλότερη ισχύ, η απόδοση είναι, επίσης, χαμηλότερη. Οι καμπύλες απόδοσης σε πραγματικές συνθήκες λειτουργίας παρουσιάζουν πιο έντονες διακυμάνσεις, καθώς η απόδοση επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες που αφορούν στη λειτουργία του κτιρίου και του συστήματος ΣΗΘ. Η απόδοση επαληθεύεται σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας. Ωστόσο, σε συνθήκες μερικής λειτουργίας αποδεδειγμένα επηρεάζεται και η απόδοση, η οποία μειώνεται αισθητά, αναδεικνύοντας την ανάγκη για συνεχή λειτουργία όσο το δυνατόν περισσότερο.

Η ψύξη είναι ένας τρόπος αξιοποίησης του θερμικού φορτίου όταν δεν υπάρχουν θερμικές ανάγκες, παρατείνοντας έτσι την περίοδο λειτουργίας της μονάδας. Ωστόσο, η συνολική απόδοση του συστήματος σε λειτουργία τριπαραγωγής είναι χαμηλότερη από αυτή της συμπαραγωγής λόγω του COP του ψυκτικού απορρόφησης, ο οποίος είναι 0,7.

Το μέγεθος της μονάδας είναι ζωτικής σημασίας για να διασφαλιστεί ότι η μονάδα χρησιμοποιείται στο μέγιστο των δυνατοτήτων της. Επιπλέον, το πρόγραμμα λειτουργίας θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μεγιστοποιείται ο συντελεστής χρησιμοποίησης (CF).

Η κερδοφορία επαληθεύεται σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν. Η λειτουργία του CCHP είναι οικονομικά αποδοτική τόσο στη λειτουργία θέρμανσης όσο και ψύξης, καθώς το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας από συμπαραγωγή είναι χαμηλότερο από το κόστος της συμβατικής ηλεκτρικής ενέργειας. Η πιο κερδοφόρα λειτουργία, ωστόσο, είναι η λειτουργία θέρμανσης. Στην περίπτωση πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο, η χρήση της ΣΗΘ εξακολουθεί να είναι συμφέρουσα, εφόσον η τιμή FiT είναι υψηλότερη από το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει η ΣΗΘ. Το περιθώριο κέρδους είναι ο παράγοντας που πρέπει να καθορίζει εάν η ηλεκτρική ενέργεια θα χρησιμοποιείται ή θα πωλείται.

Ως εκ τούτου, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η εφαρμογή ενός συστήματος CCHP σε νοσοκομείο, όταν σχεδιαστεί σωστά, είναι μια επιτυχημένη εφαρμογή εξοικονόμησης ενέργειας, με επαληθευμένα κριτήρια απόδοσης μακροπρόθεσμα.

ΣΥΜΒΟΛΑ

P_{nom}	Ονομαστική ηλεκτρική ισχύς συμπαραγωγής (KW)
P	Λειτουργική ηλεκτρική ισχύς συμπαραγωγής (KW)
t	Διάστημα λειτουργίας (h)
t'	Συνολικό χρονικό διάστημα της εξεταζόμενης περιόδου (h)
F	Ρυθμός ροής νερού (t/h)
T	Θερμοκρασία (°C)
C_p	Ειδική θερμοχωρητικότητα του νερού (kWh/ t)
Q_{gas}	Συνολική θερμική ενέργεια καυσαερίων (KW)
C_{pg}	Ειδική θερμοχωρητικότητα καυσαερίων (kJ/kg)
T_g	Θερμοκρασία καυσαερίων μετά την τουρμπίνα (°C)
T_r	Τελική θερμοκρασία απόρριψης καυσαερίων (°C)
G	Κατανάλωση φυσικού αερίου συμπαραγωγής (MWh)
E	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από συμπαραγωγή (MWh)
Q	Ωφέλιμη θερμική ενέργεια από συμπαραγωγή (MWh)
G_a	Αποφευγόμενο φυσικό αέριο από λέβητα (MWh)
E_a	Αποφευγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από ηλεκτρικό ψύκτη (MWh)
n_e	Ηλεκτρική απόδοση συμπαραγωγής (-)
n_{th}	Θερμική απόδοση συμπαραγωγής (-)
$n_{th, g}$	Θερμική απόδοση συμπαραγωγής από ψύξη καυσαερίων (-)
$n_{th, w}$	Θερμική απόδοση συμπαραγωγής από ψύξη της μηχανής (-)
n_{chp}	Συνολική απόδοση συμπαραγωγής (-)
n_{eD}	Ηλεκτρική απόδοση συμπαραγωγής, τιμή σχεδιασμού (-)
n_{thD}	Θερμική απόδοση συμπαραγωγής, τιμή σχεδιασμού (-)
n_b	Θερμική απόδοση συμβατικού συστήματος θέρμανσης (λέβητα) (-)
COP_α	Συντελεστής συμπεριφοράς ψύκτη απορρόφησης θερμότητας (-)
COP_e	Συντελεστής συμπεριφοράς συμβατικού συστήματος ψύξης (-)
f	Ποσοστό ανακτώμενης θερμότητας από συμπαραγωγή για ψύξη (-)
C_g	Λιανική τιμή φυσικού αερίου για θέρμανση (€/MWh)
C_{gc}	Λιανική τιμή φυσικού αερίου για συμπαραγωγή (€/MWh)
C_e	Λιανική τιμή ηλεκτρισμού (€/MWh)
C_m	Κόστος συντήρησης συμπαραγωγής (€/MWh)

$C_{e, chp}$	Κόστος παραγόμενου ηλεκτρισμού από συμπαραγωγή (€/MWh)
$C_{e, h}$	Κόστος παραγόμενου ηλεκτρισμού από συμπαραγωγή, όταν η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για θέρμανση (€/MWh)
$C_{e, c}$	Κόστος παραγόμενου ηλεκτρισμού από συμπαραγωγή, όταν η ανακτώμενη θερμότητα χρησιμοποιείται για ψύξη (€/MWh)

7.

Συμπεράσματα

Βασικό στόχο της παρούσας διατριβής αποτέλεσε η τεχνικοοικονομική αξιολόγηση συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας τα οποία βρίσκονται σε λειτουργία. Η αξιολόγηση βασίστηκε σε πραγματικά δεδομένα λειτουργίας, τα οποία δεν είναι συχνά διαθέσιμα, όπως επιβεβαιώθηκε και από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση. Τα κτίρια του τριτογενή τομέα επιλέχθηκαν ως πεδίο εφαρμογής της ανάλυσης.

Στο πλαίσιο αυτό, διαμορφώθηκε μια συστηματική μέθοδος για την αξιολόγηση της οικονομικής απόδοσης υφιστάμενων συστημάτων παραγωγής θερμότητας και ισχύος (CHP) ή συνδυασμένης παραγωγής ψύξης θερμότητας και ισχύος (CCHP), η οποία και εφαρμόστηκε σε 8 συστήματα συμπαραγωγής τα οποία λειτουργούν στην Αθήνα και παράλληλα αξιολογήθηκε τεχνικά και οικονομικά η απόδοση συγκεκριμένου συστήματος τριπαραγωγής ηλεκτρισμού, θερμότητας και ψύξης (CCHP).

Για την αξιολόγηση της οικονομικής απόδοσης υφιστάμενων συστημάτων συμπαραγωγής ή τριπαραγωγής προτάθηκε μία μέθοδος απλή και αποτελεσματική, η οποία μπορεί να βασιστεί μόνο σε δεδομένα καταγραφής κατανάλωσης αερίου. Η αξιολόγηση έγινε με βάση δύο συγκεκριμένους δείκτες απόδοσης, τον συντελεστή χρησιμοποίησης και την ανάκτηση κεφαλαίου. Η μέθοδος κατόπιν εφαρμόστηκε για να αξιολογηθούν 8 έργα συμπαραγωγής ή τριπαραγωγής τα οποία λειτουργούν στην Αθήνα. Η ανάλυση αφορούσε

το σύνολο περιόδου λειτουργίας. Από την αξιολόγηση προέκυψαν ενδιαφέροντα συμπεράσματα.

- Η διαχρονική εξέλιξη των εξεταζόμενων παραμέτρων παρουσίασε μεγάλες διακυμάνσεις, υποδεικνύοντας αστάθεια στη λειτουργία του εκάστοτε συστήματος, προσαρμοζόμενη στις ανάγκες του κτιρίου αλλά και στις συνθήκες της αγοράς. Οπότε και η πιθανότητα παραπλανητικών συμπερασμάτων στις περιπτώσεις αναλύσεων που βασίζονται σε βραχυπρόθεσμα δεδομένα μπορεί να είναι μεγάλη.
- Ο συντελεστής χρησιμοποίησης ήταν χαμηλός σε όλα τα έργα, επηρεάζοντας άμεσα την απόδοση, καθώς το σύστημα συμπαραγωγής πρέπει να δουλεύει όσο το δυνατόν περισσότερο και κοντά στο ονομαστικό φορτίο για να πετυχαίνει την απόδοση σχεδιασμού. Αυτό μπορεί να οφείλεται σε αστοχία στην αρχική εκτίμηση του απαιτούμενου φορτίου ή σε λανθασμένες επιλογές κατά το στάδιο του σχεδιασμού. Η βασικότερη αιτία στα συγκεκριμένα έργα αποδείχθηκε πως ήταν η υπερδιαστασιολόγηση του εξοπλισμού. Συγκεκριμένα, έξι στα οκτώ έργα θεωρήθηκαν υπερδιαστασιολογημένα.
- Ο χαμηλός συντελεστής χρησιμοποίησης σε συνδυασμό με τις αλλαγές στις τιμές της ενέργειας περιόρισαν τις δυνατότητες κερδοφορίας, οδηγώντας σε χαμηλές τιμές ανάκτησης κεφαλαίου. Έτσι, η πραγματική περίοδος αποπληρωμής στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν πολύ μεγαλύτερη από την προβλεπόμενη των τεσσάρων ετών.
- Τα συστήματα συμπαραγωγής προέκυψαν πιο κερδοφόρα επιτυγχάνοντας μεγαλύτερα ποσοστά ανάκτησης κεφαλαίου έναντι των συστημάτων τριπαραγωγής.
- Μόνο τρία από τα οκτώ έργα θα μπορούσαν να θεωρηθούν επιτυχημένα και ένα αποτυχημένο.
- Τα πιο επιτυχημένα έργα ήταν σε νοσοκομείο και σε ξενοδοχείο.
- Η εξέλιξη των τιμών του φυσικού αερίου και της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα έδειξε ότι το περιθώριο κερδοφορίας έχει συρρικνωθεί μετά το 2013, ενώ η αυτοκατανάλωση μπορεί να προσφέρει ευκαιρίες μετά το 2015.
- Σκοπός της ανάλυσης ήταν και να εντοπίσει τους λόγους που εμποδίζουν τη διεύθυνση της συμπαραγωγής στην Ελλάδα, αναλύοντας την τρέχουσα κατάσταση που φανερώνεται από τις εν λειτουργία μονάδες. Ο κυριότερος λόγος που εντοπίστηκε να μπορεί να αποθαρρύνει τελικά μια τέτοια επένδυση είναι η καθυστέρηση στην ανάκτηση κεφαλαίου.

Ακολούθησε η ανάλυση και η αξιολόγηση της ενεργειακής και οικονομικής απόδοσης ενός εγκατεστημένου συστήματος CCHP που λειτουργεί σε ένα νοσοκομείο. Και σε αυτήν την περίπτωση χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά δεδομένα λειτουργίας, ενώ η αξιολόγηση βασίστηκε σε κλασικούς δείκτες απόδοσης, τον συντελεστή χρησιμοποίησης και τις ενεργειακές αποδόσεις για την τεχνική αξιολόγηση και το κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από το σύστημα συμπαραγωγής για την οικονομική. Τα δεδομένα λειτουργίας συγκρίθηκαν με τα τεχνικά δεδομένα του κατασκευαστή και χρησιμοποιήθηκαν περαιτέρω για τον προσδιορισμό της ενεργειακής συμπεριφοράς υπό λειτουργία μερικού φορτίου. Από την ανάλυση επαληθευτήκαν τα πρότυπα απόδοσης και αξιολογήθηκε η λειτουργική βιωσιμότητα του συστήματος με τις τρέχουσες συνθήκες της αγοράς. Τα βασικότερα συμπεράσματα συνοψίζονται ως εξής:

- Η απόδοση του συστήματος υπολογισμένη με τα δεδομένα πραγματικής λειτουργίας ήταν ικανοποιητική, ωστόσο χαμηλότερη από την απόδοση σχεδιασμού με βάση τα δεδομένα του κατασκευαστή. Συγκεκριμένα, η ηλεκτρική απόδοση ήταν πολύ ικανοποιητική, παραμένοντας εντός των τιμών σχεδιασμού, ενώ η θερμική απόδοση βρέθηκε χαμηλότερη. Υπό πραγματικές συνθήκες λειτουργίας, το σύστημα δεν μπόρεσε να πετύχει τη μέγιστη δυνατή ανάκτηση όπως αυτή παρουσιάζεται στα δεδομένα του κατασκευαστή. Το σύστημα μπορεί να χαρακτηριστεί ως πλήρως ΣΗΘ, επιτυγχάνοντας ως επί το πλείστον συνολική απόδοση πάνω από το όριο του 70%.
- Η απόδοση επαληθεύτηκε σε ένα ευρύ φάσμα συνθηκών λειτουργίας.
- Το σύστημα θα πρέπει να προγραμματίζεται ώστε να έχει συνεχή και κατά το δυνατόν σταθερή λειτουργία, προκειμένου να επιτυγχάνει τη μέγιστη δυνατή απόδοση, καθώς και να δουλεύει στην ονομαστική ισχύ, αφού σε χαμηλότερη ισχύ αποδεδειγμένα μειώνεται η απόδοση. Η απόδοση επηρεάζεται και από αρκετούς ακόμα παράγοντες σχετιζόμενους με την καθημερινή λειτουργία του συστήματος και του κτιρίου, παρουσιάζοντας αρκετές διακυμάνσεις.
- Η τριπαραγωγή βρέθηκε και σε αυτήν την περίπτωση λιγότερο αποδοτική σε σχέση με την απλή συμπαραγωγή. Η επιλογή της ψύξης ωστόσο είναι σημαντική καθώς παρέχει τη δυνατότητα λειτουργίας του συστήματος και τους καλοκαιρινούς μήνες, όταν δεν υπάρχουν τα θερμικά φορτία.
- Η λειτουργία σε θέρμανση με ιδιοκατανάλωση του παραγόμενου ηλεκτρισμού ήταν το πιο κερδοφόρο σενάριο λειτουργίας. Το σύστημα βέβαια ήταν κερδοφόρο τόσο στη λειτουργία θέρμανσης όσο και ψύξης, επιτυγχάνοντας χαμηλότερο κόστος παραγωγής

ηλεκτρικής ενέργειας σε σχέση με τον συμβατικό τρόπο. Κερδοφόρο ήταν και στην περίπτωση πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο.

- Το περιθώριο κέρδους είναι ο παράγοντας που πρέπει να καθορίζει εάν η ηλεκτρική ενέργεια θα χρησιμοποιείται ή θα πωλείται.
- Η εφαρμογή ενός συστήματος CCHP σε νοσοκομείο, εφόσον έχει σχεδιαστεί σωστά, αποδείχθηκε ότι είναι μια επιτυχημένη εφαρμογή εξοικονόμησης ενέργειας, με επαληθευμένα κριτήρια απόδοσης μακροπρόθεσμα.

Βασική συνεισφορά της παρούσας διατριβής είναι η παρουσίαση και η ανάλυση πραγματικών και μακροχρόνιων δεδομένων λειτουργίας συστημάτων συμπαραγωγής. Από την βιβλιογραφική ανασκόπηση παρατηρήθηκε ότι υπάρχει μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον γενικά για τη συμπαραγωγή και για την αξιολόγηση συστημάτων, όχι όμως με πραγματικά δεδομένα λειτουργίας. Τα πραγματικά δεδομένα είναι πολύ σημαντικά, καθώς μπορούν να αναδείξουν τις αστοχίες στον σχεδιασμό ή στον προγραμματισμό της λειτουργίας. Μεγάλη απόκλιση μεταξύ απόδοσης σχεδιασμού και πραγματικής απόδοσης μπορεί να παρατηρηθεί όταν αλλάζουν τα δεδομένα λειτουργίας.

Εν κατακλείδι, η συμπαραγωγή ενέργειας ως σύστημα παραγωγής ενέργειας αποτελεί μία συμφέρουσα επιλογή καθώς επιτυγχάνει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους. Τα κτίρια του τριτογενή τομέα και ιδιαίτερα τα νοσοκομεία παρουσιάζουν ιδανικές συνθήκες για την εφαρμογή του συστήματος. Το μέγεθος της μονάδας είναι ζωτικής σημασίας για να διασφαλιστεί ότι η μονάδα θα χρησιμοποιείται στο μέγιστο των δυνατοτήτων της. Επιπλέον, το πρόγραμμα λειτουργίας θα πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να μεγιστοποιείται ο συντελεστής χρησιμοποίησης (*CF*). Με αυτόν τον τρόπο θα εξασφαλιστεί ο υψηλός βαθμός απόδοσης που μπορεί να προσφέρει το σύστημα και θα μεγιστοποιηθεί η δυνατή ανάκτηση κεφαλαίου, που είναι και ένα από τα κύρια ζητούμενα σε μια τέτοια επένδυση.

Στην Ελλάδα, τα επίπεδα διείσδυσης της συμπαραγωγής παραμένουν πολύ χαμηλά. Σε νομοθετικό επίπεδο, έχει γίνει προσπάθεια να διατηρηθεί σταθερή η διαφορά των τιμών ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου που επηρεάζουν την απόδοση της συμπαραγωγής και έχει απλοποιηθεί αρκετά η αδειοδοτική διαδικασία, ωστόσο το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, η αστάθεια των τιμών και η έλλειψη κινήτρων έχει δημιουργήσει ένα δυσμενές επενδυτικό περιβάλλον. Επιπλέον, οι κλιματικές συνθήκες περιορίζουν τις ανάγκες για θέρμανση, ευνοώντας περισσότερο τις εφαρμογές τριπαραγωγής, οι οποίες όμως βρέθηκε από την παρούσα ανάλυση πως έχουν χαμηλότερο βαθμό απόδοσης από τη συμπαραγωγή, καθιστώντας τις συγκεκριμένες επενδύσεις λιγότερο ελκυστικές.

Παρά τον εύλογο προβληματισμό που μπορεί να δημιουργούν αυτά τα θέματα, η ευρεία χρήση της συμπαραγωγής θα μπορούσε να βοηθήσει στην αποκέντρωση της παραγωγής ενέργειας και στην ανεξαρτητοποίηση των καταναλωτών από τα κεντρικά δίκτυα, καθώς και στην επίτευξη των στόχων προστασίας του περιβάλλοντος. Παράλληλα, η αύξηση της διείσδυσης της τεχνολογίας θα οδηγήσει προοδευτικά στη μείωση του κόστους της επένδυσης.

Ονοματολογία

ΑΔΜΗΕ	Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΕΕ	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΛΑΓΗΕ	Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΜΕΚ	Μηχανή Εσωτερικής Καύσης
ΡΑΕ	Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας
ΣΗΘ	Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας
ΣΗΘΥΑ	Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας Υψηλής Απόδοσης
ΣΗΘΨ	Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού Θερμότητας και Ψύξης
ΣΡ	Συντελεστής Ρήτρας
ΥΠΕΚΑ	Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας
CapEx	Capital Expenditure
CO ₂	Διοξείδιο του Άνθρακα
COP	Συντελεστής Συμπεριφοράς
FiP	Feed-in Premium
FiT	Feed-in Tariff
ROI	Return on Investment
SPB	Simple Payback Period

Βιβλιογραφία

- [1] International Energy Agency, “Technology Roadmap: Energy-efficient Buildings - Heating and Cooling Equipment”, Paris, France, 2011.
- [2] Φραγκόπουλος Χ., Καρυδογιάννης Η., Καραλής Γ., “Συμπααραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας”. Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας, 1994.
- [3] D.W. Wu, R.Z. Wang, “Combined cooling, heating and power: A review”, *Progress in Energy and Combustion Science*, vol.32, pp. 459–495, 2006.
- [4] EDUCOGEN, “The European Educational Tool on Cogeneration”, Second Edition, December 2001.
- [5] Midwest CHP Application Center, “Combined heat & power (chp) resource guide for hospital applications”, 2007.
- [6] C. Gochenour, “Regulation of heat and electricity produced in combined-heat-and-power plants”, The World Bank; Infrastructure and Energy Department, 2003.
- [7] Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδας (ΤΕΕ), Γενική Γραμματεία Ενέργειας και Ορυκτών Πρώτων Υλών, Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας. Τεχνική Οδηγία Τ.Ο.Τ.Ε.Ε. 20701-5/2017. “Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας & Ψύξης: Εγκαταστάσεις σε Κτίρια,” Αθήνα, Σεπτέμβριος 2017.
- [8] Δ. Γαλανάκης, “Φυσικό Αέριο και Συμπααραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας: Η Ελληνική Πραγματικότητα”. Ελληνικός Σύνδεσμος Συμπααραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας, 2006.
- [9] A. Teke, O. Timur, “Assessing the energy efficiency improvement potentials of HVAC systems considering economic and environmental aspects at the hospitals”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 33, pp. 224–235, 2014.
- [10] M. A. Lozano; J. C. Ramos, M. Carvalho, L. M. Serra, “Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings”, *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 1063–1075, 2009.
- [11] www.energy-efficiency.go.uk. Combined heat and power in hospitals. Good practice guide 267

- [12] N. Thilak Raj, S. Iniyan, Ranko Goic, “A review of renewable energy-based cogeneration technologies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, pp. 3640–3648, 2011.
- [13] R. Possidente, C. Roselli, M. Sasso, S. Sibilio, “Experimental analysis of micro-cogeneration units based on reciprocating internal combustion engine”, *Energy and Buildings*, vol.38, pp. 1417–1422, 2006.
- [14] G.K. Alexis, P. Liakos, “A case study of a cogeneration system for a hospital in Greece. Economic and environmental impacts”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 54, pp. 488-496, 2013.
- [15] Ε. Μπαλάνου, “Εφαρμογή της συμπαραγωγής στο γενικό νοσοκομείο Αθηνών ΣΙΣΜΑΝΟΓΛΕΙΟ”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2007.
- [16] J. Wang, J. Wu, C. Zheng, “Analysis of tri-generation system in combined cooling and heating mode”, *Energy and Buildings*, vol.72, pp. 353–360, 2014.
- [17] DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources.
- [18] K.C Kavvadias, “Energy price spread as a driving force for combined generation investments: A view on Europe”, *Energy*, vol. 115, pp.1632-1639, 2016.
- [19] K.G Tataraki, K.C Kavvadias, Z.B Maroulis, “A systematic approach to evaluate the economic viability of Combined Cooling Heating and Power systems over conventional technologies”, *Energy*, vol. 148, pp. 283–295, 2018.
- [20] Ε. Τζανίνη, “Η επίδραση της νομοθεσίας στη διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και η αρχή της αειφορίας”, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2017.
- [21] Ν.3734/2009, “Προώθηση της συμπαραγωγής δύο ή περισσότερων χρήσιμων μορφών ενέργειας, ρύθμιση ζητημάτων σχετικών με το Υδροηλεκτρικό Έργο Μεσοχώρας και άλλες διατάξεις”, αρθ.3, §1.
- [22] H. A. Moussawi, F. Fardoun, H. Louahlia-Gualous. “Review of tri-generation technologies: Design evaluation, optimization, decision-making, and selection approach”, *Energy Conversion and Management*, vol. 120, pp. 157–196, 2016.
- [23] U. Çakir, K. Çomakli, F. Yüksel, “The role of cogeneration systems in sustainability of energy”, *Energy Conversion and Management*, vol. 63, pp. 196–202, 2012.

- [24] H. Cho, A. D. Smith, P. Mago, “Combined cooling, heating and power: A review of performance improvement and optimization”, *Applied Energy*, vol. 136, pp.168–185, 2014.
- [25] M. Hu, H. Cho, “A probability constrained multi-objective optimization model for CCHP system operation decision support”, *Applied Energy*, vol. 116, pp.230–242, 2014.
- [26] G. Pagliarini, C. Corradi, S. Rainieri, “Hospital CHCP system optimization assisted by TRNSYS building energy simulation tool”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 44, pp.150-158, 2012.
- [27] M. A. Lozano, M. Carvalho, L. M. Serra, “Allocation of economic costs in trigeneration systems at variable load conditions”, *Energy and Buildings*, 2011, vol. 43, pp. 2869–2881, 2011.
- [28] M. Carvalho, M. A. Lozano, L.M. Serra, “Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects”, *Applied Energy*, 2012, vol. 91, pp. 245–254, 2012.
- [29] M.A. Korobitsyn, “New and advanced energy conversion technologies. Analysis of cogeneration, combined and integrated cycles”. Thesis, Laboratory of Thermal Engineering of the University of Twente and the Netherlands Energy Research Foundation ECN, 1998.
- [30] Frangopoulos CA, “Cogeneration: technologies, optimisation and implementation.”, London: Institution of Engineering and Technology, 2017.
- [31] X. Φραγκόπουλος, “Μέθοδος ενεργειακής αξιολόγησης συστημάτων συμπαραγωγής σύμφωνα με το νόμο και τις υπουργικές αποφάσεις”, Γενική Συνέλευση, Ελληνικός Σύνδεσμος Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού και Θερμότητας ΕΣΣΗΘ, 2009.
- [32] M. Jarre, M. Noussan, A. Poggio, “Operational analysis of natural gas combined cycle CHP plants: Energy performance and pollutant emissions”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 100, pp. 304–314, 2016.
- [33] M. Kanoglu, I. Dincer. “Performance assessment of cogeneration plants”, *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 76–81, 2009.
- [34] G. Temir; D. Bilge, “Thermoeconomic analysis of a trigeneration system”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 24, pp. 2689–2699, 2004.
- [35] Z. Beihong, L. Weiding, “An optimal sizing method for cogeneration plants”, *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 189–195, 2006.

- [36] C.Z. Li, Y.M. Shi, X.H. Huang, “Sensitivity analysis of energy demands on performance of CCHP system”, *Energy Conversion and Management*, vol. 49, pp. 3491–3497, 2008.
- [37] E. Asadi, M. G. da Silva, C. Henggeler Antunes, L. Dias, “A multi-objective optimization model for building retrofit strategies using TRNSYS simulations, GenOpt and MATLAB”, *Building and Environment*, vol. 56, pp. 370-378, 2012.
- [38] J. Wang, Z. (J.) Zhai, Y. Jing, X. Zhang, C. Zhang, “Sensitivity analysis of optimal model on building cooling heating and power system”, *Applied Energy* vol. 88, pp. 5143–5152, 2012.
- [39] L. Li, H. Mu, W. Gao, M. Li, “Optimization and analysis of CCHP system based on energy loads coupling of residential and office buildings”, *Applied Energy*, vol. 136, pp. 206–216, 2014.
- [40] P.J. Mago, L.M. Chamra, “Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations”, *Energy and Buildings*, vol. 41, pp. 1099–1106, 2009.
- [41] V. Kuhn, J. Klemes, I. Bulatov, “MicroCHP: Overview of selected technologies, products and field test results”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 2039–2048, 2008.
- [42] L. Lin, Y. Wang, T. Al-Shemmeri, T. Ruxton, S. Turner, S. Zeng, J. Huang, Y. He, X. Huang, “An experimental investigation of a household size trigeneration”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 27, pp. 576–585, 2007.
- [43] Z. G. Sun, “Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine”, *Energy and Buildings*, vol. 40, pp. 126–130, 2008.
- [44] P. Balcombe, D. Rigby, A. Azapagic. “Environmental impacts of microgeneration: Integrating solar PV, Stirling engine CHP and battery storage”, *Applied Energy*, vol. 139, pp. 245–259, 2015.
- [45] A. Papadimitriou, A. Tossios, E. Giannini, “Techno-Economic Performance Assessment of a Trigeneration System Operating in a Hospital”, *Energies*, vol. 14, 5105, 2021.
- [46] X.Q. Kong, R.Z. Wang, Y. Li, X.H. Huang, “Optimal operation of a micro-combined cooling, heating and power system driven by a gas engine”, *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 530–538, 2009.

- [47] P. Arbabi, A. Abbassi, 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, 2017.
- [48] J. Wanga, Y. Jing, C. Zhang, Z. (J.) Zhai, “Performance comparison of combined cooling heating and power system in different operation modes”, *Applied Energy*, vol. 88, pp. 4621–4631, 2011.
- [49] W. Gu, Z. Wu, R. Bo, W. Liu, G. Zhou, W. Chen, Z. Wua, “Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review”, *Electrical Power and Energy Systems*, vol. 54, pp. 26–37, 2014.
- [50] B. A. Yazdi, B. A. Yazdi, M. A. Ehyaei, A. Ahmadi, “Optimization of micro combined heat and power gas turbine by genetic algorithm”, *Thermal Science*, vol. 19, No. 1, pp. 207-218, 2015.
- [51] Κ. Καββαδίας, “Αριστοποίηση συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρισμού θερμότητας ψύξης”, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2012.
- [52] M. Muccillo, A. Gimelli, R. Sannino, “Multi-objective optimization and sensitivity analysis of a cogeneration system for a hospital facility”, *Energy Procedia*, vol. 81, pp. 585 – 596, 2015.
- [53] A. Gimelli, M. Muccillo, “Optimization criteria for cogeneration systems: Multi-objective approach and application in an hospital facility”, *Applied Energy*, vol. 104, pp. 910–923, 2013.
- [54] G. Mavrotas, D. Diakoulaki, K. Florios, P. Georgiou, “A mathematical programming framework for energy planning in services’ sector buildings under uncertainty in load demand: The case of a hospital in Athens”, *Energy Policy* vol. 36, pp. 2415–2429, 2008.
- [55] E. Merkel, R. McKenna, W. Fichtner, “Optimisation of the capacity and the dispatch of decentralized micro-CHP systems: A case study for the UK”, *Applied Energy*, vol. 140, pp. 120–134, 2015.
- [56] A. Costa, A. Fichera, “A mixed-integer linear programming (MILP) model for the evaluation of CHP system in the context of hospital structures”, *Applied Thermal Engineering* vol. 71, pp. 921-929, 2014.

- [57] C. Milan, M. Stadler, G. Cardoso, S. Mashayekh, “Modeling of non-linear CHP efficiency curves in distributed energy systems”, *Applied Energy* vol. 148, pp. 334–347, 2015.
- [58] C.J. Renedo, A. Ortiz, M. Manana, D. Silio, S. Perez, “Study of different cogeneration alternatives for a Spanish hospital center”, *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 484–490, 2006.
- [59] Y. Ruan, Q. Liu, W. Zhou, R. Firestone, W. Gao, T. Watanabe, “Optimal option of distributed generation technologies for various commercial buildings”, *Applied Energy*, vol. 86, pp. 1641–1653, 2009.
- [60] D. Ziher, A. Poredos, “Economics of a trigeneration system in a hospital”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 680–687, 2006.
- [61] A. Gimelli, M. Muccillo, R. Sannino, “Optimal design of modular cogeneration plants for hospital facilities and robustness evaluation of the results”, *Energy Conversion and Management*, vol. 134, pp. 20–31, 2017.
- [62] S. Yoshida, K. Ito, R. Yokoyama, “Sensitivity analysis in structure optimization of energy supply systems for a hospital”, *Energy Conversion and Management*, vol. 48, pp. 2836–2843, 2007.
- [63] C.J. Renedo, A. Ortiz, M. Manana, D. Silio, S. Perez, “Study of different cogeneration alternatives for a Spanish hospital center”, *Energy and Buildings*, vol. 38, pp. 484–490, 2006.
- [64] J. L. Silveira, W. de Queiroz Lamasa, C. E. Tuna, I. Aparecida de Castro Villela, L. S. Miro, “Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, pp. 2894–2906, 2012.
- [65] G. Bizzarri, G. L. Morini, “New technologies for an effective energy retrofit of hospitals”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 26, pp. 161–169, 2006.
- [66] A. Buonomano, F. Calise, G. Ferruzzi, L. Vanoli, “A novel renewable polygeneration system for hospital buildings: Design, simulation and thermo-economic optimization”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 67, pp. 43–60, 2014.
- [67] scopus Available: www.scopus.com [Accessed: 05-Sep-2019]
- [68] J. Wang, Y. Yang, T. Mao, J. Sui, H. Ji, “Life cycle assessment (LCA) optimization of solar-assisted hybrid CCHP system”, *Applied Energy*, vol. 146, pp. 38–52, 2015.

- [69] R. Yokoyama, Y. Shinano, S. Taniguchi, M. Ohkura, T. Wakui, “Optimization of energy supply systems by MILP branch and bound method in consideration of hierarchical relationship between design and operation”, *Energy Conversion and Management*, vol. 92, pp. 92-104, 2015.
- [70] M. Montero, Carrero, W. De Paepe, J. Magnusson, A. Parente, S. Bram, F. Contino, “Experimental characterisation of a micro Humid Air Turbine: assessment of the thermodynamic performance”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 118, pp.796-806, 2017.
- [71] A. Smith, R. Luck, P. J..Mago, “Analysis of a combined cooling, heating, and power system model under different operating strategies with input and model data uncertainty”, *Energy and Buildings*, vol.42, pp. 2231-2240, 2010.
- [72] A. D..Smith, P. J..Mago, “Effects of load-following operational methods on combined heat and power system efficiency”, *Applied Energy*, vol. 115, pp. 337-351, 2014.
- [73] Π. Μουζακίτης, “Μελέτη σκοπιμότητας εγκατάστασης συστήματος συμπαραγωγής στο νοσοκομείο ΚΑΤ”, Διπλωματική εργασία, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2005.
- [74] Ι. Κατσάνης, “Μια προσέγγιση των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων σε ελληνικά νοσοκομεία για τον προσδιορισμό του συστήματος συμπαραγωγής”, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2009.
- [75] Κ. Ταταράκη, “Συστήματα Συμπαραγωγής Ηλεκτρισμού, Θερμότητας και Ψύξης σε Θερμοκήπια: Έλεγχος Βιωσιμότητας και Σχεδιασμός”, Διδακτορική διατριβή, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2019.
- [76] Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΛΑΓΗΕ). “Μηνιαία Στατιστικά Δελτία ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ,” [Online]. Available: www.lagie.gr. [Accessed: 05-Sep-2019]
- [77] Eurostat, “Combined Heat and Power Generation (CHP), Combined Heat and Power (CHP) data 2005-2017,” 2019. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [78] Υπουργείο Περιβάλλοντος Ενέργειας & Κλιματικής Αλλαγής, “Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός, οδικός χάρτης για το 2050”, Μάρτιος 2012.
- [79] Ανεξάρτητος Διαχειριστής Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΑΔΜΗΕ), “Μηνιαία Δελτία Ενέργειας.” [Online]. Available: www.admie.gr. [Accessed: 05-Sep-2019].

- [80] Eurostat, “Combined Heat and Power Generation (CHP), Capacity data according to type of generation for 2015 expressed in MW”. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [81] Eurostat, “Shares, SHARES summary results 2020”. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [82] Eurostat, “Database, Energy, Energy statistics – prices of gas and electricity”. [Online]. Available: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/database>. [Accessed: 05-Sep-2019].
- [83] K.G Tataraki, K.C Kavvadias, Z.B Maroulis, “Combined cooling heating and power systems in greenhouses. Grassroots and retrofit design”, *Energy*, vol. 119, 116283, 2019.
- [84] A.D. Smith, N. Fumo, P.J. Mago, “Spark spread—A screening parameter for combined heating and power systems”, *Applied Energy*, vol. 88, pp. 1494-1499, 2011.
- [85] S.R. Asaee, V.I. Ugursal, I. Beausoleil-Morrison, “Techno-economic evaluation of internal combustion engine based cogeneration system retrofits in Canadian houses—A preliminary study”, *Applied Energy*, vol. 140, pp. 171-183, 2015.
- [86] A. Rosato, S. Sibilio, G. Ciampi, “Energy, environmental and economic dynamic performance assessment of different micro-cogeneration systems in a residential application”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 59, pp. 599-617, 2013.
- [87] A. Rosato, S. Sibilio, “Performance assessment of a micro-cogeneration system under realistic operating conditions”, *Energy Conversion Management*, vol. 70, pp. 149-162, 2013.
- [88] P.J. Mago, A.K. Hueffed, “Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies”, *Energy Building*, vol. 42, pp. 1628-1636, 2010.
- [89] S.P. Borg, N.J. Kelly, “High resolution performance analysis of micro-trigeneration in an energy-efficient residential building”, *Energy Building*, vol. 67, pp. 153-165, 2013.

- [90] M. Badami, F. Camillieri, A. Portoraro, E. Vigliani, “Energetic and economic assessment of cogeneration plants: A comparative design and experimental condition study”, *Energy*, vol. 71, pp 255-262, 2014.
- [91] J. Li, A. Laredj, G. Tian, “A Case Study of a CHP System and its Energy use Mapping”, *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1526-1531, 2017.
- [92] S. Magnani, P. Danti, G. Barbero, “Experimental results of the influence of environmental conditions on the performance of a small-size ICE-based CHP”, *AIP Conference Proceedings*, 2191, 2019.
- [93] S. Paine, P. James, A.B. Bahaj, “Evaluating CHP management and outputs using simple operational data”, *International Journal of Low-Carbon Technologies*, vol. 13, pp. 109-115, 2018.
- [94] Ministry of Environmental and Energy, “National Energy Plan. Roadmap to 2050”, Greece, March 2012. Available online: <http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?Fileticket=Xm5Lg9NOeKg%3D&tabid=367&> (accessed on 25 February 2020).
- [95] E. Giannini, A. Moropoulou, Z. Maroulis, G. Siouti, “Penetration of Photovoltaics in Greece”, *Energies*, vol. 8, pp. 6497–6508, 2015.
- [96] S. Loumakis, E. Giannini, Z. Maroulis, “Renewable Energy Sources Penetration in Greece: Characteristics and Seasonal Variation of the Electricity Demand Share Covering”, *Energies*, vol. 12, 2441, 2019.
- [97] Hellenic Electricity Market Operator, “Renewable Energy Sources and CHP Monthly Statistics”. Available online: <http://www.lagie.gr> (accessed on 25 February 2020).
- [98] H. Cho, R. Luck, S.D. Eksioglu, L.M. Chamra, “Cost-optimized real-time operation of CHP systems”, *Energy Buildings*, vol. 41, pp. 445-451, 2009.
- [99] The Association for Decentralized Energy, “Combined Heat and Power Guidance for Contractors, Consultants and Customers”, 2015. Available online: https://www.theade.co.uk/assets/docs/resources/CHP_Advice_for_Contractors_Consultants_and_Customers_Updated.pdf (accessed on 30 April 2020).
- [100] Attiki Natural Gas Distribution Company S.A. Available online: <https://edaattikis.gr/> (accessed on 2 February 2020).
- [101] G. Beck, “Grid Parity: The Art of Financing Renewable Energy Projects in the US”, *The Fairmont Press: Lilburn, GA, USA*, 1st ed., 2014.

- [102] Ministry of Environmental and Energy, “New Support Scheme for RES and High Efficiency CHP”, Greece, February 2016. Available online: <http://www.ypeka.gr/LinkClick.aspx?fileticket=xWlvcv51hrw%3D&tabid=232&language=el-GR> (accessed on 25 February 2020).
- [103] Cogeneration Observatory and Dissemination and European (CODE2), “European Cogeneration Roadmap”, January 2015. Available online: <http://www.code2-project.eu/wp-content/uploads/CODE-2-European-Cogeneration-Roadmap.pdf>
- [104] K.C. Kavvadias, A.P. Tosios, Z.B. Maroulis, “Design of a combined heating, cooling and power system: Sizing, operation strategy selection and parametric analysis”, *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 833–845, 2010.
- [105] A. Papadimitriou, V. Vassiliou, K. Tataraki, E. Giannini, Z. Maroulis, “Economic Assessment of Cogeneration Systems in Operation”, *Energies*, vol. 13, 2206, 2020.
- [106] B. Thomas, “Benchmark testing of Micro-CHP units”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 28, pp. 2049–2054, 2008.
- [107] A. Rosato, S. Sibilio, M. Scorpio, “Dynamic performance assessment of a residential building-integrated cogeneration system under different boundary conditions. Part I: Energy analysis”, *Energy Conversion and Management*, vol. 79, pp. 731-748, 2014.
- [108] A. Ondeck, T. F. Edgar, M. Baldea, “A multi-scale framework for simultaneous optimization of the design and operating strategy of residential CHP systems”, *Applied Energy*, vol. 205, pp. 1495-1511, 2017.
- [109] S. Sibilio, A. Rosato, G. Ciampi, M. Scorpio, A. Akisawa, “Building-integrated trigeneration system: Energy, environmental and economic dynamic performance assessment for Italian residential applications”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 68, pp. 920–933, 2017.
- [110] L. Urbanucci, D. Testi, “Optimal integrated sizing and operation of a CHP system with Monte Carlo risk analysis for long-term uncertainty in energy demands”, *Energy Conversion and Management*, vol. 157, pp. 307–316, 2018.
- [111] A. Rong, R. Lahdelma, “An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration”, *Applied Energy*, vol. 82, pp. 40–63, 2005.

- [112] H. E. Dillon, W. G. Colella, “Real-time measured performance of micro combined heat and power fuel cell independently evaluated in the field”, *10th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology collocated with the ASME 2012 6th International Conference on Energy Sustainability*, Fuel Cell, pp. 553-562, 2012.
- [113] G. Bidini, U. Desideri, S. Saetta, P. P. Bocchini, “Internal combustion engine combined heat and power plants: Case study of the university of Perugia power plant”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 18, pp. 401-412, 1998.
- [114] J. Li, A. Laredj, G. Tian, “A case study of a CHP system and its energy use mapping”, *Energy Procedia*, vol. 105, 1526–1531, 2017.
- [115] D. Prando, M. Renzi, A. Gasparella, M. Baratieri, “Monitoring of the energy performance of a district heating CHP plant based on biomass boiler and ORC generator”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 79, pp. 98-107, 2015.
- [116] I. Verhaert, F. Van Riet, R. Baetens, M. De Pauw, M. Van Erdeweghe. “Performance evaluation of different micro-CHP configurations in real life conditions and the influence of part load behaviour”, *E3S Web Conf.*, vol. 111, 01084, 2019.